

EL OCÉANO

MARAVILLA TERRESTRE

EL OCÉANO

MARAVILLA TERRESTRE

Secretaría Ejecutiva Comisión Colombiana del Océano

Bogotá D.C - 2013

EL OCÉANO MARAVILLA TERRESTRE

Presidente Comisión Colombiana del Océano

Directora Agencia Presidencial de Cooperación
Internacional de Colombia, APC Colombia
Sandra Bessudo Lion

Secretario Ejecutivo de la Comisión Colombiana del Océano

Capitán de Navío Julián Augusto Reyna Moreno

Ministra de Relaciones Exteriores

María Ángela Holguín Cuéllar

Ministro de Defensa Nacional

Juan Carlos Pinzón Bueno

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Rubén Darío Lizarralde Montoya

Ministro de Minas y Energía

Amylkar Acosta Medina

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

Santiago Rojas Arroyo

Ministra de Educación Nacional

María Fernanda Campo Saavedra

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Luz Helena Sarmiento Villamizar

Ministra de Transporte

Cecilia Álvarez Correa Glen

Comandante Armada Nacional

Vicealmirante Hernando Wills Vélez

Directora Departamento Nacional de Planeación

Tatyana Orozco de la Cruz

Director General Marítimo

Contralmirante Ernesto Durán Gonzáles

Directora Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS

Paula Marcela Arias Pulgarín

Presidente de la Asociación Colombiana de Universidades ASCUN

Iván Enrique Ramos Calderón

Delegados del señor Presidente de la República de Colombia vinculados al sector productivo y las ONGs ambientales

Alfonso Salas Trujillo, Jorge Reynolds Pombo

Director General del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - José Benito Vives de Andreís (INVEMAR)

Francisco A. Arias Isaza

AUTORES

Capitán de Navío Julián Augusto Reyna Moreno Secretario Ejecutivo Comisión Colombiana del Océano

Ph.D. Andrea Devis Morales
**Postdoctorado Universidad Nacional de Colombia
(Sede Medellín)**

Ph.D. Jaime Ricardo Cantera Kintz
Profesor Titular Universidad del Valle

Capitán de Fragata (RA)

Efraín Ángel Cárdenas

Capitán de Corbeta (RA)

Eusebio Cabrales Vernaza

Ph.D. José A. Lozano Iriarte
**Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas
y Naturales**

Ph.D. José Edgar Montealegre Bocanegra
Universidad Nacional de Colombia

M.Sc. Amparo Ramírez del Castillo

Olga Rojas

Zulma Pardo Rojas

Comité Editorial

Ph.D. (C) Jean R. Linero Cueto

M.Sc. Ruby Ortiz Martínez

Esp. Yeimy Vargas Castillo

Esp. Camila Romero Chica

Laura Milena Camacho Jaramillo

Teniente de Fragata Julián Alejandro Salgado Mesa

Coordinación Editorial

Esp. Carolina Garay Linares

M. Sc. Lina María Botero Cifuentes

Laura Garzón Vengoechea

Sonia Montaña Duque

Raúl Morillo Benedetti

M.Sc. Angélica María Castrillón Gálvez

Revisores

Contralmirante Juan Manuel Soltau Ospina

Ph.D. Iván Rey

Ph.D. Nancy Liliana Villegas Bolaños

Ph.D. Javier Díaz Ochoa

M.Sc. Elizabeth Taylor Jay

Cristina Acevedo

Alfredo Acero Sánchez

Ilustraciones

Olivié Gallet

Pautas 1986

Capitán de Fragata (RA) Ricardo Alvarado Reyes,
Secretario General Comisión Colombiana de
Oceanografía

ISBN

Primera Edición. Noviembre de 2013

Editorial Comisión Colombiana del Océano

Diseño y Diagramación: Unión Gráfica Ltda.

Bogotá, Colombia



AGRADECIMIENTOS

Este libro no sería una realidad sin el apoyo de decenas de instituciones y personas que se vincularon desde sus inicios al proyecto, en especial a:

La Comisión Colombiana de Oceanografía por aportar la idea que dio origen a la presente publicación.

Por sus aportes científicos, técnicos y gráficos a la Armada Nacional de la República de Colombia, Dirección General Marítima y sus Centros de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe y Pacífico, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis”, Universidad Nacional – Grupo Oceánicos, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Investigaciones Marinas de Francia (IFREMER), así como otros institutos franceses de investigaciones, Comisión Oceanográfica Intergubernamental (UNESCO-COI), Organización Hidrográfica Internacional (OHI), Organización Marítima Internacional (OMI), Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA), Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), y Fundación Malpelo.

Por el apoyo financiero para la edición del primer prototipo de este libro a Conservación Internacional Colombia (CI).

A Ana Judith Cardona Lora por ayudar en la primera transcripción de los contenidos.

Al Capitán de Navío William Pedroza Nieto por ayudar en la búsqueda inicial del documento en 1998.



“Estoy segura, que gracias a esta publicación todos los Colombianos y no solo los defensores de los océanos, empezaremos a entender y valorar nuestros mares, costas y espacios insulares.”

Sandra Bessudo Lion

Directora General de la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional
Presidente de la Comisión Colombiana del Océano

“Este libro se convierte en un inmenso aporte para el desarrollo integral de los mares del país y para la educación de las nuevas generaciones”.

Angelino Garzón
Vicepresidente de la República

Al país del mar, mi país, mi Colombia

Capitán de Navío Julián Augusto Reyna Moreno
Secretario Ejecutivo de la Comisión Colombiana del Océano



HISTORIA DE LA PUBLICACIÓN

En una tarde calurosa y húmeda de sábado, en octubre de 1998, solo, en la decanatura de la Facultad de Oceanografía Física de la Escuela Naval, en Cartagena, revisaba libro por libro la biblioteca técnico-científica, para abrir espacio a las nuevas publicaciones que había anunciado la Dirección de la Escuela, estarían llegando el siguiente lunes.

Surgió de un cajón, un paquete de hojas sueltas, amarillas, arrugadas, desordenadas y borrosas, al parecer por haber sido de las últimas copias medianamente legibles, de una serie que logró agotar la letras. Se trataba de un guía de apoyo educativo para profesores de bachillerato que estaba preparando la Comisión Colombiana de Oceanografía, según se alcanzaba a leer, desde 1986.

Lo que se alcanzaba a descifrar parecía interesante, así que se digitó nuevamente para tratar de entender completamente el texto, Ana Judith empezó la paciente tarea de transcribir la información, dejando los vacíos de lo que no podía entender, desafortunadamente no se contaba y aún no se conoce memoria oficial sobre la preparación del documento original, su culminación y desarrollo posterior, por lo tanto se desconoce también la existencia de información que permita tener referencias bibliográficas de su primera etapa, al igual

que se desconoce qué exactamente escribió cada uno de los autores mencionados en aquellas fotocopias.

Con el fin de respetar lo escrito por los primeros colaboradores, no se dejó registro explícito capítulo por capítulo de los autores del libro, ya que al no conocer detalles, se podía incurrir en un error de información, aun tampoco se incluyeron los que hoy se conocen por su actualidad y que entraron a enriquecer, fortalecer, actualizar, incrementar y optimizar la información mediante nuevos capítulos que no se consideraron en la versión original, nuevas experiencias colombianas y nuevas tecnologías aplicadas en la actualidad.

De la misma manera y al no tener referencias bibliográficas de la base original, se buscaron las nuevas referencias y otras a la totalidad del libro, para mostrarlas en la parte final del texto, bajo el título de Bibliografía. Si el lector quisiera encontrar alguna referencia, entonces la puede ubicar allí, esto se efectuó buscando mediar entre el respeto por la base de los textos de hace 27 años aún cuando fueron editados ampliamente, y el respeto por los derechos de autor de las muchas publicaciones que fueron revisadas en la actualidad para esta producción editorial.

Por ser este un texto con fines netamente académicos y no científicos se buscaron otros libros de referencia similares como *Oceanography – A view of earth* de M. Grant Gross y *Essentials of Oceanography* de Harold V. Thurman para tomarlos como ejemplo de redacción, graficación, edición y modo de incluir las referencias bibliográficas, sin especificaciones textuales dentro del contenido del libro, con lo que se busca dar un reconocimiento de las fuentes (al final), pero aliviando el texto para hacerlo más didáctico y brindarle un sentido de continuidad a la lectura.

Es así como desde 1998, cuando se retomó el trabajo realizado en 1986, se ha estado editando, revisando, corrigiendo y actualizando



hasta en un 80%, con la inclusión de nuevos temas, textos y figuras adicionales, para elevarle el nivel académico y editorial, cambiando así el esquema original y lograr pasar de aquella guía para educación media, a este texto base de educación superior en ciencias del mar.

Capitán de Navío Julián Augusto Reyna Moreno
**Secretario Ejecutivo de la
Comisión Colombiana del Océano**



ÍNDICE DE CONTENIDO

PRÓLOGO	35
PRESENTACIÓN	39
UNIDAD 1. LA FORMACIÓN DE LOS OCÉANOS Y LAS COSTAS	43
INTRODUCCIÓN	45
1.1. ORIGEN DE LA TIERRA	46
1.2. MODELOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL: INTERACCIÓN ATMÓSFERA-LITÓSFERA-BIÓSFERA	46
1.3. ORIGEN DE LOS OCÉANOS	49
1.4. LA CORTEZA TERRESTRE, CONTINENTAL Y OCEÁNICA	50
1.5. INVERSIÓN MAGNÉTICA DE LOS POLOS	52
1.6. DISTRIBUCIÓN Y MAGNITUD DE LOS OCÉANOS Y LOS CONTINENTES	53
1.7. LÍMITE TIERRA-MAR	55
1.8. MORFOGÉNESIS DE LAS ZONAS COSTERAS	57
1.9. PLAYAS	58
1.9.1. Tipos de playa	58
1.9.2. Ciclos de playa	61
1.9.3. Mecánica de la formación de playas	62
1.9.4. Origen de los sedimentos de playa	63
1.9.5. Efectos biológicos	64
1.9.6. Corrientes en la zona de rompientes	65

1.10. TIPOS DE COSTAS	67
1.11. MORFOLOGÍA SUBMARINA	71
1.11.1. Margen continental	73
1.11.2. Cuencas oceánicas	75
1.11.3. Dorsales oceánicas	76
1.11.4. Fosas o trincheras submarinas	76
1.11.5. Arrecifes como estructura morfológica submarina	77
1.12. EROSIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITO DE SEDIMENTOS	79
1.13. EL AGUA	86
1.13.1. Propiedades del agua pura	87
1.13.2. El agua de mar como disolución	88
1.13.3. Propiedades físicas del agua de mar	93
1.14. HIDROGRAFÍA	103
1.14.1. Definición de Hidrografía	103
1.14.2. Importancia de la hidrografía	103
1.14.3. Historia	105
1.14.4. Áreas de competencia asociadas con la hidrografía	108
1.14.5. Proceso hidrográfico	112
1.14.6. Proceso cartográfico	125
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	127
 UNIDAD 2. LA ENERGÍA Y LOS MOVIMIENTOS DEL MAR	 133
 INTRODUCCIÓN	 135
2.1. PROCESOS DE INTERACCIÓN ENTRE LA LITÓSFERA, ATMÓSFERA Y EL MEDIO MARINO	136
2.1.1. La energía solar, fuente de vida del planeta	136
2.1.2. Diferencias de temperatura entre los continentes y el océano	138
2.1.3. Interacciones océano-atmósfera	139
2.1.4. El ciclo hidrológico	141
2.1.5. Circulación de la atmósfera	142
2.1.6. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)	145
2.1.7. Ciclones tropicales	147



2.2. CORRIENTES OCEÁNICAS	151
2.2.1. Circulación oceánica general	151
2.2.2. Corrientes oceánicas inducidas por el viento	152
2.2.3. Circulación termohalina	158
2.3. OLAS, MAREAS Y FENÓMENOS EXTREMOS	160
2.3.1. Las olas	160
2.3.2. Las mareas	170
2.3.3. La zona costera	175
2.3.4. Manejo integrado de la zona costera	179
2.3.5. Formación de los fondos marinos y su influencia en el movimiento oceánico	182
2.3.6. Tsunami	183
2.3.7. El Niño-La Niña oscilación sur (ENOS)	201
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	207
 UNIDAD 3. LA VIDA EN EL MAR	 211
 INTRODUCCIÓN	 213
3.1. BIODIVERSIDAD MARINA Y COSTERA	214
3.1.1. Características biológicas del medio ambiente marino	216
3.1.2. Clasificación de los organismos según el tipo de vida	221
3.1.3. Distribución de los organismos en el mar	222
3.1.4. El dominio bentónico	227
3.1.5. El dominio pelágico	231
3.2. PRINCIPALES ECOSISTEMAS COSTEROS	239
3.2.1. Las playas arenosas	240
3.2.2. Las costas rocosas	246
3.2.3. Los ecosistemas de manglar	251
3.2.4. Los arrecifes coralinos	258
3.3. LAS MIGRACIONES DE LOS ANIMALES MARINOS	262
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	266

UNIDAD 4. FACTORES FISICOQUÍMICOS QUE REGULAN LOS ECOSISTEMAS MARINOS	267
INTRODUCCIÓN	269
4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE MAR	270
4.2. EFECTOS SOBRE LOS ORGANISMOS MARINOS	272
4.3. SALINIDAD	273
4.3.1. Determinación de la salinidad	275
4.4. DENSIDAD	277
4.4.1. Densidad y estabilidad del agua	279
4.5. COMPUESTOS DISUELTOS EN EL AGUA DE MAR	279
4.5.1. Fosfatos	279
4.5.2. Nitratos	281
4.5.3. Oligoelementos	281
4.5.4. Carbonatos y bicarbonatos	282
4.6. EL pH DEL AGUA DE MAR	283
4.7. CONSTITUYENTES DE LOS FONDOS MARINOS: SEDIMENTOS	284
4.7.1. Partículas sedimentarias	285
4.8. FOTOSÍNTESIS	287
4.9. RESPIRACIÓN DE LOS ORGANISMOS MARINOS	288
4.10. PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y NIVELES TRÓFICOS	291
4.11. FACTORES FÍSICOS QUE INFLUYEN EN LA PRODUCTIVIDAD	292
4.12. TEMPERATURA DEL AGUA DE MAR	293
4.12.1. Variación de la temperatura de los océanos.	294
4.12.1.1. Variaciones de la temperatura con la profundidad	295
4.12.1.2. Termoclima	295
4.13. MODIFICACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS POR EL HOMBRE	297
4.13.1. Contaminación	297
4.13.2. Cambio climático global	297
4.13.3. Acidificación del océano	301
4.13.4. Fertilización del océano	302
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	305



UNIDAD 5. RECURSOS NO VIVOS	307
INTRODUCCIÓN	309
5.1. RECURSOS ABIÓTICOS MARINOS	310
5.2. AGUA - OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE	312
5.3. GÉNESIS	315
5.4. MINERALES DE ÓXIDO DE HIERRO	317
5.5. HIDROCARBUROS	318
5.5.1. Técnicas de explotación	319
5.6. ENERGÍA RENOVABLE EN LOS OCÉANOS	319
5.6.1. Conversión de energía del oleaje - Energía undimotriz	323
5.6.2. Conversión de energía de las mareas - Energía mareomotriz	327
5.6.3. Conversión de energía de las corrientes	331
5.6.4. Conversión de energía de los gradientes de temperatura y salinidad	333
5.6.5. Conversión de energía del viento sobre la superficie del mar	340
5.6.6. Islas de energía	342
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	343
UNIDAD 6. LA CONTAMINACIÓN DEL MAR	345
INTRODUCCIÓN	347
6.1. FUENTES DE CONTAMINACIÓN	349
6.1.1. Aguas residuales	349
6.1.2. Emisarios submarinos	352
6.1.3. Efectos de la contaminación del agua sobre la salud del hombre	353
6.2. DESECHOS INDUSTRIALES: CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL	355
6.2.1. Contaminación atmosférica	355
6.2.2. Contaminación del agua	355
6.2.3. Contaminación del suelo	355
6.3. CONTAMINACIÓN POR PLAGUICIDAS	373
6.4. METALES PESADOS: PLOMO Y MERCURIO	375
6.5. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS	378
6.5.1. Propagación de los hidrocarburos en el agua	380
6.5.2. Desastre del Deepwater Horizon en el Golfo de México	381

6.6. OTROS TIPOS DE CONTAMINACIÓN MARINA	383
6.6.1. Contaminación por energía térmica	383
6.6.2. Aguas de lastre	384
6.6.3. Islas de basura en el Pacífico	389
6.7. CAMPAÑA DIVULGATIVA LOCAL SOBRE PROBLEMAS CAUSADOS POR LA CONTAMINACIÓN	392
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	394
 UNIDAD 7. EVOLUCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN OCEANOGRÁFICA	 395
INTRODUCCIÓN	397
7.1. MEDICIÓN DE CORRIENTES MARINAS	400
7.1.1. Mediciones eulerianas	401
7.1.1.1. Correntómetros mecánicos	401
7.1.1.2. Correntómetros electromagnéticos	402
7.1.1.3. Correntómetros acústicos	402
7.1.2. Mediciones lagrangianas	405
7.2. VEHÍCULOS SUBMARINOS	406
7.2.1. Sumergibles tripulados	407
7.2.2. Sumergibles no tripulados	409
7.2.2.1. Vehículos Submarinos Operados Remotamente (ROV)	409
7.2.2.2. Vehículos Autónomos Submarinos (AUV)	410
7.3. MEDICIONES DEL FONDO MARINO	414
7.3.1. Ecosonda monohaz	415
7.3.2. Ecosondas multihaz	416
7.3.3. Sonar de barrido lateral	417
7.3.4. Perfilador del subsuelo marino	418
7.3.5. Magnetómetro	419
7.4. SISTEMAS DE MONITOREO SATELITAL O AEROTRANSPORTADOS	420
7.4.1. Sistema Lidar	420
7.4.2. Sistema Argos	421
7.4.3. Oceanografía Satelital	423
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	427



UNIDAD 8. ORGANIZACIONES A CARGO DE LOS OCÉANOS	429
INTRODUCCIÓN	431
8.1. LA ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL (OMI)	432
8.2. LA COMISIÓN OCEANOGRÁFICA INTERGUBERNAMENTAL (COI)	434
8.3. DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA (DIMAR)	444
8.4. LA COMISIÓN COLOMBIANA DEL OCÉANO (CCO)	446
8.5. DIRECCIÓN MARES, COSTAS Y RECURSOS ACUÁTICOS	453
8.6. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS “JOSÉ BENITO VIVES DE ANDRÉIS” (INVEMAR)	454
PRUEBAS DE CONOCIMIENTO	455
BIBLIOGRAFÍA	457
PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS	471
SIGLAS Y ABREVIATURAS	475
GLOSARIO	477

UNIDAD 1. LA FORMACIÓN DE LOS OCÉANOS Y LAS COSTAS

- Figura 1.1.** Comportamiento aproximado de la Velocidad de las ondas sísmicas longitudinales y transversales
- Figura 1.2.** Estructura de la Tierra dividida en sus cuatro capas y sus zonas de transición o discontinuidades
- Figura 1.3.** Tipos de corteza terrestre
- Figura 1.4.** Modelos de corteza terrestre
- Figura 1.5a.** Huella de la inversión magnética de los polos
- Figura 1.5b.** Creación de corteza oceánica y fenómeno de subducción
- Figura 1.6.** Distribución de agua (océano) y tierra (continente) entre paralelos de latitud y relación de distribución del agua en los océanos
- Figura 1.7.** Océanos y continentes del planeta Tierra
- Figura 1.8a.** Isla San Andrés
- Figura 1.8b.** Isla Malpelo
- Figura 1.9a.** Perfil de playa y sus componentes característicos
- Figura 1.9b.** Perfil de la zona costera
- Figura 1.10a.** Sistema de circulación costera
- Figura 1.10b.** Aspecto de la corriente de desgarre o resaca
- Figura 1.11a.** Costa de erosión tipo ría
- Figura 1.11b.** Costa de erosión tipo fiordo
- Figura 1.11c.** Costa cárstica formada por rocas calcáreas
- Figura 1.11d.** Diferentes formaciones de delta causados por deposición fluvial



- Figura 1.11e.** Formación de Drumlin
- Figura 1.11f.** Costa de deposición glacial
- Figura 1.11g.** Costas de deposición eólica
- Figura 1.11h.** Costa de formación tectónica causada por desplazamiento de corteza
- Figura 1.11i.** Acantilados, costas formadas por la acción erosiva de las olas
- Figura 1.11j.** Ciénaga de Chambacú, Cartagena
- Figura 1.11k.** Playa El Acuario (Rose Cay) San Andrés
- Figura 1.12.** Morfología del fondo submarino
- Figura 1.13.** Principales provincias morfológicas de los fondos oceánicos
- Figura 1.14.** Cañón submarino resultado de la acción erosiva de las corrientes de turbidez
- Figura 1.15.** Las corrientes de turbidez en el río Magdalena
- Figura 1.16.** Fosa submarina de Puerto Rico
- Figura 1.17a.** Secuencia de formación de un Atolón
- Figura 1.17b.** Atolón Albuquerque
- Figura 1.18.** Cocolitofóridos
- Figura 1.19.** Foraminíferos planctónicos modernos
- Figura 1.20.** Ejemplos de microorganismos calcáreos
- Figura 1.21.** Radiolarios modernos
- Figura 1.22.** Algunas diatomeas marinas
- Figura 1.23.** Distribución mundial de los principales tipos de sedimentos del fondo marino
- Figura 1.24.** Fotografía submarina de campo de nódulos de manganeso
- Figura 1.25.** El ciclo hidrológico
- Figura 1.26.** Curva teórica de los cambios que sufre la densidad del agua pura con respecto a las variaciones de la temperatura
- Figura 1.27.** Ruta realizada durante la primera expedición oceanográfica a bordo del buque inglés HMS Challenger
- Figura 1.28.** Perfil típico de la temperatura en la columna del agua de mar
- Figura 1.29.** Diagrama T-S
- Figura 1.30.** Sección meridional (norte-sur) de temperatura (°C)
- Figura 1.31.** Lancha hidrográfica “Isla Tesoro”
- Figura 1.32.** Mapa de Benjamin Franklin de la Corriente del Golfo
- Figura 1.33.** Carta náutica Col 101 Aproximación al puerto de Tumaco
- Figura 1.34.** Modelo geodésico general
- Figura 1.35a.** Modelo Geoidal (cuasi-geoidal) GEOCOL2004

- Figura 1.35b.** Modelo de anomalías gravimétricas terrestres, escala en miligals
- Figura 1.36.** Ajuste entre la superficie terrestre y dos diferentes elipsoides de referencia
- Figura 1.37.** Proyección Mercator
- Figura 1.38a.** Proyección Mollweide
- Figura 1.38b.** Proyección Mercator
- Figura 1.38c.** Proyección Gnomónica
- Figura 1.39a.** Carta náutica general del Caribe colombiano
- Figura 1.39b.** Carta náutica general del Pacífico colombiano
- Figura 1.40.** Elementos esenciales de la hidrografía
- Figura 1.41.** Levantamiento batimétrico, mediante ecosonda multihaz
- Figura 1.42.** Finalización del proceso hidrográfico
- Figura 1.43.** Carta Electrónica – ENC
- Figura 1.44.** Levantamiento del perfil horizontal de playa
- Figura 1.45.** Levantamiento perfil vertical de playa
- Figura 1.46.** Distribución granulométrica (histogramas) del tamizado
- Figura 1.47.** Histograma de tiempos de asentamiento de las partículas

UNIDAD 2. LA ENERGÍA Y LOS MOVIMIENTOS DEL MAR

- Figura 2.1.** Espectro de radiación solar que ingresa a la Tierra vs profundidad de penetración en el mar por longitud de onda
- Figura 2.2.** Balance de energía anual de la Tierra (en W m^{-2})
- Figura 2.3.** Ciclo hidrológico
- Figura 2.4.** Circulación atmosférica probable y vientos resultantes para la Tierra sin rotación
- Figura 2.5.** Efecto Coriolis
- Figura 2.6.** Modelo de circulación para el planeta en rotación
- Figura 2.7.** Variación de la temperatura de las distintas capas atmosféricas
- Figura 2.8.** Variación estacional de la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical
- Figura 2.9.** Ciclones tropicales y otros nombres que reciben según su origen
- Figura 2.10.** Formación de un huracán
- Figura 2.11.** Circulación superficial general oceánica y sus patrones básicos de corrientes llamado GIRO
- Figura 2.12.** Corrientes oceánicas inducidas por el viento
- Figura 2.13.** Principales corrientes superficiales del océano
- Figura 2.14.** Diferencias de presión inducidas por el viento producen corrientes geostróficas



- Figura. 2.15.** Representación esquemática de la espiral de Ekman
- Figura. 2.16.** Proceso de surgencia (*upwelling*) y hundimiento (*downwelling*)
- Figura 2.17.** Circulación Termohalina general de los océanos
- Figura 2.18.** Perfil vertical de dos ondas oceánicas sucesivas
- Figura 2.19.** Movimiento de las partículas de agua en aguas profundas
- Figura 2.20.** Celeridad de la onda en función de su longitud
- Figura 2.21.** Representación del área donde el viento genera oleaje o fetch
- Figura 2.22.** Representación de la zona de rompiente del oleaje en la costa
- Figura 2.23.** Esquema de la reflexión del oleaje
- Figura 2.24.** Refracción de un tren de olas a su llegada a la playa
- Figura 2.25.** Esquema de la refracción del oleaje al acercarse a la costa
- Figura 2.26.** Esquema de la difracción del oleaje y tren de olas difractadas al chocar con un obstáculo costero
- Figura 2.27.** Esquema de la deriva litoral
- Figura 2.28.** Ley gravitacional de las mareas
- Figura 2.29.** Tipos de mareas según las fuerzas de atracción gravitacional existentes entre la Tierra, la Luna y el Sol
- Figura 2.30.** Posición de la Luna con respecto a la Tierra durante el apogeo y el perigeo
- Figura 2.31.** Intensas corrientes de marea
- Figura 2.32.** Variación del nivel del mar observada en Tumaco, Colombia
- Figura 2.33.** Imagen de la Tierra de noche
- Figura 2.34.** Unidades Ambientales Costeras (UAC). Mapas de ecorregiones naturales marinas y costeras
- Figura 2.35.** El pueblo de Tierra Bomba en Cartagena
- Figura 2.36.** Erosión costera, playa San Luis, Isla de San Andrés
- Figura 2.37.** Playa de Sprat Bight en la Isla de San Andrés
- Figura 2.38.** Principales placas tectónicas
- Figura 2.39.** Representación de tsunami
- Figura 2.40.** Tsunami originado por el deslizamiento de terrenos cerca de la costa
- Figura 2.41.** Características de la propagación de las olas de tsunami
- Figura 2.42.** Retiro del mar en costas de Sri Lanka
- Figura 2.43.** Imágenes de tsunami
- Figura 2.44.** Modelación del tsunami ocasionado por el terremoto de 1960
- Figura 2.45.** Fenómenos asociados a los sismos y consecuentes tsunami
- Figura 2.46.** Aero fotografías de la ciudad de Banda Aceh en la Isla de Sumatra-Indonesia
- Figura 2.47.** Efectos de la licuefacción de los suelos en el terremoto

- Figura 2.48.** Cinturón de Fuego del Pacífico
- Figura 2.49.** Mapa del mundo con la ubicación de sensores de tsunami
- Figura 2.50.** Tsunami de Sumatra 2004
- Figura 2.51.** Tsunami ocurrido en el noreste de Japón
- Figura 2.52.** Registro obtenido del mareógrafo de Esmeraldas
- Figura 2.53.** Destrucción de viviendas costeras en Tumaco
- Figura 2.54.** Variación de la temperatura superficial del mar
- Figura 2.55.** Las inundaciones causadas por La Niña
- Figura 2.56.** Cambio de las olas en su paso de aguas profundas a aguas someras
- Figura 2.57.** Refracción de las olas biométricas

UNIDAD 3. LA VIDA EN EL MAR

- Figura 3.1.** Regiones biogeográficas marinas en el mundo
- Figura 3.2a.** Fauna bentónica
- Figura 3.2b.** Zonas de distribución de los organismos bentónicos y pelágicos
- Figura 3.3.** Fauna de la columna de agua. Algunas especies del dominio pelágico
- Figura 3.4.** Formas planctónicas
- Figura 3.5.** Fauna de las playas arenosas
- Figura 3.6.** Fauna de las costas rocosas
- Figura 3.7.** Fauna asociada a planos lodosos que rodean los manglares
- Figura 3.8.** Floración de los mangles
- Figura 3.9.** Manglares encontrados en Colombia
- Figura 3.10.** Fauna encontrada en los manglares
- Figura 3.11.** Arrecifes coralinos
- Figura 3.12.** Migración ballena yubarta y gris en América
- Figura 3.13.** Migración anual que realiza el charrán ártico o golondrina de mar

UNIDAD 4. FACTORES FISICOQUÍMICOS QUE REGULAN LOS ECOSISTEMAS MARINOS

- Figura 4.1.** Proporción de los principales constituyentes del agua de mar
- Figura 4.2.** Variaciones de densidad
- Figura 4.3.** Distribución vertical de los fosfatos y los nitratos



- Figura 4.4.** Perfiles de oxígeno disuelto en el océano Atlántico y Pacífico
- Figura 4.5.** Representación esquemática de la variación vertical de temperatura del agua del mar, en relación con los cambios estacionales
- Figura 4.6.** Tendencia al aumento de la concentración de CO₂
- Figura 4.7.** Inundaciones extremas en sectores turísticos de Cartagena

UNIDAD 5. RECURSOS NO VIVOS

- Figura 5.1.** Nódulo de manganeso extraído del Pacífico colombiano
- Figura 5.2.** Tipos de plataformas para la explotación del petróleo ubicado en el subsuelo marino
- Figura 5.3.** Mapa mundial del promedio de energía potencial de las olas marinas
- Figura 5.4.** Sistema Pelamis de generación de energía undimotriz
- Figura 5.5.** Gradiente de temperatura
- Figura 5.6.** Parque eólico marino en Dinamarca

UNIDAD 6. LA CONTAMINACIÓN DEL MAR

- Figura 6.1.** Diagrama de la dirección del flujo en una planta de tratamiento de residuos líquidos
- Figura 6.2.** Derrame de aceite de palma en la Bahía de Taganga - Playa Grande, Santa Marta, Colombia
- Figura 6.3.** Ejemplo de tratamiento para recuperación del aceite
- Figura 6.4.** Incendio a bordo de la plataforma Deepwater Horizon
- Figura 6.5.** Octavo continente compuesto de basuras
- Figura 6.6.** Zona de bajamar en Tumaco, Nariño

UNIDAD 7. EVOLUCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN OCEANOGRÁFICA

- Figura 7.1.** Instalación de un correntómetro mecánico
- Figura 7.2.** Correntómetro Acústico ADCP
- Figura 7.3.** Correntómetro acústico RCM-11 y sensores de presión, temperatura y oxígeno
- Figura 7.4.** Boya de deriva usada para la medición de corrientes por el método lagrangiano
- Figura 7.5.** *Bathyscaphe Trieste*
- Figura 7.6.** Batiscafo Alvin en inicio de inmersión
- Figura 7.7.** Lanzamiento del vehículo ROV Hércules

- Figura 7.8.** Vehículo submarino AUV Sentry
- Figura 7.9.** AUV tipo Slocum
- Figura 7.10.** Perfilador de conductividad, temperatura y profundidad (CTD) y CTD con botellas Niskin
- Figura 7.11.** Equipos para medir la transparencia del agua de mar: Disco Secchi
- Figura 7.12.** Graficador ecosonda monohaz de dos canales
- Figura 7.13a.** Tipo de batimetrías realizadas con ecosondas multihaz
- Figura 7.13b.** Tipo de batimetrías realizadas con ecosondas monohaz
- Figura 7.14.** Sonar de barrido lateral empleado para graficar el fondo marino
- Figura 7.15.** Perfilador del subfondo marino 2 200 M Asmin Adisentosa
- Figura 7.16.** Draga de Van Veen y aparato que opera con gravedad utilizado para obtener cilindros de sedimento del fondo oceánico
- Figura 7.17.** Visualización resultados magnetometría
- Figura 7.18.** Sistema Lidar básico
- Figura 7.19.** Boya APEX y ubicación de boyas existentes a agosto 2013
- Figura 7.20.** Satélite Topex/Poseidon traspasando el Pacífico Norte

UNIDAD 8. ORGANIZACIONES A CARGO DE LOS OCÉANOS

- Figura 8.1.** Estructura Organizacional de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI)
- Figura 8.2.** Mapa oficial del territorio colombiano y sus áreas marítimas
- Figura 8.3.** Organigrama Dirección General Marítima
- Figura 8.4.** Organización de la Comisión Colombiana del Océano (CCO)
- Figura 8.5.** Áreas Temáticas de la PNOEC
- Figura 8.6.** Procesos educativos sobre asuntos marinos



ÍNDICE DE TABLAS

UNIDAD 1. LA FORMACIÓN DE LOS OCÉANOS Y LAS COSTAS

- Tabla 1.1.** Área, volumen y profundidad promedio de los océanos
- Tabla 1.2.** Granulometría de los sedimentos según la pendiente de fachada de la playa
- Tabla 1.3.** Algunas relaciones entre sub-provincias de los fondos oceánicos

UNIDAD 2. LA ENERGÍA Y LOS MOVIMIENTOS DEL MAR

- Tabla 2.1.** Categorías de los ciclones tropicales
- Tabla 2.2.** Principales causas que generan tsunami
- Tabla 2.3.** Zonas afectadas por los tsunami
- Tabla 2.4.** Regiones de la cuenca del Pacífico afectadas por tsunami
- Tabla 2.5.** Tsunami devastadores ocurridos desde 1945

UNIDAD 3. LA VIDA EN EL MAR

- Tabla 3.1.** Producción de hojarasca en varias localidades del Pacífico colombiano comparados con otros manglares del mundo

UNIDAD 4. FACTORES FISICOQUÍMICOS QUE REGULAN LOS ECOSISTEMAS MARINOS

- Tabla 4.1.** Principales iones negativos y positivos del agua de mar
- Tabla 4.2.** Proporción existente entre la clorinidad y los principales componentes del agua de mar

Tabla 4.3. Gramos de sales encontrados en un litro de agua de mar

Tabla 4.4. Abundancia de los elementos en el océano.

UNIDAD 5. RECURSOS NO VIVOS

Tabla 5.1. Minerales de óxidos de hierro en los nódulos de manganeso del océano Pacífico

Tabla 5.2. Recursos energéticos oceánicos estimados

Tabla 5.3. Potencias de parques eólicos *offshore* instalados en el mundo

UNIDAD 6. LA CONTAMINACIÓN DEL MAR

Tabla 6.1. Cargas totales que aportan los ríos al Caribe y Pacífico colombiano

Tabla 6.2. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de residuos industriales típicos

Tabla 6.3. Cargas aportadas por los vertimientos domésticos de asentamientos humanos costeros a las cuencas marítimas colombianas durante el 2001

Tabla 6.4. Criterios corrientes sobre algunos pesticidas y herbicidas contenidos en el agua de suministro público

Tabla 6.5. Causa de los derrames de hidrocarburos en los últimos 30 años



PRÓLOGO

Los inicios de la oceanografía en Colombia están relacionados con los inicios de la historia naval. Los primeros pasos se dieron en 1811, cuando se fundó la Escuela Náutica y de Matemáticas. Hacia 1822, la Escuela se reabrió en la Universidad del Magdalena como Escuela Náutica. El General Francisco de Paula Santander, entre 1819 y 1826, llevó al Congreso el proyecto de ley para reglamentar la marina mercante, de esta manera se hizo necesario incrementar el conocimiento marítimo en nuestro país, con el fin de apoyar el comercio y la navegación.

Por la misma época, el 24 de julio de 1823, iniciando la historia del reconocimiento de Colombia por la importancia del mar, con la guerra del Golfo de Coquibacoa, se abrió la gloriosa página de las victorias navales patrióticas, que nos conducirían hacia la libertad de América al arrebatarle los mares a la corona española y permitir a la vez el nacimiento de la Armada Nacional.

En 1907, la Escuela Náutica se convirtió en la Escuela Naval Nacional hasta 1912, para una nueva apertura hacia 1935 en Cartagena como la Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla. Por esos mismos años, en 1934 se creó la Escuela de Formación de Suboficiales Navales, hoy conocida como la Escuela Naval de Suboficiales “ARC Barranquilla”.

En febrero de 1946, se celebró en Bogotá, la Primera Conferencia Naviera Grancolombiana que buscaba la creación de una empresa de marina mercante para Colombia, Venezuela y Ecuador. En abril del mismo año se llevó a cabo en Caracas, la Segunda Conferencia en donde se decidió la creación de la Flota, con una participación del

45% de capital colombiano, igual porcentaje venezolano y un 10% ecuatoriano.

En 1952, se creó la Dirección de Marina Mercante bajo el Comando de la Armada Nacional. Más tarde, a principios de los años sesenta, debido a los grandes avances tecnológicos que dejaron las guerras mundiales, las ciencias oceánicas entraron al país y con el apoyo mutuo del gobierno de los Estados Unidos y de la Armada Nacional, se realizaron las primeras expediciones oceanográficas a bordo del buque ARC San Andrés, con lo que acudiendo al uso de otras ciencias como la hidrografía, la cartografía y la geodesia se generaron las primeras cartas náuticas de Colombia.

En 1962, la Universidad Jorge Tadeo Lozano abrió la Facultad de Ciencias del Mar, iniciando junto con la Armada Nacional la formación de profesionales en oceanografía, biología marina y acuicultura.

Hacia la misma época, en 1963, tres profesores de la Universidad de Justus Liebig de Giessen, Alemania, que fueron invitados por la Universidad de los Andes, encontraron atractiva Punta Betón ubicada en la Bahía de Santa Marta, para establecer un centro de investigaciones, que en principio iba dirigido hacia la Sierra Nevada de Santa Marta, pero más tarde fue convertido en el Centro de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR).

En 1964, la Escuela Naval fundó la Facultad de Ingeniería Naval, y por 1968, la Facultad de Oceanografía Física y Matemáticas. Posteriormente, en 1969, la Armada Nacional, visionaria del futuro, creó la Comisión Colombiana de Oceanografía (CCO) para apoyar el desarrollo de la investigación marina en el país.

En la década de los setenta se desarrolló aún más la investigación científica marina; se fortaleció el conocimiento del mar en el país y se dio inicio a la explotación de recursos no renovables. La compañía Chevron, halló los primeros yacimientos de gas natural en el fondo marino colombiano y en 1979, estableció la plataforma de explotación de gas natural Chuchupa 1, en la plataforma continental de la Guajira. Años más tarde, en 1996 se inauguró la plataforma Chuchupa 2.

En 1974, el país adquirió dos buques nuevos de investigación científica marina, el ARC Providencia y el ARC Malpelo, y en 1975 la



Dirección General Marítima (DIMAR) fundó en Cartagena el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH).

A través de la CCO se lograron grandes avances en la investigación científica marina y fue así como se creó el Seminario Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar, que hoy alcanza su versión número XV. En la versión número III, realizada en Villa de Leyva en 1977, se tomaron trascendentales decisiones para el país, como la fundación de un centro de investigaciones marinas en el Pacífico como consecuencia del hundimiento del buque tanquero Saint Peter en esa zona.

Los anteriores hechos llevaron en 1984, a la fundación del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP) en San Andrés de Tumaco, costa nariñense del suroccidente colombiano, hoy conocido como el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico que opera bajo la tutela de DIMAR.

En 1984, DIMAR se reorganizó y modernizó para facilitar una mayor dinámica como autoridad marítima nacional. En 1986, se alió con la Universidad del Valle para desarrollar investigaciones relacionadas con la dinámica físico-biológica marina del país.

En la década de los noventa, se privatizaron los puertos con lo que el antiguo sistema de manejo estatal cambió a manos de privados, modernizando así el sector y abriendo nuevas opciones para el desarrollo portuario en el país.

De esta manera, Colombia ingresó al siglo XXI, momento en el que los avances nacionales en temas marinos y costeros llevaron a plantear una nueva organización capaz de propulsar la inmensa variedad de asuntos que esta temática exige. La CCO, se reestructuró y se traspasó la responsabilidad de la Armada Nacional a la Vicepresidencia de la República, constituyendo así una organización intersectorial con los diferentes ministerios para proponer al Gobierno Nacional, la Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros.

Este logro se alcanzó en 2007, y a partir de ese hito, el país se estructuró bajo un proyecto estratégico de Estado y de largo plazo, que busca el desarrollo responsable del país a través de su otro 50% de territorio nacional, que es el territorio marítimo.

Dentro de los muchos impulsos que requiere el país para alcanzar las metas trazadas en esta política, sin duda, el de base y más importante, es la educación; es así como el esfuerzo conllevó en 2007 a incluir este proceso en el Plan Nacional Decenal de Educación.

En los últimos años se creó la maestría en Oceanografía Física de la Escuela Naval Almirante Padilla y otros programas de maestría, así como distintos apoyos de importancia en estudios de pregrado que han fortalecido la educación superior en esta área del conocimiento. A fines de 2010, se dio inicio el primer doctorado en Ciencias Marinas y en 2012 la Corporación Académica Ambiental de la Universidad de Antioquia inician por primera vez en Colombia los pregrados de Oceanografía e Ingeniería Oceanográfica en su sede de Turbo, constituyéndose una nueva etapa del desarrollo científico nacional y favoreciendo el avance en el conocimiento científico de nuestros mares.

Hasta el momento, el proceso descrito requiere como complemento un texto técnico adaptado al país que se constituya en pilar general del conocimiento de los océanos y las costas para los nacionales, dicho documento lo preparó la Comisión Colombiana del Océano y a partir de este momento se pone a consideración de los lectores. En él, se abarca una amplia diversidad de temas con el propósito de crear conciencia de nuestro patrimonio marítimo y del aprovechamiento responsable de sus recursos.

Este documento se suma a los primeros intentos que se hacen en el país, por introducir a los lectores en temas científicos relacionados con el mar y su entorno; sin embargo, para profundizar en el conocimiento es necesario estudiar e investigar más a fondo, preferiblemente a través de textos especializados escritos por nuestros investigadores, por lo que se espera que el libro sirva también de motivación para ellos.

A continuación, le damos la bienvenida al conocimiento del verdadero valor del océano en Tierra y la magnitud de lo que significa para Colombia el otro 50% del territorio nacional, que es su territorio marítimo, bienvenidos a reconocer conscientemente el valor de sus recursos, a disfrutar responsablemente de ellos para no perder de vista su conservación para el futuro.

Contralmirante *Ernesto Durán González*
Director General Marítimo



PRESENTACIÓN

La Comisión Colombiana del Océano tiene el agrado de presentar este libro de oceanografía general, el cual ha exigido el paso de varias generaciones de especialistas y décadas de conocimiento para escribirlo.

Está destinado a la enseñanza de estudiantes avanzados de educación media y superior y para aquellas personas que quieran adquirir mayores conocimientos relacionados con los orígenes del océano y su dinámica ambiental.

Con este texto se pretende crear conciencia de los ciclos de vida de la Tierra, de los seres que en ella existimos y de las consecuencias de no tener esto en cuenta, como es el caso de la contaminación de las aguas, la variación de la temperatura global, el incremento del nivel del mar, la acidificación del océano y la modificación del clima, lo que conlleva inexorablemente en la destrucción del planeta y por lo tanto de nosotros mismos.

En la primera unidad, el lector encontrará información acerca de la creación de la Tierra y de los océanos para adentrarse en las zonas costeras, en la formación de las playas y de los sedimentos que las componen.

Con el estudio de la segunda unidad, se comprende mejor la dinámica del océano y cómo interactúa con otros elementos del sistema climático, dando origen a las olas, mareas, modificaciones del clima y a fenómenos como El Niño y los eventos de tsunamis.

Posteriormente, se amplía el conocimiento sobre la química de los océanos y cómo los factores físico-químicos son responsables del funcionamiento de los ecosistemas y los organismos vivos que encontramos en el mar. Esta unidad se cierra con algunos apartes del efecto antropogénico en los ecosistemas marinos como son la contaminación marina, el cambio climático, la variación del pH, sus consecuencias y los esfuerzos más recientes del hombre por frenar estos fenómenos.

La biología marina, que resulta fascinante por lo diversa, cuantiosa y desconocida, es el componente final de esta unidad. Allí el lector podrá deleitarse con la lectura de cómo la cadena trófica marina es tan completa, sobre lo fuerte y delicada que es a la vez; esta información nos permitirá entender que los recursos vivos del océano están lejos de ser inagotables como se pensó equivocadamente y que la sobreexplotación o destrucción por cualquier medio de alguno de sus eslabones, pone en alto riesgo la supervivencia de los humanos.

Adicionalmente, el libro ofrece el reconocimiento del valor estratégico del mar en términos de recursos no renovables y la responsabilidad que conlleva su exploración y explotación, pero también en el aprovechamiento de la energía renovable, que es una de las mayores posibilidades que actualmente se visualizan en el océano para que los hombres puedan mejorar la salud del planeta.

Casos como el derrame de petróleo del Deepwater Horizon, sucedido en el Golfo de México en 2010, recuerdan que el hombre olvida su humilde posición ante la naturaleza. Por ello resulta de suma importancia revisar minuciosamente este capítulo, en el que se recuerda que cada acción en contra de los mares, es un factor contaminante más en contra del mismo hombre.

Para finalizar, se presenta la evolución de las tecnologías empleadas para la investigación científica del océano que van desde el empleo de satélites, hasta la exploración de sus profundidades con equipos tripulados y no tripulados por el hombre, gracias a lo cual hemos podido conocer las maravillas que encierran nuestros mares y de lo mucho que nos hace falta para llegar a comprenderlo y conocerlo completamente. Culminar con una descripción de las principales organizaciones que son las responsables por salvaguardar los océanos a nivel nacional e internacional.



Presentación

Las buenas decisiones políticas y buenas prácticas mundiales y nacionales, seguidas por su cumplimiento, junto con la responsabilidad de las instituciones y de los pobladores de este planeta, son las acciones que permitirán que nuestros mares se preserven, que tengamos alimento, agua y oxígeno en el futuro, y que las futuras generaciones puedan conocer y disfrutar los paisajes costeros del mundo y que en nuestro país, como en muy pocos, podamos disfrutar de cara a los dos océanos más grandes del planeta.

Vicealmirante *Hernando Wills Vélez*
Comandante Armada Nacional

UNIDAD 1

LA FORMACIÓN DE LOS OCÉANOS Y LAS COSTAS



INTRODUCCIÓN

Una característica que diferencia al planeta Tierra de los demás del Sistema Solar es su riqueza hídrica. Bien podría llamarse el planeta de agua. Visto desde la Luna, su satélite natural, la Tierra tiene más de 2/3 partes de su superficie cubiertas por agua. Esta agua corresponde al dominio de los océanos, que es el tema de estudio.

Metodología y evaluación

Esta unidad se desarrolla de manera teórico-práctica. Es necesario hacer una excursión a la zona costera y realizar laboratorios. La evaluación se debe hacer sobre las lecturas y los trabajos realizados en el campo y en el laboratorio. Como una parte del curso se transmitirá necesariamente en forma teórica, esta parte deberá ser evaluada por medio de exámenes escritos y orales.

Objetivos

- Familiarizarse con los conocimientos más recientes sobre el origen, evolución, naturaleza y extensión del medio marino.
- Familiarizarse con los principales procesos físicos, químicos, geológicos y biológicos que tienen lugar en el medio marino, así como su distribución y sus variaciones en el tiempo y en el espacio.
- Identificar las interacciones existentes entre los elementos del sistema climático (litósfera, atmósfera, criósfera e hidrósfera).

1.1. ORIGEN DE LA TIERRA

La edad de la Tierra es incierta, y su determinación está basada principalmente en el análisis de los elementos radiactivos (isótopos de torio y uranio). Estas medidas y otras evidencias geológicas, sugieren que la Tierra tiene una edad de 4 500 millones de años (eones).

Las rocas más antiguas que se encuentran en cualquier lugar de la Tierra, parecen haberse formado hace 2 o 3 mil millones de años. Los meteoritos, según el estudio de su radiactividad, tienen edades de 4 mil millones de años.

Basándose en estudios hechos sobre la separación de las galaxias, que indican que estas estaban agrupadas en un pequeño espacio del universo hace 5 mil millones de años, se supone que la Tierra pudo haberse iniciado en el origen de una o de todas las galaxias conocidas.

Una de las primeras teorías de la formación de la Tierra sugiere que este era un fragmento de una estrella mayor, de la cual se había disgregado. Teorías más recientes se basan en la hipótesis de que el Sol y todos los cuerpos del Sistema Solar, se condensaron a partir de una masa gaseosa.

Según esta teoría, la Tierra se formó por la coagulación de partículas frías en un gas turbulento. Al principio, la Tierra tenía una composición uniforme, pero la temperatura interior se elevó por la compresión y el calentamiento radiactivo, por lo cual los elementos ligeros se separaron de los pesados y se formaron las capas exteriores. Se cree que esto sigue en progreso y en cualquier lugar la Tierra estará experimentando cambios durante algún tiempo en el futuro.

1.2. MODELOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL: INTERACCIÓN ATMÓSFERA-LITÓSFERA-BIÓSFERA

El conocimiento del interior de la Tierra no se ha podido obtener directamente debido a que los pozos que se han perforado alcanzan profundidades de hasta 10 km aproximadamente. Los métodos que se han usado se basan principalmente en el estudio del comportamiento de las ondas sísmicas, que pueden ser registradas por el sismógrafo, después de pasar por el interior de la Tierra. De acuerdo con el



comportamiento de las ondas (cambios de velocidad que sufren las ondas sísmicas transversales y longitudinales) se ha podido dividir el interior de la Tierra en capas concéntricas (Figura 1.1).

Cálculos matemáticos que se han hecho sobre la atracción de los cuerpos celestes, usando la segunda Ley de Newton:

$$\left(\frac{\bar{F} \times M_1 M_2}{d^2} \right)$$

demuestran que la atracción de la Tierra tiene una densidad promedio de $5,5 \text{ g/cm}^3$, por lo tanto debe haber un incremento de densidad hacia las capas interiores del planeta.

Con los datos conocidos sobre las ondas sísmicas y las densidades, se ha establecido un modelo que se ajusta a las propiedades físicas conocidas de la Tierra (momento inercial). Igualmente, la composición de cada capa se deduce de su densidad y del comportamiento de las ondas sísmicas al momento de pasar por cada una de ellas. Esquemáticamente, la estructura de la Tierra es la indicada en la figura 1.2 en la que se aprecia una serie de capas.

La primera capa corresponde al núcleo, compuesta según su densidad, de hierro y níquel en estado sólido. La siguiente o núcleo exterior tiene la misma composición del núcleo interior, pero en estado líquido. La suposición de su estado proviene del hecho de que las ondas sísmicas se comportan como en un líquido, donde no se transmiten las ondas transversales pero si las longitudinales.

A continuación, se encuentra una capa conocida como manto, constituida principalmente de silicatos en su parte externa más sólida, mientras que la interna se encuentra en un estado plástico y compuesto de una mezcla de silicatos pesados y cierta cantidad de hierro y níquel.

La corteza, parte exterior de la Tierra, tiene un espesor que varía de 5 a 10 km bajo los océanos y hasta más de 40 km bajo los continentes. Se encuentra formado por rocas de silicatos de baja densidad y separada del manto exterior por una discontinuidad, donde la velocidad de propagación de las ondas sísmicas sufre un cambio abrupto conocido como discontinuidad de Mohorovicic (o Moho).

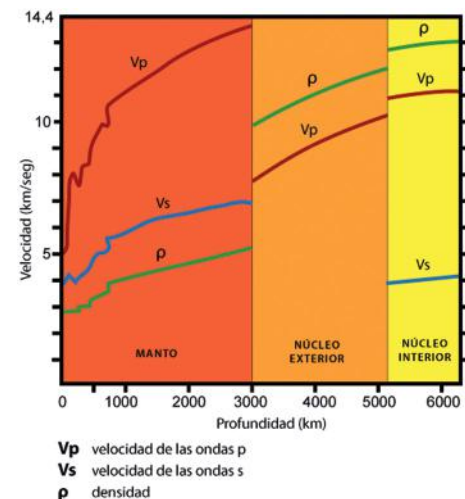
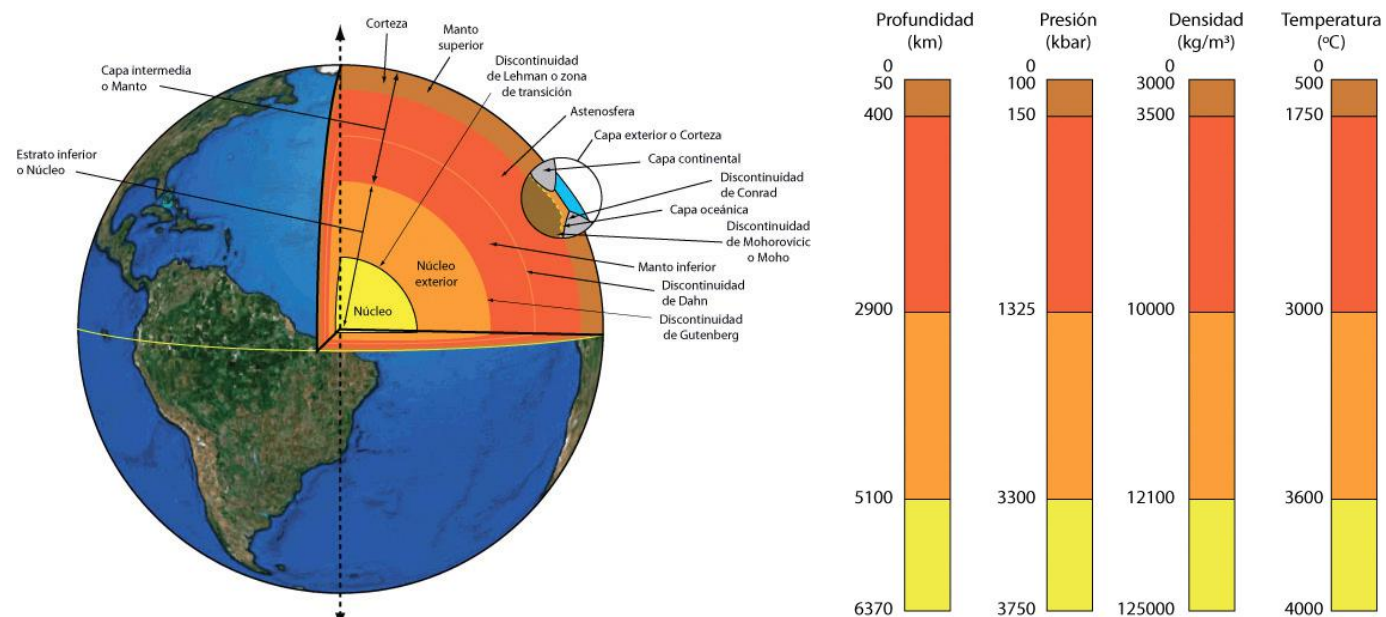


Figura 1.1. Comportamiento aproximado de la Velocidad de las ondas sísmicas longitudinales (P) y las ondas sísmicas transversales (S) en las diferentes capas de la Tierra.

Fuente: Modificado de Cailleyx (1968).

En resumen, la Tierra tiene cuatro componentes estructurales principales: la corteza terrestre, el manto y los núcleos exterior e interior. La corteza llega hasta unos 40 km y se compone de roca de una densidad de menos de 3 000 kg/m³. El manto, dividido por una zona de transición se compone de rocas que son más densas que la corteza. La temperatura asciende en él rápidamente sobre todo entre los 100 y 200 km bajo tierra, donde alcanza unos 1 000°C. En el límite del manto y el núcleo, se encuentra la discontinuidad de Gutenberg, (a 2 900 km bajo tierra), donde la presión sube de golpe junto con la densidad (de 5 500 kg/m³ a 9 900 kg/m³). El núcleo exterior es completamente líquido, y el interior es sólido con una densidad media de 11 000 kg/m³.



La corteza terrestre se encuentra envuelta por una capa gaseosa conocida comúnmente como atmósfera. Existen evidencias de que la atmósfera, como actualmente se conoce, se formó debido a las alteraciones sufridas por la Tierra en sus inicios y no por fuentes cósmicas.

Tanto el agua como los gases que componen la atmósfera fueron formados por la separación de elementos existentes en las rocas silíceas que hacen parte del manto superior y la corteza terrestre, así como de las rocas fundidas que arrojaban los volcanes al sufrir un proceso que hacía que el agua y los gases que poseían escapasen a la atmósfera. A través del tiempo, esta agua se condensó llenando las depresiones de

Figura 1.2. Estructura de la Tierra dividida en sus cuatro capas (núcleo interior, núcleo exterior, manto, corteza) y sus zonas de transición o discontinuidades.

Fuente: Modificado de Cailleyx (1968).



la corteza terrestre que constituyen las actuales cuencas oceánicas, quedando los gases en la nueva atmósfera formada.

Se cree que inicialmente no existieron moléculas libres de oxígeno, ya que al analizar sedimentos antiguos, aparecen minerales no estables en presencia de éste. Otras evidencias también sugieren que la abundancia de oxígeno libre en la atmósfera y en el agua, no apareció sino hasta la evolución de las plantas y el inicio del proceso de fotosíntesis.

1.3. ORIGEN DE LOS OCÉANOS

En base a las diferentes teorías desarrolladas en torno al origen de la tierra, están enlazadas diversas teorías planteadas en cuanto al origen del océano. Como primera instancia, el enfriamiento de la superficie de la tierra provocó la condensación de vapor de agua y su acumulación en las depresiones de la superficie, dando origen al primer océano.

A partir de estudios realizados, los geólogos han demostrado que en las grandes erupciones se envía a la atmósfera grandes cantidades de agua en forma de vapor que al enfriarse y condensarse en forma de lluvia va creando ríos, lagos y finalmente los océanos. Lo que permite suponer que la teoría planteada con respecto al origen de los océanos, es en definitiva, un proceso resultante de la actividad volcánica que produjo una atmósfera con altos contenidos de vapor de agua y dióxido de carbono.

El agua de los grandes depósitos se evapora y se integra a la atmósfera en donde puede ser transportada a otros sitios por los vientos imperantes; se condensa y es precipitada nuevamente en forma de lluvia o nieve. El agua que ha caído se infiltra, evapora o corre por la superficie terrestre. Tanto el agua que se infiltra como la escorrentía superficial regresan nuevamente a los grandes depósitos. Las fuentes de energía que activan estos procesos son la energía solar y la gravedad.

Las fuentes termales y los volcanes producen continuamente agua nueva (agua juvenil) en una proporción del 1 al 2% del total de agua expelida; el resto es agua infiltrada.

Se destaca la importancia del agua para la existencia de todo organismo y la interrelación que existe entre la criósfera, atmósfera, hidrósfera y litósfera. Aprovechando los elementos básicos de estas esferas de la Tierra (CO_2 , H_2O , nutrientes, energía solar), las plantas producen oxígeno y su propio alimento contribuyendo así al primer eslabón de la cadena trófica.

1.4. LA CORTEZA TERRESTRE, CONTINENTAL Y OCEÁNICA

La corteza terrestre se puede dividir en dos grandes tipos: la corteza continental y la corteza oceánica (Figura 1.3).

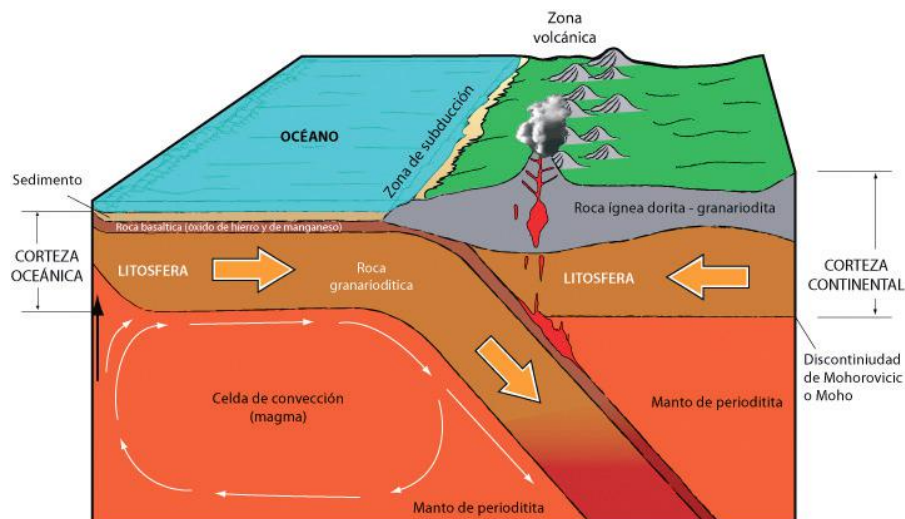


Figura 1.3. Tipos de corteza terrestre (corteza continental y corteza oceánica).
Fuente: Modificado de Cailleyx (1968).

Las rocas de tipo granítico (diorita y granodiorita) son características de la corteza continental, y las de tipo basáltico son características de la corteza oceánica de mayor densidad. Al colisionar las placas tectónicas la corteza oceánica subduce bajo la corteza continental debido a su mayor densidad.

Debajo de estas dos cortezas y separadas por la discontinuidad de "moho" empieza el manto con una densidad de $3,4 \text{ g/cm}^3$ sobre el cual flota la corteza terrestre formada por bloques de volúmenes diferentes. Esta flotación o "isostasia", requiere que las columnas de roca pesen igual para que se pueda mantener el equilibrio. Por esto el espesor de la corteza bajo las montañas debe ser mayor que bajo los océanos. Existen dos modelos que explican de manera diferente cómo se logra el equilibrio de los bloques de la corteza terrestre.

El modelo propuesto por Pratt (1855) supone una “superficie de compensación, aproximadamente horizontal” a una profundidad de unos 1 000 km en donde las presiones son iguales debido a que los bloques tienen densidades diferentes (Figura 1.4).

El modelo propuesto por Airy (1855) sugiere que los bloques de corteza de igual densidad ($2,67 \text{ g/cm}^3$) flotan sobre un material homogéneo de mayor densidad ($3,27 \text{ g/cm}^3$). Esto produce una “superficie de compensación” irregular cuya profundidad es mayor bajo las montañas más altas (Figura 1.4).

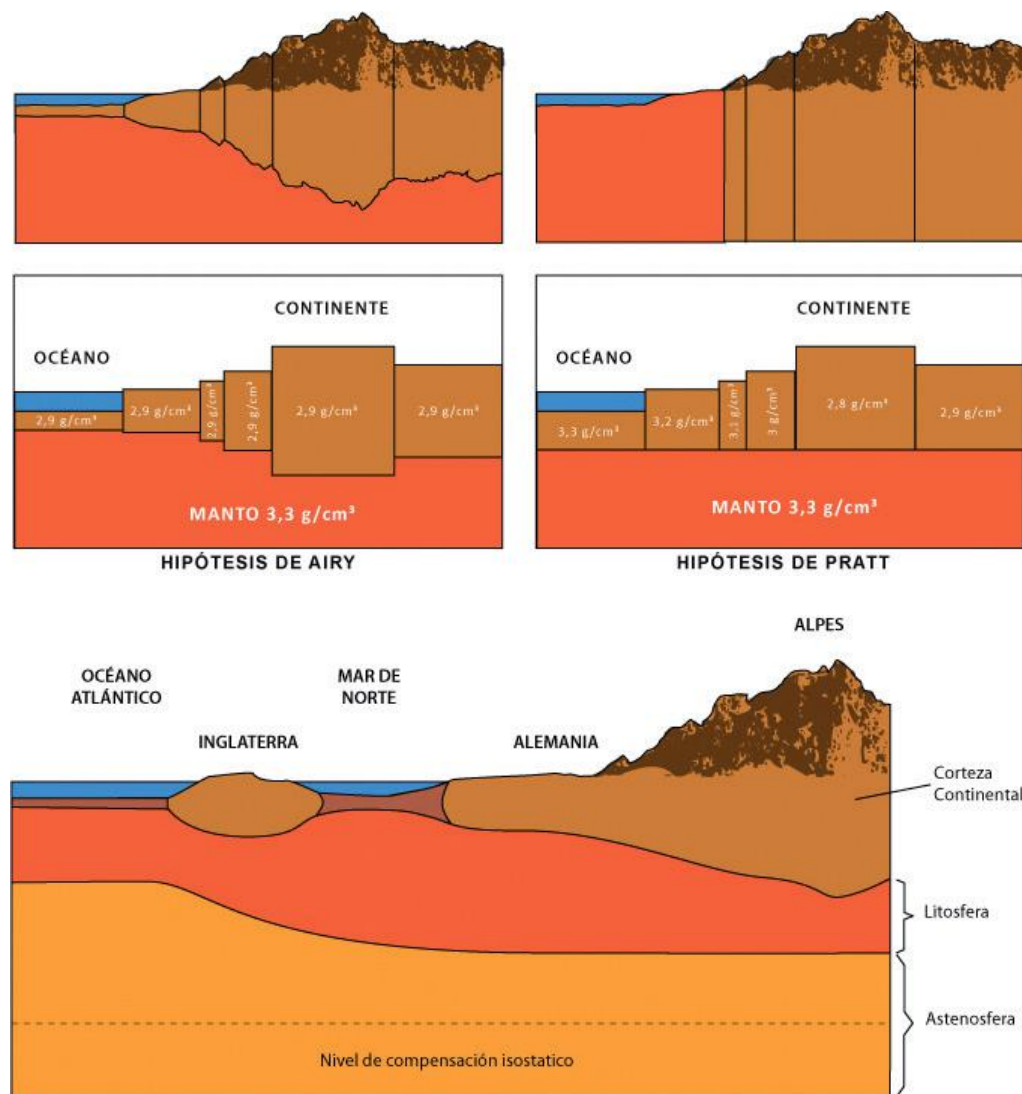


Figura 1.4. Modelos de corteza terrestre: Pratt (derecha) y Airy (izquierda).
Fuente: Modificado de Musset & Khan (2000).

El tipo de equilibrio que aparece, es denominado isostasia o equilibrio isostático. En general la Tierra está en equilibrio isostático. Cualquier movimiento de la corteza rompe este equilibrio y genera otros movimientos tendientes a recuperarlo. Por ejemplo, se produce una montaña de origen volcánico; se pone un exceso de masa sobre la superficie de la Tierra y este exceso tiene que ser compensado por otros movimientos. Estos movimientos isostáticos son muy lentos.

1.5. INVERSIÓN MAGNÉTICA DE LOS POLOS

Este fenómeno sucede cada 200 000 años aproximadamente y explica las huellas magnéticas generadas en el fondo del mar. Durante el año Geofísico Internacional 1957, los científicos notaron que paralelo a las dorsales oceánicas se formaron huellas magnéticas (Figura 1.5.a) en las rocas de la corteza oceánica que indicaban en unos casos orientación norte y en otras orientaciones sur, lo que los hizo suponer que en las dorsales oceánicas sale el magma y se orienta de acuerdo con la ubicación de los polos de ese momento, para en otro momento geológico invertir su polaridad con respecto a los polos magnéticos terrestres, a continuación se genera nueva corteza y sucede el mismo fenómeno, pero debido a que la profundidad del fondo oceánico no varía, se determina la teoría, hoy aceptada, de que la corteza oceánica se evoluciona en las dorsales y se desplaza hacia la corteza continental, en donde subduce por su mayor densidad bajo los continentes para tender a convertirse en magma y luego volver a salir por la dorsal. (Figura 1.5.b).

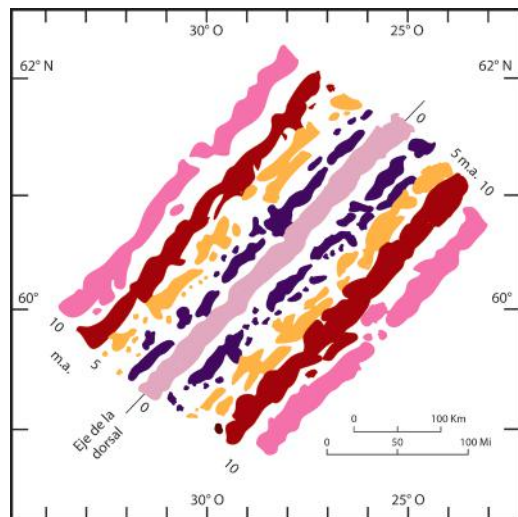
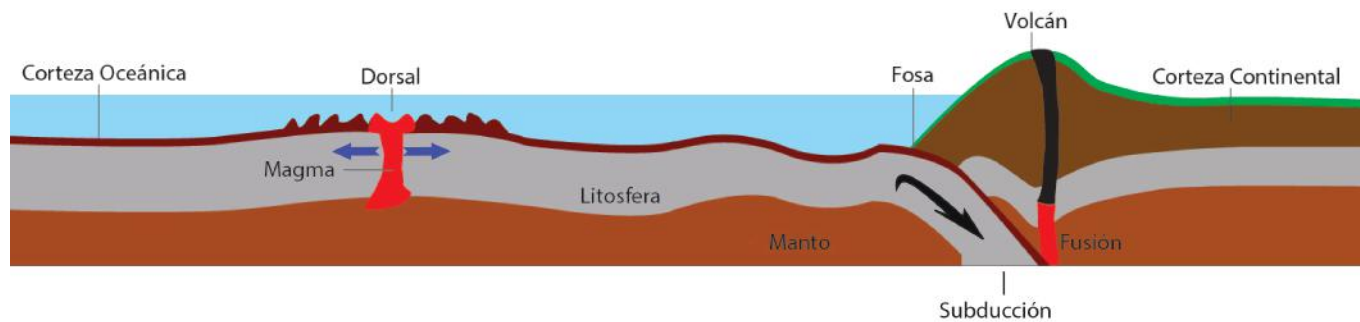


Figura 1.5.a Huella de la inversión magnética de los polos.

Fuente: Adaptada por el autor.



1.6. DISTRIBUCIÓN Y MAGNITUD DE LOS OCÉANOS Y LOS CONTINENTES

Figura 1.5b. Creación de corteza oceánica y fenómeno de subducción.
Fuente: El autor.

La superficie de la Tierra está cubierta principalmente por agua: 365,25 millones de km² se encuentran cubiertos por este líquido. Solamente 148,85 millones de km² se encuentran por encima del nivel del mar. El total de superficie terrestre es de 510,10 millones de km². En las regiones polares en donde parte de la superficie está cubierta por hielo es difícil hacer una determinación precisa de los límites entre continentes y océanos.

Sin embargo, estas imprecisiones no alteran sustancialmente la relación entre el área cubierta por agua (71%) y el área de los continentes (29%). La distribución de tierra y agua es asimétrica ya que las áreas continentales están localizadas preferentemente en el hemisferio Norte, aunque en ambos hemisferios predomina el agua sobre el continente. Solamente, en el hemisferio Norte entre las latitudes 45° y 70°, la superficie continental es mayor que la superficie del océano (Figura 1.6).

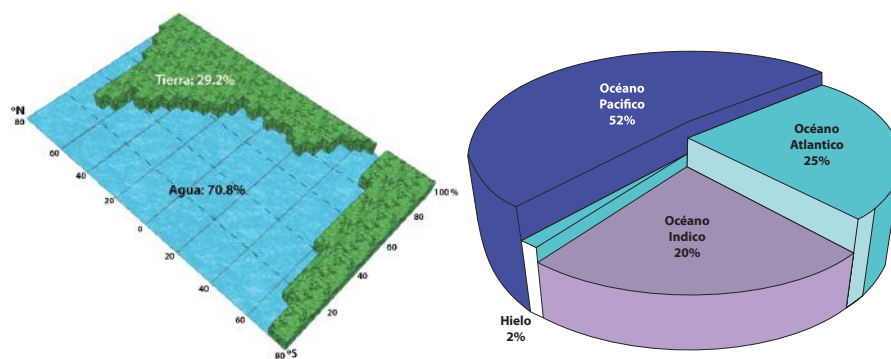
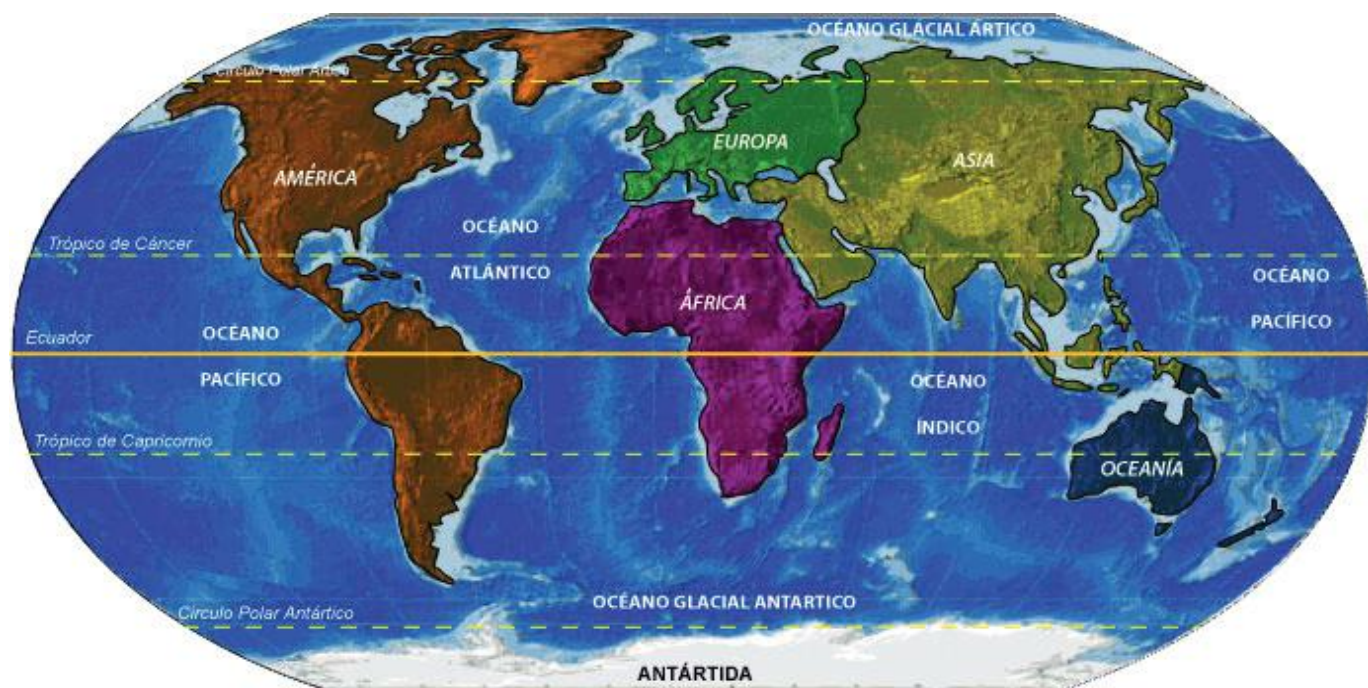


Figura 1.6. Derecha: Distribución de agua (océano) y tierra (continente) entre paralelos de latitud. Izquierda: relación de distribución del agua en los océanos
Fuente: Modificado de Newman & Pierson (1966).



Las masas continentales dividen la superficie de la Tierra en tres cuerpos de agua principales: los océanos Atlántico, Índico y Pacífico (Tabla 1.1).

Figura 1.7. Océanos y continentes del planeta Tierra.
Fuente: Modificado de Gallach (1982).

El mar Ártico se considera una parte del océano Atlántico y la franja continua alrededor de la Antártica se considera como la continuación sur de los tres océanos. Sin embargo, muchos geógrafos lo denominan océano Glacial Antártico. Si se observa el planeta desde el Polo Sur, sería más acertado decir que existe un sólo océano que se subdivide en tres hacia el Norte (Figura 1.7).

Tabla 1.1. Área, volumen y profundidad promedio de los océanos. Área de la superficie terrestre $510 \times 10^6 \text{ km}^2$. Fuente: Menard & Smith (1966).

Océanos y mares adyacentes	Área 10^6 km^2	Volumen 10^6 km^3	Profundidad Promedio m
Pacífico	181	714	3 940
Atlántico	94	337	3 575
Índico	74	284	3 840
Ártico	12	14	1 117
Total de todos los océanos	361	1 349	3 729



1.7. LÍMITE TIERRA-MAR

Existen factores que hacen que el límite tierra-mar cambie constantemente, por ejemplo la variación del nivel del mar producido por el efecto de las mareas. En el mar Caribe colombiano el cambio de nivel producido por las mareas es menor de 1 metro; en el Pacífico colombiano este valor puede llegar hasta los 5 metros. La máxima diferencia de nivel entre marea alta y baja se produce en la bahía de Fundy en Nueva Escocia, Canadá y es de 15,4 metros.

Otros factores que inciden en la variación del límite tierra-mar son las olas, tormentas y tsunamis. Un factor mucho más importante que ocurre con periodos de tiempo del orden de miles de años lo constituyen las glaciaciones y desglaciaciones. Estas han ocurrido principalmente durante los últimos 2 millones de años. La última glaciación tuvo su máximo hace aproximadamente 18 000 años. Durante la glaciación una parte considerable del agua de los océanos se transforma en hielo que se deposita sobre los continentes en forma de casquetes de varios kilómetros de espesor, de manera que se produce una reducción sustancial del nivel del mar.

Se ha calculado que la diferencia del nivel del mar entre un periodo de máxima glaciación y otro de interglaciación (eliminación completa de los casquetes de hielo) sería del orden de los 250 metros. El cambio de nivel entre la última glaciación y el presente, es del orden de 100 metros (los cálculos varían entre 80 y 130 metros) de manera que en los últimos 18 000 años el mar ha avanzado sobre los continentes. Considérese por un instante la catástrofe que ocurriría si se derritieran los casquetes de hielo de Antártica y Groenlandia; habría un cambio del nivel del mar de varias decenas de metros.

También se producen cambios por retroceso y avance en la línea de costa como resultado de procesos erosivos del mar y por procesos de sedimentación, como es el caso de Galerazamba (Bolívar), donde se producen avances del continente hacia el mar por aumento de la sedimentación. En el Delta del Sinú se evidencia claramente el avance de los sedimentos depositados cada año por el río sobre el mar; también se produce avance del continente por depósitos de barras de arena y playas, tal como sucede en el área al norte de Cartagena. De manera artificial se ha logrado el ensanchamiento de las playas

en Bocagrande y Marbella en Cartagena, mientras simultáneamente se afectaron negativamente las playas de Castillogrande.

Existe entonces una clara diferencia entre la corteza continental y la corteza oceánica, pero no hay un límite claro entre las dos, sino una zona de transición no muy bien definida que ha sido estudiada por métodos geofísicos como la velocidad de las ondas sísmicas y gravimetría.

El límite entre continentes y océanos no coincide con la línea de costa sino que se encuentra por debajo del mar y corresponde con esa zona de transición. Por ejemplo en el caso de islas volcánicas como la Isla de San Andrés, en el Caribe Colombiano (Figura 1.8a), o la Isla de Malpelo en el Pacífico Colombiano (Figura 1.8b). A pesar de tener origen, conformación geológica y estructura diferente, cuentan con las características de unión tierra-mar en una zona submarina de transición.



Figura 1.8a. Isla San Andrés.
Fuente: Cortesía Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

Como se expuso, el límite Tierra-Mar sufre continuos cambios y corresponde a la línea de costa. Por ser esta línea de costa una zona de interacción entre la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera, está sujeta a procesos muy activos que la modifican continuamente. También tienen gran influencia los procesos biológicos como lo atestiguan la formación de manglares, arrecifes marinos, la abundancia de conchas, algas y tipo de organismos.



Las tierras costeras son las comprendidas entre la línea de la costa o nivel de la bajamar, y la tierra firme, incluyendo muchos detalles menores del relieve, así como los principales de la topografía costera. Se hace hincapié en los aspectos regionales de la morfología costera.

La vigorosa acción de las olas, las diversas corrientes, la elevada salinidad del agua y los vientos continuos originan formas terrestres, tanto constructivas como destructivas, ya que actúan sea cual fuere la composición de las rocas y su estructura, sus características topográficas y la cubierta vegetal que puedan poseer. Además de los agentes que actúan sobre las formas terrestres, la posición variable de la línea de la costa respecto al nivel del mar es un factor importante en la evolución costera.

Se observan costas de tipo “constructivo” como playas, bancos, arrecifes, dunas, marismas y de tipo “destructivo” como los acantilados, las rías (desembocadura de un río) o ríos y fiordos.

La línea de costa es la franja donde el aire, agua y tierra interactúan, siendo la parte más dinámica de toda la zona costera donde el efecto de las olas, corrientes, vientos, mareas, lluvias, movimientos del mar y la acción del hombre son dominantes.

1.8. MORFOGÉNESIS DE LAS ZONAS COSTERAS

Entre las causas del moldeamiento o alteración de la zona costera se pueden mencionar la acción mecánica del oleaje, las corrientes y las mareas, así como sus relaciones con los sedimentos y los organismos de la plataforma continental y de las aguas litorales. Las olas, vientos y corrientes tienen por efecto el mantener los sedimentos en movimiento en aguas poco profundas. Esta acción puede erosionar la costa y transportar material suelto, generalmente arena, a lo largo de las mismas.

Los procesos de erosión y sedimentación cercanos a las costas, desempeñan un importante papel en la determinación de la forma de la línea costera. Los tramos expuestos al oleaje están constituidos por aluviones y otros materiales no consolidados, mientras que la sedimentación es más frecuente a lo largo de entrantes situadas entre promontorios. Estos procesos tienden a producir líneas de costas



Figura 1.8b Isla Malpelo.

Cortesía: Sandra Bessudo Lion, Fundación Malpelo y Otros ecosistemas marinos

rectas. Sin embargo, no siempre sucede así; la erosión diferencial del oleaje puede causar una rápida erosión de los aluviones entre los cabos, produciéndose irregularidades en el borde costero.

El que la sedimentación o erosión sea predominante en un lugar determinado, depende de un número de factores relacionados entre sí: la cantidad de arena de playa existente y la situación de su área distributiva, la configuración de la línea de la costa y la del fondo del mar contiguo y los efectos de la acción de las olas, corrientes, vientos y mareas. El establecimiento y la persistencia de las playas naturales de arena son a menudo el resultado de un equilibrio delicado entre un buen número de éstos factores, si bien los cambios de los mismos, naturales o producidos por la mano del hombre, tienden a alterar este equilibrio.

1.9. PLAYAS

La playa es considerada como la zona de material no consolidado que abarca la línea de bajamar desde el límite donde llegan las olas de tormenta. La zona que desde ese límite avanza tierra adentro se denomina zona costera y está afectada notablemente por los procesos de formación de las playas.

1.9.1. Tipos de playa

Para comprender los procesos costeros, sería conveniente, hacer un reconocimiento de los tipos de playa y la configuración de la misma. Las playas están compuestas de material detrítico móvil (fragmento no consolidado) situado cerca de los límites entre la tierra y el mar que está sujeto a la acción de las olas.

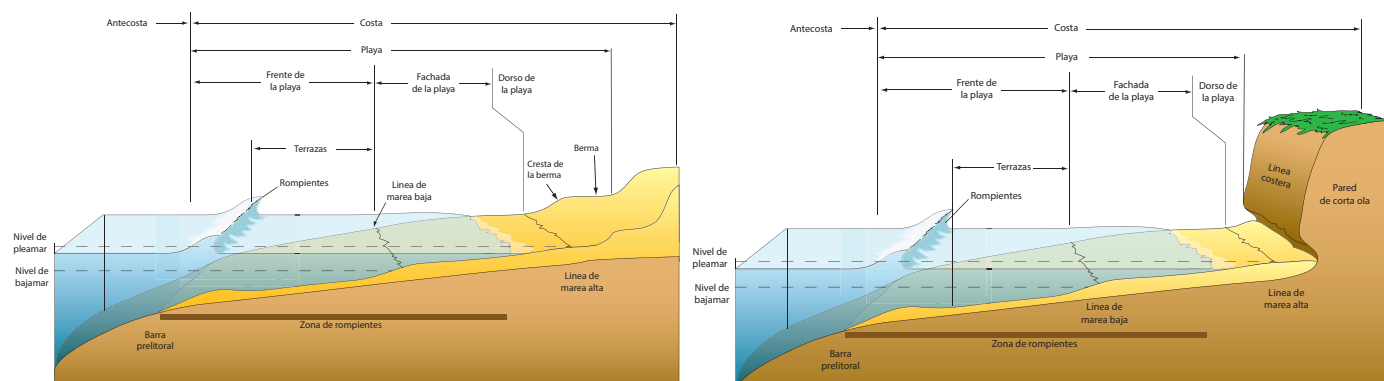
Este material tiene un reposo más dinámico que estático, por tanto la anchura y composición de las playas varía según la intensidad de los procesos de erosión, transporte y sedimentación que actúa sobre ella.

Las playas son esencialmente franjas de arena movidas por procesos litorales. Su materia proviene del interior del continente transportado por los ríos, o de erosión de la misma zona costera y en algunos casos las arenas pueden ser traídas desde aguas más profundas.

La morfología de las playas depende de la historia del litoral; además existe una estrecha relación entre las características de la playa y el tipo de costa. Las playas largas y rectas son típicas de costas bajas arenosas, como la de la Boquilla en Cartagena; las playas más cortas, en forma semilunar y las playas en forma de ensenada, como las de Santa Marta y el Parque Tayrona, son más frecuentes a lo largo de los litorales montañosos. Las costas pueden poseer acantilados o tener un cordón de dunas arenosas que separan la playa de las marismas u otras masas de agua.

A lo largo de muchas costas arenosas bajas, la playa está separada del continente por aguas o por un canal costero natural. Tales playas reciben el nombre de playas de cordón litoral, como la que forma la barra de Ciénaga de Santa Marta. Si una playa se extiende desde la tierra para terminar en aguas libres se llama flecha y espiga; mientras que si una playa une una isla o escollo con el continente, o dos islas entre sí, recibe el nombre de tómbolo.

Las playas de todo el mundo, aunque difieren en algunos detalles particulares, tienen ciertas formas características comunes que permiten la aplicación de una terminología general según su perfil (Figura 1.9a).



La playa se extiende desde el nivel de las mareas más bajas hasta el límite de acción del oleaje de tempestad. La zona situada más hacia el mar se conoce con el nombre de antecosta; la zona situada fuera de la influencia del oleaje recibe el nombre de costa. La playa propiamente dicha comprende una parte frontal y una parte dorsal. La parte dorsal (o dorsal de playa) es la más elevada y es afectada por las olas únicamente durante los temporales. La parte frontal (o frente de playa) se extiende desde la cresta de la berma hasta el nivel de la

Figura 1.9a. Perfil de playa y sus componentes característicos.

Fuente: El autor.

bajamar y constituye la parte activa de la playa afectada por el vaivén de las olas.

La parte frontal o frente de playa posee una fachada fuertemente inclinada hacia el mar, cuya inclinación está relacionada con el tamaño de sedimentos de la playa y con la fuerza de impulso de la ola rompiente; además enlazada en esta fachada, hay una terraza que se extiende hacia el mar, que posee una pendiente más suave (a veces se conoce con el nombre de terraza o escalón de bajamar) por encima de la cual rompen las olas.

En algunos lugares, la fachada y la terraza de la parte frontal de la playa se funden en una curva continua; en otras, hay una discontinuidad notable entre las partes. La primera condición es característica de las playas de arena fina y de las costas donde la altura de las olas es igual o mayor de la oscilación de mareas, como las playas de San Andrés. La última es la típica de costas en las que la oscilación de las mareas es mayor en comparación con la altura de las olas, como en algunas localidades del Pacífico colombiano.

La zona de antecosta a menudo contiene una o más barras y surcos paralelos a la playa, conocidos con el nombre de barras y surcos prelitorales. Las barras prelitorales generalmente se forman sobre el fondo en el punto en que se rompe el oleaje; la posición de la misma está influida por la altura de la ola rompiente, el tipo de oscilación de la marea y la longitud de la ola (Figura 1.9b).

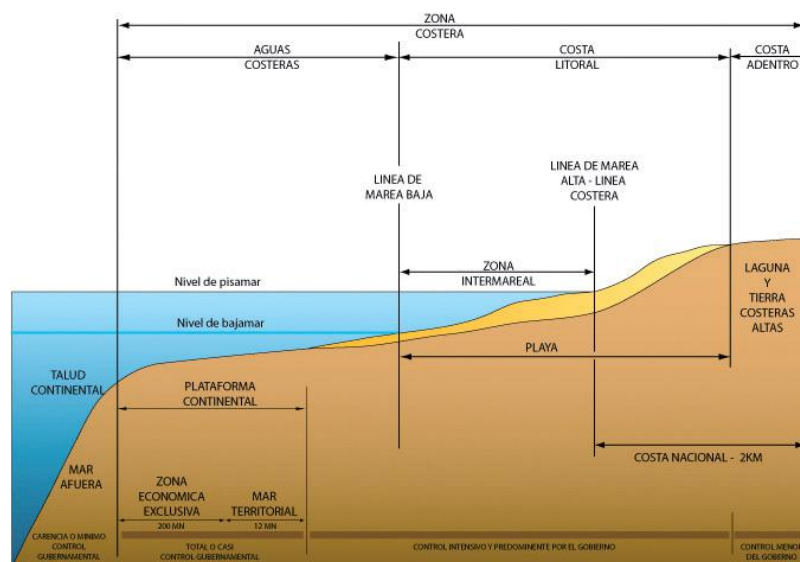


Figura 1.9b. Perfil de la zona costera. Divisiones físicas y políticas definidas por la Convención de las Naciones Unidas para la Ley del Mar (1982).

Fuente: El autor.



1.9.2. Ciclos de playa

Las olas participan de manera activa en el transporte de arena a lo largo de la playa, provocando corrientes litorales; también intervienen en el acarreo normal a la costa, es decir, dando lugar a un desplazamiento alternativo de arena de la parte frontal de la playa hacia aguas profundas, desde donde es llevada de nuevo a la playa. Ese transporte de arena desde o hacia la costa, que está vinculado con el perfil de la playa y con los ciclos relativos a la anchura de la misma, es considerado en la mecánica de formación de playas.

En la mayoría de las costas hay una migración estacional de arena desde las playas hacia aguas más profundas, como respuesta de los cambios registrados, tanto en las características del oleaje como en la dirección de incidencia del mismo. En general las playas crecen y se ensanchan durante el débil oleaje del verano (tiempo de calma) en cambio, retrocede y se reduce durante el invierno por la presencia de olas de tempestad.

En la costa del Caribe colombiano durante la época seca, cuando los vientos son más fuertes, se presentan olas de magnitudes mayores que las generadas durante la época húmeda o lluviosa. Además hay ciclos más cortos de crecimiento y retroceso relacionado con mareas vivas o sicigias y muertas o de cuadratura y con el oleaje de tormentas no estacionales. Las exploraciones del litoral han demostrado que la mayor parte del intercambio de arena entre el mar y la playa se efectúa a profundidades inferiores a 10 metros aunque en algunos casos puedan extenderse hasta 30 metros.

Durante las épocas en que se generan olas de tormenta, la parte frontal de la playa se erosiona formándose a menudo un escarpe de playa. Posteriormente, merced a las olas bajas, se reconstruye la parte frontal de la playa, recuperándola al mar. La fachada de playa es una forma de sedimentación; el punto más alto de la misma, que viene señalado por la cresta de la berma, representa la altura máxima alcanzada por el impulso ascendente del agua en la parte frontal de la playa.

Este nivel máximo alcanzado, generalmente varía de una a tres veces la altura de la ola al romperse. Puesto que la altura de la berma

depende del tamaño de la ola, la berma más alta, si existe, se atribuye a veces a la berma de tempestad; la más baja, a la época de calma. Durante los temporales fuertes la playa entera puede retirarse hasta dejar al desnudo el substrato rocoso. En tales condiciones las olas erosionan las costas y forman marismas y plataformas de abrasión. Éstas con frecuencia quedan preservadas o fosilizadas dentro de las series estratigráficas y sirven de niveles guías o límites para determinar las antiguas relaciones entre mar y tierra.

1.9.3. Mecánica de la formación de playas

En todos los lugares en donde ocurre la incidencia del oleaje y existe un suministro suficiente de arena o material más grueso se forman las playas. Incluso los terraplenes y las obras construidas por el hombre son erosionados y reformados por la acción de las olas. La circunstancia inicial más característica en la formación de una nueva playa a partir de un sedimento heterogéneo es la clasificación del material, de manera que el más grueso permanece en la playa, mientras que el más fino es transportado a otros lugares.

Al mismo tiempo que se efectúa esta clasificación, el material es reagrupado; una parte del mismo es acumulado hasta alcanzar una altura superior al nivel marino por efecto del impulso ascendente de las olas, formando la berma de playa y otra parte es arrastrada por delante de la fachada para ir a formar la terraza del frente de playa. En un período de tiempo relativamente corto la playa adquiere un perfil que está en equilibrio con las fuerzas que le han dado forma.

En una playa permeable la filtración reduce la cantidad del agua del impulso descendente, y de este modo da lugar al depósito de la arena transportada. Las arenas gruesas son más permeables, y por consiguiente, se facilita la sedimentación con el crecimiento de una fachada de playa más inclinada. En cambio, cuando la playa está saturada, el impulso descendente es más rápido y esto da lugar a la erosión.

De lo dicho anteriormente se deduce que la pendiente de la fachada de playa aumenta al crecer el tamaño del sedimento. A continuación (Tabla 1.2) se presentan algunos promedios típicos para la inclinación de las fachadas de playas:



Tabla 1.2. Granulometría de los sedimentos según la pendiente de fachada de la playa. Fuente: Tomado de Larson (1991).

Granulometría sedimentos de playa (mm)		Pendiente de la fachada de playa (grados)
Arena muy fina	1/16 - 1/8	1
Arena fina	1/8 - 1/4	3
Arena media	1/4 - 1/2	5
Arena gruesa	1/2 - 1	7
Arena muy gruesa	1 - 2	9
Gránulos	2 - 4	11
Cantos	4 - 64	17
Guijarros	64 - 256	24

La arena es transportada a lo largo de la playa por corrientes de deriva y también es arrastrada a través de la rompiente por las corrientes de desgarré o de resaca, hasta que se sedimenta en aguas más profundas. Es probable que se reduzca un transporte por difusión de sedimentos hacia el mar, entre la zona de rompiente, donde la concentración de material en suspensión es grande, y las aguas de la antecosta, donde la concentración es relativamente baja.

1.9.4. Origen de los sedimentos de playa

El origen principal de los sedimentos de playa son los ríos, que arrojan directamente grandes cantidades de arena al océano. También lo son los acantilados marinos de material poco cohesionado, al ser erosionado por el oleaje y los de origen biológico (fragmentos de conchas, corales y esqueletos de pequeños animales marinos). A veces el sedimento puede ser suministrado por la erosión de formaciones no consolidadas bajo aguas poco profundas. Por ejemplo, los sedimentos de las playas de Holanda se derivan, en parte, de los bajos fondos del mar del Norte. La arena transportada por el viento también constituye un importante suministro del sedimento de la playa, aunque generalmente los vientos suelen llevarse más arena de la que depositan.

En las latitudes tropicales muchas playas están compuestas en su totalidad por granos de carbonato cálcico de origen biológico. Generalmente,

el material está formado por fragmentos de conchas, corales y algas calcáreas que crecen en los arrecifes franjeantes o sus proximidades; el material es acarreado por encima del arrecife hasta la playa, por la acción del oleaje. Algunas playas están formadas principalmente por los caparazones de foraminíferos que viven en los fondos arenosos fuera de los arrecifes.

Las corrientes y los ríos son los principales proveedores de arena de las playas de latitudes templadas. La erosión de los acantilados generalmente no proporciona más de un 5% del material existente en la mayor parte de las playas. La erosión marina en las costas rocosas es generalmente lenta. Por otra parte, retrocesos de más de 1 m por año no son extraordinarios en los acantilados no consolidados.

1.9.5. Efectos biológicos

La rigurosa acción del oleaje y un suelo continuamente cambiante, hacen de la playa un hábitat biológico único. Como son pocos los seres de tamaño apreciable que puedan sobrevivir en las playas, éstas son ocupadas por muchos animales y plantas microscópicas. Gran parte del sustento de estos animales lo constituyen sustancias que proceden de la circulación acuífera que se filtra y acumula en la arena. La playa actúa como un gigantesco filtro de arena que retiene la materia microscópica del agua que se infiltra a través de la fachada de playa.

Puesto que los procesos de formación de las playas y el almacenamiento del material por las corrientes y la arena son muy parecidos en todas partes, los animales que viven en las playas de arena de todo el mundo son semejantes en su aspecto y costumbres; no obstante, existen especies distintas, dependiendo de las localidades. Además, puesto que los declives y otras propiedades físicas de las playas están estrechamente relacionados con el nivel de las aguas, los animales también presentan una delimitación en franjas paralelas a la línea de costa.

Los organismos que viven en la parte activa de la fachada tienden a ser de dos tipos en lo que atañe a la manera de procurarse el alimento:

1. Los que horadan la arena, utilizándola como refugio para filtrar determinadas sustancias del agua a través de sifones u otros apéndices que sobresalen del fondo arenoso.



2. Los que sacan la materia orgánica de la superficie de los granos de arena, ya sea ingiriéndolos o chupándolos. Generalmente hay pocas especies, pero las que están presentes pueden ser numerosas; por ejemplo; el gusano tubícola llamado *Thoracophelis mucronata*, que ingiere granos de arena. Se calcula que en algunas playas existen 100 000 individuos por m³ de arena fina.

En algunas especies como la almeja *Donax gouldii* se pueden encontrar hasta 25 000 individuos/m².

La acción bacteriana sobre la materia orgánica de la playa origina a menudo una capa negra a profundidades de 5-75 cm por debajo de la superficie frontal de la playa. Químicamente se trata de una lámina de carácter reductor con pH superior a 8. Se ha demostrado que la decoloración se debe a la presencia de sulfito ferroso, que en contacto con el aire se oxida, dando una coloración amarillo rojiza. Esta capa reductora conduce a la fijación del carbonato cálcico, lo cual desempeña un papel destacado en la cementación de la arena, así como en la formación de las rocas de playa y nódulos.

En los mares tropicales, la costa entera puede estar constituida por esqueletos cementados y trabados de corales arrecifales y de algas calcáreas. Cuando esto ocurre, el sistema de corrientes litorales está regulado por la configuración de los arrecifes construidos.

En los lugares donde existen arrecifes franjeantes, la rompiente de las olas transporta agua por encima del cantil del arrecife originando corrientes que fluyen a lo largo de la costa interna del mismo, para que nuevamente sea vertida al mar a través de conductos profundos abiertos en los arrecifes. Generalmente, en tales condiciones las playas se reducen a una berma con superficie frontal que bordea el límite del arrecife.

1.9.6. Corrientes en la zona de rompientes

Cuando las olas inciden de manera tal que hay un ángulo entre las crestas de las olas rompientes y la playa, el ímpetu de la ola rompiente posee un componente paralelo a la playa en la dirección de propagación de la ola. Este da por resultado la generación de corrientes o derivas litorales que discurren paralelas a la playa y dentro de la zona de rompientes.

Después de discurrir paralelamente a la playa como derivas litorales, el agua es devuelta al mar a lo largo de zonas relativamente estrechas, por corrientes de desgarre o de resaca.

El transporte de agua hacia la tierra por la acción del oleaje, el transporte lateral debido a las derivas litorales, el retorno del agua hacia el mar en forma de corrientes de desgarre y el movimiento paralelo a la costa que se produce en la expansión terminal de la corriente de desgarre constituyen el sistema de circulación costera (Figura 1.10a).

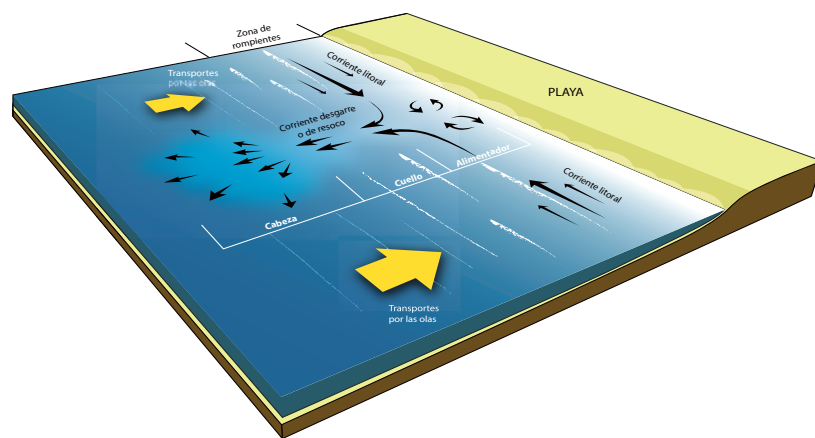


Figura 1.10a. Sistema de circulación costera (corrientes de litoral y corrientes de desgarre o resaca).

Fuente: Adaptada por el autor.

La resultante de esta circulación por lo general toma la forma de un remolino. La localización de las corrientes de resaca depende de la topografía submarina y de la configuración de la costa, así como de la altura y del periodo de las olas. La periodicidad o fluctuación de la velocidad y dirección de la corriente es un factor característico de ésta en el sistema próximo a la costa.

Estas corrientes se deben en esencia a la formación de un tren de olas altas, seguido por otro de olas bajas, lo que constituye un fenómeno que da lugar a un ritmo ascendente y descendente del nivel del agua en la zona de rompientes, llamado pulsación de rompientes.

El agua en la zona de rompientes tiene un flujo lento mar adentro, deslizándose cerca del fondo situado entre las corrientes de resaca. No está del todo probado que exista una fuerte resaca en la zona de rompientes, a no ser el flujo instantáneo de retroceso de la onda, que se introduce por debajo de la base de una ola que rompe frente a una playa algo inclinada. Estas corrientes generan un peligro especial para los nadadores que pueden ser transportados hacia

mayores profundidades del mar, creando fatiga y pánico al tratar de nadar infructuosamente hacia la orilla, lo que suele terminar en ahogamientos. (Figura 1.10b).

Las corrientes litorales normalmente van a velocidades de 15-75 cm/s (0,5 - 2,7 km/h), aunque se han medido algunas de 125 cm/s (4,5 km/h).

En aquellos casos en que las olas rompen en una playa rectilínea con contornos de fondo paralelos, será posible estimar la velocidad de la corriente litoral, basándose en la observación de las características de la ola y de la playa. Por otra parte, en las playas no rectilíneas, o aquellas que poseen una topografía de antecosta que provoca una refracción diferencial del oleaje, estas corrientes litorales dependen del gradiente de altura de zona de rompiente, a lo largo de la playa, así como del ángulo de incidencia de la ola con la playa.

Las puntas, los rompeolas y los muelles influyen en la circulación alterando la dirección de las corrientes litorales. Por lo general, estas obstrucciones determinan la posición de uno de los lados de la célula de circulación, allí donde una playa relativamente recta queda interrumpida por puntas u otros obstáculos, y lo hace justamente por el lado de la corriente descendente. Se crea en dirección al mar una violenta corriente de desgarre. Durante las épocas de fuerte oleaje puede adentrarse más de 2 km en el mar.

1.10. TIPOS DE COSTAS

Para poder describir los diferentes tipos de costas se han diseñado varias clasificaciones. Una de las que ha tenido más aceptación es la de Shepard (1973), que divide las costas en dos grandes categorías: costas primarias y costas secundarias.

I. Costas primarias:

Son aquellas que deben su configuración al hecho de que el mar descansa sobre una superficie moldeada por procesos esencialmente continentales. Las costas primarias se subdividen en:

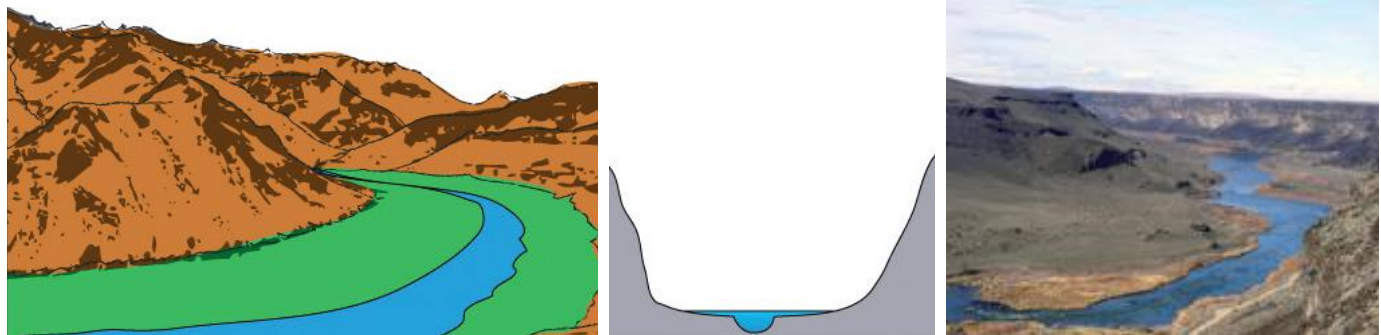


Figura 1.10b. Aspecto de la corriente de desgarre o resaca.

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

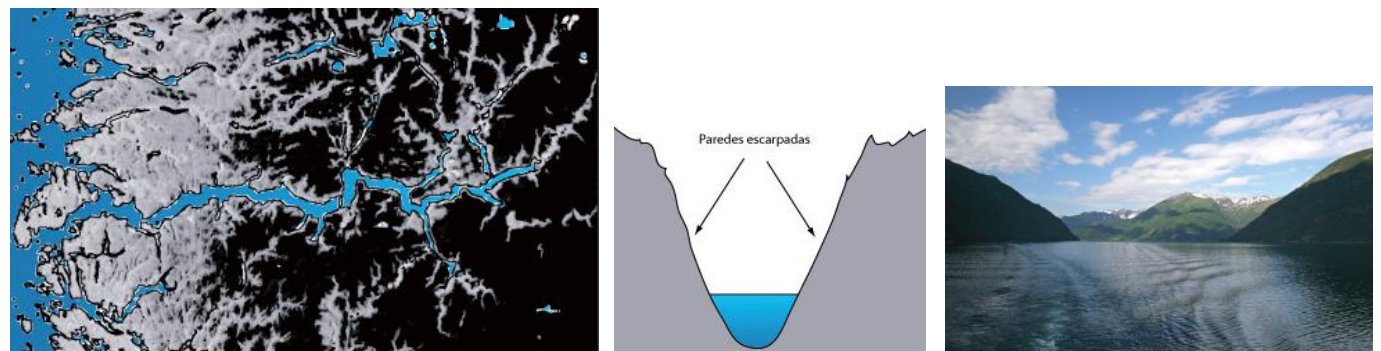
A- Costas de erosión: formadas por procesos de erosión durante la época de las glaciaciones cuando se produjo un descenso en el nivel del mar y que actualmente se encuentran inundadas por el efecto de la desglaciación (fusión del hielo). Entre ellas encontramos:

A.1- Las rías: valles de ríos inundados que penetraban hasta el borde del talud continental durante la época de glaciación (Figura 1.11a).



A.2- Las costas de erosión glacial, caracterizadas por los fiordos: valles de glaciares que durante la época de glaciación penetraban hasta el talud continental y que posteriormente fueron inundados por efectos de la desglaciación (Figura 1.11b).

Figura 1.11a. Costa de erosión tipo ría.
Fuente: El autor.

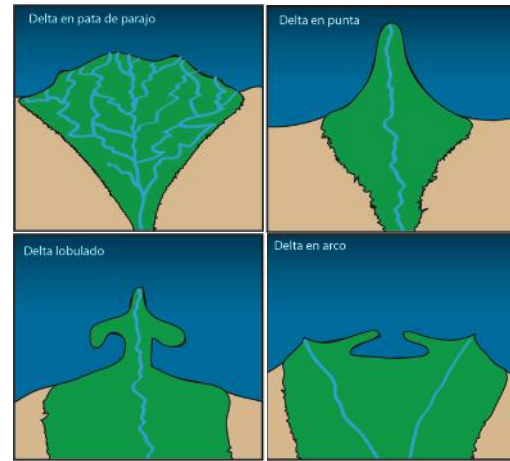


A.3- Las costas de topografía cárstica inundados: se forman en rocas calcáreas que durante la época de glaciación estuvieron expuestas a la erosión sub-área dando lugar a la formación de cavernas, que posteriormente fueron inundadas durante la desglaciación (Figura 1.11c).

B- Costas de deposición sub-aérea: son el producto de la deposición por medio de agentes de sedimentación actual (glaciares y vientos).

Figura 1.11b. Costa de erosión tipo fiordo.
Fuente: El autor.

B.1- Costas de deposición fluviales (deltas) como el delta del Sinú, Magdalena, San Juan y Patía (Figura 1.11d).



B.2- Costas de deposición glacial, que se encuentran en zonas sometidas a procesos de glaciación actual en latitudes altas. Un ejemplo de éstas son los drumlins (Figura 1.11e y 1.11f).

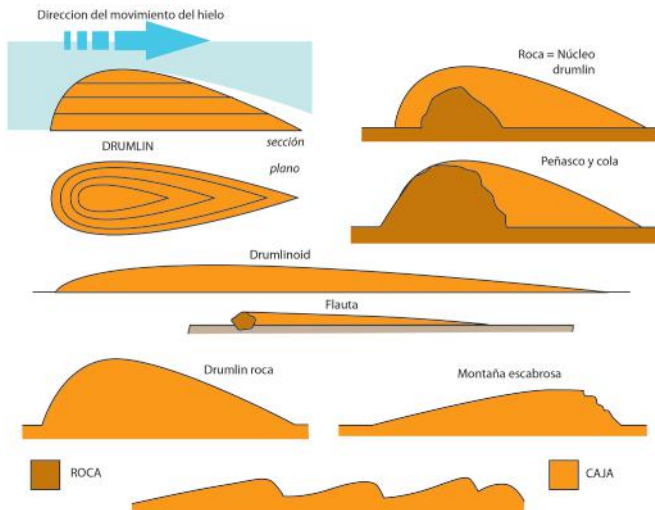


Figura 1.11c. (Izquierda) Costa cárstica formada por rocas calcáreas.

Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

Figura 1.11d. (Derecha) Diferentes formaciones de delta causados por deposición fluvial.

Fuente: El autor.

Figura 1.11e. (Arriba) Formación de Drumlin. **Fuente:** El autor.

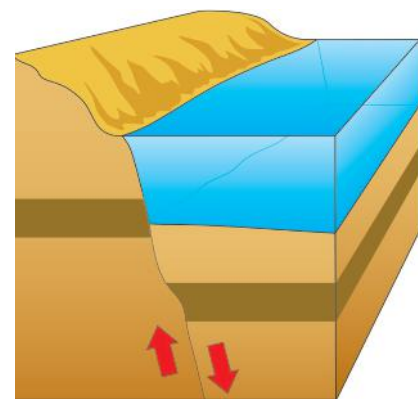
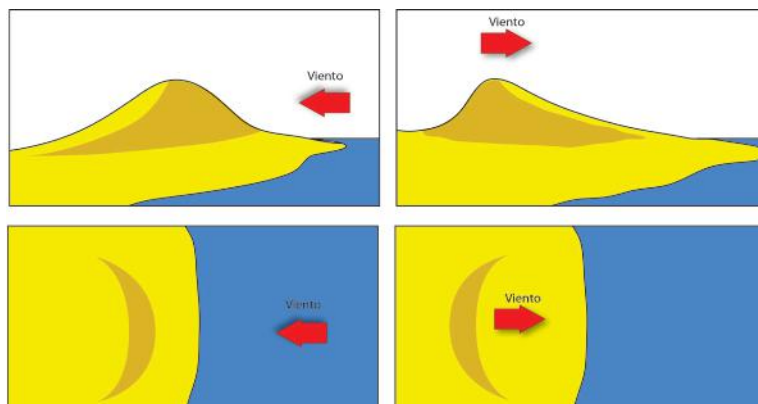
Figura 1.11f. (Abajo) Costa de deposición glacial; Drumlin.

Fuente: Recursos Naturales de Canadá, Comisión Geológica de Canadá (2008).

B.3- Costas de deposición eólica, formadas por el viento como las dunas de la Guajira y Galerazamba y los “rodaderos” del área de Santa Marta (Figura 1.11g).

C- Costas volcánicas: Hawai y algunos sitios de Providencia.

D- Costas originadas por movimientos tectónicos: desplazamientos de la corteza terrestre, como fallas (Figura 1.11h).



II. Costas secundarias

Son las costas cuya configuración es el producto de procesos marinos o de la acción de organismos que viven en el mar. Las costas secundarias se subdividen en:

A- Costas de erosión por las olas: acantilados, como los que se aprecian en las costas colombianas (Figura 1.11i).

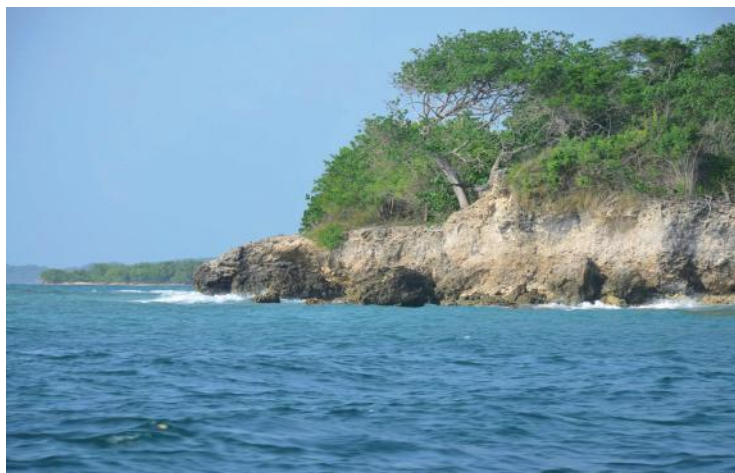


Figura 1.11g. (Izquierda) Costas de deposición eólica.
Fuente: El autor.

Figura 1.11h. (Derecha) Costa de formación tectónica causada por desplazamiento de corteza, (las flechas señalan el sentido del desplazamiento de las dos porciones de corteza).
Fuente: El autor.

Figura 1.11i. Acantilados, costas formadas por la acción erosiva de las olas. Isla Barú, Cartagena.
Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

B- Costas de deposición marina: como las barras de la Ciénaga Grande y playas aledañas (Figura 1.11j).



Figura 1.11j. Ciénaga de Chambacú, Cartagena. Laguna costera de agua salobre (mezcla de agua dulce y agua salada).

Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

C- Costas constituidas por organismos: arrecifes coralinos como las Islas del Rosario y las de manglares en la costa Caribe y Pacífica (Figura 1.11k).



Figura 1.11k.. Playa El Acuario (Rose Cay) San Andrés.

Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

1.11. MORFOLOGÍA SUBMARINA

Anteriormente se determinaba la morfología con base en sondeos realizados desde buques, midiendo la profundidad, usando un cable con un peso en el extremo (Escandallo). Con este método llamado de Sondaleza, se determina la profundidad en un sólo punto, en cada sondeo.

De esta manera, con la medición de muchos puntos, se obtiene un perfil del fondo marino. La obtención de muchos de estos perfiles ha permitido la elaboración de mapas detallados de la morfología submarina (Figuras 1.12 y 1.16). Detalles de los instrumentos modernos utilizados para estudiar los fondos marinos se da en la unidad 7 de este libro.

Observando el mapa de fondos submarinos se pueden distinguir principalmente tres regiones morfológicas: el borde o margen continental, las cuencas oceánicas y las dorsales (Figura 1.13).

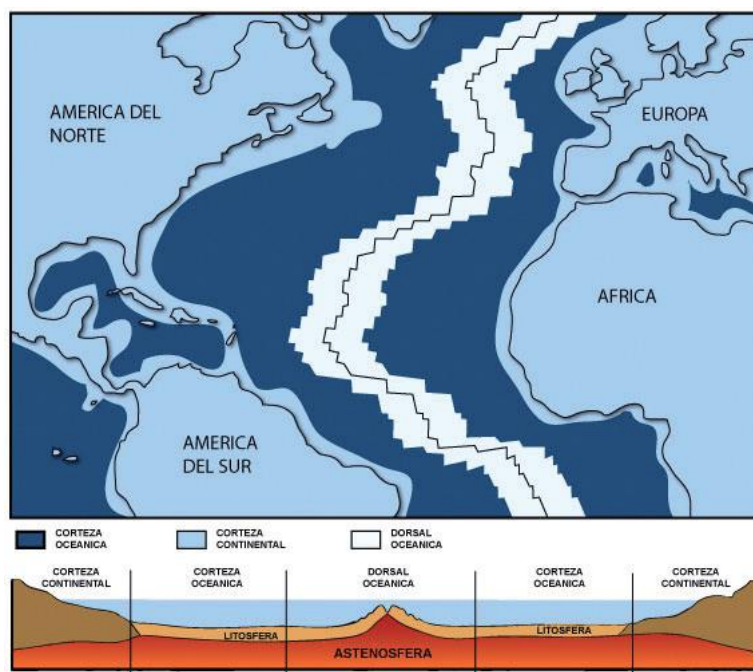
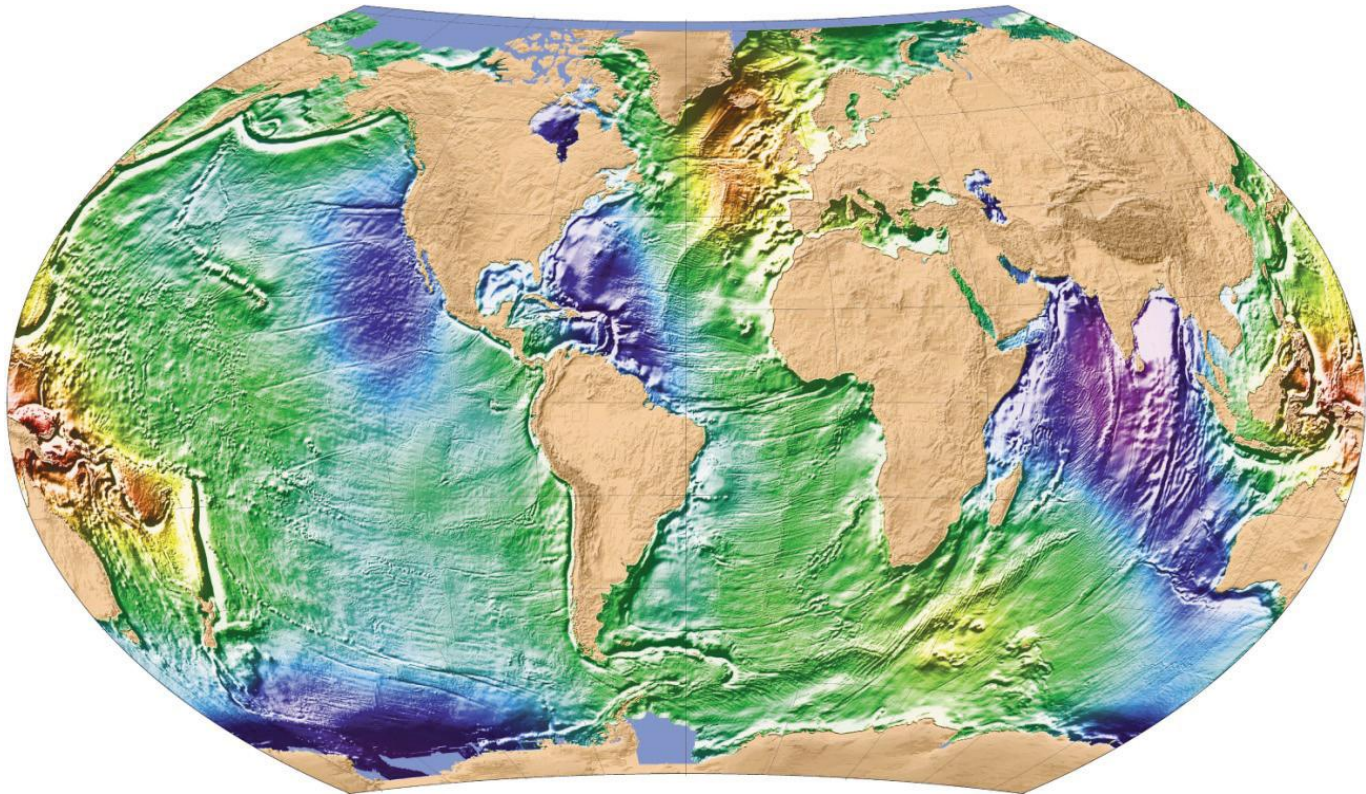


Figura 1.12. (Arriba) Morfología del fondo submarino.

Fuente: *Collecte Localisation Satellites - CLS* (Centro francés de recolección y localización de datos medioambientales por satélite).

Figura 1.13. (Abajo) Principales provincias morfológicas de los fondos oceánicos.

Fuente: Adaptada por el autor.



1.11.1. Margen continental

En el borde o margen continental se distinguen tres subregiones: la plataforma continental, el talud o pendiente continental y la rampa continental. La plataforma es una continuación de las llanuras costeras y se extiende por debajo del nivel del mar con una pendiente promedio de 1:1 000 hasta profundidades que varían desde decenas hasta unas centenas de metros, con un promedio de unos 200 m.

La extensión de la plataforma bajo el nivel del mar varía entre unos pocos kilómetros y algo más de 400 km con un promedio de 78 km. Las plataformas más anchas se encuentran en el mar Ártico y las más profundas alrededor de la Antártica (aproximadamente 350 m de profundidad).

El nivel actual y la morfología general de la plataforma continental son el producto de procesos de erosión y sedimentación relacionados con las numerosas oscilaciones de gran amplitud del nivel del mar durante el último millón de años (cuaternario reciente).

El borde de la plataforma continental está generalmente influenciado por el nivel del mar. Durante la última glaciación (hace unos 18 000 años) la línea de costa coincidió o estuvo muy cerca del borde de la plataforma continental.

La plataforma del Caribe colombiano es mucho más amplia que la del Pacífico colombiano. La primera tiene una extensión aproximada de 20 a 30 km, mientras que la del Pacífico prácticamente no existe. El borde de la plataforma del Caribe colombiano se encuentra generalmente a profundidades menores de 100 m.

El talud o pendiente continental marca la división entre las regiones continentales y oceánicas de la corteza terrestre. La pendiente continental es realmente el borde de las cuencas oceánicas. El océano empieza en el talud y no en la costa, tiene una pendiente mayor de 1:40 y en algunos casos es casi vertical. La pendiente promedio es de unos 4 grados y se extiende desde el borde de la plataforma hasta una profundidad que varía más o menos entre 1 500 y 3 500 m. Es una gran zona estrecha con una amplitud generalmente menor de 200 m.

El talud continental es uno de los rasgos morfológicos mejor definidos en la tierra, caracterizado por el cambio de pendiente brusco que se puede seguir continuamente por miles de kilómetros a lo largo de los bordes continentales.

La rampa continental es una cuña de sedimentos que reposa sobre el talud continental y se extiende hacia las cuencas oceánicas. Se caracteriza por tener una pendiente mucho menor, del orden de 1: 3 000 con promedio de alrededor de 2 grados.

Característicos de los taludes continentales son los cañones submarinos o fosas oceánicas que algunas veces atraviesan también la plataforma continental. Algunos de éstos tienen un relieve comparable con el del Gran Cañón del Colorado o aún mayor.

Estos cañones son mucho más numerosos en el talud continental. Sólo algunos se extienden desde la desembocadura de ríos que actualmente atraviesan la plataforma, continúan en el talud continental y terminan en un abanico de sedimentos similar a un delta. Estos cañones han sido labrados por la capacidad erosiva de las llamadas corrientes de turbidez, las cuales se originan al producirse un deslizamiento de grandes masas de sedimentos de la parte superior del talud o de la plataforma continental, que se transforma rápidamente en una corriente de alta densidad al poner en suspensión el material que se transporta (Figura 1.14).

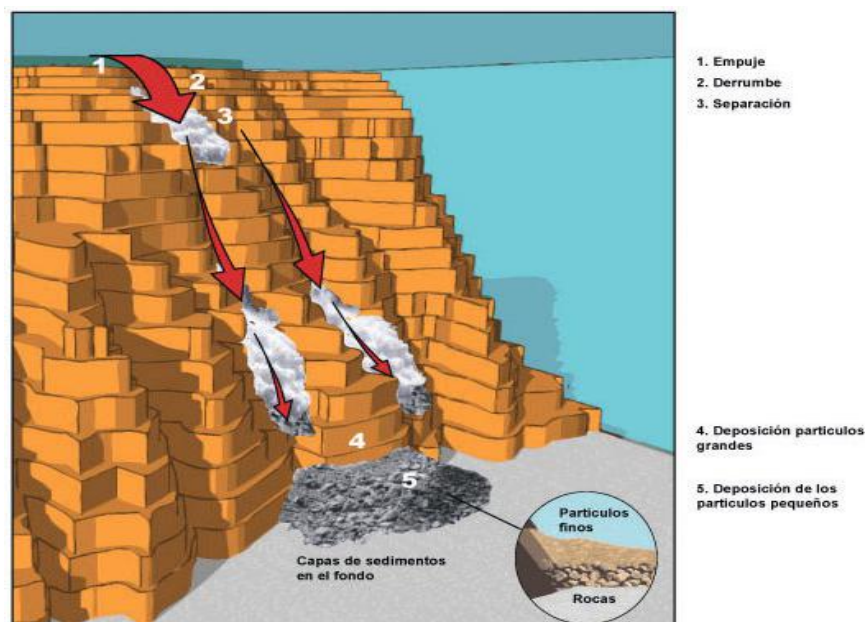


Figura 1.14. Cañón submarino resultado de la acción erosiva de las corrientes de turbidez.

Fuente: Modificado de Longwell & Flint (1981).

Esta corriente por ser más densa que el agua que la rodea corre por el fondo siendo capaces de cortar los valles de estos cañones submarinos. El cañón del río Magdalena es un ejemplo claro que se extiende desde la desembocadura hasta las cuencas oceánicas (Figura 1.15).

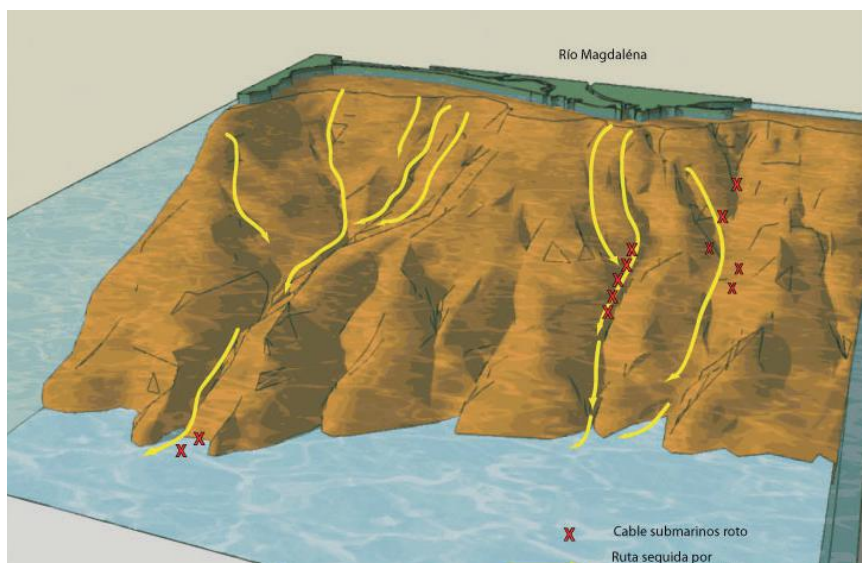


Figura 1.15. Las corrientes de turbidez en el río Magdalena son capaces de romper cables submarinos y erodar canales.

Fuente: El autor.

1.11.2. Cuencas oceánicas

Es difícil decir donde finaliza la rampa continental y donde empiezan las cuencas oceánicas, de manera que generalmente el límite se fija arbitrariamente hasta donde comienzan las dorsales.

Dentro de estas cuencas se presentan algunos accidentes topográficos que reciben diferentes nombres tales como: las colinas abisales que constituyen el rasgo topográfico más común en la superficie de la Tierra, si se elevan más de 900 m sobre el piso oceánico se llaman montes submarinos; estos rasgos son de origen volcánico.

Características de las cuencas oceánicas son las llamadas llanuras abisales, que constituyen las áreas planas más extensas de la superficie de la Tierra. En algunas ocasiones es difícil reconocer diferencias de profundidad en una llanura abisal. A lo largo de cientos de kilómetros, con la precisión actual (aproximadamente 1:5 000), es decir alrededor de un metro.

Esta horizontalidad de la superficie se ha explicado por el relleno de las depresiones y eliminación de la topografía existente por medio de

los sedimentos acarreados por corrientes de turbidez que se desplazan al llegar a las cuencas oceánicas.

Existen unos pocos canales oceánicos profundos, cuyo origen es complejo de explicar y se han relacionado con alguna clase de corrientes de turbidez o de densidad. El caso mejor conocido es el del Canal Profundo del Atlántico Norte o Mid-ocean Canyon

1.11.3. Dorsales oceánicas

El sistema de dorsales oceánicas constituye la cadena montañosa más grande de la superficie de la Tierra con una extensión aproximada de 65 000 km, un poco más de una y media veces la circunferencia de la Tierra.

Tiene una anchura promedio de 1 700 km, su elevación máxima varía generalmente 1 o 2 km, por encima del piso oceánico pero en algunos casos se extiende hasta el nivel del mar, como en el caso de Islandia. La topografía más abrupta se encuentra en la parte central. En la parte más alta de las crestas se presenta un valle axial que es desplazado continuamente por fracturas transversales. Los valles axiales son sísmicamente activos. Estas fracturas o fallas activas se conocen como fallas de transformación.

1.11.4. Fosas o trincheras submarinas

Son depresiones largas y estrechas con flancos (bordes) de fuerte inclinación, que corren aproximadamente paralelas a las márgenes continentales, o sea un arco de islas. Constituyen rasgos espectaculares de los fondos oceánicos por su longitud, profundidad y continuidad. La fosa de Perú-Chile, tiene 5 900 km de longitud. Generalmente, tiene menos de 100 km, de anchura, alcanza profundidades de 11 km y su máxima profundidad está entre 2 y 4 km más profunda que el piso oceánico adyacente. Prácticamente todo el océano Pacífico está circundado por estas fosas, mientras que en el océano Atlántico únicamente existen 2; la fosa de Puerto Rico (Figura 1.16) y la de South Sándwich que está ubicada en la región Antártica.

Los puntos más profundos del océano se encuentran en las fosas. La mayor profundidad del océano es de 11 034 m, está ubicada en la fosa de las Marianas en el océano Pacífico. Estas fosas se encuentran



en el borde de los continentes o en el lado oceánico de arcos de islas de origen volcánico, como las dos fosas del Atlántico antes mencionadas y las fosas del Pacífico Norte y del Pacífico Occidental.

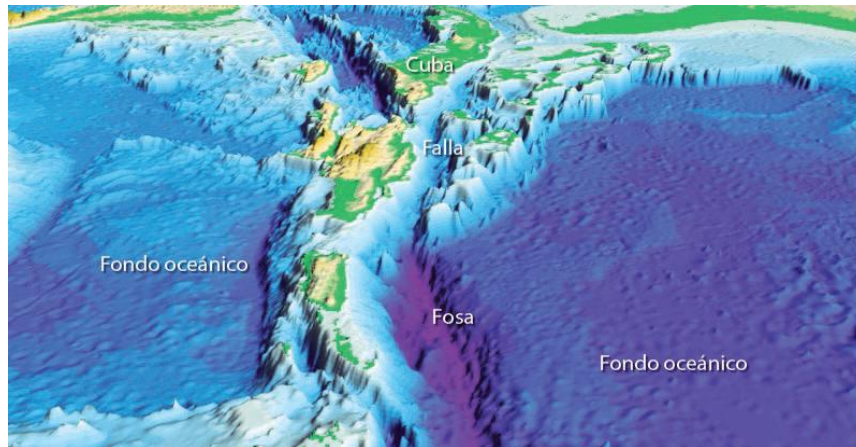


Figura 1.16. Fosa submarina de Puerto Rico. Perspectiva del suelo marino en el océano Atlántico y el mar Caribe. Las Antillas Menores se ubican en el extremo inferior izquierdo de este gráfico. El color morado en el centro indica las zonas más profundas de la trinchera de Puerto Rico.

Fuente: United States Geological Survey (USGS).

1.11.5. Arrecifes como estructura morfológica submarina

Se pueden clasificar en tres tipos principales de acuerdo con su morfología:

- **Arrecifes franjeantes** que se encuentran cercanos al continente y prácticamente no presentan una laguna asociada a ellos. Estos se encuentran cerca de las costas en las que no desembocan ríos que impidan su desarrollo.
- **Arrecifes de barrera** se encuentran un poco más lejos de la costa. El arrecife mismo constituye una barrera contra la cual se estrellan las olas y se produce una laguna de aguas calmas entre la barrera y el continente. El ejemplo más claro de este tipo de arrecifes es el de Australia, que se encuentra separado del continente por una laguna poco profunda de varios cientos de kilómetros de ancho.
- **Atolones** Atolones que son arrecifes de forma variable pero generalmente circulares u ovalados, encierran una laguna interior que puede llegar hasta unos 40 m de profundidad. Los atolones ubicados alrededor de islas volcánicas, las cuales, a medida que se hundén, dejan aflorar los arrecifes cerca de la superficie del mar (Figura 1.17a y Figura 1.17b).

En Colombia, los arrecifes mejor desarrollados se encuentran en el departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

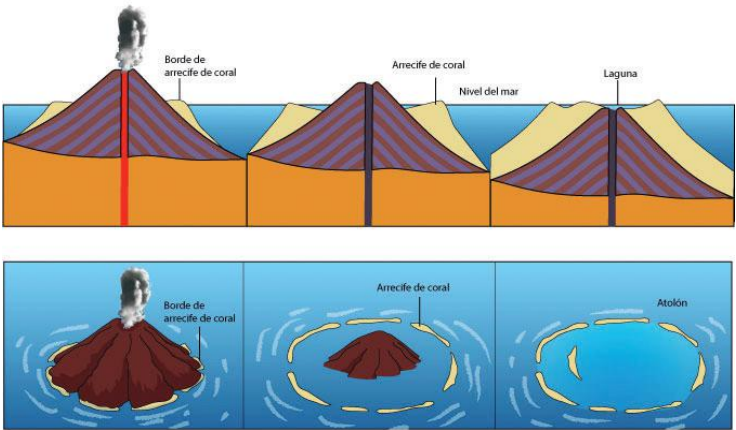


Figura 1.17a. Secuencia de formación de un Atolón.
Fuente: El autor.



Figura 1.17b. Atolón Albuquerque, Departamento de San Andrés Providencia y Santa Catalina.
Fuente: Cortesía Fuerza Aérea Colombiana - FAC

Tabla 1.3. Algunas relaciones entre sub-provincias de los fondos oceánicos. Fuente: Wyllie (1971).

Región oceánica	% de la superficie terrestre	% de la superficie del océano	% del agua en el océano	Pendiente promedio	Ancho promedio en km
Plataforma	6	9	0.2	0-1º	75
Talud	4	6	3	4-3º	50
Rampa	4	5	5	0-2º	40
Cuencas	30	42	53	-	-
Dorsales	23	33	33	0.2º	1700
Fosas	1	2	4	3º	100
Áreas volcánicas	2	3	2	-	-



1.12. EROSIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS

Las rocas expuestas en la superficie de la Tierra sufren alteraciones físicas y químicas producidas por los agentes atmosféricos, que tienden a transformarlas y desintegrarlas. En donde predominan los agentes químicos hay una tendencia a producir suelos. Donde predominan los agentes físicos existe la tendencia a desintegrar las rocas, fragmentándolas y haciéndolas susceptibles a la erosión. Estos procesos físicos y químicos constituyen lo que se conoce como meteorización o intemperismo de las rocas. En la superficie de la Tierra siempre actúan conjuntamente pero con predominio de alguno de ellos.

La tendencia general es la de transportar material desde los puntos más altos del continente hacia las cuencas más profundas del océano. Este proceso se ve interrumpido muchas veces por el depósito de estos detritos o sedimentos en cuencas intermedias de sedimentación, constituidas por depresiones topográficas tales como los valles, lagos, lagunas y la misma plataforma continental que se constituye en un obstáculo en el camino de los sedimentos terrígenos (de origen continental) hacia el mar.

El factor siempre presente en el transporte de sedimentos es la gravedad y el principal medio de transporte de éstos en los continentes son las corrientes de agua, seguido en importancia por los glaciares y los vientos.

Los glaciares pueden transportar bloques muy grandes y acarrear fragmentos de todos los tamaños. Sin embargo, su acción está restringida a las áreas cubiertas por los glaciares.

Los ríos son los agentes que tienen mayor capacidad de transporte en volumen de sedimentos, pero sólo en ocasiones especiales transportan gravas (partículas de tamaño mayor de 2 mm de diámetro) hasta la costa, como en el caso de los ríos que viajan desde la Sierra Nevada de Santa Marta. Generalmente transportan arenas (partículas entre 2 y 1/16 mm), limos (partículas entre 1/16 y 1/256 mm) y arcillas (partículas de diámetro menor de 1/256). El viento tiene menor capacidad de transporte y sólo puede acarrear partículas de arena fina y de tamaño menor.

Los diferentes tipos de sedimentos tienen la tendencia a depositarse en distintos ambientes. Los sedimentos gruesos tienen la tendencia a concentrarse en ambientes de alta energía tales como las playas o donde existen corrientes de alta velocidad. Los sedimentos finos se depositan en ambientes de baja energía tales como la parte externa de la plataforma, lejos de las corrientes y de la zona de rompiente del oleaje, o, en ambientes de bahías protegidas y de aguas tranquilas. Ocasionalmente llegan a las cuencas profundas limos, arenas y gravas transportadas por corrientes de turbidez a lo largo de cañones submarinos.

De manera que en general, los depósitos de sedimentos actuales de los océanos disminuyen en contenido terrígeno y en su tamaño a medida que nos alejamos de los continentes. Según esto, el tipo de sedimentos de la plataforma continental debería tener las mismas características en todas partes. Sin embargo, se presenta una considerable variación de acuerdo con la latitud.

Aunque la arena predomina en todas partes, se encuentran más fragmentos de roca y grava en las altas latitudes, lo que refleja la actividad de los glaciares y la poca alteración química que sufren las rocas. La abundancia de partículas finas en las regiones ecuatoriales se debe probablemente a la mayor alteración química que sufren las rocas en la zona ecuatorial bajo la influencia de su alta humedad y elevada temperatura. Los corales están restringidos a la región tropical debido a que sólo proliferan en aguas de temperaturas altas, entre 24°C y 28°C.

Sedimentos pelágicos

Reciben el nombre de pelágicos aquellos sedimentos que son depositados desde la superficie del océano en dirección esencialmente vertical. Éstos se encuentran constituidos principalmente por material biogénico, conchas y esqueletos de organismos planctónicos (organismos que flotan en las capas superiores del océano). Cuando mueren los organismos, sus esqueletos y conchas se hunden y se acumulan en los fondos oceánicos. El material terrígeno muy fino acarreado en suspensión por el agua y en algunas ocasiones por el viento son otras maneras de formación de estos sedimentos.

Los caparazones y esqueletos de estos organismos que se conservan como sedimentos, están constituidos por sílice (SiO_2) y carbonato de

calcio (CaCO_3). Los principales organismos que muestran esqueletos de CaCO_3 son los foraminíferos (microscópicos) y los cocolitos (submicroscópicos) que son cápsulas de calcáreas de la familia Cocolithophoridae (Figura 1.18).

Los principales componentes de esqueletos silicios son los radiolarios y las diatomeas (algas planctónicas microscópicas), seguidas muy lejos por las esponjas y los flagelados (Figuras 1.19 - 1.22).

Según el material que predomine en el sedimento, se puede clasificar de una manera general en dos principales tipos: sedimentos terrígenos (con predominio de material proveniente del continente y el transporte lateral) y sedimentos pelágicos (transporte esencialmente vertical por depósito de partículas en suspensión).

Los principales sedimentos pelágicos son la arcilla roja (constituidos por minerales arcillosos de tamaño arcilla); los lodos calcáreos (material biogénico calcáreo); y los silíceos (material biogénico silíceo). Estos tipos de sedimentos cubren las superficies de los fondos marinos (Figura 1.23).

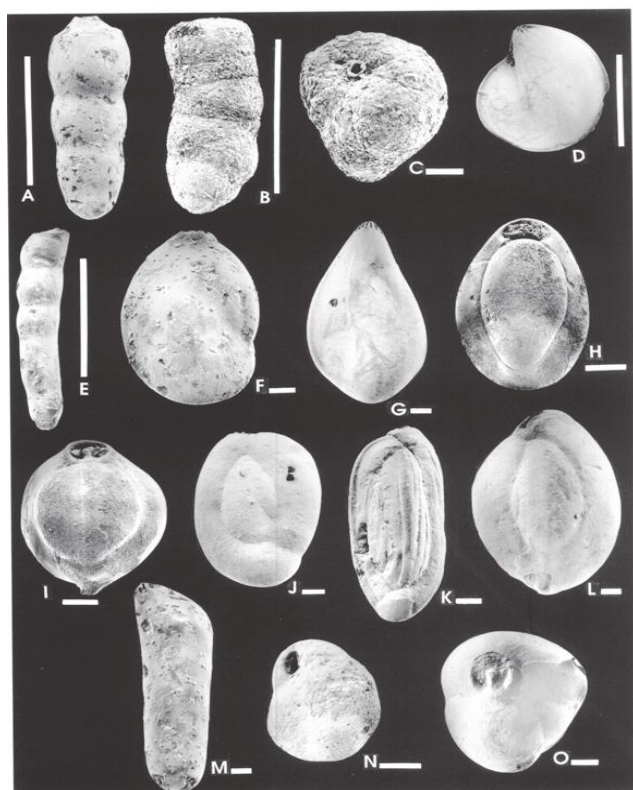


Figura 1.18. Cocolitofóridos. La barra representa 0,1 mm. Todas las ilustraciones son de ejemplares de la muestra 430. A, *Pseudonodosaria brevis* (d'Orbigny), SEGEMAR 2381. B, *Martinottiella communis* (d'Orbigny), SEGEMAR 2382. C, *Karrerella siphonella* (Reuss), SEGEMAR 2383. D, *Lenticulina inornata* (d'Orbigny), SEGEMAR 2384. E, *Dentalina* sp., SEGEMAR 2385. F, *Saracenaria* cf. *kellumi* Dorreen, SEGEMAR 2386. G, *Sigmomorphina* cf. *flintii* (Cushman), SEGEMAR 2387. H, *Pyrgo elongata* d'Orbigny, SEGEMAR 2388. I, *Pyrgo subsphaerica* (d'Orbigny), SEGEMAR 2389. J, *Quinqueloculina seminulum* Linne, SEGEMAR 2390. K, *Quinqueloculina singletoni* Crespín, SEGEMAR 2391. L, *Quinqueloculina akneriana* d'Orbigny, SEGEMAR 2392. M, *Marginulina* sp., SEGEMAR 2411. N, *Globocassidulina subglobosa* (Brady), SEGEMAR 2393. O, *Triloculina gibba* d'Orbigny, SEGEMAR 2394. Fuente: Annick Baudrimont-Laboratorio de Geología y Oceanografía Universidad Bordeaux, Francia.

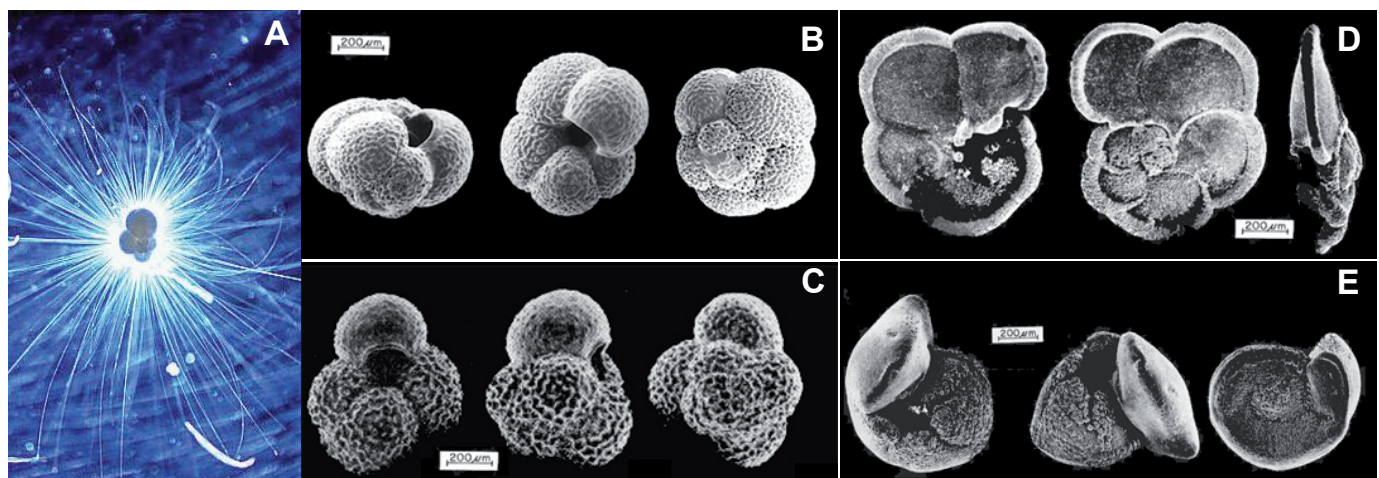


Figura 1.19. Foraminíferos planctónicos modernos. A: Foraminífero planctónico viviente *G.bulloides* (Foto Bijma J.), B: *Globigerina pachyderma* (Bé A., 1977), C: *Globigerina rubescens*, D: *Globorotalia menardii menardii*, E: *Globorotalia truncalinoides*.

Fuente: Annick Baudrimont-Laboratorio de Geología y Oceanografía Universidad Bordeaux, Francia.

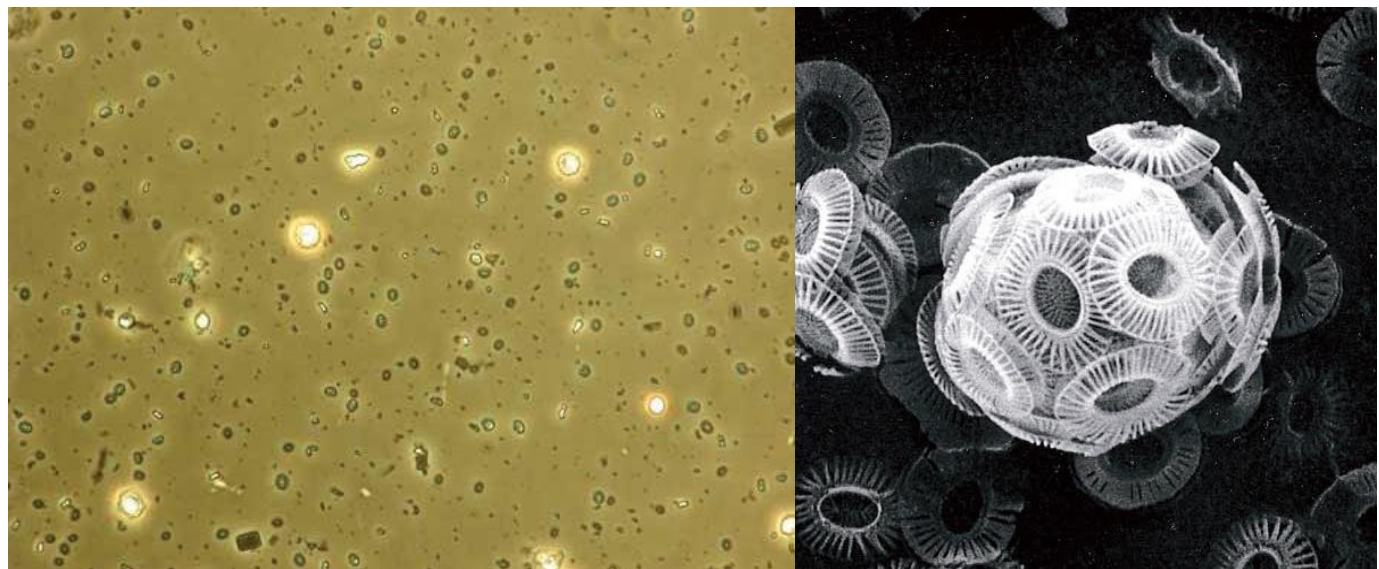


Figura 1.20 Ejemplos de microorganismos calcáreos (cocósferas y cocolitos, *Emiliana huxley*) vistos con microscopio electrónico.

Fuente: National Oceanography Centre – University of Southampton

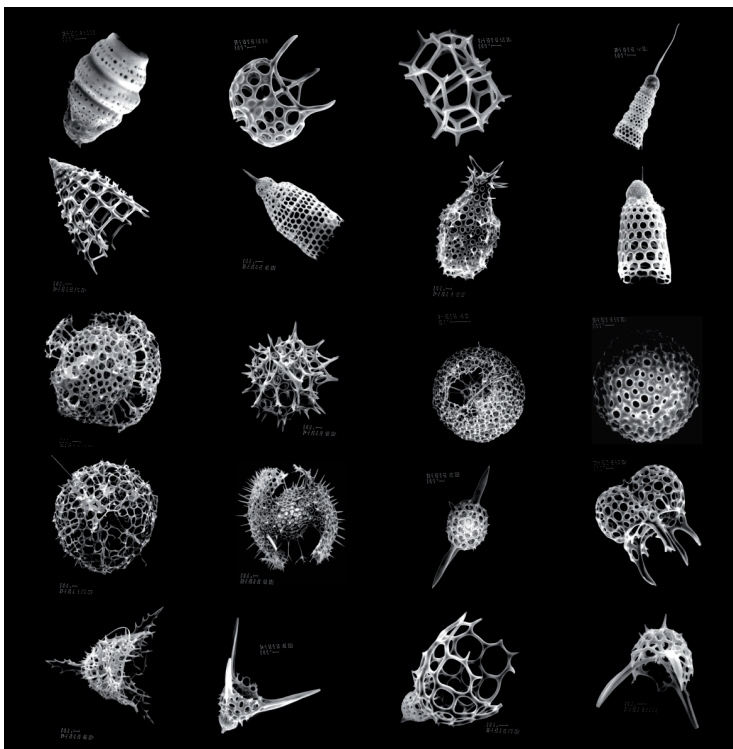


Figura 1.21. Radiolarios modernos.

Fuente: Annick Baudrimont-Laboratorio de Geología y Oceanografía Universidad Bordeaux, Francia.

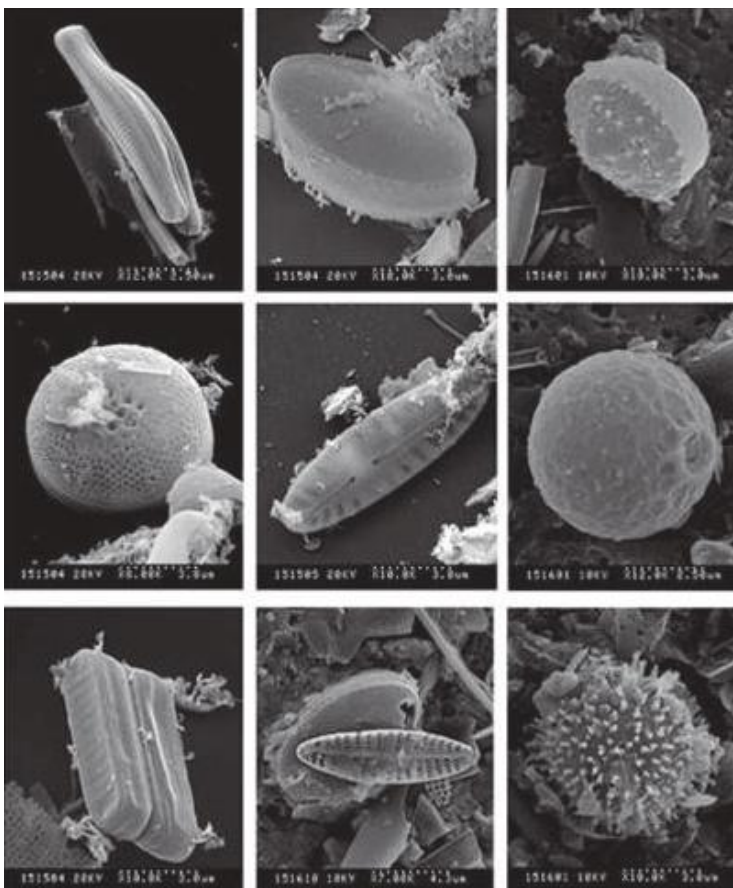
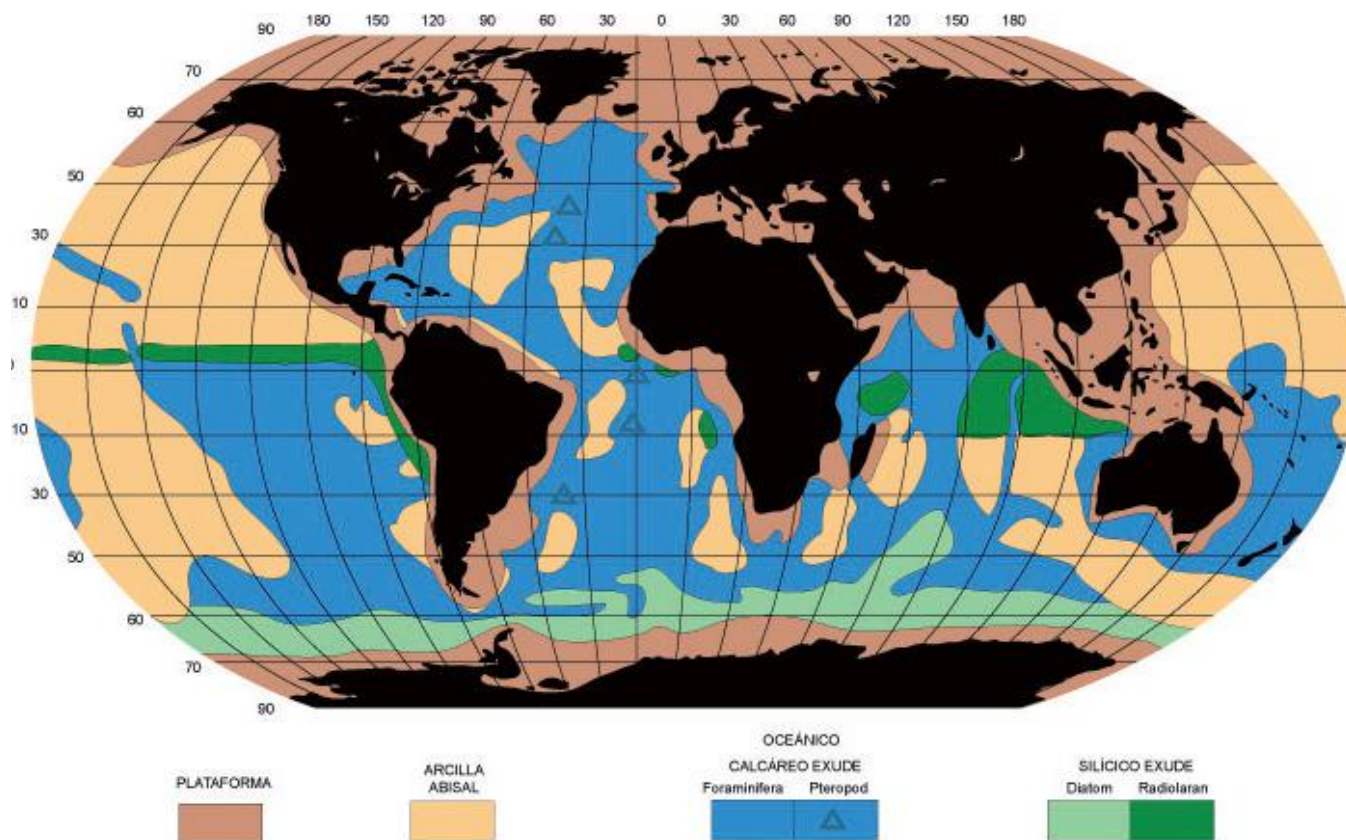


Figura 1.22. Algunas diatomeas marinas.
Fuente: Revista de biología marina y oceanografía. Valparaíso, Chile . 2008.



Otros tipos de depósitos

- **Nódulos de manganeso**

La presencia de recubrimientos de manganeso y óxido de hierro, así como la existencia de nódulos es de ocurrencia común en el piso oceánico. Estos varían desde recubrimientos muy delgados de cocolitos (de diámetro menor a 30 micrones) hasta extensos campos de nódulos cada uno de los cuales puede llegar a pesar 850 kg. En estos nódulos el hierro y el manganeso forman capas concéntricas alrededor de un núcleo de material arcilloso de CaCO_3 o restos volcánicos (Figura 1.24).

Los nódulos de manganeso, más propiamente llamados nódulos polimetálicos son comunes en áreas con una tasa muy baja de sedimentación, como la parte central del océano Pacífico (menor de 1 mm por 100 años) y en áreas sujetas a rápidas corrientes de fondo, como las que ocurren en el estrecho de Drake, entre Antártica y Suramérica.

Figura 1.23. Distribución mundial de los principales tipos de sedimentos del fondo marino.

Fuente: Adaptada por el autor.



Figura 1.24. Fotografía submarina de campo de nódulos de manganeso.

Fuente: Instituto Francés para la Exploración de los Mares (IFREMER).

Evaporitas

Son depósitos producidos por la evaporación del agua y consecuentemente la saturación de algunos minerales en el agua y por tanto su precipitación. Las condiciones más adecuadas para la formación de evaporitas son las que se presentan en regiones áridas que favorecen una alta evaporación, en masas de agua con circulación restringida desde el mar abierto. Las lagunas costeras y mares interiores cumplen estos requisitos. Actualmente, las evaporitas se están formando en cantidades apreciables solamente en áreas muy pequeñas tales como el golfo de California, el Mar Rojo y el Golfo Pérsico. En el pasado geológico se produjeron depósitos tan importantes como los de las salinas de Zipaquirá y Nemocón, en Cundinamarca. A medida que el agua se evapora se inicia la precipitación de carbonatos de calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Después de los carbonatos vienen los sulfatos, particularmente el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La sal (NaCl) empieza a precipitarse cuando el 90% del agua se ha evaporado y las últimas en precipitar son las sales de potasio y magnesio.

1.13. EL AGUA

El agua es uno de los compuestos más increíbles de la naturaleza. La mayoría de los procesos que tienen lugar en el medio ambiente en que vive el hombre, dependen fundamentalmente del agua y sus propiedades.

El estado líquido del agua es raro en el Universo. Dentro del enorme rango de temperaturas que existe en el Universo, solamente dentro de un margen muy estrecho (aproximadamente de 0-100°C) se puede presentar el agua en estado líquido como se presenta en la Tierra.

Las aguas de la Tierra se originan en el mar, ya que las cuencas oceánicas almacenan unos 1 372 millones de km³ de agua salada. De este vasto depósito se extraen anualmente por evaporación unos 334 000 km³ de agua dulce y a través del ciclo hidrológico regresan al mar por precipitación directa y mediante los ríos. Más de 99 000 km³ de agua descienden anualmente en forma de lluvia sobre los continentes (Figura 1.25).

Comparada con otros compuestos químicamente relacionados, el agua se comporta físicamente de una manera singular; por ejemplo sus puntos de congelación y de ebullición deberían ser muchos más bajos, tan bajos que dentro del rango de temperaturas que hoy se dan en la superficie de la Tierra, el agua debería presentarse únicamente en estado gaseoso.

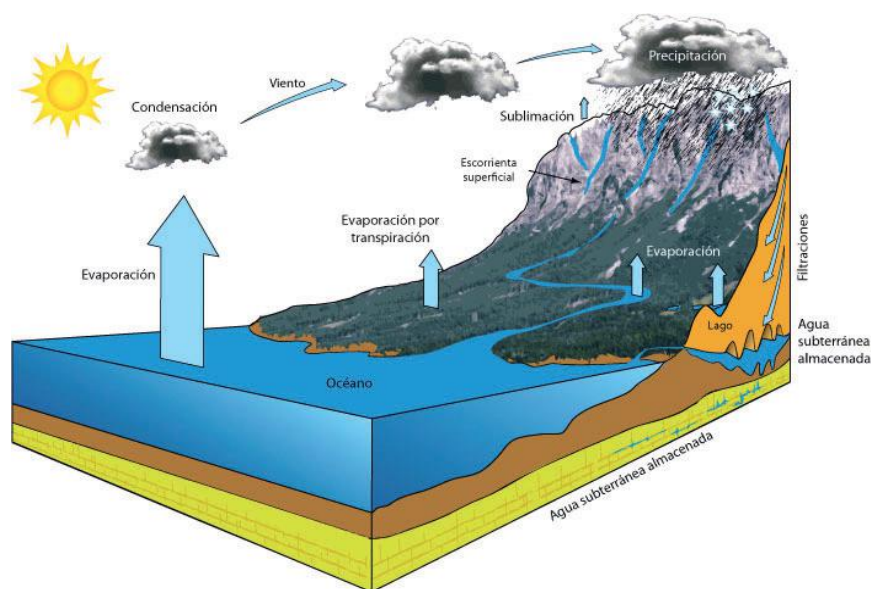


Figura 1.25. El ciclo hidrológico (se muestra los diferentes estados del agua).
Fuente: Modificada de Longwell & Flint (1981).

1.13.1. Propiedades del agua pura

Casi todas las sustancias se expanden al ser calentadas y se contraen cuando se enfrían, pero el agua sigue esta regla sólo parcialmente. A temperaturas por debajo de 4°C se expande si se enfría más y al congelarse a una temperatura alrededor de 0°C sufre súbitamente una expansión de cerca de 9% de su volumen. Si esta anomalía no ocurriera el hielo se hundiría hasta el fondo en vez de flotar sobre la superficie y constituir una especie de cubierta protectora que demora o previene la congelación continua del agua subyacente. Si el hielo se hundiera hasta el fondo, las aguas polares se convertirían finalmente en un bloque sólido de hielo con una delgada capa de agua en la capa superior, únicamente durante el verano.

Hay otras irregularidades en el comportamiento del agua que afectan la vida en la Tierra. Con excepción del amoníaco, la capacidad calorífica del agua es la más alta de todos los líquidos y sólidos que hay en la naturaleza. Esto hace posible que el agua, especialmente el agua de los océanos, almacene grandes cantidades de calor que puede ser liberado a la atmósfera en diferentes tiempos y lugares.

El agua también disuelve más sustancias que cualquier otro líquido y por tanto el mar representa un depósito de gran número de elementos químicos. Algunos de estos compuestos químicos disueltos constituyen los nutrientes necesarios para el crecimiento de organismos microscópicos, el fitoplancton, del cual depende toda la vida marina ya que constituyen el primer eslabón en la cadena trófica.

El agua pura tiene una densidad máxima a una temperatura cerca de 4°C ($3,97^{\circ}\text{C}$). La densidad a esta temperatura es igual a 1 g/cm^3 (Figura 1.26). Cuando aumenta la salinidad disminuye la temperatura correspondiente a la densidad máxima del agua de mar. Cuando la salinidad es superior a 17/1 000 (ppm), la temperatura correspondiente a la máxima densidad se encuentra por debajo del punto de congelación del agua pura. Debido al contenido de sal, el agua marina tiene un punto de congelación más bajo que el agua pura.

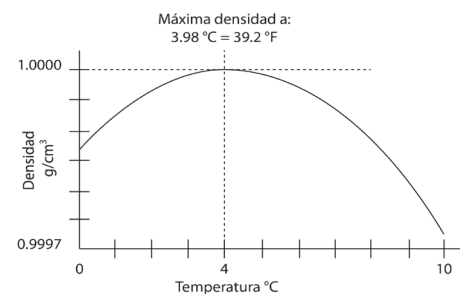


Figura 1.26. Curva teórica de los cambios que sufre la densidad del agua pura con respecto a las variaciones de la temperatura.
Fuente: El autor.

La temperatura de congelación se puede calcular de la fórmula obtenida empíricamente: $T(^{\circ}\text{C}) = 0,0003 - 0,0527s - 0,00004 S^2$; donde S, representa la salinidad del agua expresada en partes por mil o gramos por litro. Según esta fórmula, el agua de salinidad de 30 partes por mil tiene una temperatura de congelación de $-1,663^{\circ}\text{C}$.

1.13.2. El agua de mar como disolución

- **Principales constituyentes**

Químicamente, el agua de mar se puede considerar como una disolución de sales en agua pura, disociada en sus correspondientes iones. El 99% de estas sales está constituido por once tipos de iones, de los que el Cl^- y el Na^+ se encuentran en cantidades muy superiores al resto. Las teorías establecidas para determinar el origen de estos iones han sido variadas, pero hoy se admiten que el agua actual se desprendió del interior de la Tierra como consecuencia de la actividad volcánica, al mismo tiempo que el cloruro de hidrógeno, el anhídrido carbónico y otros gases.

Bastaría con que esta actividad se mantuviese al ritmo actual, una vez consolidada la corteza terrestre, para originar toda el agua que hoy contiene el océano, así como los elementos cloro, azufre, boro y bromo.

Pero así como el contenido en aniones es de origen volcánico, el contenido en cationes es básicamente producto de la meteorización de las rocas de la corteza terrestre, originada especialmente por el cloruro de hidrógeno y el anhídrido carbónico desprendidos de forma lenta. Al verificarse ambos fenómenos simultáneamente, es muy posible que, ni aún en sus principios, el océano fuera ácido y en su salinidad no haya sufrido grandes variaciones hasta nuestros días.

Como es natural, la proporción en que cada uno de los elementos que se encuentra disuelto en el agua del mar es extraordinariamente diferente, variando entre márgenes muy amplios, pues frente al cloro, que es el elemento disuelto en mayor cantidad (18,980 g/kg en un agua de 34,33 de salinidad), hay otras sustancias disueltas en proporciones infinitamente pequeñas, como el radio, del que se encuentran de 2 a 3×10^{-10} mg/kg de agua mar, cuya exacta composición, dada la diversidad de sus componentes y la variadísima proporción en que se encuentran, es muy difícil de determinar.

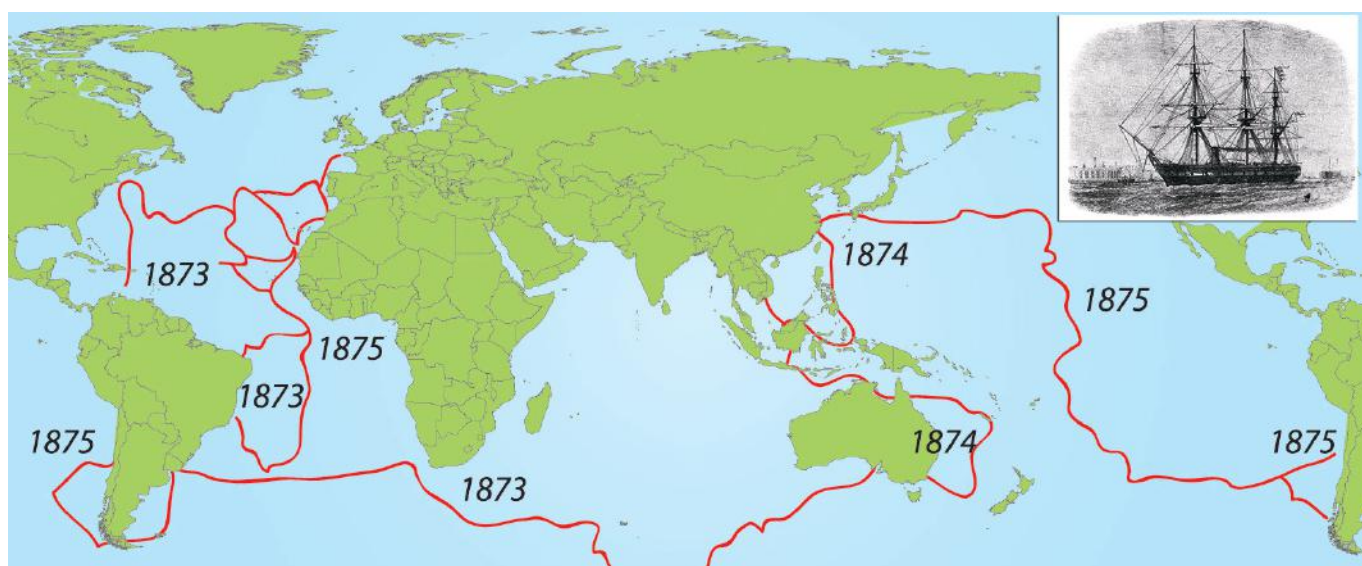
Por razones prácticas, se distinguen entre los constituyentes que se encuentran en mayor proporción y los que se encuentran en menor proporción. Además del hidrógeno y del oxígeno, el agua de mar consta de once componentes principales: sodio, potasio, magnesio, calcio y estroncio, como cationes, y cloruros, bromuros, fluoruros, sulfatos, bicarbonatos y boratos o ácido bórico, como aniones.

Los primeros análisis de las sales disueltas en el agua del mar hechos con rigurosidad científica se deben al químico inglés William Dittmar, quien en 1884 analizó 77 muestras recogidas durante la famosa expedición del buque oceanográfico inglés *Challenger*, que realizó el primer crucero oceanográfico de la historia, a distintas profundidades y en diversos lugares del mundo (Figura 1.27).

Dittmar determinó halógenos, sulfatos, potasio, calcio, magnesio y sodio, constatando que la cantidad absoluta varía con la salinidad, pero la proporción relativa de los principales iones componentes del agua de mar permanece constante. Posteriormente, se ha comprobado que esta propiedad no es absoluta, pero se puede aceptar como hipótesis útil. Sin embargo, no se da en aquellos constituyentes que se encuentran en menores cantidades, tales como nitratos, fosfatos o silicatos, pues por estar incluidos en el ciclo vital sufren grandes variaciones, llegando a agotarse en algunos casos.

Figura 1.27. Ruta realizada durante la primera expedición oceanográfica a bordo del buque inglés HMS Challenger, cuya duración fue de 1000 días y cubrió más de 68 000 millas náuticas.

Fuente: *Ocean Explorer*, NOAA.



- **Gases disueltos**

Todos los gases atmosféricos se hallan en disolución en el agua de mar. Además del nitrógeno y del oxígeno, que son los más abundantes en la atmósfera, puede apreciarse gran abundancia de dióxido de carbono, combinado principalmente en forma de carbonatos y bicarbonatos, y cantidades menores de gases nobles; argón, neón y helio. Además, hay amoníaco y, cuando el oxígeno está ausente, es frecuente la formación de ácido sulfhídrico. En determinadas zonas de aguas estancadas y con activos procesos fermentativos se puede producir otros gases como el metano.

La concentración de los gases en el agua del mar depende de la presión parcial y del coeficiente de solubilidad propio de cada uno de ellos. El valor de este coeficiente varía grandemente con la temperatura y la salinidad, de forma que a mayor temperatura y salinidad, disminuye. Por otra parte, esta variación no es igual para todos los gases, por lo que sus proporciones relativas varían también con la temperatura y la salinidad. Cabe señalar que mientras la relación oxígeno-nitrógeno es aproximadamente 1:4 en la atmósfera, aumenta a un valor de 1:2 en solución en el agua; y aún es mayor la desviación en lo que respecta al dióxido de carbono.

- **Constituyentes secundarios**

Además de los gases disueltos y los constituyentes principales, existen en el agua de mar una serie de elementos a los que llamamos constituyentes secundarios o menores, no tanto porque su importancia biológica o industrial no llegue a ser tan grande como los principales, sino porque su cantidad no alcanza el 0,05% del total de los elementos contenidos en el agua del mar. Lógicamente, estos elementos que se encuentran disueltos en proporciones tan pequeñas (por lo que se llama también elementos de traza u oligoelementos) son frecuentemente muy difíciles de reconocer por un análisis químico normal, pero su existencia está perfectamente probada por el hecho de que, con frecuencia, forman parte de la composición química de los seres vivos que habitan el mar. Aunque se presentan en cantidades reducidísimas, tienen un interés especial.

Algunos constituyentes poseen una concentración relativamente constante, pero la mayoría la tienen variable, debido en parte a



que son indispensables para animales y plantas. Así el cobre, por ser constituyentes de la hemocianina de la sangre en determinados moluscos; el hierro, por formar parte de la hemoglobina de otros; y el vanadio, que intervienen en el mecanismo respiratorio de otros animales. Muchos de estos elementos traza son adsorbidos fácilmente por los organismos vivos y en muchos casos se acumulan en ellos.

Se han comprobado que muchos mecanismos marinos contienen elementos traza en concentraciones hasta un millón de veces superior a las del agua donde viven, y son frecuentes acumulaciones de cien a cien mil veces. Es bien conocida la riqueza en yodo de las algas pardas comparado con el contenido en el agua del mar; la acumulación de mercurio que se presenta en determinados peces, etc. Este poder de concentración de un elemento o de una serie de elementos se atribuye frecuentemente a un grupo particular de organismos e incluso a una especie determinada. Los contenidos de oligoelementos de los peces y moluscos varían considerablemente de un órgano a otro dentro de un mismo animal.

En general, los metales pesados y de transición se concentran en mayor cantidad en las vísceras y en mucha menor cantidad en la carne, músculos y conchas. Muchos de los elementos traza concentrados por los organismos marinos son esencialmente para su crecimiento (por ejemplo el hierro, el manganeso, el cobre, el cobalto, el zinc, el molibdeno, el boro y el vanadio); sin embargo es probable que otros elementos no lo sean.

Aunque las concentraciones en el agua de muchos de estos elementos son del orden de microorganismos por litro o menos, su aumento, aún en muy pequeñas cantidades, bien por causas geológicas o humanas, puede producir variaciones locales apreciables. Probablemente el camino por el que se introducen la mayoría de ellos sea por medio de los ríos después de la disolución, y adsorbidos en materiales en suspensión. Se han observado concentraciones muy elevadas de ciertos oligoelementos a muchos kilómetros de distancia de las desembocaduras de los ríos que lo transportan.

También pueden encontrarse aumentos en la concentración de algunos de estos elementos traza por la acción de volcanes submarinos. Concentraciones relativamente altas de cobalto, níquel y bario hallados en ciertas regiones del océano Pacífico se han atribuido a esta causa.

La distribución marina del plomo se considera que ha sido modificada por las actividades humanas, incrementándose notablemente en los últimos tiempos. Este aumento ha sido, en parte, debido a la utilización de compuestos de plomo en agricultura y actividades industriales, pero sobre todo al uso del plomo tetraetilo añadido a la gasolina. Al pasar el plomo desde la atmósfera al agua, se acumula en las capas superficiales en cantidades próximas a 0,2 µg/L, mientras que en aguas profundas está en concentraciones de 0,03 µg/L.

Esta distribución contrasta con la de muchos otros metales pesados que, en general, se van enriqueciendo con la profundidad. La adsorción por precipitados orgánicos que se forman en el mar y posteriormente se incorporan a los sedimentos, el medio oxidante o reductor y las variaciones de pH son factores importantes para controlar el balance geoquímico de muchos elementos traza.

- **Elementos de proporcionalidad variable**

Entre los elementos que se encuentran en menores cantidades en el agua de mar hay un grupo que tiene una enorme importancia, especialmente desde el punto de vista biológico, por ser componentes fundamentales en la síntesis orgánica y depende de ellos la vida en las aguas marinas. Estos elementos, al ser utilizados por los organismos vivos en gran proporción, no mantienen su constancia en relación con la salinidad y de ahí que se conozcan como elementos de proporcionalidad variable o no conservativos.

Entre estos elementos los más importantes son el nitrógeno y el fósforo que, como en los vegetales terrestres, son imprescindibles para el crecimiento de fitoplancton. Por eso se denominan nutritivos y como se encuentran en tan pequeñas cantidades, se conocen también como micronutrientes.

La necesidad de estos elementos es un hecho perfectamente probado; pues su concertación limita la producción máxima de fitoplancton, aun cuando la luz sea suficiente y, por lo mismo, la de toda la cadena alimenticia: herbívoros y carnívoros. Aquellos organismos que poseen caparazones silicios, tales como las diatomeas, necesitan de este elemento y por tanto pueden reducir apreciablemente el contenido en sílice del agua circundante.



La importancia de cada uno de estos elementos varía de acuerdo con las necesidades de los diferentes grupos de organismos, por lo que el agotamiento de uno u otro depende de la población dominante. En primavera hay una floración de fitoplancton que va consumiendo en primer lugar el sílice y posteriormente el hierro, quedando una parte de nitrógeno y fósforo sin utilizar. A expensas de este fitoplancton se desarrolla una población de zooplancton que asimila el nitrógeno y el fósforo de éstos y va dejando en libertad el hierro y el sílice, produciéndose ciclos vegetales y animales con alternancias cada vez más amortiguadas, hasta que al final del verano se alcanza un equilibrio con el agotamiento de todos los nutrientes.

Los restos de fitoplancton y las excretas del zooplancton se mineralizan en parte en la capa superficial; pero el resto, con los organismos muertos, se deposita en el fondo, donde se descompone. Esto lleva consigo un empobrecimiento en nutrientes de la zona fotosintética.

El enriquecimiento de esta zona en sales nutritivas puede verificarse de distintas formas. En aguas no muy profundas los temporales de invierno destruyen la estratificación del agua, produciéndose una turbulencia que hace que las aguas se mezclen. Ello permite que las sales nutritivas vuelvan de nuevo a las capas superiores.

Otra forma muy importante es el afloramiento de corrientes submarinas que se elevan hasta la superficie llevando consigo los productos mineralizados de los organismos sedimentarios. Este afloramiento puede producirse en zonas litorales cuando el viento sopla con fuerza desde tierra hacia el mar y en aquellas zonas oceánicas donde exista la divergencia de aguas superficiales que favorecen el ascenso de aguas profundas hacia la superficie del mar.

1.13.3. Propiedades físicas del agua de mar

Las propiedades físicas del agua de mar son análogas a las del agua pura; las diferencias que existen son debidas a las presencias de sales disueltas y a las sustancias orgánicas en suspensión interviniendo además el movimiento del océano, de manera que en el agua pura las propiedades físicas están sujetas a dos variables que son la temperatura y la presión mientras que en el agua de mar interviene otra variable que es la salinidad.

- **Temperatura del agua de mar y el balance térmico**

La principal fuente de energía es el Sol; una parte de esta energía que llega a la superficie terrestre es absorbida por el mar y otra parte se refleja al espacio en forma de onda larga. La energía absorbida por el océano es perdida constantemente con lo que establece un equilibrio de energía que no permite el excesivo calentamiento. Las principales formas de ganancia de energía (calor) del océano son:

- La absorción de radiación solar (onda corta).
- Conducción de calor de la atmósfera al océano.
- Conversión de energía cinética en calor.
- Conducción de calor desde el centro de la Tierra hacia el mar.
- Calor producido por los procesos químicos y biológicos que se producen en el mar.
- Condensación del vapor de agua en el mar.
- Las pérdidas de calor son por:

Radiación de la superficie del mar hacia el espacio (onda larga).

Conversión de calor sensible de mar hacia la atmósfera (convección).

Evaporación desde la superficie del mar (calor latente).

De acuerdo con estas pérdidas y ganancias de calor se puede establecer el siguiente balance térmico: la cantidad de calor absorbido por el océano por radiación solar (entradas de calor) es igual a la cantidad de calor perdido por radiación de onda larga saliente, convección y evaporación (salidas de calor).

Del total de radiación solar que ingresa al océano, sólo un 1% alcanza profundidades mayores que 200 m. Así, la variación vertical de la temperatura en el océano se representa por una curva que recibe el nombre de perfil, donde se muestra la disminución de este parámetro con el aumento de la profundidad (Figura 1.28).

En la superficie del océano existe una capa en la cual la temperatura es relativamente constante, se denomina capa de mezcla. Esta capa es de gran importancia ya que en ella se desarrolla la mayor cantidad de actividad biológica y en ella ocurren los principales fenómenos físico-químicos de interés en oceanografía. El espesor de esta capa es muy variable, esto se debe al lugar, época del año, fenómenos

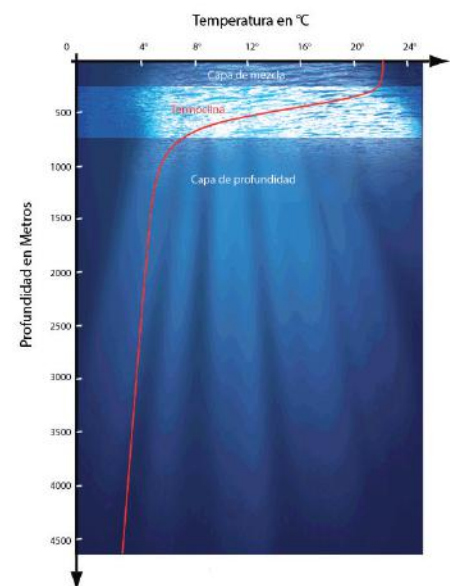


Figura. 1.28 Perfil típico de la temperatura en la columna del agua de mar.

Fuente: El autor.



meteorológicos y otros. Por debajo de esta capa, la temperatura comienza a decrecer drásticamente con la profundidad. Esta rápida transición de la temperatura se denomina termoclina. El gradiente de temperatura tan marcado ($1^{\circ}\text{C}/1\text{m}$) indica que la columna de agua está bien estratificada y por tanto es estable. En la siguiente capa, denominada capa profunda ubicada debajo de la termoclina, las variaciones de temperatura con la profundidad son mucho menores, por lo que se dice que el océano profundo es relativamente homogéneo y poco estratificado. (Ver Unidad 4)

- **Salinidad del agua de mar**

Se definió la salinidad como la cantidad total en gramos del residuo obtenido como sólido en un kilo de agua de mar, cuando todos los carbonatos han sido transformados en óxido, los yoduros y bromuros reemplazados por cloruros y toda la materia orgánica ha sido completamente oxidada.

El agua de mar es una solución compleja de varias sales. El análisis de numerosas muestras de agua marina a lo largo de muchos años ha demostrado que las proporciones relativas de los principales constituyentes son casi constantes. La composición de sales en el agua de mar depende de tres procesos que cambian constantemente como son los físicos, químicos y biológicos.

Procesos físicos:

- Formación de hielos y fusión de los mismos.
- Evaporación y precipitación.
- Mezcla del escurrimiento continental y descarga de los ríos.
- Las surgencias (afloramientos).

Procesos químicos:

- Reacción inorgánica.
- Precipitación y absorción de ciertos minerales.

Procesos biológicos:

- Fotosíntesis.
- Disolución de esqueletos y conchas.

- Extracción del yodo, fósforo y calcio del medio por los organismos vivos.

Las sales, principalmente cloruros, sulfatos y carbonatos, constituyen un componente fundamental, hasta el punto de que se puede decir que básicamente el mar es una solución acuosa de sales; a esta característica corresponde la conocida propiedad de su sabor. Entre las sales destaca por su cantidad la sal común, o cloruro sódico, que constituye por sí sola casi el 78% del peso de la misma y representan más de 27 g/kg de agua de mar.

- **Presión**

Se llama presión a la fuerza que actúa normal a un área (superficie) de fluido. En el mar, la presión que actúa sobre una superficie situada a una determinada profundidad, viene dada por el peso de la columna de agua que gravita sobre ella, más la presión atmosférica que actúa sobre la superficie del mar. Por cada 10 m que se descienda en el mar, la presión aumenta en 1 kg/cm².

La presión se mide mediante manómetros de muy diversos tipos. Indirectamente, en el mar se puede calcular a partir de las determinaciones de densidad y profundidad. Recíprocamente, conociendo la presión que actúa sobre una muestra de agua y la distribución de densidades, es posible determinar la profundidad de donde se extrajo la muestra.

En la actualidad se utilizan los equipos de medición conocidos como perfiladores de profundidad (medida por la presión), temperatura y conductividad (CTD por sus siglas en inglés), los cuales permiten la determinación de la estructura vertical de las propiedades físicas más importantes del agua de mar con una gran precisión.

Las distribuciones de densidad y presión tienen gran importancia en la oceanografía física, pues su combinación con el movimiento de rotación de la Tierra determina la configuración de las principales corrientes del océano.



- **Densidad**

Se denomina densidad absoluta de un cuerpo a la masa de su unidad de volumen. En un laboratorio es posible medir directamente la densidad de un líquido, pero en las campañas oceanográficas es necesario conocer la densidad del agua *in situ*, es decir, en las mismas condiciones que tiene en el lugar que se encuentra.

La densidad del agua del mar (símbolo: ρ ; se dice: *rho*) es directamente proporcional a su salinidad, ya que a mayor salinidad habrá más masa por unidad de volumen. En cambio es inversamente proporcional a la temperatura, la unidad de masa ocupará un mayor volumen y en consecuencia su densidad será menor. También la presión tiene su influencia: aunque el agua es muy poco comprensible, las grandes presiones reinantes en las capas profundas del océano comprimen el agua allí existente y aumentan su densidad. Como se aprecia, la densidad del agua del mar es una función de la salinidad, la temperatura y la presión [$\rho = \rho (S, T, P)$].

Considerando lo aquí expuesto, se entiende que respecto a la densidad del agua de mar, los factores que más intervienen en ella son la temperatura y la salinidad, por ello se diseñó un tipo de diagrama denominado T-S, por sus componentes de temperatura y salinidad, que muestran las curvas producidas por estas dos características en una muestra de agua de mar y ellas definen lo que se denomina, *masas de agua*, pues las curvas graficadas de aguas marinas provenientes de diversos mares del mundo mantienen sus características T-S intactas y por lo tanto son identificables aun si se encuentran en otros lugares diferentes a los de su origen (Figura 1.29).

El término *masa de agua* no debe confundirse con un cuerpo de agua de ciertas características como alta temperatura, a estos se les denomina lenguas de agua o parcelas de agua, las masas de agua, como ya se anotó se identifican por su lugar de origen y las características sostenidas de sus perfiles T-S.

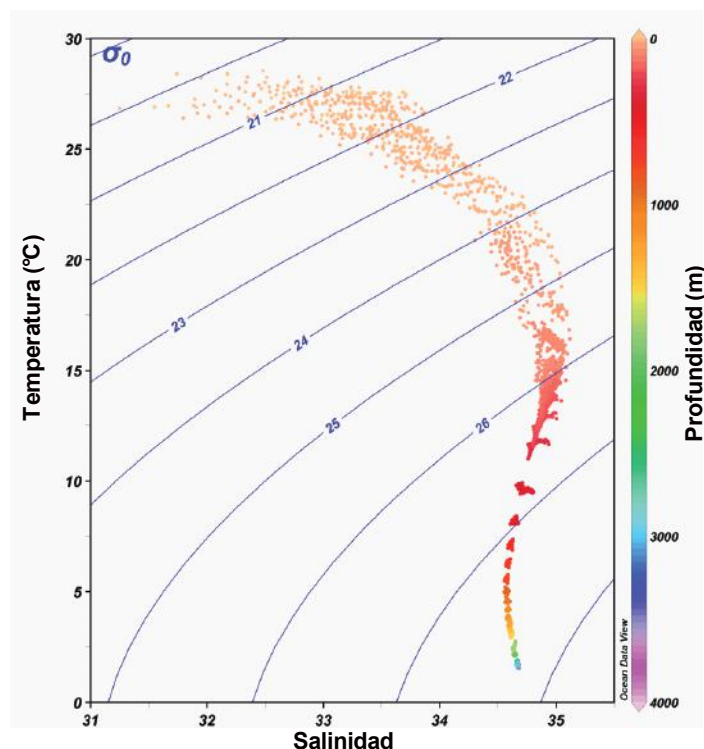


Figura 1.29. Diagrama T-S utilizado para identificar masas de aguas a partir de las características de temperatura y salinidad (colores). La densidad potencial (curvas en azul) es utilizada para definir algunas masas de agua cuyos rangos de T-S son muy amplios.

Fuente: Climatología del *World Ocean Atlas* 2009 (elaborado en *Ocean Data View™*).

El estudio de las diferentes masas de agua y, por lo tanto, de la determinación de la densidad producida por la relación temperatura-salinidad, es una de las operaciones de gran importancia para la oceanografía física, debido a que crea los conocimientos para entender toda la dinámica del océano y proporciona las bases para establecer la síntesis sobre los movimientos del agua del mar.

Teniendo en cuenta las variaciones verticales de la temperatura y la salinidad, aguas más cálidas y menos saladas en la superficie sobre aguas más frías y saladas en el fondo, se puede decir que la columna de agua se encuentra estable en condiciones normales, con aguas más ligeras (menos densas) ubicadas sobre las más pesadas (más densas). Las corrientes marinas son las responsables de distribuir estas masas de agua por lo que es posible encontrar distintas densidades en un mismo nivel horizontal.

Todas las masas de aguas existentes se forman en la superficie del mar, donde adquieren sus características según las condiciones locales y regionales. Estas masas de agua recientes luego migran por la columna de agua, envejecen y con el tiempo pueden considerarse como masas de agua antiguas.



Cuando el agua abandona la superficie al hundirse y distribuirse según su necesidad, se modifican sus propiedades adquiridas al mezclarse con las características de otras masas de agua. Por lo tanto, los procesos que se llevan a cabo en la superficie, así como las mezclas que se hacen en las profundidades, son las causas que dan lugar a la formación de masas de agua, y esta formación depende, principalmente, de las condiciones climáticas y las características geográficas del área en que se encuentra, la topografía del fondo y las corrientes que hay en la zona.

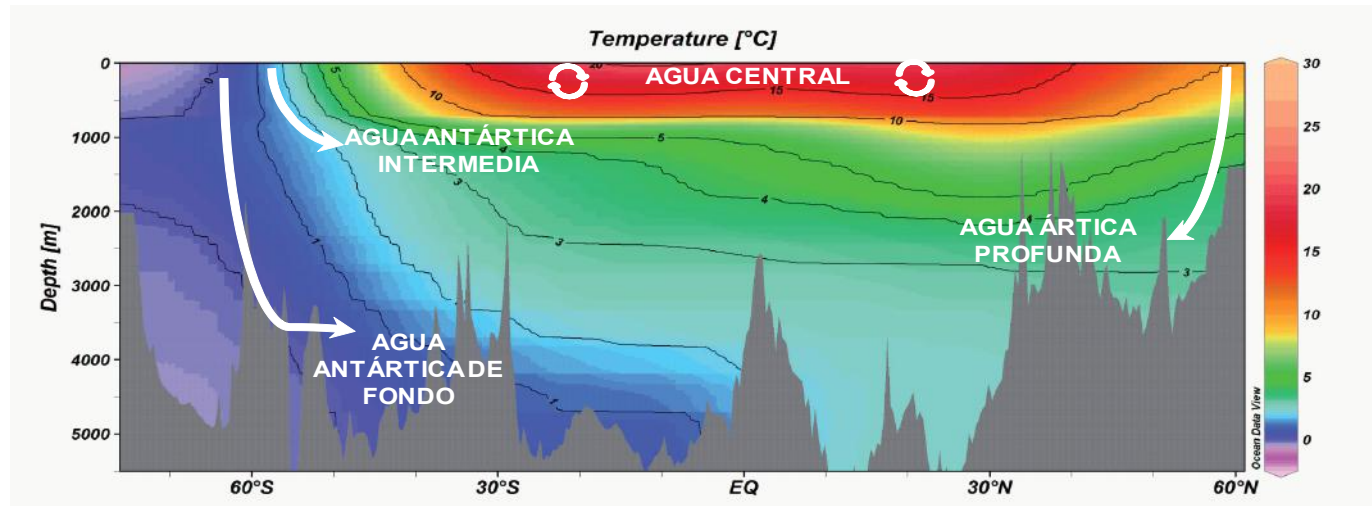
Si en una zona determinada del océano se observa una sección transversal de temperatura, se pueden distinguir cinco tipos principales de masas de agua, aunque no siempre se encuentran los cinco presentes: masa de agua superficial, masa de agua central, intermedia, profunda y por último una masa de agua de fondo; que además reciben nombres particulares según el océano y región de éste en donde se localizan (Figura 1.30).

El agua superficial se encuentra, en general, como una capa de 150 m de espesor, siendo influenciada por procesos climáticos externos y las corrientes locales; y por lo tanto, sus características varían según la región y la época del año, principalmente en las latitudes medias. Se considera que el agua superior está localizada entre los 150 y 700 m de profundidad, separada de la anterior por una zona bien delimitada de temperatura (la termoclina), y se origina del hundimiento del agua superficial, en zonas donde ocurre la convergencia de masas de agua.

El agua intermedia resulta también del agua superficial que se hunde por una convergencia, o de la que se ha formado como agua profunda en una cuenca y derramado por fuera de ella; se encuentra entre los 700 y los 1 500 m de profundidad. El agua profunda es la que generalmente está entre los 1 500 y los 3 000 m y proviene de las altas latitudes por hundimientos de las masas que se localizan a menor profundidad. Los principales sitios de formación de estas masas de agua se ubican en el Atlántico Norte (por esto se denominan masas de aguas profundas del Atlántico Norte, NADW).

La formación de las aguas de fondo se lleva a cabo por el hundimiento del agua superficial que se hace más densa (se enfría y aumenta su salinidad). Este proceso de formación de aguas de fondo sólo ocurre en aguas Antárticas que se caracterizan por las más bajas temperaturas

y altas salinidades durante los meses de invierno austral. Este es el caso de la masa de agua Antártica de fondo (AABW) que se forma en el mar de Weddell.



En la práctica, el valor de la densidad se estima mediante una fórmula empírica aceptada internacionalmente (**Ecuación de Estado**) tomando como base la salinidad de una muestra de agua, y efectuando las correcciones de temperatura y presión del lugar donde se tomó *in situ*. Como es lógico, la distribución y las variaciones de la densidad vendrán condicionadas por sus variables determinantes: es decir, salinidad, temperatura y presión (UNESCO, 1983).

La Comisión Oceanográfica Intergubernamental de UNESCO, a través del Comité Científico de Investigación Científica Marina (SCOR, por sus siglas en inglés), definió un grupo de trabajo para estudiar las propiedades del agua de mar en 2005.

En 2009 se definió la nueva ecuación de Estado, con lo que se logró que los modelos climáticos posean mayor precisión al realizar los cálculos con datos obtenidos de ecuaciones en la forma de una función de energía libre que incluye todas las propiedades termodinámicas del agua de mar. A esta ecuación se le denominó TEOS-10 (*Thermodynamic Equation Of Seawater - 2010*).

La Ecuación de Estado del Agua de Mar anterior (EOS-80) se empleó durante los últimos 30 años y calculaba las propiedades de la presión, volumen y temperatura de una muestra de agua de mar, mientras

Figura 1.30. Sección meridional (norte-sur) de temperatura (°C) que muestra la distribución de las principales masas de agua de los océanos y sus sitios de formación y posterior distribución a lo largo de la columna de agua (flechas).

Fuente: Climatología del *World Ocean Atlas* 2009 (elaborado en *Ocean Data View*TM).



que otras propiedades termodinámicas, como la capacidad calórica, la entalpía y la velocidad del sonido eran calculadas empleando otras ecuaciones (UNESCO, 2010).

Las determinaciones de densidad del mar, tienen gran importancia en relación con los tipos de estratificación; en general, podemos decir que si la densidad crece con la profundidad, existe una estratificación estable, que no se alterará por pequeños desplazamientos verticales del agua. Si la densidad disminuye con la profundidad habrá una estratificación inestable que puede cambiar totalmente por un pequeño movimiento.

Otras propiedades del agua de mar

Existen otras propiedades del agua de mar de importancia en los procesos físico-químicos y biológicos que tienen lugar en el océano. Propiedades como la penetración de luz, el color del océano y la productividad biológica serán discutidas de manera más detallada en los próximos capítulos.

- **Calor específico:** propiedad termodinámica que expresa el cambio en el contenido de calor con los cambios en la temperatura. Depende de la temperatura, salinidad y la presión y se obtiene mediante fórmulas empíricas derivadas de mediciones en laboratorios.
- **Contenido de calor:** es la energía termodinámica. Se calcula usando la medición de temperatura, densidad y el calor específico del agua de mar. Flujos de calor a través de la superficie determinan la cantidad de energía que atraviesa la superficie por unidad de tiempo (vatios/m²).
- **Temperatura potencial:** el agua de mar es casi incompresible. Un aumento de la presión causa que la parcela de agua se comprima ligeramente. Este aumento aumenta la temperatura de la parcela del agua si ésta ocurre sin intercambio de calor con su entorno (compresión adiabática). Así, la temperatura potencial es la temperatura que la parcela de agua tendría si fuera movida adiabáticamente a otro nivel de presión, como es la presión en la superficie del mar ($P=0$).

- **Volumen específico:** es el recíproco a la densidad ($1/\rho$) y se utiliza en el cálculo de las corrientes oceánicas dominadas por gradientes de presión (o densidad) horizontales. Este tipo de corrientes se denominan geostróficas.
- **Velocidad del sonido:** las frecuencias de sonidos que son de interés en la oceanografía van desde 1 Hz (1 vibración por segundo) hasta 1 MHz (1 millón de vibraciones por segundo). Como la velocidad del sonido (c), la frecuencia (n) y la longitud de onda (L) están relacionadas por la ecuación de la onda ($c=nL$), las longitudes de onda del sonido en el océano cubren rangos muy extensos; desde 1 500 m (para $n=1$ Hz) hasta 7 cm (para $n=200$ kHz).

Una de las aplicaciones del sonido en el mar se puede encontrar en el empleo de la ecosonda que permite la determinación de la batimetría (profundidad del fondo oceánico). La velocidad del sonido se obtiene por fórmulas empíricas las cuales están en función de la temperatura y la presión y en menor medida por la salinidad.

En las capas superficiales donde la temperatura es alta, la velocidad del sonido es también alta y disminuye hacia abajo con la disminución de la temperatura. Sin embargo, la presión aumenta con la profundidad, por lo que a profundidades intermedias la disminución de la velocidad del sonido por disminución de la temperatura es compensada por el aumento de la presión.

En la mayoría de las áreas del océano el agua cálida en la superficie y las altas presiones en el fondo producen un canal de sonido con velocidades máximas en la superficie y en el fondo y mínimas entre ellas. Esta región de mínimas velocidades se conoce como canal del sonido SOFAR (*Sound Fixing and Ranging*), el cual es usado en operaciones navales, ya que las ondas de sonido de baja frecuencia (cientos de hertzios) pueden viajar distancias considerables (miles de km) y permiten la detección de submarinos.



1.14. HIDROGRAFÍA

La información contenida en este capítulo se basó en el conocimiento especializado del autor, con la supervisión de pares y sustentado en diversa bibliografía técnica, entre la que se encuentra el Manual de Hidrografía C-13 de la Organización Hidrográfica Internacional – OHI, algunos manuales del Servicio Hidrográfico Nacional de la Dirección General Marítima, otras publicaciones como *Hydrography for the surveyor and engineer* (1987) y diversa normatividad nacional, como los decretos de adopción del sistema MAGNA-SIRGAS del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2113 de 1992 y 208 de 2004), de los que se fundamentó la información general principal para ser posteriormente ampliada o adaptada por el autor para los fines académicos propios de la presente publicación.

1.14.1. Definición de hidrografía

La palabra hidrografía, en español, presenta diversas definiciones, sin embargo en este capítulo se tiene en cuenta sólo aquella que hace referencia al mapeo de los fondos de los cuerpos de agua y su relación con otras ciencias, lo que se obtiene mediante la medición sistemática de sus profundidades.

El término se encuentra definido por el organismo de las Naciones Unidas que lo enmarca y establece sus estándares, se trata de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y define el término como: La rama de las ciencias aplicadas que se ocupa de la medida y descripción de las características del mar y de las áreas costeras con el propósito primario de la navegación y el resto de los propósitos y actividades marinas, incluyendo actividades costa afuera, la investigación, la protección del ambiente, y servicios de predicción. (OHI Pub. S-32).

1.14.2. Importancia de la hidrografía

El desarrollo de una Política Oceánica Nacional requiere una capacidad avanzada para generar conocimiento oceanográfico, geográfico y geofísico marino; de esta manera, los datos que representan exactamente la naturaleza del fondo del mar, su relación geográfica con la tierra, y las características dinámicas del océano en todas las zonas del territorio marítimo permiten el desarrollo nacional

a través del mar. En resumen, la hidrografía, por definición, es la clave para el progreso de todas las actividades marítimas que son de gran importancia para la economía, la seguridad y el bienestar nacional.

Algunos estudios hechos por los Estados miembros de la OHI han sugerido que la relación costo beneficio de los servicios hidrográficos es aproximadamente de 1:10 para las naciones marítimas importantes. Debe también ser notado que, económicamente hablando, el programa hidrográfico nacional debe ser considerado de “interés público”. Es decir que los servicios hidrográficos requeridos por el interés público no podrán ser entregados en sus niveles óptimos al mercado privado.

El Servicio hidrográfico a través de la recolección, procesamiento y análisis sistemático de datos de la costa y el mar, produce y disemina la información que sirve de apoyo a la seguridad de la navegación marítima, a la conservación, defensa y explotación del medio ambiente marino, para tratar adecuadamente la defensa, seguridad y soberanía del Estado en el mar, las áreas de seguridad y operación de tráfico marítimo, administración de la zona costera, exploración y explotación de recursos marinos y protección del medio ambiente marino. En la (Figura 1.31) se muestra una nave de la Dirección General Marítima (DIMAR), diseñada en los astilleros Seaark en Maryland, Estados Unidos.



Figura 1.31. Lancha hidrográfica “Isla Tesoro”, perteneciente a la Dirección General Marítima – DIMAR.

Fuente: Cortesía del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe CIOH, DIMAR, 2013.



1.14.3. Historia

De acuerdo con el Manual de Hidrografía de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), a continuación se realiza la descripción de la historia de la hidrografía.

La carta de navegación más antigua que se conoce es la carta de Pisano, llamada así porque fue llevada a la Biblioteca Nacional de París por una familia de Pisa en 1829. Esta carta fue dibujada a finales del siglo XIII, en una piel animal, probablemente en Génova, en donde había sido establecida una escuela de cartografía marina; había también una escuela similar en Venecia y otra en la isla de Mallorca. Estas escuelas producían las cartas conocidas como “portulanos” que eran similares en estilo y contenido.

La característica más llamativa era la interconexión de las líneas de rumbo obtenidas de la rosa de los vientos que representaba 32 direcciones de vientos, cada uno de los cuales se podía utilizar con los divisores para fijar el curso de los buques. Representaron toda la línea de costa mediterránea y los nombres se escribían sobre tierra, dejando el área marina libre para graficar el posicionamiento del buque. Contenían algunos símbolos como por ejemplo la cruz, que indica rocas sumergidas, pero carecían de algo muy importante, los sondeos de profundidad.

La información de navegación costera fue publicada por primera vez por Pierre Garcie de Rouen en su “Routier de la Mer”, gracias al desarrollo de la imprenta, ilustrando con simples perfiles o vistas del área costera. Este era el paso siguiente al método de pilotaje conocido como “Caping the ship”, que proveía información marinera de generación en generación.

El proyectista Cornelius Anthonisz, de Amsterdam, por medio de bloques de madera, imprimió cartas en papel, su primer trabajo fue el “Karte van Ostland” del mar Báltico y del Norte, adoptando líneas de rumbo y otras características de los portulanos, además de la proyección de Ptolomeo que se había redescubierto recientemente en Constantinopla.

Cuarenta años después, Lucas Janszoon Waghenauer de Enkhuizen en Holanda, imprimió en cartas de papel, la información hidrográfica

recopilada por él durante 49 años en los que navegó como piloto, utilizando el grabado en una placa de cobre. Waghenauer publicó su gran atlas 'Spieghel der Zeevaerdt' (espejo del mar) en 1584, el cual contenía 45 cartas que cubren las costas europeas de Noruega hasta el Estrecho de Gibraltar. Determinó muchas características nuevas como el reconocimiento de perfiles costeros detrás de las líneas de costa; minimizar distancias entre los puertos, de modo que sus aproximaciones se pudieran mostrar a una escala mayor; introdujo también los símbolos para boyas, faros, pináculos de iglesia y redujo los sondeos a su profundidad en la marea media.

El rey Carlos de Inglaterra, frente a tal documento de gran importancia, decidió que todas las costas y puertos británicos debían ser levantados, seleccionando un oficial naval llamado Greenville Collins, a quien le proporcionó el yate Merlín y llamó "Hidrógrafo del Rey". El proyecto inició en 1681 y se desarrolló durante 11 años.

Collins no contaba con mapa topográfico del Reino ni tampoco un método para encontrar la longitud, solo existía el cuadrante para evaluar la latitud. Sus sondeos fueron fijados por compás y cadenas de medición (marcaciones). Las cartas resultantes fueron publicadas en un atlas titulado "Derrotero de las costas de Gran Bretaña", el cual contenía 47 cartas y 30 páginas de tablas de mareas, rumbos de navegación y vistas de costa. Los sondeos y las enfilaciones principales para la entrada a puerto, fueron incluidos en el grabado de las cartas.

Durante el siglo XVI, se creó la Escuela de Hidrografía en Dieppe, Francia, por pilotos de mar, quienes navegaban hacia costas distantes. En 1661, Jean Baptiste Colbert, además de asumir el control no sólo de la escuela de Dieppe, también estableció centros hidrográficos similares en numerosos puertos franceses, permitiendo hacer el levantamiento de toda la línea de costa francesa.

Alexander Agassiz, oceanógrafo preeminente del siglo XIX, atribuyó la primera base científica para la exploración de la Corriente del Golfo al estadista americano Benjamin Franklin, quien publicó un mapa de la Corriente del Golfo en 1769. (Figura 1.32)

Franklin había notado que las embarcaciones provenientes de Inglaterra tomaban mayor tiempo en llegar a las colonias, que los barcos americanos haciendo el mismo recorrido. Su primo, Timothy

Folger, comentó a Franklin acerca de la Corriente del Golfo, lo cual era comúnmente conocido por los balleneros americanos y posiblemente, entre otros capitanes de buques estadounidenses.



Figura 1.32. Mapa de Benjamin Franklin de la Corriente del Golfo, publicado en 1770.
Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA

El mapa de la Corriente del Golfo, permitió a los capitanes de buques, localizar las fuertes corrientes mientras navegaban hacia el este, y evitar navegar en contra de esas corrientes cuando volvían hacia el oeste.

Alrededor de 1775, dos topógrafos británicos, Murdoch Mackenzie y su sobrino del mismo nombre fueron en gran parte responsables de la invención del estimógrafo o estaciógrafo ("station point"), un dispositivo con el cual la posición del buque podía ser posicionada precisamente con la observación de dos ángulos horizontales entre tres marcaciones costeras. Éste fue un importante avance técnico que revolucionó los levantamientos marinos a lo largo del siglo XIX durante el cual la demanda por cartas de navegación para la guerra y la paz aumentó drásticamente.

En 1830, la marina de los Estados Unidos creó un depósito de las cartas y los instrumentos para supervisar su uso en la navegación de buques del gobierno. Matthew Fontaine Maury, un superintendente, quería hacer el transporte marítimo más rápido y más seguro. Posteriormente, Maury organizó la gran cantidad de datos sobre los vientos, las corrientes y el clima estacional en el libro de navegación, en especial en embarcaciones balleneras. Su primera publicación, fue llamada Geografía Física del Mar, siendo el primer libro de oceanografía en inglés. Maury fue llamado el "Padre de la Oceanografía Física".

Con el fin de la I Guerra Mundial, en 1919, los hidrógrafos británicos y franceses, en conjunto, convocaron a una conferencia en Londres, donde se presentaron varias resoluciones referentes a la estandarización de la carta y una resolución para formar una Oficina Hidrográfica Internacional. El Príncipe Alberto I de Mónaco, facilitó un edificio de su Principado para el funcionamiento de esta oficina, donde opera actualmente la Organización Hidrográfica Internacional (OHI).

En Colombia el primer Plan de Cartografía Náutica se produjo en 1965, más tarde, en 1968 se creó la División de Hidrografía en la Armada Nacional y se produjo la primera carta náutica, que fue la Col 101 “Aproximación al Puerto Interior de Tumaco”, posteriormente la División de Hidrografía pasó a formar parte de la Dirección General Marítima y Portuaria. Desde entonces esta División ha evolucionado hasta conformar el actual Servicio Hidrográfico Nacional teniendo un desarrollo importante y encontrándose hoy catalogado como un servicio altamente confiable y reconocido dentro de la OHI.

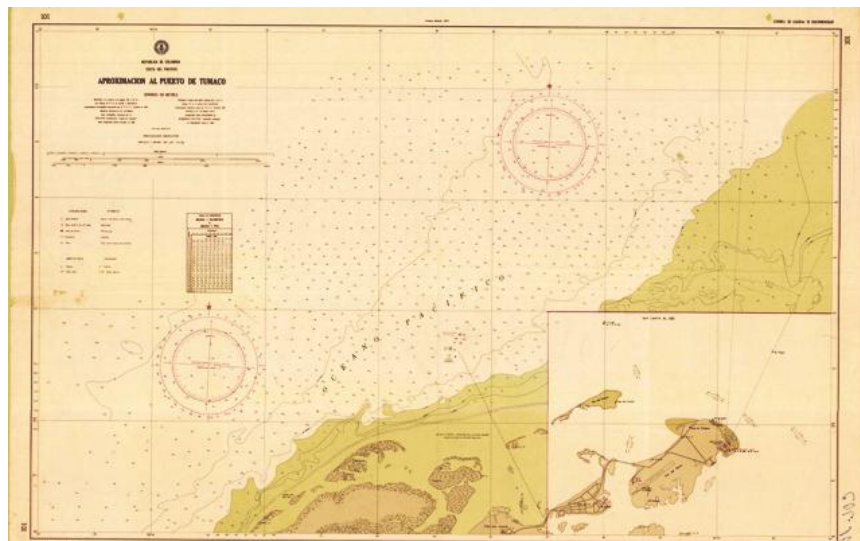


Figura 1.33. Carta náutica Col 101 Aproximación al puerto de Tumaco.

Fuente: Cortesía Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico-CIOH.

1.14.4. Áreas de competencia asociadas con la hidrografía

- **Defensa, seguridad y soberanía del Estado en el mar**

Las marinas de guerra de los Estados son los principales usuarios de cartas náuticas, debido a que deben estar preparados para desplegar su fuerza en el lugar del mundo que les sea asignado, con seguridad para



la navegación. Los riesgos asociados con el transporte de personal, explosivos y material nuclear hacen que sea muy importante que estos buques tengan cartas náuticas actualizadas y extremadamente confiables. Los datos y la información marina proporcionadas por las oficinas hidrográficas nacionales apoyan la variedad de productos usados en las operaciones navales, operaciones de superficie, submarinas, antisubmarinas, barre-minas y operaciones aeronavales.

- **Transporte marítimo**

Más del 80% del comercio internacional en el mundo es transportado por el mar. El comercio marítimo es un elemento básico también de la economía nacional en Colombia, por ello las cartas náuticas modernas son necesarias para la navegación segura a través de las aguas de un país, costas cercanas y entradas a puertos. La falta de cartas náuticas adecuadas impide el desarrollo del comercio marítimo en las aguas y puertos marítimos de un país.

Si las empresas navieras confían en el Servicio Hidrográfico Nacional, asignarán a la zona naves más grandes y rápidas, con lo que se genera un ahorro importante de tiempo y dinero, representando a su vez un ahorro para la economía nacional.

- **Administración de las zonas costeras**

Las zonas costeras requieren información detallada del fondo marino para su mejor administración y organización ya que en ella se genera la construcción de nuevos puertos, el mantenimiento de los ya existentes, operaciones de dragado para el establecimiento y mejora de los canales, control de la erosión costera, recuperación de tierra del mar, establecimiento de emisarios submarinos, extracción de depósitos minerales, estudios de fenómenos que pueden afectar a las poblaciones costeras, como los tsunamis y actividades acuícolas entre otras.

- **Exploración y explotación de los recursos marinos**

Las zonas sedimentarias costeras y costa afuera a menudo contienen depósitos minerales, en particular hidrocarburos, que requieren ser identificados mediante levantamientos hidrográficos adecuados. Una vez confirmada su existencia, el desarrollo de su industria requerirá

el estudio de la morfología del fondo marino, la seguridad en la navegación para el transporte de esta carga peligrosa, la instalación y seguridad de las plataformas costa afuera, la disposición de los sistemas de transmisión en el fondo del mar, colocación de oleoductos y la construcción de pozos de producción.

La industria pesquera también necesita la información hidrográfica no solamente para la seguridad en la navegación de sus embarcaciones, sino también para el despliegue seguro de sus aparejos de pesca, evitando la pérdida de los mismos y de las embarcaciones pesqueras que pudieran encallar en obstrucciones no detectadas o no reflejadas en las cartas, además de permitirles identificar fácilmente las áreas de pesca y localizar claramente las áreas prohibidas o limitadas para pescar.

- **Protección y administración del medio ambiente**

Un factor esencial para la protección del ambiente es la navegación segura. Los desechos y derrames de crudo en el mar son un factor contaminante que puede conllevar situaciones de alto riesgo para las especies marinas propias de la región y para sus habitantes, las consecuencias económicas son del orden de millones de dólares por un sólo incidente y sus efectos residuales de décadas de duración. Esto mismo es aplicado en diferentes escalas, a cualquier otro tipo de contaminante que debe ser transportado con seguridad en el mar.

El capítulo XII de la agenda 21 de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo (UNCED), llevada a cabo en 1992, reconoció que “El cartografiado náutico es de vital importancia para la seguridad de la navegación”.

- **Ciencias marinas**

Las ciencias marinas dependen en gran parte de la información batimétrica. Los modelos matemáticos oceanográficos locales y regionales para una amplia variedad de estudios científicos, la geología / geofísica marina, el despliegue y colocación de la instrumentación científica marina y muchos otros aspectos de las ciencias marinas en general, dependen de la hidrografía para su realización.



- **Infraestructura nacional de los datos espaciales**

La infraestructura de datos espaciales actualmente incluye datos topográficos, geodésicos, geofísicos, biológicos, meteorológicos y batimétricos, lo que indica que cada día más los gobiernos han ido entendiendo la importancia de este tipo de información marina para el desarrollo nacional.

- **Delimitación de fronteras marítimas**

De acuerdo con lo establecido en la Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar los datos hidrográficos son de un alto valor estratégico para los Estados que pretenden definir o aclarar sus fronteras marítimas.

- **Turismo**

Las cartas náuticas son importantes para el desarrollo de la economía, especialmente para lo relacionado con los cruceros como grandes buques para transporte de personal con fines turísticos. El potencial de la industria de los cruceros es especialmente importante para los países en desarrollo, esta fuente de ingresos no puede ser desarrollada correctamente sin la seguridad de la navegación. Igualmente las cartas se vuelven importantes para el paso seguro de yates de turismo, de las marinas que los acogen y para desarrollar la industria del buceo turístico. No sobra anotar que el turismo es una de las industrias de mayor crecimiento del siglo XXI y por lo tanto el empleo de la hidrografía denota una vez más su importancia en la economía nacional.

- **Navegación**

La comunidad de navegantes de recreación representa un porcentaje grande de marinos. Generalmente no es obligatorio que quienes practican la navegación de recreación lleven cartas y a menudo los marinos de recreación no ponen al día sus cartas; sin embargo, con el advenimiento de la información digital, la carta hace posible que el navegante deportivo tenga información actualizada, disponible rápidamente, junto con muchos tipos de información de valor agregado tal como la localización de las marinas, etc. Este desarrollo hace posible que los navegantes de recreación se conviertan en una

parte más grande del mercado de datos hidrográficos, ya que cada vez crece el número de gente que es propietaria de uno de estos botes.

1.14.5. Proceso hidrográfico

- **Relación con otras ciencias**

Habiendo dejado en claro de qué se trata, es necesario indicar que al desarrollarse este tipo de investigaciones en un medio tan complejo como el medio marino, se hace necesario emplear otras ciencias auxiliares que soporten la obtención de resultados precisos a la hidrografía.

A continuación se presentan algunas de las ciencias o tecnologías más empleadas para apoyar el desarrollo de levantamientos hidrográficos y se dan algunas explicaciones básicas puesto que el presente no es un tratado sobre la materia, sino que pretende dar a conocer los fundamentos de la misma para entender su importancia en la hidrografía y en la oceanografía en general.

- » **Geodesia**

Según el Instituto Geográfico Nacional de España, la geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de La Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de La Tierra y la superficie del fondo oceánico. Dentro de esta definición, se incluye también la orientación y posición de La Tierra en el espacio.

Una parte fundamental de la geodesia es la determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre mediante coordenadas (latitud, longitud, altura). La materialización de estos puntos sobre el terreno constituye las redes geodésicas, conformadas por una serie de puntos (vértices geodésicos o también señales de nivelación), con coordenadas que configuran la base de la cartografía de un país, por lo que también se dice que es “la infraestructura de las infraestructuras”.

La geodesia es empleada por la hidrografía debido a que es necesario conocer las formas y medidas de La Tierra para obtener un posicionamiento preciso en ella, sin embargo, la superficie terrestre es tan irregular que se requiere encontrar una expresión matemática

denominada elipsoide, que se acople de la manera más aproximada a la curvatura real de la superficie terrestre para facilitar los cálculos de posicionamiento.

Una vez se conozca la posición y elipsoide de referencia de la estación en tierra, se podrá localizar con una precisión similar, aquella plataforma de investigación que se encuentre en el mar tomando medidas de profundidad o batimetrías, así se pueden cartografiar las formas del fondo del mar con una precisión definida, lo que permite publicar dichas mediciones en mapas denominados cartas náuticas o cartas de navegación, que bajo diversos estándares permite garantizar la calidad de sus datos, facilitando la navegación, evitando el encallamiento de buques, y ofreciendo seguridad para la carga de buques, el medio ambiente marino y salvaguardar la vida humana en el mar.

Con lo visto hasta el momento queda claro que sin la geodesia no hay posibilidad de posicionarse con exactitud en una superficie irregular como la de La Tierra y menos aún en el mar, en donde la falta de firmeza y dinámica de su superficie, hace que cualquier objeto que se encuentre en ella no sea estable y a pesar de ello, es allí justamente en donde es prioritario tener la máxima precisión de las dos dimensiones horizontales (latitud y longitud), para que cuando se determine la tercera dimensión vertical (profundidad), esta sea obtenida bajo estándares de precisión internacionales.

En la figura 1.34 se representa un modelo geodésico general, en el que se pueden identificar la elevación del terreno (superficie topográfica), el elipsoide (figura matemática de una elipse en rotación que se aproxima a la forma de La Tierra) y el geoide (es la curva gravimétrica equipotencial), esta curva se aproxima a la altura del nivel medio del mar y es el dato que se encuentra en las mediciones topográficas de elevación, en los bancos de nivel (bench marks) o en archivos de puntos topográficos o geodésicos. Igualmente se pueden identificar la altura elipsoidal o altura geodésica (h), altura ortométrica o altura sobre el nivel medio del mar (H) y la altura geoidal (N) que se emplea para transformar los sistemas de alturas anteriores y se obtiene del modelo geodésico que emplee el país o lugar en donde se realicen las mediciones.

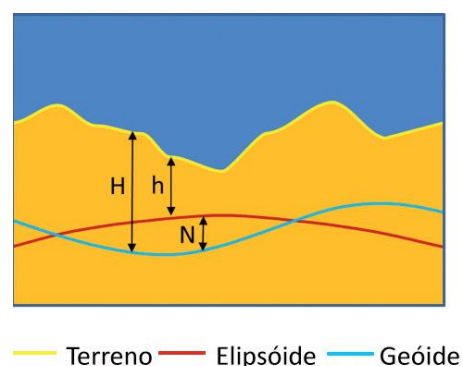


Figura 1.34. Modelo geodésico general.
Fuente: El autor.

La altura ortométrica H se calcula sobre la ecuación:

$$H = h \pm N$$

En el caso de Colombia el modelo geoidal (cuasi-geoidal) es el modelo GEOCOL2004, mostrado en la figura 1.35a y establecido por el IGAC bajo el Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS), que es una extensión del *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF), determinando la Red Básica de GPS (*Global Positioning System*), denominada MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia), que por estar referida a SIRGAS, se denomina entonces convencionalmente MAGNA- SIRGAS.

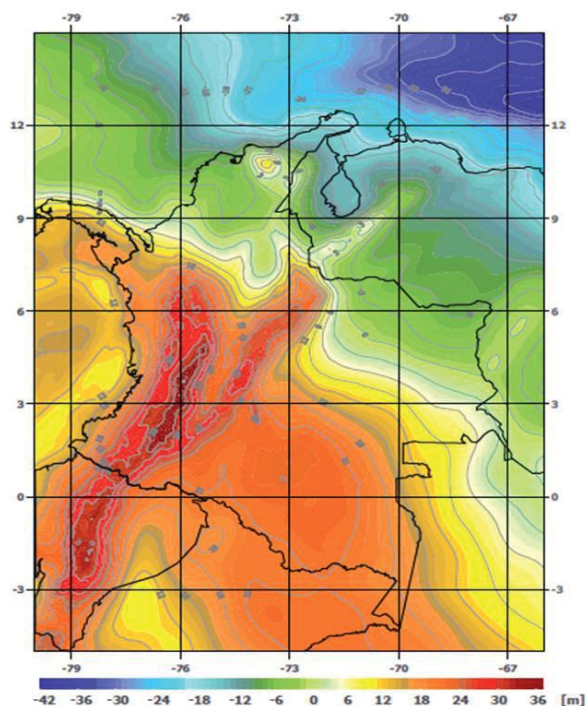


Figura 1.35a. Modelo Geoidal (cuasi-geoidal) GEOCOL2004

Fuente: Cortesía: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Con lo que se ha estudiado hasta ahora en este capítulo se puede intuir que la forma real de La Tierra no se asimila a ninguna de las figuras que se enseñan tradicionalmente en los primeros niveles de educación, sino que es totalmente asimétrica, incluyendo la altura de los océanos. La figura 1.35b muestra el modelo gravimétrico de La Tierra, permitiendo visualizar su verdadera forma en escala vertical exagerada.

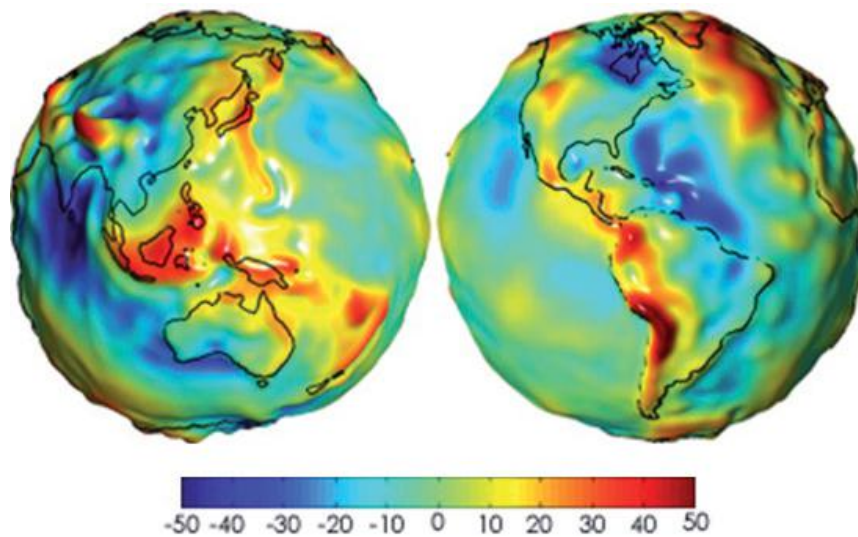


Figura 1.35b Modelo de anomalías gravimétricas terrestres, escala en miligals
Fuente: Cortesía Earth Observatory, NASA.

En la figura 1.36 se explica cómo una elipsoide en color azul oscuro se aproxima a la verdadera forma de La Tierra que está demarcada por líneas rojas; sin embargo otra elipsoide en color verde, se ajusta muy bien a un sector específico de La Tierra, pero no a la gran mayoría de la superficie terrestre, como lo hace la elipsoide azul, igualmente se puede notar que los semiejes mayor y menor de las elipsoides no coinciden con los semi-ejes mayor y menor de la Tierra.

El elipsoide azul simula ser el elipsoide calculado hasta el momento, que mejor se aproxima a la superficie real de La Tierra, este elipsoide se denomina WGS84, por las palabras en inglés World Geodetic System, y haber sido calculado en 1984. El elipsoide verde simula ser un elipsoide local que puede ser empleado para trabajos muy precisos y limitados a un área específica, sin embargo está claro que no se ajusta a cualquier parte de la superficie terrestre.

La diferencia entre el origen de coordenadas terrestres y el origen de coordenadas elipsoidales está dado en tres dimensiones (x , y , z) y se denomina datum. Este datum es el que establece la referencia para ubicar una posición sobre la superficie terrestre, en otras palabras, el datum define el origen y la orientación de las líneas de longitud y latitud; es entonces obvio que si se cambia el datum, es decir el sistema de coordenadas, los valores de las coordenadas que se tomen con el nuevo sistema también cambiarán.

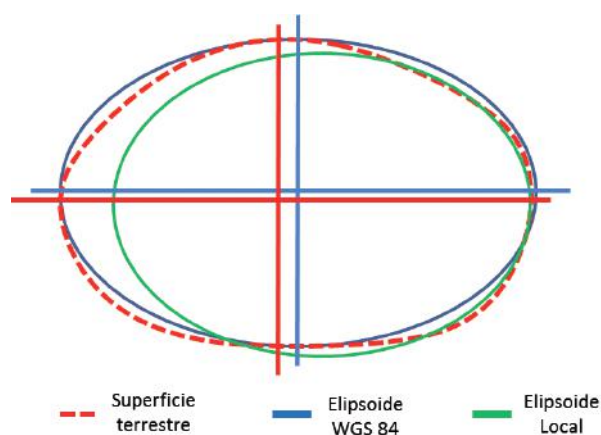


Figura 1.36. Ajuste entre la superficie terrestre y dos diferentes elipsoides de referencia.

Fuente: El autor.

Los equipos de GPS se pueden programar para trabajar bajo una amplia variedad de elipsoides, de manera que teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, cuando se establecen coordenadas con un GPS, se debe ser cuidadoso con medirlas posteriormente mediante el mismo sistema de coordenadas empleado la primera vez y graficarlas en un plano cuyo sistema de coordenadas también corresponda con el sistema que esté empleando el equipo en que se esté estimando la posición, de lo contrario, la latitud y longitud medida con el primer sistema y repetidas numéricamente exactas con el segundo sistema, podrán realmente estar separadas por decenas de metros sin que el usuario lo note, cometiendo un error de posición inaceptable en la precisión que se requiere para la producción cartográfica por parte de los servicios hidrográficos.

Para realizar levantamientos hidrográficos, aun hoy, con apoyo de GPS diferenciales (de la más alta precisión), se hace necesario tener control geodésico de la plataforma de investigación desde estaciones geodésicas de apoyo en tierra, es entonces necesario que tanto los equipos de GPS en tierra, como los ubicados a bordo, se encuentren programados en el mismo sistema de coordenadas y para ello se emplea generalmente el elipsoide WGS84.

Para establecer una posición confiable mediante el sistema GPS, se requiere al menos la recepción de señal de cuatro de los satélites que integran el sistema, tres para posición tridimensional y una para efemérides, los cuales mediante el aprovechamiento del efecto Doppler permiten ubicar la posición del receptor; para incrementar su nivel de precisión se apoyan con otros GPS ubicados en tierra, en



posiciones conocidas e intercomunicados entre sí, lo que se conoce como sistema GPS diferencial, por otra parte al permitir que los receptores de GPS ubicados en tierra obtengan un mayor número de posiciones del mismo punto, cuyos estándares ya se encuentran regulados, durante un intervalo de tiempo suficientemente amplio, se podrá incrementar el nivel de precisión de la posición en el mar, al disminuir estadísticamente la probabilidad de error de la posición muestreada.

» **Topografía**

La topografía se emplea en la hidrografía fundamentalmente con dos fines. El primero es posicionar convenientemente nuevos puntos geodésicos en tierra, para establecer allí estaciones de control hidrográfico horizontal, es decir, aquellos que permitirán mediante diversos métodos, o técnicas preestablecidas, controlar la posición bidimensional del buque en la superficie del mar con el menor error posible.

El segundo fin es determinar la variación de niveles de elevación relativos a un punto previamente establecido. Estos nuevos niveles sirven para relacionar las alturas de marea y posteriormente efectuar el control vertical del levantamiento, lo que implica corregir en el tiempo las variaciones de elevación que se surtan en la plataforma de investigación con la diferencia de las mareas, para con ellas corregir las profundidades medidas y recalcularlas bajo un mismo nivel de referencia invariable.

El párrafo anterior hace referencia a las mareas y en él se denota la importancia que tienen las mismas para el hidrógrafo, ya que estas ondas en la superficie marina generan una elevación variable en el tiempo y modifican constantemente la profundidad (z) en la medida que transcurre el levantamiento batimétrico. Es por ello que se requiere un seguimiento constante al parámetro de elevación (H) durante los levantamientos hidrográficos, para una vez se cuente con el dato de sondeo (profundidad medida z) en el tiempo (t), se descuenta la altura instantánea de la marea (H) en el mismo tiempo (t) y se pueda calcular la profundidad en una posición horizontal determinada (x , y), con respecto a un nivel de referencia previamente definido por el hidrógrafo.

Este nivel de referencia se fija de acuerdo con las características del levantamiento y no siempre es el mismo. Sin embargo para las cartas de navegación, generalmente se emplea el mínimo nivel de referencia posible, con el fin de garantizar al navegante que la profundidad (z) que sea registrada en ellas, nunca exceda la mínima profundidad que pudiera encontrar el navegante en las mínimas condiciones de elevación del nivel del mar.

A los cuidados anteriores, se debe sumar que las cartas náuticas tienen periodos de vigencia estandarizados por la Organización Hidrográfica Internacional, que empiezan a correr después del levantamiento hidrográfico. Este periodo corresponde en menor vigencia a las escalas mayores de las cartas (por ejemplo cartas náuticas de bahías) y de mayor vigencia a escalas menores (por ejemplo cartas náuticas de grandes cuencas oceánicas), estas vigencias se encuentran de manera general entre dos y diez años.

» Proyecciones

Las proyecciones se hacen necesarias para poder representar una superficie curva como la de la Tierra, en la superficie plana de una carta de navegación.

Existen varios tipos de proyecciones que se emplean convenientemente dependiendo del caso específico de la escala y la zona de representación de la carta, pero la forma más empleada de proyección en las cartas náuticas es la proyección Mercator. Imagine un globo transparente, del tamaño de una bola de basquetbol, piense que tiene un bombillo en el centro y un pliego de papel cartulina enrollado alrededor de la bola, si enciende el bombillo las líneas de la bola se proyectarán a la cartulina, este es el mismo principio que se emplea para proyectar el globo terráqueo en el papel de las cartas náuticas, para que al proyectarse las líneas de latitud y longitud, junto con las líneas que bordean las islas y los continentes, dichas formas queden estampadas en la cartulina y en ella se puede ver La Tierra en sólo dos dimensiones (Figura 1.37).

Existen muchos tipos de proyecciones cartográficas, a continuación, en las figuras 1.38a, 1.38b y 1.38c, se presentan algunas de las tres proyecciones más comunes a manera de ejemplo.

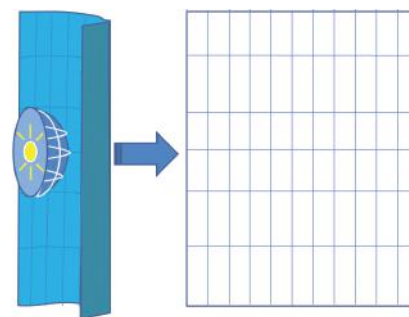
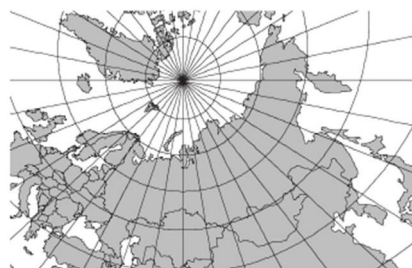


Figura 1.37. Proyección Mercator.
Fuente: El autor.



» Levantamientos Hidrográficos

Habiendo visto la definición e importancia de la geodesia, la topografía y las proyecciones en la cartografía náutica, se facilita ahora comprender el proceso del levantamiento hidrográfico mediante el cual se llegará posteriormente a la producción de la cartografía náutica. Ver figuras 1.39a y 1.39b.

Figura 1.38a. (Izquierda) Proyección Mollweide.

Fuente: Adaptada por el autor.

Figura 1.38b. (Centro) Proyección Mercator.

Fuente: Adaptada por el autor.

Figura 1.38c. (Derecha) Proyección Gnomónica.

Fuente: Adaptada por el autor.

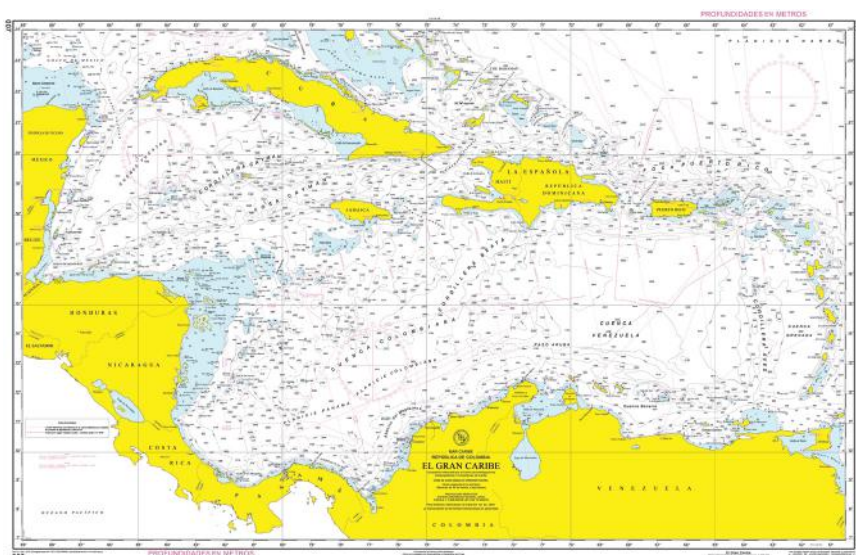


Figura 1.39a. Carta náutica general del Caribe colombiano.

Fuente: Cortesía CIOH del Caribe, DIMAR 2013.

Los levantamientos hidrográficos requieren de la medición en las tres dimensiones del medio marino, en esta sección se explicará la obtención de la profundidad. En hidrografía, a la medición de la profundidad se le denomina batimetría (bathos = profundidad, metros = medida). Igualmente a las líneas de contorno que señalan en una carta náutica la misma profundidad se les denomina isóbatas.

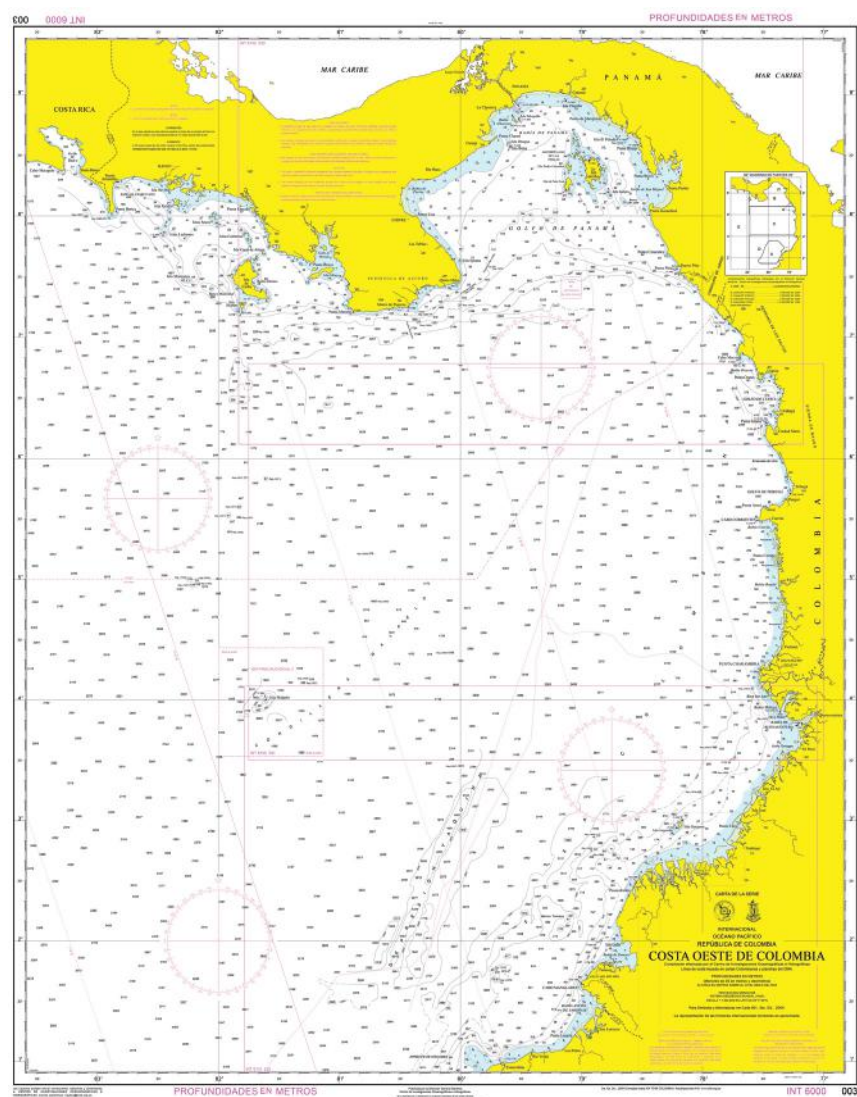


Figura 1.39b. Carta náutica general del Pacífico colombiano.
Fuente: Cortesía CIOH del Caribe, DIMAR 2013.

Una característica muy importante del trabajo en el mar es que los errores de planeación no pueden corregirse ni fácil, ni en corto tiempo, ni económicamente, por lo tanto el hidrógrafo debe esmerarse al máximo en el proceso de planeación con el fin de que las tareas que se hayan programado se puedan ejecutar sin mayores contratiempos o que en caso de surgir imprevistos, puedan ser corregidos porque se tienen a mano los recursos de repuestos, herramientas y conocimiento para solucionarlos, debido a que la operación se planeó con el máximo nivel de detalle, de atención, y se apoyó permanentemente en listas de verificación y en segundas revisiones de verificación y preparación.

En la figura 1.40 se pueden apreciar los elementos esenciales de la hidrografía, que son: el control horizontal en coordenadas (X, Y), brindado actualmente por el sistema de posicionamiento diferencial DGPS; la medición de sondajes (Z), medidos a través de una ecosonda, y el control vertical (H), dado por el monitoreo permanente de las mareas.

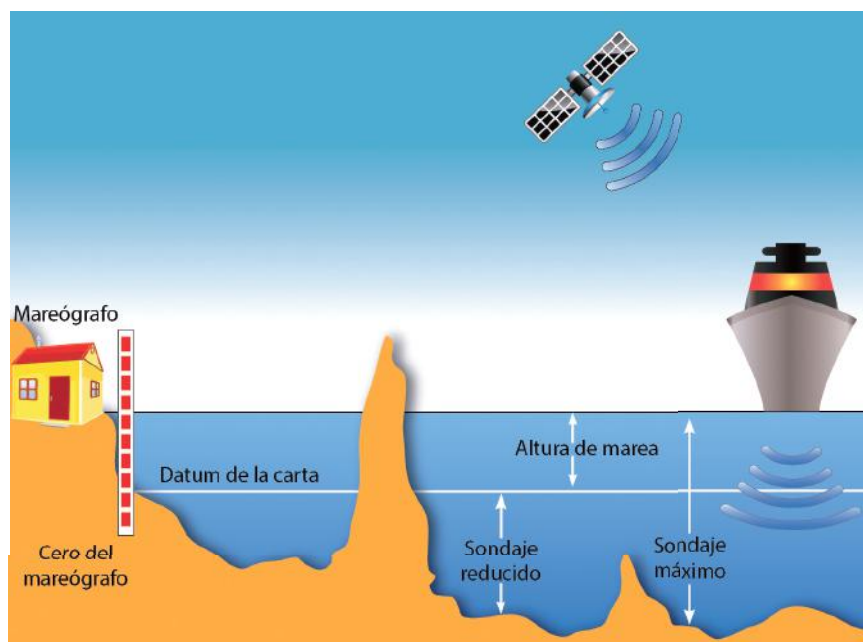


Figura 1.40. Elementos esenciales de la hidrografía.
Fuente: El autor.

En la hidrografía se levanta la línea de costa y los accidentes geográficos que sobresalen del mar, tales como islas, plataformas y otras estructuras marinas, así como los puntos conspicuos que pudieran servir de referencia al navegante, tales como iglesias, chimeneas, torres elevadas o faros, mediante el empleo de aerofotografías georeferenciadas, muy importante que se verifique su posicionamiento por parte del mismo equipo que efectúa el levantamiento hidrográfico.

Las ecosondas son equipos electrónicos que permiten la recolección continua de información de profundidad (sondajes) a través de la emisión de ondas acústicas ya que el medio marino no es transparente a las ondas de luz, pero sí a las ondas de sonido. Sabiendo que estas ondas viajan en promedio a una velocidad de $1\,500\text{ m s}^{-1}$ en agua de mar, es entonces relativamente fácil calcular la profundidad de un lugar al contar el tiempo que se demora la onda en salir del transmisor y regresar al receptor de la ecosonda, esta medición se verifica mediante la ecuación de velocidad.

$$V = S / T$$

V = velocidad del sonido en el agua de mar

S = distancia recorrida por la onda

T = tiempo transcurrido

Como lo que se desea conocer es la distancia recorrida por la onda, al despejar la ecuación se obtiene.

$$S = V * T$$

Y finalmente el espacio recorrido ha sido el doble de la profundidad ya que el sonido debió recorrer una distancia en una dirección hasta encontrar el fondo y después al rebotar, recorrió nuevamente la misma distancia pero en la dirección opuesta para llegar nuevamente a la ecosonda, a bordo del buque, de tal manera que la profundidad de sondaje máximo (Z max) será la mitad de la distancia recorrida por el sonido.

$$Z \text{ max} = \frac{1}{2} S$$

Luego este sondaje máximo (Z max) debe ser reducido por el nivel de marea (H) en cada instante durante el levantamiento, con lo que se obtiene el sondeo final (Z).

$$Z = Z \text{ max} - H$$

Mediante los sistemas modernos se pueden efectuar levantamientos hidrográficos de manera continua con los equipos interconectados automáticamente en tiempo real, recibiendo y transmitiendo datos que en cuestión de milisegundos, permiten visualizar, no solo cada posición y sondaje simultáneamente durante el trabajo de campo, sino tener los sondeos corregidos por el nivel de marea y por el movimiento de la embarcación en todas las direcciones. Este movimiento genera errores debido a la navegación de la embarcación en un medio rugoso como es el mar, lo que no facilita las mediciones verticales de la ecosonda y que por lo tanto deben corregirse también.

De la misma manera estos sistemas facilitan replantear constantemente el levantamiento hidrográfico, ya que se puede observar en pantalla el trabajo realizado y el trabajo pendiente por realizar, permitiendo



corregir fácilmente en campo los errores o falta de información, antes de finalizar el trabajo, con lo que se logra mayor eficiencia y economía.

Las escalas y precisión del levantamiento se definen bajo el tamaño del área a levantar, su profundidad y el tipo de producto que resulta de dicho levantamiento, para ello la OHI define claramente los estándares, que deben ser acogidos con extrema rigurosidad.

En la antigüedad el método empleado para medir las profundidades era la sondaleza, que no es otra cosa que un cabo marcado cada cierta distancia en las unidades que se establecieran para el levantamiento, con un plomo atado a su extremo, de tal manera que se lanzaba, se verificaba cuanta profundidad había alcanzado el plomo, se volvía a recoger y a lanzar cuantas veces fuera necesario para graficar y entender como era el fondo del cuerpo de agua en el que se navegaba. La posición se obtenía mediante un sextante trabajado horizontalmente, lo que permitía medir ángulos entre puntos conspicuos en tierra y graficarlos para ubicar simultáneamente cada sondaje hecho con la sondaleza.

Posteriormente el equipo empleado para las mediciones de sondeo fue la ecosonda monohaz, la cual emitía un solo pulso acústico a través de un único transductor, el sonido entonces hacía su recorrido hasta el fondo, regresaba al equipo y este mostraba un solo dato de profundidad ubicado aproximadamente bajo el casco de la embarcación, mientras que para el posicionamiento horizontal se empleaban al menos tres estaciones de radio en tierra que permitían medir el ángulo desde el buque a cada estación y con ello establecer la posición de sondeo. Estos equipos aunque en versiones más sofisticadas y en la mayoría de los casos, sólo como apoyo a los equipos de GPS que permiten posicionarse con precisión métrica, se siguen empleando para seguridad de la navegación en las embarcaciones comunes, con el fin de verificar la posición y la profundidad en la que se encuentran operando.

Sin embargo, para fines hidrográficos, actualmente se emplea la ecosonda multihaz (Figura 1.41), que a cambio de tener un solo transductor, tiene un arreglo de transductores que se ubican a los costados de la plataforma de investigación, lo que le permite emitir varios haces de sonido en diferentes ángulos laterales, en una línea perpendicular al eje del buque, de manera que cuando se navega no

recoge solo una línea de información batimétrica sino que produce toda un área sondeada. Respecto al sistema de posicionamiento horizontal, el equipo empleado es un GPS, que como ya se explicó tiene otros equipos de GPS ubicados en estaciones geodésicas en tierra con los que se comunica constantemente para corregir su posición al milímetro en tiempo real, este sistema se denomina Diferencial Global Positioning System (DGPS) o sistema diferencial de GPS. Estos adelantos tecnológicos redundan en la eficiencia, economía, resolución y calidad del levantamiento.

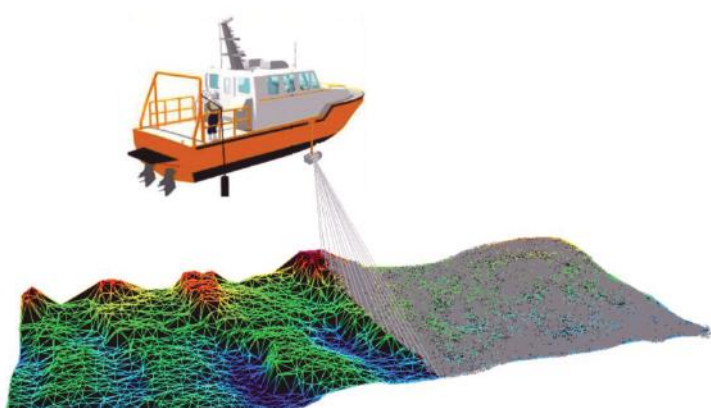


Figura 1.41. Levantamiento batimétrico, mediante ecosonda multihaz

Fuente: Cortesía Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), Dirección General Marítima (DIMAR), 2013.

Una vez finalizado el levantamiento de campo, se lleva la información al laboratorio para revisarla sistemáticamente, corregir los posibles errores bajo los estándares que fija la Organización Hidrográfica Internacional y limpiar los sondeos; esto es, quitar sondeos repetidos y dejar solamente los más significativos, trazando finalmente las isóbatas (Figura 1.42), todo con el fin de no saturar la carta con información para facilitar su lectura al navegante, lo que termina convirtiéndose en un arte.

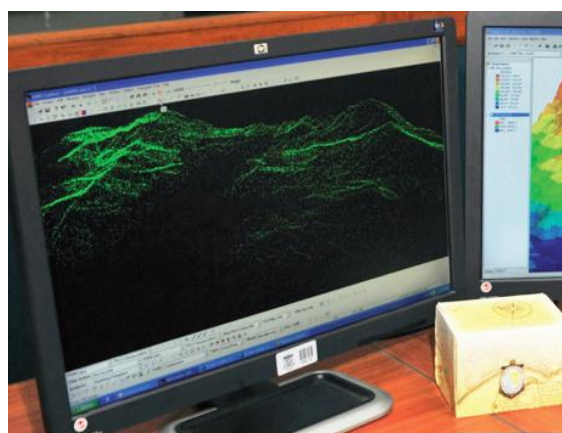


Figura 1.42. Finalización del proceso hidrográfico.

Fuente: Cortesía Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), Dirección General Marítima (DIMAR), 2013.



1.14.6. Proceso Cartográfico

Superado este paso, se integra la información del levantamiento con la información oceanográfica y la información de las aerofotografías, dando inicio al proceso cartográfico, en él se incluyen las márgenes y se traza la grilla correspondiente a la proyección que se vaya a emplear, ya que el levantamiento se debe realizar en un sistema de coordenadas planas UTM (Universal Transverse Mercator), que no permite la visualización de grandes áreas, pero asegura la precisión en áreas pequeñas.

Posteriormente se incluyen los símbolos y convenciones que emplee el servicio hidrográfico bajo los estándares internacionales para boyas, faros, cables submarinos, puertos y otros. Se definen los colores que facilitan la visualización y comprensión de la información, las marquillas y cualquier otra información adicional que debe poseer la carta, como la fecha en que fue producida, la escala, el sistema de coordenadas empleado, la unidad de medida de los sondeos y el número de la carta; este viene definido previamente por el servicio hidrográfico del país y es establecido bajo el Plan Nacional de Cartografía Náutica, en fin, toda la información adicional que facilite al navegante el empleo de este documento para la seguridad de su tripulación personal y de la nave que gobierna.

Actualmente la cartografía náutica se produce en papel y en el formato ENC (Figura 1.43), por sus siglas en inglés (Electronic Nautical Chart), que en español se denomina simplemente carta electrónica. Las ENC se encuentran diseñadas bajo un sistema de información geográfico especializado para cartografía náutica estándar, que permite la integración del archivo digital, con las señales digitales del radar, ecosonda de navegación, corredera, GPS, girocompás y todos los demás equipos de abordó, de tal manera que en el puente de mando se puede estar observando a través del sistema ECDIS (Electronic Chart Display), cada detalle de la navegación en una sola pantalla, pero con la facilidad de poderlo visualizar por capas, para que la información no sature la pantalla del equipo y se facilite su lectura e interpretación en la navegación.

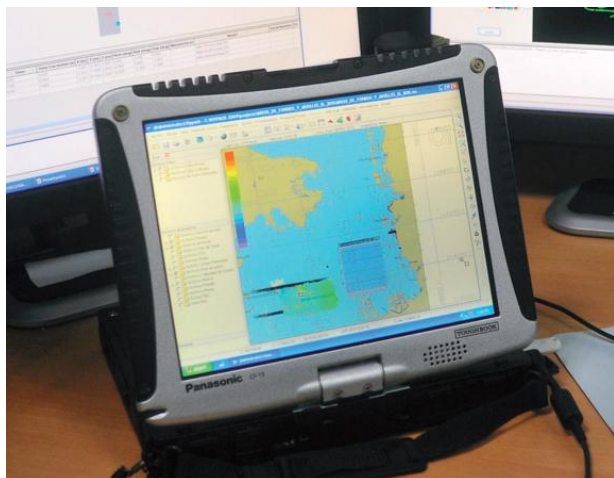


Figura 1.43. Carta Electrónica – ENC.

Fuente: Cortesía Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), Dirección General Marítima (DIMAR), 2013.

Las cartas náuticas terminan siendo documentos legales que se tienen en cuenta en juicios por siniestros marítimos, por lo tanto cualquier omisión implica responsabilidades jurídicas que pueden llegar a ser penalizadas por la ley, por ello la insistencia en la aplicación rigurosa de todos los procedimientos y estándares internacionales que le eviten problemas al personal que las elaboró y a los servicios hidrográficos de los Estados.



PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

Esta práctica tiene como finalidad adaptar al estudiante con el medio ambiente costero.

Objetivos específicos

- Reconocer algunos tipos de costas, sus características y sus procesos costeros.
- Adquirir una noción práctica para graficar técnicamente características costeras.
- Definir las características generales y componentes de la arena de una playa.

Recursos

- Decámetro.
- Brújula y GPS.
- Bolsas plásticas de 1 libra.
- Tamices de diferentes tamaños.
- Lupa o estereoscopio.
- Transportador, teodolito o estación total.
- Probeta graduada de 100 ml.
- Balanza de precisión.

Procedimiento

Ejercicio 1.- Observar las características de la playa y describirlas, longitud anchura, tipo, color, olor y tamaño del sedimento, tipo de vegetación y cuerpos de agua circundantes (si existen), relieve circundante y construcciones u otras obras artificiales que las ocupen (espolones, muelles, naves encalladas, etc), descripción del perfil vertical de la playa (es plana o tiene dunas, hendiduras, etc.), características de las olas (altura, frecuencia, periodo, longitud de onda, dirección), viento (velocidad y dirección). Sacar conclusiones de las relaciones entre todas las características registradas de la playa y presentarlas en un ensayo.

Ejercicio 2.- Recolectar cinco muestras de sedimentos en la playa a lo largo de un perfil perpendicular a la costa. Los puntos de toma

de muestras deben estar representados en un mapa (consignar las características de las muestras que pueden ser determinadas en el campo) y registrar la fecha, hora, posición y profundidad de cada muestra. Las muestras deben ser analizadas en un laboratorio, describiendo la composición del sedimento observada en el estereoscopio, observar si son componentes oscuros o claros y si son similares a rocas o a organismos marinos, concluyendo así el proceso de formación de la playa. También se debe contabilizar el porcentaje de los diferentes tamaños de grano de cada muestra una vez sean pasados por el tamiz, graficar los datos y comparar esta información con la pendiente del perfil vertical de playa y con las olas de la misma para tratar de establecer una relación.

Ejercicio 3.- Levantamiento de un plano para graficar técnicamente las características de la playa. Mediante el empleo del GPS definir las coordenadas de puntos conspicuos en la playa que permitan reflejar en un plano las principales características de la zona del ejercicio.

Definir el perfil horizontal de la playa. Luego empleando el decámetro y un teodolito o estación total, definir el perfil horizontal de la playa, este procedimiento también se puede realizar mediante el empleo del GPS si la playa es suficientemente grande.

Fundamentalmente, el procedimiento consistirá en dibujar la playa contando con ángulos y distancias de sectores no superiores a 10 metros en una curva continua o hasta encontrar variaciones en el ángulo en una playa recta, o cada vez que encuentre una variación importante en una playa muy accidentada (Figura 1.44).

Se debe ilustrar el perfil vertical de la playa (Figura 1.45) usando escalas apropiadas, tanto verticales como horizontales aunque estas dos sean diferentes, de tal manera que permitan usar con la mayor exactitud los datos consignados en el plano. Para poder determinar el perfil topográfico a lo largo de la línea de muestreo se inicia desde el punto más alto y con el teodolito o el nivel se pueden medir los ángulos hacia cada uno de los puntos subsiguientes de medición, es preciso que se tenga conocimiento técnico del empleo de estos equipos para poder efectuar las mediciones estas se pueden realizar en la zona seca de la playa y preferiblemente también en la zona de interacción del mar con la tierra, al menos hasta la zona de rompiente.

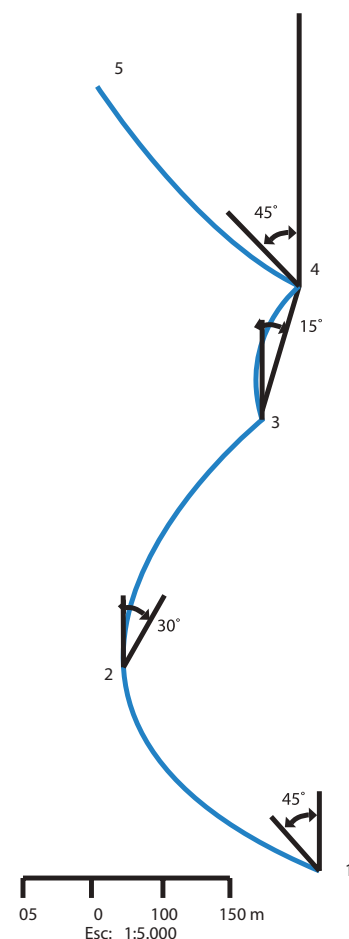


Figura 1.44. Levantamiento del perfil horizontal de playa en un plano
Fuente: El autor.

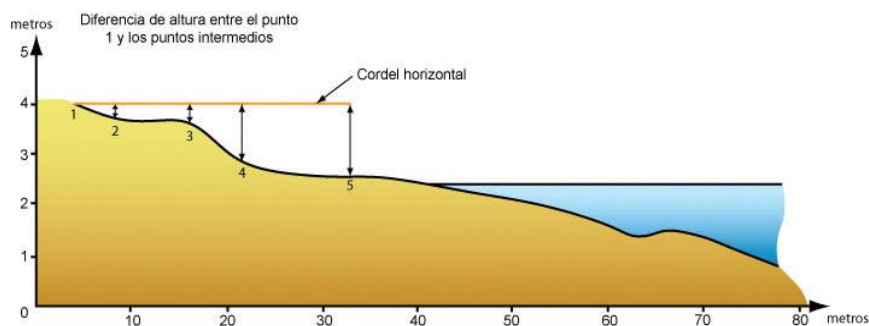


Figura 1.45. Levantamiento perfil vertical de playa.

Fuente: El autor.

En el mapa se debe localizar la línea de perfil en donde se van a tomar las muestras y sobre esta línea se debe medir la distancia entre los diferentes puntos de muestreo.

Lógicamente estos ejercicios indican los procedimientos que se dictan para casos en que sea necesario tomar información en campo, que no haya sido solicitada con anterioridad y que por lo tanto no haya sido planeada debidamente en el laboratorio, sin que requiera alta precisión, sin embargo, para la toma de información científica, se requiere la máxima precisión en la toma de datos, por lo tanto estas campañas deben ser detalladamente planeadas y se debe contar con equipos de la mayor sofisticación, como estaciones totales digitales, GPS diferencial y niveles lásericos.

Se deben tomar muestras de arena y los organismos asociados en las distintas zonas que se puedan observar en las playas, dunas si las hay, berma, zona intermareal (pleamar y bajamar) y si es posible, zona de rompientes. En general, se deben tomar muestras en donde se puede notar un cambio de pendiente, de tamaño del grano, de color de arena, o de cualquier otra naturaleza.

Trabajo de laboratorio

Los experimentos se harán de acuerdo con el material disponible. Si se dispone de una máquina y tamices para hacer el tamizaje del material, se hará un estudio del tamaño de los granos por el método de tamizaje.

El peso de la muestra para tamizar debe ser aproximadamente de 100 gramos. Para poder obtener esta muestra es necesario cuartear la muestra original. Se pone la muestra sobre una hoja de papel,

preferiblemente encerado. Con un cuchillo o una espátula se divide la muestra en 4 partes iguales. Si todavía dispone de suficiente muestra, se vuelve a cuartear en cuatro partes hasta obtener el tamaño y muestra del peso deseado.

Luego se pesa la muestra en una balanza de precisión, se pone una serie de tamices en la máquina de tamizar, los de mayor abertura en la parte superior, luego en forma descendente. Se pone a funcionar la máquina durante 15 minutos. Se retira luego uno de los tamices y se pesa la cantidad de material retenido en cada uno de ellos. Se expresa en porcentajes de la muestra total el peso retenido en cada uno de los tamices. Se expresa la distribución granulométrica por medio de un gráfico de barras (histogramas), de manera que en las abscisas se coloca el valor de las aberturas de los tamices y en la orden del valor del peso retenido en cada tamiz expresado en porcentaje (Figura 1.46).

Si no es posible hacer un análisis por tamizaje se puede realizar la siguiente experiencia. En una probeta graduada de 100 ml, medir 20 cm³ de muestra seca. Llenarla con agua y agitar fuertemente hasta que la muestra se encuentre en suspensión homogénea. Esto se logra invirtiendo repetidamente la probeta. Se pone en una superficie horizontal y se inicia la toma de tiempo con un cronómetro.

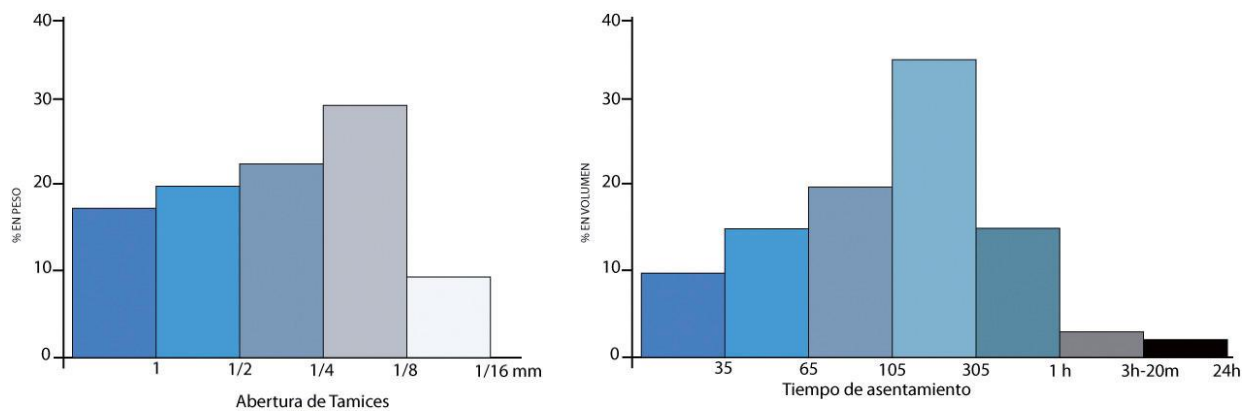
Se estima el volumen de sedimentos decantados en el fondo de la probeta a los 3 segundos, 6 segundos, 10 segundos, 30 segundos, 1 hora, 3 horas y 20 minutos. Finalmente, se mide el volumen total decantado cuando el agua en reposo este perfectamente clara a las 24 horas de iniciado el experimento. Estos tiempos corresponden de manera muy aproximada al tiempo que demora en sedimentarse a través de una columna de agua de 30 cm, esferas de cuarzo de diámetro 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/256 de milímetro. A las 24 horas se espera que hasta las partículas más finas hayan decantado.

Los valores de volumen obtenidos en cada lectura se expresan en porcentajes del volumen total decantado. Con la información así obtenida se elabora un histograma similar al anterior colocando los intervalos de tiempo en la abscisas (Figura 1.47).

Como se puede observar, las partículas más grandes se sedimentan primero y el tiempo de sedimentación está relacionado con el tamaño



de las partículas, de manera que estos gráficos nos dan una idea de la distribución del sedimento. Las gráficas obtenidas deben ser comparadas entre sí y relacionadas con su localización en el perfil de la playa. Se debe promover una discusión al respecto.



Hidrografía

Ejercicio 4. - Marque un punto cualquiera en un espacio abierto e identifique de tal manera que no se modifique totalmente dicha marca. Tome un GPS y prográmelo con Elipsoide WGS 84, mida la posición con latitud y longitud durante 5 minutos y regístrelo. Ahora re programe el elipsoide del GPS en un elipsoide cualquiera que usted seleccione y vuelva a repetir el ejercicio sobre el mismo punto y el mismo tiempo, registre nuevamente latitud y longitud. Repita nuevamente el ejercicio con otra elipsoide y registre los resultados. Escriba un informe breve sobre lo observado y de sus conclusiones al respecto.

Ejercicio 5. - Adquiera una carta náutica, léala e intérprete su información durante media hora y escriba un informe breve de lo que pudo identificar.

Figura 1.46. (Izquierda) Distribución granulométrica (histogramas) del tamizado.
Fuente: El autor

Figura 1.47. (Derecha) Histograma de tiempos de asentamiento de las partículas.
Fuente: El autor

UNIDAD 2

LA ENERGÍA Y LOS MOVIMIENTOS DEL MAR



INTRODUCCIÓN

Este tema es fundamental dentro del programa de Oceanografía, por cuanto el conocimiento de los sistemas energéticos y la acción a través de las interfases aire-mar y tierra-mar, permitirán que el lector comprenda mejor los procesos completos de causa-efecto y los fenómenos derivados de tales procesos, tal como la circulación atmosférica y oceánica, así como los movimientos oceánicos generados por estas interacciones del sistema climático.

Objetivos

- Familiarizarse con la distribución de la radiación solar y la interacción de la litósfera, atmósfera y el medio marino (hidrósfera).
- Reconocer la dinámica de los océanos, en particular las corrientes oceánicas, las fuerzas que las originan y sus efectos sobre el medio marino.
- Identificar las causas que originan cada uno de los movimientos del mar (olas, mareas y tsunamis), y la interacción del medio marino con otros medios.
- Entender las anomalías climáticas asociadas con los eventos El Niño-La Niña Oscilación Sur (ENOS).

2.1. PROCESOS DE INTERACCIÓN ENTRE LA LITÓSFERA, ATMÓSFERA Y EL MEDIO MARINO

2.1.1. La energía solar, fuente de vida del planeta

Prácticamente toda la energía que llega a la Tierra procedente del Sol es interceptada por la atmósfera; una pequeña parte es absorbida directamente, en especial por ciertos gases como el ozono y el vapor de agua; otra parte de la energía es reflejada al espacio por la atmósfera y sus nubes y por la superficie terrestre. La superficie terrestre también absorbe una parte de la energía radiante del Sol. Entre la superficie terrestre y la atmósfera se efectúan intercambios de energía por diferentes procesos tales como la evaporación, la radiación, la conducción y la convección.

La energía cinética (aire en movimiento o viento) es consecuencia de diferencias de temperatura en el interior de la atmósfera. La fricción transforma constantemente cierta parte de la energía cinética en calor. La radiación solar que llega a la Tierra puede dividirse en tres intervalos que dependen de su longitud de onda y sus características:

- Radiación ultravioleta correspondiente a longitudes menores a 0,4 micras (una micra es la milésima parte de 1 milímetro), es invisible.
- Radiación visible correspondiente al intervalo 0,4 a 0,75 micras, en la cual se distribuyen todos los colores del espectro solar.
- Radiación infrarroja correspondiente a longitudes de onda mayores de 0,75 micrones que también es invisible. Cerca del 7% de la energía solar corresponde al intervalo ultravioleta, el 48% a la parte visible y el 45% al infrarrojo (Figura 2.1).

La distribución geográfica del balance de radiación nos indica que es positivo en casi toda la superficie. Según esto, la radiación absorbida sería mayor que la efectiva, por lo cual la Tierra debería aumentar constantemente su temperatura, sin embargo, parte de la radiación absorbida es devuelta a la atmósfera por procesos no radiativos como son, en primer lugar, el intercambio de calor con el suelo por conducción y con la atmósfera por turbulencia y en segundo lugar por las transformaciones del estado del agua. De esta forma se demuestra

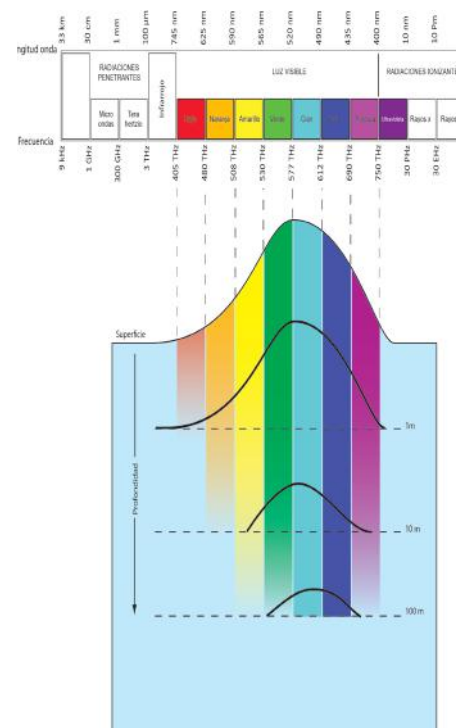


Figura 2.1. Espectro de radiación solar que ingresa a la Tierra vs profundidad de penetración en el mar por longitud de onda, se observa que los azules penetran más profundo que el rojo y el amarillo, igualmente se observan los tres intervalos de longitud de onda característicos (ultravioleta, visible, infrarrojo).

Fuente: El autor.



que la suma algebraica del flujo de calor entrante y saliente de la superficie terrestre debe ser igual a cero, según la expresión sencilla de la ecuación del balance térmico así:

$$R+P+A+L= 0$$

R= balance de radiación

P= intercambio turbulento de calor

A= intercambio conductivo de calor

L= calor debido al cambio de estado del agua

La cantidad de energía que llega al límite superior externo de la atmósfera, a la distancia media de Tierra-Sol, incidiendo normalmente en él, se llama constante solar (S) y equivale a 1,4 cal-g/cm² min.

Si imaginamos que llega a la atmósfera un “paquete” de 100 unidades de energía, equivalentes a la constante solar, S = 100%, observamos que las nubes absorben por radiación de onda corta el 2% y los gases (el ozono, dióxido de carbono, el oxígeno y principalmente el vapor de agua) y el polvo de la atmósfera absorben casi el 17%; esto significa que un total de 19% es absorbido cuando los rayos atraviesan la atmósfera.

La superficie terrestre absorbe alrededor del 47% de la radiación solar: una parte (19%) procede directamente del Sol, otra (23%) ha sido reflejada por las nubes y el resto (5%) llega a la superficie terrestre después de haber sido difundida por el aire. Del total de energía procedente del Sol, el 34% se pierde en el espacio, después de reflejarse en las nubes, en la superficie terrestre o de haber sido dispersada por las partículas del aire. El resto (66%) es absorbido por la atmósfera.

Si bien la atmósfera es relativamente transparente para la radiación solar de onda corta, es también completamente opaca para la radiación terrestre de onda larga que se refleja.

La radiación de la superficie terrestre se establece con base en su temperatura. A la temperatura media de 15°C, la Tierra emite una cantidad de energía equivalente al 114% de la constante solar. Esta radiación es absorbida por los gases de la baja tropósfera, principalmente por el vapor de agua y el anhídrido carbónico.

La atmósfera, por su parte remite hacia el suelo un 106% de esa constante solar. Esta energía generada por la atmósfera y dirigida hacia la Tierra, recibe el nombre de contra-radiación. Es destacable el elevado porcentaje de la contra-radiación, gracias a la cual el planeta es habitable, de lo contrario tendríamos valores promedio inferiores a 0 °C.

Por último, si al 10% radiado por la Tierra directamente al espacio, agregamos la cantidad que se pierde en el intercambio tierra-atmósfera ($114 - 106 = 8\%$), concluimos que en este transporte de energía únicamente se pierde hacia el exterior un 10% del valor de la constante solar, del “paquete” que continúa alimentando energéticamente al globo terrestre (Figura 2.2).

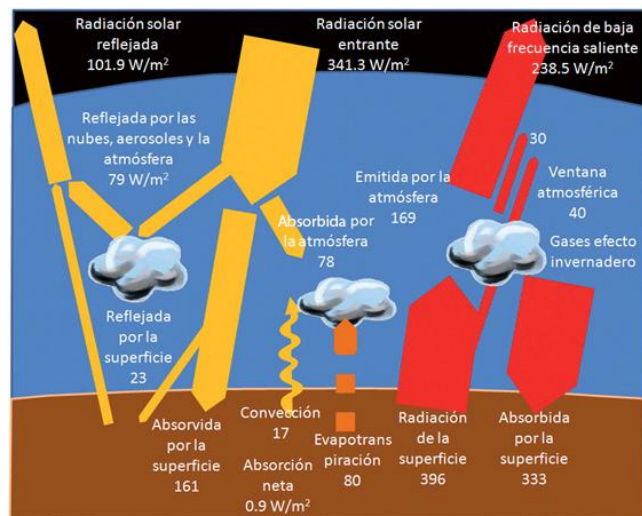


Figura 2.2. Balance de energía anual de la Tierra (en W m^{-2}). El grosor de las flechas indica el flujo esquemático de la energía proporcional a su importancia.
Fuente: Modificada de Kiehl & Trenberth, 1997.

2.1.2. Diferencias de temperatura entre los continentes y el océano

El aumento de la temperatura de la superficie terrestre por efecto de la radiación es variable. Depende, de una parte, de la profundidad a la que penetra la radiación y de otra parte, del calor específico de la materia.

El calor específico de una sustancia es la cantidad de calor necesario para elevar un 1°C la temperatura por su unidad de masa. A excepción del hidrógeno, el agua es la sustancia que tiene más calor específico, es decir: necesita una cantidad importante de calor para elevar en 1°C su unidad de masa.



Cuando el Sol está alto en el cielo, el agua absorbe una gran parte de la radiación incidente; pero como su calor específico es elevado, su temperatura aumenta lentamente. Parte de la radiación incidente penetra en el agua hasta una profundidad de varios metros. Luego, por efecto de la mezcla que se produce en la capa superficial, el calor se propaga hasta una profundidad considerable. Además, una parte de la energía absorbida por el agua se transforma en calor latente durante el proceso de evaporación.

Durante el día la temperatura de la superficie del mar no se eleva tan rápidamente como la de la superficie continental. Por la noche en ausencia de radiación incidente, el agua pierde calor por radiación. Pero como la cantidad de calor almacenado en profundidad es importante, la variación de temperatura en superficie es muy débil. Las oscilaciones entre las temperatura diurnas y nocturnas de la superficie del mar son, por lo tanto, muy pequeñas.

2.1.3. Interacciones océano - atmósfera

Intercambio de materiales terrestres

Cierta cantidad de sal marina pasa del mar a la atmósfera cuando las olas del mar proyectan al aire pequeñas gotas de agua, las cuales al evaporarse, dejan unos cristales de sal que son trasladados grandes distancias por los vientos.

Estos cristales se convierten en núcleos de condensación sobre los que el vapor de agua se condensa para formar nubes. Igualmente, se realiza un intercambio de gases en la superficie que limita el océano y la atmósfera. El oxígeno y el anhídrido carbónico son los más importantes ya que son necesarios para el mantenimiento de la vida en los océanos.

Desde el punto de vista meteorológico el agua se constituye como una de las sustancias más importantes del intercambio entre el océano y la atmósfera. Más del 80% de vapor de agua atmosférico procede de los océanos por evaporación. Esto es especialmente rápido cuando la temperatura del mar es superior a la del aire.

Una gran cantidad de este vapor se condensa después y cae sobre el mar en forma de precipitación. La mayoría de precipitación que cae sobre el continente tiene así mismo, origen oceánico.

Intercambio de energía

Además de los intercambios de materiales terrestres, en la interfase océano-atmósfera se producen igualmente intercambios de energía.

El acoplamiento entre la atmósfera y el océano da como resultado una transferencia de energía en forma de cantidad de movimiento y calor (sensible y latente). Este intercambio energético es condición necesaria para el mantenimiento de la circulación atmosférica y oceánica, la estabilidad de los climas regionales y la producción y modificación de las masas de agua y aire.

La evaporación del agua requiere un aporte de energía que se transfiere a la atmósfera en forma de calor latente de vapor de agua. Esta energía liberada representa la fuente de producción de vientos y tempestades.

Los océanos cubren alrededor de 71% de la superficie terrestre, de modo que una gran parte de la radiación de longitud de onda corta procedente del Sol es absorbida por los océanos que, a su vez, irradian una gran parte de esta energía en forma de radiación terrestre de onda larga. El vapor de agua y el anhídrido carbónico que contiene la atmósfera, absorben esa radiación de onda larga. Esta energía se utiliza para calentar el aire.

Los primeros metros de agua de la superficie del mar absorben la mayor parte de la radiación de onda corta recibida del Sol. Una parte de este calor es transportado hacia el fondo como resultado de la agitación debida a los vientos y a las olas.

Los intercambios de materiales y de energía que se han descrito, constituyen importantes eslabones de la cadena de acontecimientos que implica la circulación de la atmósfera y de los océanos. Los meteorólogos y oceanógrafos prestan gran atención a estos procesos de transferencia que se producen en la superficie de separación océano-atmósfera, con el fin de utilizar este conocimiento para comprender y explicar la ocurrencia de eventos del sistema climático, como los eventos El Niño-La Niña Oscilación Sur (ENOS) y para la predicción del tiempo atmosférico.

2.1.4. El ciclo hidrológico

Una consecuencia importante del proceso de interacción del océano y la atmósfera es el denominado ciclo hidrológico o ciclo del agua en la naturaleza, el cual está definido como la circulación del agua evaporada de los océanos, que viaja a través de la atmósfera hacia los continentes, para luego regresar por vía superficial y flujo subterráneo al mar, tal como se puede apreciar en el esquema que representa la figura 2.3.



Figura 2.3. Ciclo hidrológico.
Fuente: El autor

Esta ciclicidad se debe al Sol, que proporciona la energía para elevar la temperatura del agua y evaporarla, la gravedad, también juega un papel importante pues obliga a que el agua condensada se precipite y que una vez sobre la superficie vaya hacia zonas más bajas. Se supone que el ciclo se inicia cuando una parte del agua contenida en la atmósfera en forma de vapor se condensa y da origen a precipitaciones en forma de lluvia, nieve o granizo.

No toda la precipitación alcanza la superficie del suelo, ya que una parte se vuelve a evaporar en su caída y otra es interceptada y retenida por la vegetación u otros objetos (edificios, construcciones, carreteras, etcétera.) y devuelta a la atmósfera, al poco tiempo, en forma de vapor. Del agua que alcanza la superficie terrestre, una parte queda retenida en charcas o pequeños almacenamientos superficiales y también vuelve a la atmósfera en forma de vapor. Otra parte circula (escorrentía) sobre la superficie formando arroyos, posteriormente, quebradas, ríos y finalmente fluye hacia los lagos o al mar en donde es evaporada o bien es infiltrada en el terreno.

Por último, hay una tercera parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno, se infiltra a través de los agujeros o canalículos del suelo y van relleno los poros o fisuras de este medio poroso. Una buena parte de la infiltración no desciende hasta la zona saturada o de agua subterránea donde regresa nuevamente a la atmósfera por transpiración de las plantas. En la práctica no es fácil separar ambos fenómenos y se suelen identificar bajo el término de evotranspiración.

En todo momento, la atmósfera contiene 10 billones de toneladas de agua; un billón de toneladas caen diariamente a la Tierra y un billón se evapora hacia la atmósfera desde los océanos. Por lo tanto, la atmósfera es un gran depósito de vapor de agua, aunque este sólo representa una cantidad insignificante en relación con los otros gases que componen la misma.

2.1.5. Circulación de la atmósfera

Tanto la atmósfera como el océano en las regiones ecuatoriales reciben una mayor cantidad de radiación solar por unidad de área comparado con las regiones polares. Para mantener el balance de calor en la Tierra, parte de ese exceso de calor es transferido por la atmósfera hacia latitudes altas. Si la Tierra no estuviera en rotación y suponiendo que la superficie del globo es uniforme con igual distribución de océanos y continentes, existiría probablemente un tipo de circulación muy simple entre el Ecuador y los polos, tal como se puede apreciar en la figura 2.4.

El aire en el Ecuador experimenta un mayor calentamiento, por ello sube y se expande creando un área de baja presión atmosférica. El aire más frío de las regiones adyacentes se moverá en dirección al área de baja presión en el ecuador (desde la zona de alta hacia la zona de baja presión) resultando un viento estacionario soplando del norte en el Hemisferio Norte y del sur en el Hemisferio Sur (los vientos se nombran según de donde provienen).

A éste modelo teórico simple de la circulación atmosférica en un sistema sin rotación se han opuesto numerosas objeciones de orden científico y por ello se ha desarrollado un modelo más complejo para la Tierra en rotación. En este modelo el movimiento del aire tendrá una aparente deflexión del flujo hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur. Este movimiento aparente

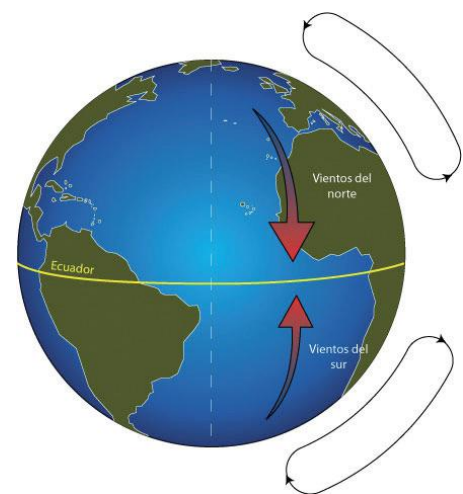


Figura 2.4. Circulación atmosférica probable y vientos resultantes para la Tierra sin rotación, donde los aires fríos descenderían en los polos y circularían por la superficie terrestre hacia zona ecuatorial donde ascenderían por acción de la radiación solar.

Fuente: Adaptada por el autor.

es conocido como efecto de Coriolis. Así, en lugar de desplazarse en línea recta a lo largo del gradiente, desde la zona de alta hacia la baja presión, fluirá reflejando a lo largo de caminos curvilíneos (Figura 2.5).

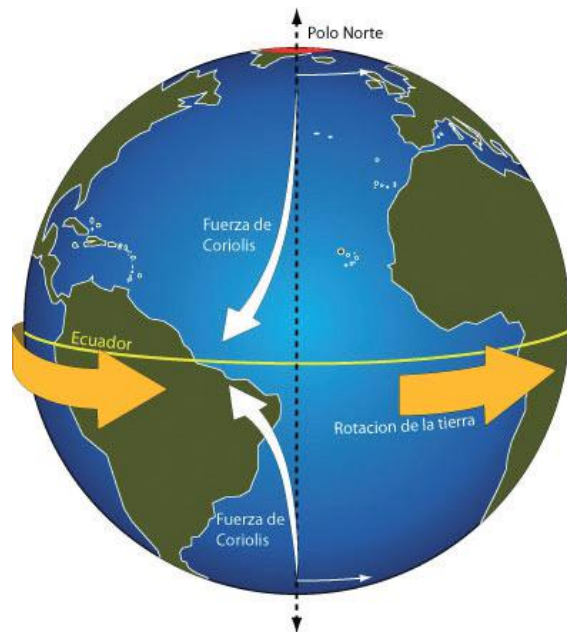


Figura 2.5. Efecto Coriolis produce una desviación aparente del viento a la derecha (izquierda) en el Hemisferio Norte (Sur).
Fuente: Adaptada por el autor.

En el modelo más avanzado, en el Hemisferio Norte, el aire caliente que asciende en el Ecuador fluye hacia el norte en dirección al polo, a medida que se aparta del Ecuador es reflejado hacia la derecha enfriándose y eventualmente desciende en la latitud de 30°N , aproximadamente (Figura 2.6).

Parte de este aire comprimido completa el giro caminando hacia el sur en dirección al Ecuador (celda de Hadley); la otra parte continúa hacia el norte en dirección al polo. Este aire es calentado por transferencia de calor desde la superficie de la Tierra y asciende a la altura de los 60°N , regresando en altura hacia el Ecuador, descendiendo aproximadamente en 30°N , formando así la segunda celda en la circulación (celda de Ferrel).

Finalmente, en la región polar el aire desciende sobre el polo y avanza hacia el sur hasta que se calienta lo suficiente como para subir nuevamente en una latitud aproximada de 60°S retornando hacia el polo en altura y formando así la tercera celda de circulación atmosférica (celda polar).

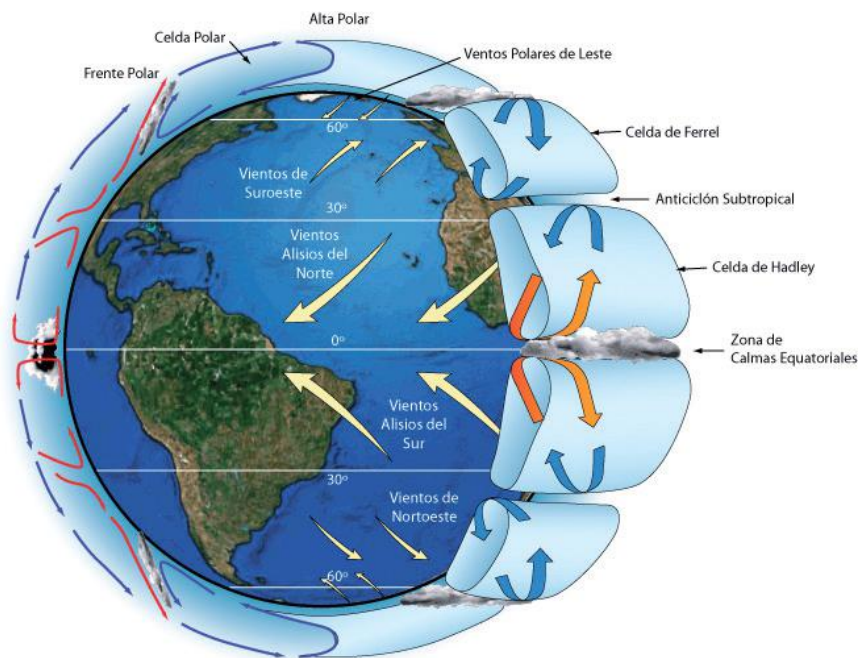


Figura 2.6. Modelo de circulación para el planeta en rotación que consiste de tres celdas principales en cada hemisferio.
Fuente: Adaptada por el autor.

Es importante recordar que cuando un meteorólogo se refiere a un viento oeste, él quiere decir que éste sopla desde el oeste. Cuando un oceanógrafo se refiere a una corriente oceánica oeste, él quiere decir que ésta va para el oeste.

Cuando se habla de proceso de interacción océano-atmósfera se habla de una capa de aproximadamente un kilómetro de altura de la atmósfera y cien metros de profundidad en el océano, esas son las capas que interactúan con mayor facilidad y se ven más afectadas mutuamente.

Por lo anterior, es necesario que cuando se estudie la interacción océano-atmósfera en oceanografía, se tengan muy presentes los fenómenos que suceden en la tropósfera (Figura 2.7) y en el océano en la misma escala de tiempo. La primera capa oceánica, que está en contacto directo con la atmósfera se denomina capa de mezcla, justamente por sus características especiales que le ha dado la interacción directa y permanente con la atmósfera y que hace que parámetros como el oxígeno, la salinidad y la temperatura, tengan características especiales.

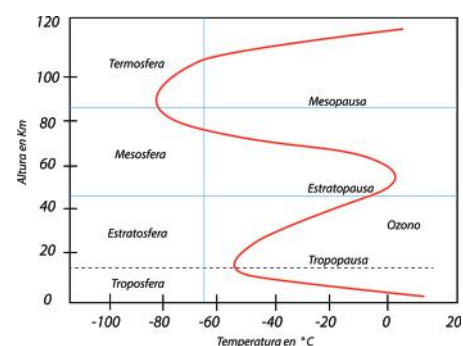


Figura 2.7. Variación de la temperatura (curva roja, en °C) de las distintas capas atmosféricas.
Fuente: Organización Meteorológica Mundial, Agosto de 2013.



2.1.6. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)

Cuando en las capas bajas de la atmósfera, las masas de aire que se mueven horizontalmente desde distintas direcciones se encuentran en cierta región, este aire se ve forzado a ascender por conservación de masa, produciéndose convección. El área de encuentro de las masas de aire de bajo nivel se denomina zona de convergencia.

Una de las características más sobresalientes de la circulación atmosférica en regiones tropicales es la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual se ubica en las bajas presiones ecuatoriales, donde los vientos alisios del noreste y el sureste, cargados de calor y humedad producto de la evaporación superficial y el calor sensible, se encuentran y forman una zona de alta convección, nubosidad y precipitaciones.

El calor latente liberado en este sistema de convección atmosférica de la ZCIT es un componente crítico del balance energético del planeta; el aumento de la nubosidad asociada es además un factor importante que contribuye a determinar el albedo global.

Los flujos de calor, humedad, momentum y radiación entre la atmósfera y el agua superficial adyacente varían dramáticamente entre la región de la ZCIT y las regiones al norte y sur de ésta, por lo que la posición, estructura y migración meridional (norte-sur) de la ZCIT juega un rol fundamental en la determinación de las características del sistema climático global y en los procesos de interacción océano-atmósfera a escala local y en la circulación de los océanos tropicales.

Dentro del curso del ciclo anual, ocurren cambios estacionales en la ZCIT. En general, esta franja de activa convección atmosférica tiene una migración meridional asociada principalmente a la insolación. Durante los meses de primavera y verano en el Hemisferio Norte (abril a septiembre) la ZCIT se desplaza hacia el norte, mientras que durante los meses de otoño e invierno (octubre a marzo) migra hacia el sur (Figura 2.8).

Las diferencias observadas en la ubicación de esta franja de bajas presiones ecuatoriales a las diferentes longitudes está dada en parte por las distintas características de la superficie (ya sea terrestre u oceánica) y los patrones locales del clima. La ZCIT sobre la tierra sigue

la marcha anual del Sol, mientras que sobre áreas extensas de agua (como los océanos) ésta se retrasa uno o dos meses debido a la gran inercia termal de la capa de mezcla oceánica comparada con la de la superficie terrestre. En la región tropical de América la ZCIT ocurre sólo en el Hemisferio Norte mientras que en el sureste de África y en el Pacífico oeste esta zona de convergencia de los vientos se ubica en el Hemisferio Sur en enero y en el Hemisferio Norte en julio.

En Colombia, la oscilación meridional de la ZCIT constituye el mecanismo físico de mayor importancia para explicar el ciclo anual (o semi-anual) de la hidro-climatología de la región. Sobre el centro del país se presentan dos temporadas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto) como resultado del doble paso de la ZCIT sobre el territorio; este ciclo anual es unimodal. Por el contrario, en las regiones norte y sur de Colombia, la ZCIT sólo pasa una vez por lo que durante el ciclo anual ocurre únicamente una temporada lluviosa y seca.

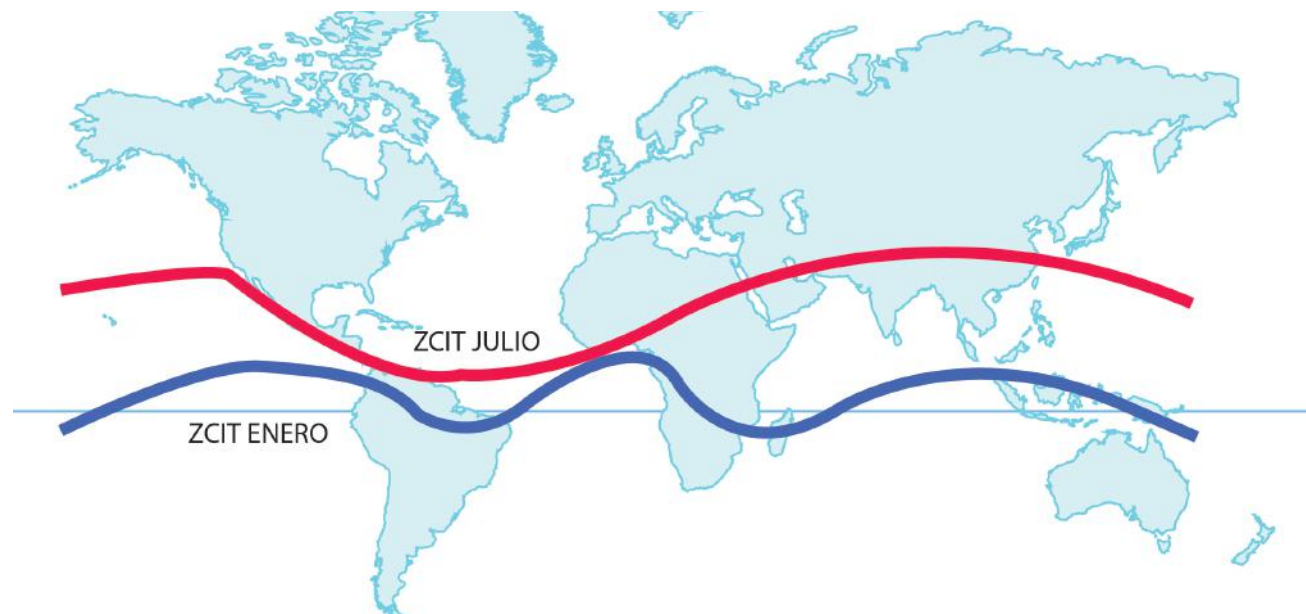


Figura 2.8. Variación estacional de la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) a lo largo de todo el planeta. En azul se muestra la posición aproximada de la ZCIT en los meses de invierno boreal (verano austral); en rojo su posición en verano boreal (invierno en el Hemisferio Sur).

Fuente: Adaptada por el autor.



2.1.7. Ciclones tropicales

La atmósfera busca permanecer en un estado de equilibrio, de manera que cuando el aire se acumula en algún lugar, naturalmente estas moléculas de aire se desplazarán hacia otro sitio en donde haya menor resistencia o menor cantidad de moléculas de aire por unidad de volumen, de tal manera que se pueda equilibrar la presión atmosférica entre los centros de alta y baja presión.

En los mapas de presión atmosférica, las isobaras (líneas de igual presión) casi nunca son rectas, sino que tienen amplias curvas. En ocasiones se pueden cerrar isobaras aproximadamente circulares tanto de altas como de bajas presiones. El viento que se mueve aproximadamente según la dirección de las isobaras sigue trayectorias cerradas en torno a esos centros. Debido al efecto de la rotación de la Tierra (efecto de Coriolis), el viento que se mueve en el Hemisferio Norte se desvía hacia la derecha haciendo que gire en sentido anti-horario (horario) alrededor de los centros de bajas (altas) presiones.

Los centros de bajas presiones se denominan ciclones y el viento alrededor de éstos se llama circulación ciclónica porque tiene el mismo sentido de la rotación de la Tierra (anti-horario en el Hemisferio Norte y horario en el Hemisferio Sur). Los centros de altas presiones se denominan anticiclones y al viento que fluye alrededor de éstos se le conoce como circulación anticiclónica.

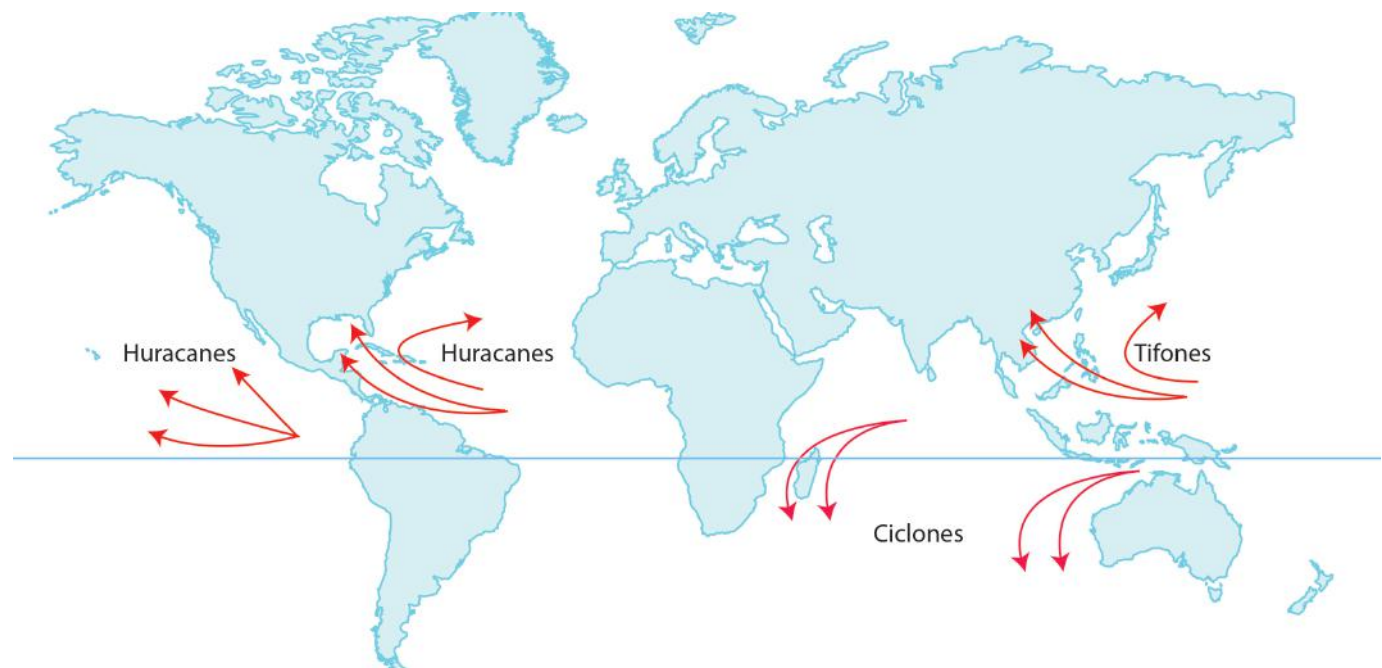
Sobre el océano ecuatorial el agua es muy cálida por acción de la radiación solar, lo que facilita que el aire que está cerca de la superficie del mar se evapore y ascienda rápidamente, con lo que se crean allí centros permanentes de baja presión. Las tormentas más grandes y violentas de la Tierra son conocidas como huracanes, tifones o ciclones según el lugar en donde se generen. El término científico para todas estas tormentas es ciclón tropical. Los ciclones tropicales que se forman sobre los océanos Atlántico y Pacífico Oriental denominados huracanes (Figura 2.9).

Los ciclones se clasifican según la intensidad de sus vientos en:

- **Ciclón tropical:** sistema formado por nubes con movimiento definido con vientos máximos sostenidos menores a 60 km/h.

- **Tormenta tropical:** sistema formado por nubes con movimiento definido cuyos vientos máximos sostenidos varían entre 61 y 120 km/h.
- **Huracán:** es un ciclón tropical de intensidad máxima en donde los vientos máximos alcanzan y superan 120 km/h, aunque se han observado vientos de hasta 250 km/h en los más violentos. Tienen un núcleo definido de presión en superficie muy baja que puede ser inferior a 930 hPa.

Los huracanes son grandes perturbaciones que se producen en regiones tropicales de la atmósfera donde las aguas del océano son relativamente cálidas (alrededor de 28°C) y el aire gira a gran velocidad en torno a un centro de baja presión, abarcando una extensión de varios cientos de kilómetros.



Otra clasificación dada a los ciclones tropicales se basa además de la velocidad del viento, en el daño causado a las estructuras en tierra y en la magnitud de la elevación del nivel del mar causado por la tormenta (Tabla 2.1).

Figura 2.9. Ciclones tropicales y otros nombres que reciben según su origen.
Fuente: Adaptada de *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.



Tabla 2.1 Categorías de los ciclones tropicales según la velocidad sostenida de los vientos, los daños causados en tierra y la altura del nivel del mar asociado a dicha de tormenta. Fuente: Adaptada de National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Categoría	Velocidad del viento (km/h)	Daño en tierra	Marea de tormenta (metros)
1	119 a 153	Mínimo	1,2 – 1,8
2	154 a 177	Moderado	1,9 – 2,5
3	178 a 209	Extenso	2,6 – 3,6
4	210 a 249	Extremo	3,7 – 5,5
5	Supera los 249	Catastrófico	5,7 +

Los ciclones tropicales son verdaderas máquinas termodinámicas gigantes que usan como combustible el aire cálido y húmedo que se encuentra sobre los océanos ecuatoriales. Este aire se eleva desde cerca de la superficie creando un área de menor presión atmosférica sobre el océano.

El aire con mayor presión de las áreas circundantes fluye hasta llenar el área de baja presión. Con el tiempo, este “nuevo” aire también se torna cálido y húmedo elevándose nuevamente, mientras que el aire circundante gira para ocupar su lugar. A medida que el aire cálido y húmedo va llegando más alto, la temperatura disminuye y al enfriarse, el agua contenida en el aire forma nubes. Todo el sistema de nubes continúa girando y creciendo, alimentado por el calor del océano y el agua que se evapora en la superficie.

Al girar el sistema de tormenta cada vez más rápido, se forma un ojo en el centro. En el ojo todo es muy tranquilo y claro, con una presión de aire muy baja. El aire de presión alta superior desciende hacia el interior del ojo (Figura 2.10).

Los ciclones tropicales por lo general se debilitan y mueren cuando tocan tierra, porque ya no se pueden “alimentar” de la energía proveniente de los océanos. Sin embargo, a menudo avanzan bastante

tierra adentro causando mucho daño por las lluvias y el viento antes de desaparecer por completo.

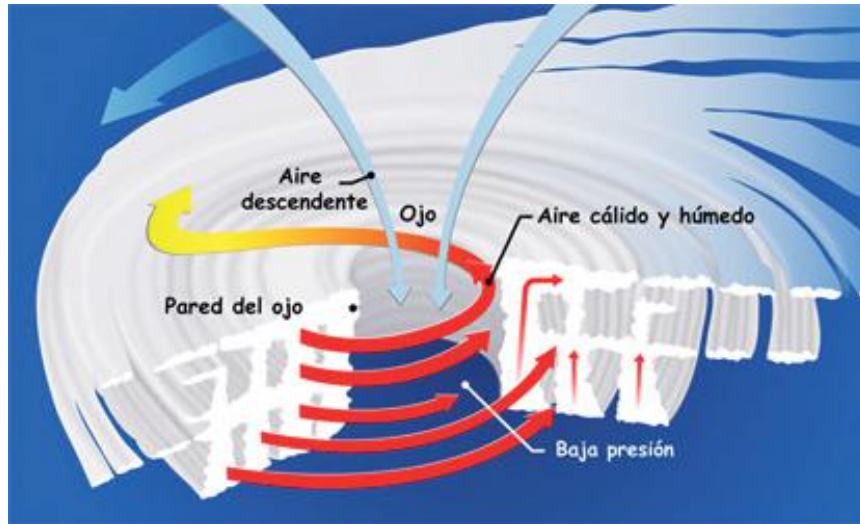


Figura 2.10. Formación de un huracán. Las flechas rojas pequeñas muestran el aire cálido y húmedo que sube desde la superficie del océano y forma bandas de nubes alrededor del centro de baja presión. Las flechas azules muestran cómo el aire frío y seco baja hacia el ojo y por entre las bandas de nubes. Las flechas rojas grandes muestran la rotación de las bandas de nubes que se elevan.

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Los ciclones tropicales intensos son particularmente difíciles de observar, ya que son fenómenos oceánicos muy peligrosos, y las estaciones meteorológicas existentes están relativamente muy esparcidas y rara vez se ubican en sitios donde ocurren las tormentas. Las observaciones superficiales están generalmente disponibles si éstos pasan sobre islas o cerca de áreas costeras.

Es por esto que para hacer pronósticos y seguimiento a los ciclones tropicales lejos de las costas se deben utilizar observaciones satelitales. El satélite Aqua se encarga de estudiar el ciclo del agua, el satélite Terra realiza investigaciones científicas, los satélites GOES vigilan permanentemente las condiciones marítimas desde 35 680 km sobre la superficie de la Tierra y capturan imágenes desde el espacio cada 15-30 minutos, a medida que la tormenta se acerca a tierra se pueden observar con radares Doppler ubicados en la costa.

Los efectos y daños previstos de un ciclón tropical no dependen solamente de la velocidad del viento, sino también de factores como la velocidad de desplazamiento; la duración de los vientos fuertes y las precipitaciones ocurridas durante el evento y después de que éste se produce; del cambio repentino de la dirección en la que se desplaza el ciclón y de su intensidad; de la estructura del ciclón tropical y también de la respuesta humana a los desastres ocasionados por el ciclón en cuestión.

2.2. CORRIENTES OCEÁNICAS

2.2.1. Circulación oceánica general

Los sistemas de corrientes oceánicas superficiales corresponden con bastante exactitud a los tipos generales de vientos. El patrón básico de las corrientes oceánicas es un sistema llamado GIRO.

Cada océano presenta un gran giro de corrientes centrado aproximadamente en las regiones subtropicales de ambos hemisferios (cerca de los 30°N y 30°S). En los océanos Atlántico y Pacífico Norte hay giros de corrientes más pequeños centrados aproximadamente en los 50°N. En el Hemisferio Sur la gran corriente de deriva occidental que rodea la Antártica pone en comunicación los sistemas de corrientes de cada uno de los tres océanos.

Cada giro está constituido por cuatro corrientes. Los límites norte y sur del giro están marcados por corrientes de dirección casi este-oeste (zonales), uno de los cuales fluye casi directamente hacia el este y la otra va hacia el oeste. A estas corrientes del océano abierto van a unirse corrientes fronterizas norte-sur (meridionales) que fluyen casi paralelas a los límites continentales (Figura 2.11).

Las corrientes variables como las “corrientes estacionales de los monzones” cerca de Asia no están bien definidas, pese a las observaciones recogidas en diversas estaciones durante muchos años.

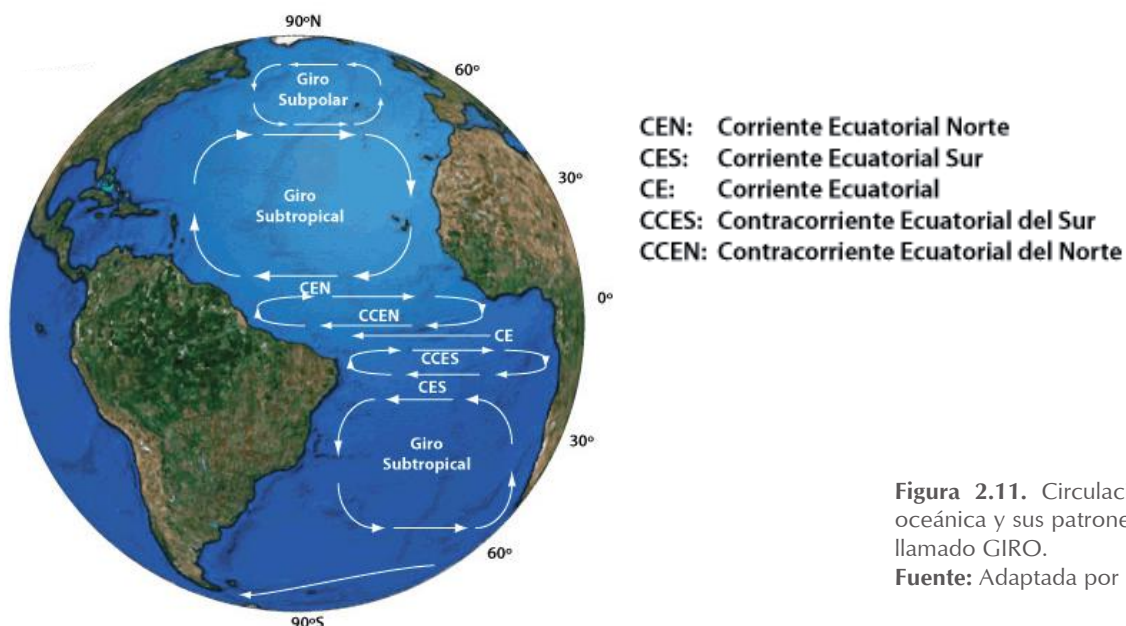


Figura 2.11. Circulación superficial general oceánica y sus patrones básicos de corrientes llamado GIRO.

Fuente: Adaptada por el autor.

Las corrientes del océano abierto, como la corriente del Pacífico Norte o las corrientes ecuatoriales norte y sur, fluyen a razón de 3 a 5 km diarios y generalmente penetran hasta 100 o 200 m de profundidad.

La corriente hacia el Este más importante es la gran corriente de deriva del viento del oeste (*westerlies*). Da la vuelta a la Antártica y forma parte de los giros de corrientes del Hemisferio Sur en cada uno de los océanos.

Las corrientes de frontera occidentales fluyen generalmente hacia el Norte en el Hemisferio Norte, y hacia el Sur en el Hemisferio Sur; son corrientes muy intensas y se caracterizan por ser relativamente estrechas, en forma de chorro. La Corriente del Golfo y la de Kuroshivo son las más rápidas; sus aguas avanzan de 40 a 120 km diarios. Así mismo, son las que penetran a mayor profundidad: 1 000 m o más. Las corrientes de frontera occidentales del Hemisferio Sur, como la Corriente del Brasil y la Corriente del Este de Australia no son tan intensas como las del Hemisferio Norte.

Las corrientes de frontera oriental como la de California o la de Canarias son más débiles y más anchas que sus similares occidentales. Por su transporte de agua fría hacia los trópicos, las corrientes de borde oriental como la corriente del Perú-Chile (Humboldt) o la de Benguela también desempeñan un papel en el balance global de calor.

2.2.2. Corrientes oceánicas inducidas por el viento

El sistema de vientos descritos anteriormente ejerce un esfuerzo de corte sobre la superficie del océano y produce una circulación inducida por el viento (Figura 2.12). Los vientos alisios que soplan del este, forman unas corrientes ecuatoriales comunes a todos los océanos. En los océanos Pacífico y Atlántico tales corrientes son interceptadas por los continentes y son reflectadas hacia el norte y hacia el sur. Estas corrientes deflectadas circulan a lo largo de la parte oeste de los océanos y son algunas veces llamadas como corrientes de límite oeste. Ellas están comprendidas entre las mayores y más fuertes corrientes oceánicas. Una de ellas, la Corriente del Golfo transporta más de 100 veces el flujo combinado de todos los ríos del mundo, sus volúmenes transportados son tan grandes que para cuantificarlos se ideó una medida llamada Sverdrup que equivale a 100 000 m³ por segundo de agua.

Las corrientes de límite (o borde) occidental adquieren grandes dimensiones debido a la variación de la fuerza de Coriolis con la latitud. Las corrientes son conducidas a través del océano por los vientos predominantes del oeste y forman flujos que van de vuelta para la región ecuatorial, completando de esta forma un giro grande. Giros de este tipo ocurren en las regiones subtropicales del Pacífico Norte y Sur, del Atlántico Norte y Sur y parte del océano Índico; los giros norte y sur de los océanos esta separados por una contracorriente fluyendo hacia el este; de manera análoga, se encuentra en el océano Índico norte un giro que migra de dirección cada seis meses (Figura 2.13).

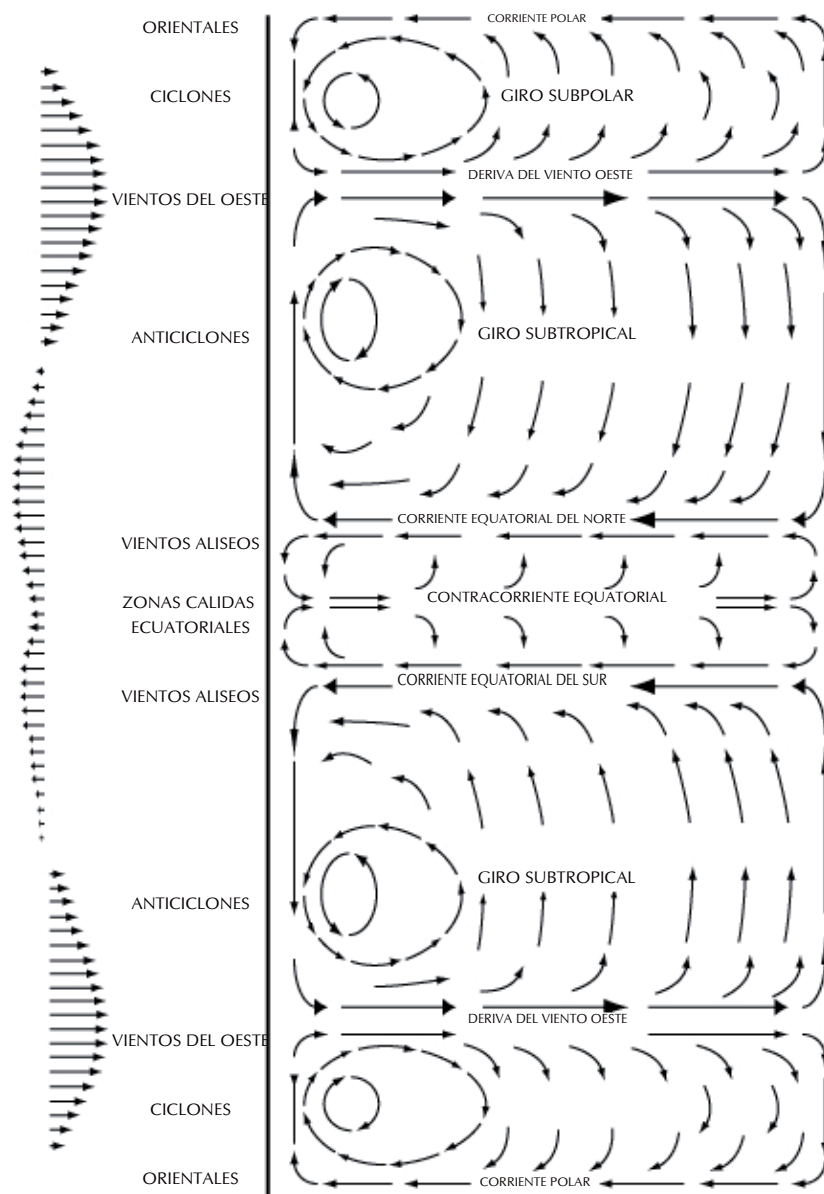


Figura 2.12. Corrientes oceánicas inducidas por el viento.

Fuente: Adaptada de Punk, 1955, en Moore (1971).

Si la diferencia de presión es balanceada por la fuerza de Coriolis la corriente es llamada corriente geostrófica. Esta corriente se produce entonces, cuando el agua posee un movimiento horizontal y las fuerzas que actúan sobre ella: debida al gradiente de presión y a Coriolis se balancean.

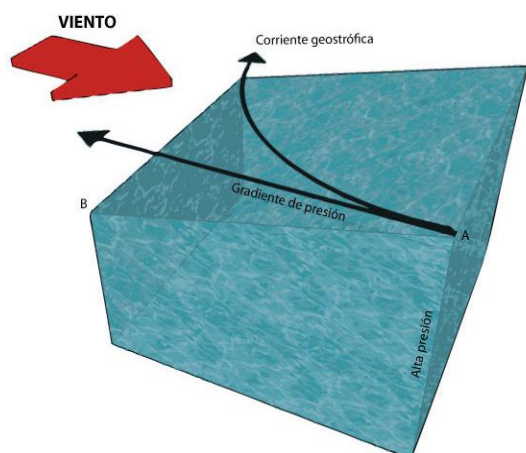


Figura 2.14. Diferencias de presión inducidas por el viento producen corrientes geostróficas.

Fuente: Adaptada por el autor.

El gradiente de presión es el índice de variación de la presión en relación con la distancia, contada desde las altas presiones hacia las bajas presiones. En el sentido del gradiente de presión se ejerce una fuerza sobre cada partícula de agua, que corresponde a la fuerza del gradiente de presión mencionado anteriormente.

- **Fuerza de Coriolis**

Al tener en cuenta el movimiento de rotación de la Tierra, se observa que por efecto de este movimiento el agua sufre una deflexión en su desplazamiento de un lugar a otro que está dirigido hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur; este efecto se debe a una fuerza aparente que lo produce denominado la fuerza de Coriolis, su valor es proporcional a la velocidad del movimiento y varía con la latitud siendo máxima en los polos y nula en el Ecuador.

El valor de la fuerza de Coriolis (F_c) es:

$$\vec{F}_c = 2 m \vec{v} \times \vec{\omega}$$

Donde:

m Es la masa del cuerpo.

v Es la velocidad del cuerpo en el sistema en rotación.

- w** Es la velocidad angular del sistema en rotación vista desde un sistema inercial.
- x** Indica producto vectorial (producto cruz).

Los oceanógrafos pueden calcular la corriente geostrófica si la distribución vertical y horizontal de la densidad es conocida. La densidad es determinada a partir de las mediciones de perfiles de salinidad y temperatura. Las corrientes calculadas por este método (geostrofía) generalmente concuerdan con las corrientes medidas usando aparatos especializados para ello (correntómetros).

La mayoría de las corrientes superficiales son geostróficas, pero existen algunas que fueron descubiertas hace unos pocos años y que al parecer poseen un carácter no geostrófico. Una de estas es la subcorriente ecuatorial en el Pacífico que fluye de Oeste a Este, en el Ecuador a 100 m de profundidad. Esta corriente, también llamada de corriente Cromwell, tiene una anchura de 300 km, algunas centenas de metros de espesor y posee velocidades que alcanzan los 3 nudos (150 cm/s).

Generalmente las subcorrientes fluyen en dirección opuesta a la corriente de superficie. El origen de estas subcorrientes y su relación con las aguas de la capa superior son materia de investigación en la actualidad. En el Ecuador los vientos alisios causan el apilamiento de agua en el Oeste lo que produce un gradiente de presión horizontal zonal que causa un flujo al Este. Normalmente un gradiente de presión zonal causa un flujo geostrófico meridional, pero debido a que Coriolis es nulo en el Ecuador, el flujo no es desviado a la derecha/izquierda. Esta corriente zonal subsuperficial fluye hacia el Este por debajo de la corriente superficial hacia el Oeste (Corriente Surecuatorial).

- **Corriente de Ekman**

La acción del viento en la superficie del océano, además de causar el movimiento horizontal del agua, puede también producir movimientos en la dirección vertical.

El viento al soplar durante un determinado tiempo sobre la superficie del océano genera un movimiento en el agua orientado a 45° aproximadamente de la dirección del viento. La velocidad del movimiento del agua inducida va disminuyendo progresivamente con la profundidad. Cuando la dirección es exactamente opuesta a la

inicial, es decir se ha producido un giro de 180° la influencia directa del viento es mínima y por debajo de esta profundidad no ocurren corrientes dirigidas por el viento. El flujo neto resultante a lo largo de la columna de agua influenciada por el viento tiene una dirección 90° del flujo del viento. Este movimiento recibe comúnmente el nombre de espiral de Ekman y se puede apreciar en el siguiente esquema (Figura 2.15).

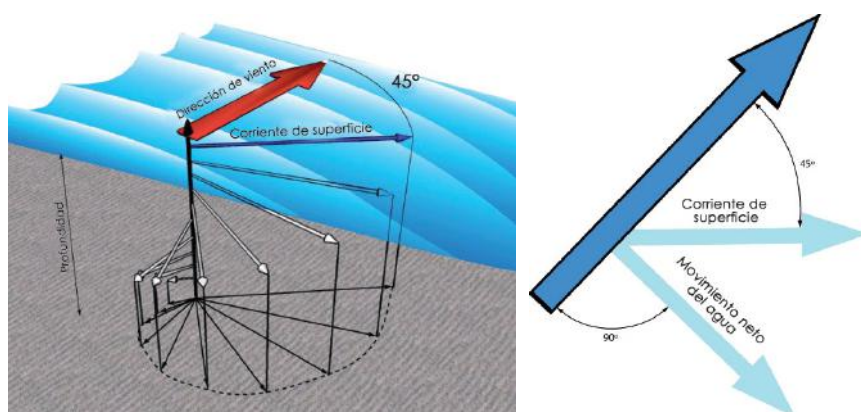


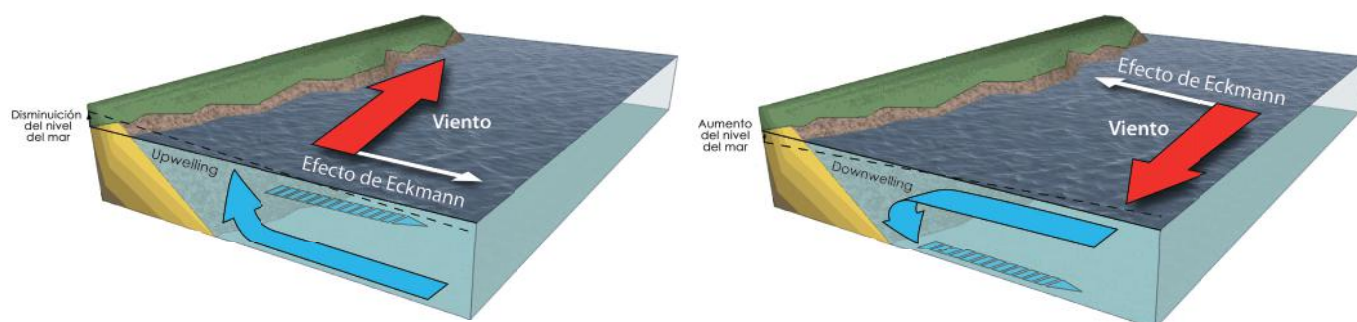
Figura. 2.15. Representación esquemática de la espiral de Ekman.
Fuente: Modificada de Kennet (1982).

• Surgencia

La surgencia (upwelling) como proceso dinámico ocasiona variaciones en la estructura vertical de la temperatura y en la estratificación (Figura 2.16). Cuando el viento sopla a lo largo de la costa y por Coriolis el flujo superficial del océano no corre en la misma dirección del viento sino que es desviado a la derecha (en el Hemisferio Norte).

El agua que es acarreada hacia fuera de la costa deja la región costera con un nivel del mar más bajo el cual debe ser reemplazado por un flujo ascendente de aguas profundas hacia la superficie del mar. Este movimiento vertical de agua enfría las aguas superficiales y les aporta mayor concentración de sales, ocasionando que la columna de agua se haga más densa. Si estas aguas subsuperficiales poseen una alta concentración de nutrientes el resultado será un área de alta productividad biológica favorable para la actividad pesquera.

Cuando el viento sopla en dirección contraria, el transporte de Ekman se dirige hacia la costa y se da allí una acumulación de agua, por lo que se induce el hundimiento de aguas superficiales (*downwelling*). Este movimiento vertical puede ser observado como un ascenso del nivel del mar, el cual debe ser compensado por un movimiento vertical hacia abajo (Figura 2.16).



2.2.3. Circulación termohalina

Las diferencias espaciales de temperatura en el océano causan diferencias de densidad que generan gradientes de presión horizontales, las cuales a su vez fuerzan la superficie del mar y producen corrientes. Así mismo, la precipitación, la evaporación, la fusión y la congelación del agua producen cambios de salinidad que alteran la distribución de densidad en la capa superficial. Todos estos factores pueden dar lugar al movimiento del agua de mar; este proceso se conoce como circulación termohalina o circulación profunda.

Las diferencias de densidad que inducen corrientes, ocurren generalmente en la interfase mar-aire pudiéndose concluir entonces que los sistemas de circulación inducidos por el viento y termohalinas están relacionados.

La primera teoría sobre las corrientes termohalinas expuesta por Lenz a mediados del siglo XIX, postulaba una fuente ecuatorial y unos sumideros polares de tal forma que el agua más fría de los polos resultaría más densa y se iría hacia el fondo oceánico, para luego desplazarse desde las regiones polares hacia latitudes bajas, en tanto que el agua ecuatorial caliente se traslada hacia los polos por la superficie del mar.

Las observaciones directas de la circulación termohalina de las aguas profundas son de difícil realización principalmente porque el flujo es lento y no afecta la capa superficial. Las medidas que se han realizado a través de carbón radioactivo manifiestan velocidades del orden de cm/s para el Pacífico y un poco más altas para el Atlántico. Sin embargo, existen otros datos que sugieren velocidades mayores para esas corrientes del orden de 10 a 20 cm/s. La mayor parte de la

Figura. 2.16. Proceso de surgencia (*upwelling*) y hundimiento (*downwelling*). La flecha roja indica la dirección del viento; la flecha blanca indica el flujo neto de agua debido a Coriolis (transporte de Ekman). La flecha azul muestra el movimiento vertical resultante (ascenso o descenso) en el Hemisferio Norte.

Fuente: Modificada de Pipkinet *al.*, 1977 en Kennet, 1982.

información relacionada con la circulación termohalina se ha obtenido de mediciones directas de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto.

La circulación termohalina es principalmente un proceso convectivo mediante el cual, las masas de agua frías y densas formadas en altas latitudes se hunden y fluyen lentamente hacia el Ecuador. Aparentemente la mayor parte del agua profunda del océano es formada o toma sus características en dos lugares: en el área del mar de Noruega y en la Antártica (Figura 2.17).

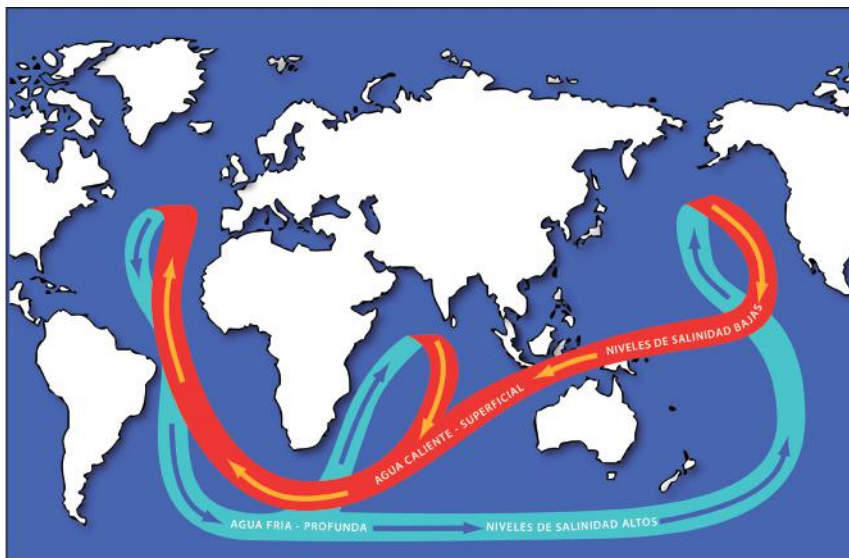


Figura 2.17. Circulación termohalina general de los océanos, en azul claro aguas frías profundas y oxigenadas, en rojo aguas superficiales cálidas.

Fuente: Modificada de Stewart, 1969, en Moore (1971).

En el Atlántico Norte, durante el invierno, el agua superficial se enfría y se congela liberando sal, por lo que el agua que queda inmediatamente debajo de esta capa de hielo aumenta su salinidad, haciéndose pesada (densa) se hunde y al encontrarse con el fondo posteriormente se mueve hacia el Ecuador, en dirección al sur. Esta masa de agua, denominada Agua Profunda del Atlántico Norte (A.P.A.N. o N.A.D.W por sus siglas en inglés) está bien definida por sus rangos de temperatura y salinidad por lo que es fácil de distinguir de otras masas de agua.

En la región Antártica se forman dos clases tipos de masas de agua: Agua de Fondo de la Antártica (A.F.A o A.A.B.W por sus siglas en inglés) y Aguas Intermediarias Antárticas (A.I.A o I.A.A.W por sus siglas en inglés). Las primeras se hunden hasta el fondo del mar por ser las masas de agua más densas y fluyen lentamente sobre el lecho marino. Las segundas son de menor densidad y se hunden sólo hasta profundidades intermedias.

A.F.A es la masa de agua más densa del océano y fluye hacia el norte, sobre el fondo, en la dirección del Ecuador. A.I.A. también fluye hacia el norte, pero a una profundidad de aproximadamente 1 000 metros.

Las masas de agua que fluyen sobre el fondo pueden ser influenciadas por la topografía del suelo marino. Las aguas densas en el océano Ártico están impedidas para alcanzar el Atlántico debido a la presencia de una cordillera de montañas submarinas. Las masas de agua densas del fondo no pueden subir niveles topográficos sino que solamente los pueden rodear.

Estudios recientes relacionan las variaciones en la circulación termohalina y las anomalías climáticas causadas por el calentamiento global. Escenarios de cambio climático (aumento del CO₂ atmosférico) predicen que el aumento de +2°C en la temperatura ambiente ocasionaría el deshielo total de los casquetes polares lo que ocasionaría el descenso de la densidad del mar y por consiguiente se suspendería la circulación termohalina. Si se detiene, el flujo de agua desde el polo hacia el Ecuador entonces cesaría también el flujo de calor desde el Ecuador hacia los polos y el sistema climático global sería drásticamente enfriado en el Hemisferio Norte y más cálido de lo normal en el Hemisferio Sur. Esta hipótesis es discutida por la comunidad científica internacional ya que algunos suponen que el calentamiento global sólo ocasionaría una disminución de la intensidad de la circulación termohalina, las conclusiones son tema de debate actual.

2.3. OLAS, MAREAS Y FENÓMENOS EXTREMOS

2.3.1. Las olas

Las olas son ondas mecánicas superficiales que se propagan por la superficie del mar. Son generadas por el viento al golpear repetidamente la superficie y restauradas por la gravedad.

El esfuerzo del viento deforma la superficie del mar. Si éste es suave se da lugar a rizaduras que se conocen como ondas capilares las cuales sólo tienen unos cuantos milímetros de altura y cerca de 1,7 cm de longitud de onda. Si el viento se intensifica las ondas capilares son rápidamente reemplazadas por ondas de gravedad u oleaje que es fácilmente distinguible desde la costa.



Si bien el viento induce la deformación de la superficie del mar, la gravedad y la tensión superficial tienden a restaurar la forma original del agua superficial intentando alisarla. Estas fuerzas ocasionan el avance de la deformación. En el caso de las ondas capilares es la tensión superficial la responsable de esto. En el oleaje la fuerza restauradora es la gravedad generada por la Tierra.

Las principales características de una ola son (Figura 2.18):

- La parte más alta de una ola es su cresta, y la parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas se conoce como valle.
- La altura (H) es la distancia vertical entre el vértice de una cresta y el fondo de un valle.
- El período (T) es el número de segundos que transcurren entre el paso de dos crestas o dos valles consecutivos por el mismo punto (Figura 2.18).
- Longitud de onda (λ) es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos.
- Velocidad (V) es el espacio recorrido por una cresta o un valle por unidad de tiempo. La velocidad de propagación de las olas se calcula dividiendo la longitud de onda λ por el período T . Dirección es el punto del horizonte de donde viene la ola.
- La inclinación o pendiente es el cociente entre la altura y la longitud de onda.

La altura de las olas depende de la dirección, velocidad y persistencia del viento predominante. En regiones donde estas condiciones se cumplen ampliamente se encontrarán los mayores oleajes. Sin embargo, la amplitud de las olas también depende de las diferencias de presión existentes en su superficie. El viento que sopla sobre la cara posterior de la ondulación ejerce mayor presión sobre la superficie del mar mientras que en la parte anterior, protegida del viento la presión es menor. Esta diferencia de presión permite el avance de las olas agregándoles energía.

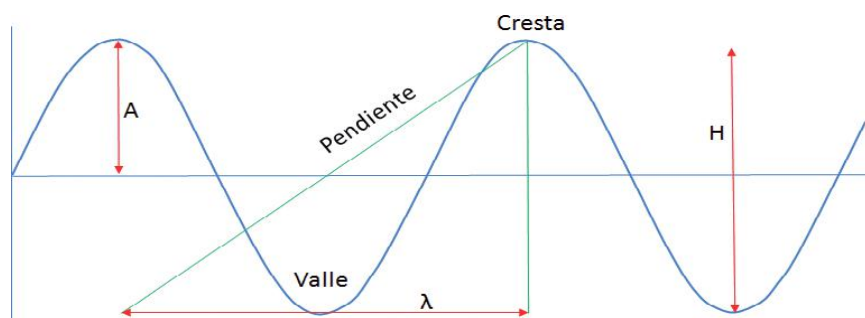


Figura 2.18. Perfil vertical de dos ondas oceánicas sucesivas, mostrando sus dimensiones lineales (altura "H", longitud de onda " λ ") y su forma sinusoidal.

Fuente: Modificada por el autor.

Todas las ondas pueden ser consideradas ondas progresivas ya que transportan energía través de la superficie del mar. En aguas profundas las olas no pierden su energía si no presentan fricción con el fondo o chocan con una porción de tierra, por lo que pueden avanzar cientos de kilómetros desde su lugar de formación (Fetch). Es por esta razón que en un lugar dado se pueden encontrar oleajes muy altos aún en ausencia de viento.

Para una velocidad dada del viento, la energía de la ola puede estar limitada por el alcance o por la duración. Las olas no crecen indefinidamente aunque aumente el alcance o tiempo que sopla el viento, sino que la altura de las mismas después de un tiempo bajo la acción del mismo viento alcanza su equilibrio. Esto se denomina un mar completamente desarrollado, mar de leva, mar de fondo o Swell cuando por el contrario, el oleaje se encuentra bajo la acción directa del viento se le llama mar de viento, mar de war o Sea.

En aguas profundas las partículas de agua en la onda se mueven siguiendo un patrón casi circular (Figura 2.19). En la cresta, las partículas se mueven en la misma dirección de propagación de las olas, mientras que en el valle lo hacen en la dirección contraria. En la superficie, el diámetro orbital corresponde a la altura de la ola, pero su diámetro disminuye exponencialmente con el aumento de la profundidad, hasta cierto punto (cuando la profundidad es igual a la mitad de la longitud de onda) en el cual el diámetro es imperceptible, por lo que no ocurre el desplazamiento de las partículas.

El estudio de las ondas superficiales dirigidas por el viento (oleaje) está basado en relaciones matemáticas que asocian las características de la longitud de onda (λ), el periodo de la ola (T) y la velocidad de las mismas con la profundidad del agua y la energía de las olas.

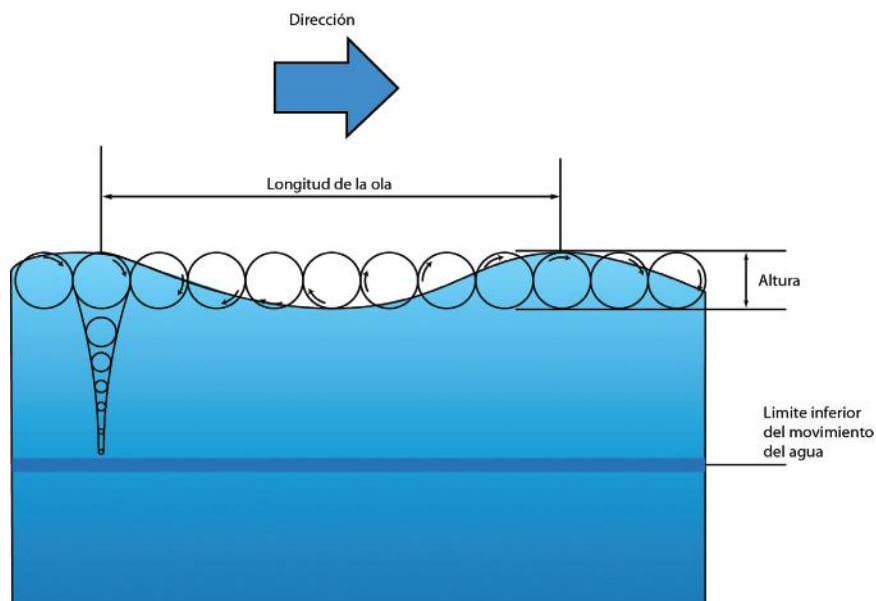


Figura 2.19. Movimiento de las partículas de agua en aguas profundas. Se muestra la disminución exponencial del diámetro orbital con la profundidad.

Fuente: El autor

La velocidad de las olas, conocida también como celeridad de propagación (C) y puede definirse como $C = \lambda/T$.

Si se conocen dos de las variables de esta ecuación se puede calcular la tercera. Sin embargo, existen otras formas de calcularlo, ya que hay otras interrelaciones entre C , λ y T . Dos términos que un oceanógrafo debe conocer son; el número de onda ($k = 2\pi/\lambda$) cuyas unidades son ondas por metro, y la frecuencia angular ($\sigma = 2\pi/T$), con unidades número de ciclos (olas) por segundo.

En aguas profundas (cuando la profundidad es mayor a la mitad de la longitud de onda) la longitud de onda $\lambda = L$ es la única variable que afecta la velocidad de la onda, es decir,

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

Donde g es la gravedad. En aguas someras (cuando la profundidad d es mucho menor que la longitud de onda, en la práctica $d < \lambda/20$) la profundidad del agua (d) es la única variable que afecta la velocidad de las olas, y la ecuación de la celeridad se aproxima a:

$$C = \sqrt{gd}$$

Para calcular la velocidad de las olas se requiere conocer de antemano la longitud de las olas y la profundidad por donde éstas se desplazan (Figura 2.20).

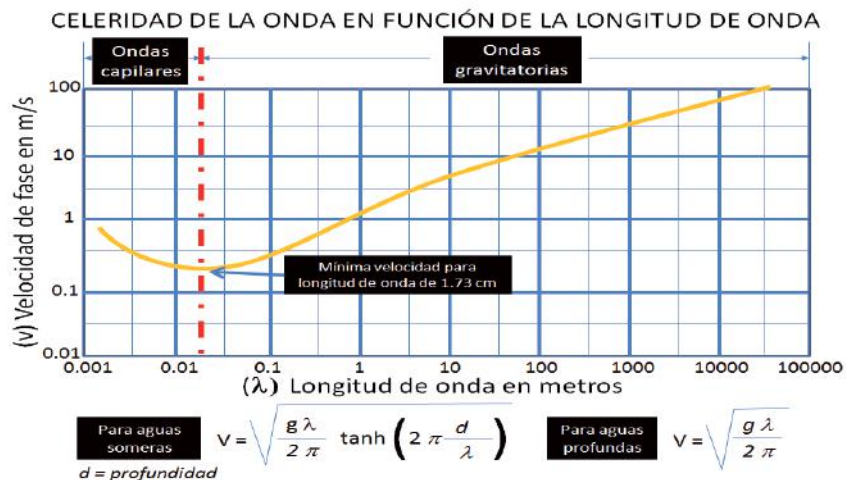


Figura 2.20. Celeridad de la onda en función de su longitud.

Fuente: Adaptada por el autor.

La energía que poseen las olas se encuentra en dos formas; energía cinética, que es la energía inherente al movimiento orbital de las partículas de agua; y la energía potencial que poseen las partículas cuando son desplazadas desde su posición media. La energía total (E) por unidad de área de una ola está dada por:

$$E = \frac{1}{8} (\rho g H^2)$$

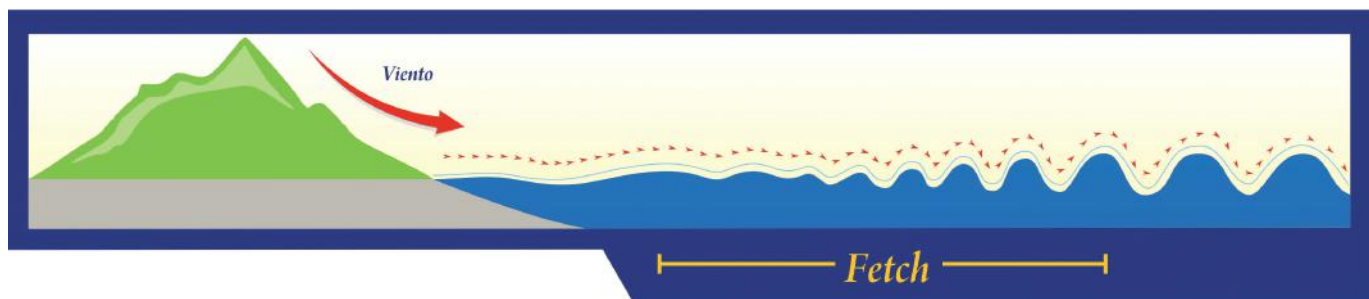
Donde ρ es la densidad del agua (en kg/m³), g es la gravedad (9,8 m/s²) y H es la altura del oleaje (en metros). La energía es dada en Julios por metro cuadrado (J/m²). Esta ecuación nos dice que la energía de las olas es proporcional al cuadrado de la altura de la ola, por lo que podemos concluir que a mayor altura, mayor será la energía que estas transportan.

Fetch

La superficie del mar está siempre en movimiento; un buen observador puede notar olas con longitud de onda muy larga y unos pocos centímetros de amplitud, incluso cuando no hay viento y el agua parece un espejo.

Se denomina fetch a la distancia necesaria para que el viento transfiera su energía completamente a la superficie del océano, una vez ocurra esto, es decir, se haya desarrollado el mar, el oleaje mantendrá su altura y longitud de onda por conservación de energía, por lo que estas olas se pueden propagar a lugares remotos, sin que en los mismos haya fuerza del viento para generarlos. (Figura 2.21)

Una vez que las olas se alejan del área de generación, sus crestas son más lisas y menos caóticas, fundamentalmente por dispersión angular.



Las olas no desplazan masas de agua sino que mueven la energía transmitida por el viento a la superficie del mar. El agua superficial se mueve hacia arriba y abajo y no de manera horizontal hacia la orilla. Su comportamiento es similar al patrón seguido por una soga que oscila, en consecuencia, una ola no representa el movimiento de moléculas en el flujo de agua, una ola representa una transmisión de energía desde su origen hasta su eventual rotura, la cual puede ocurrir en medio del océano o en la costa.

La disipación de la energía del oleaje ocurre de distintas maneras; después que las olas rompen una parte se puede convertir en una corriente superficial, el movimiento circular de sus partículas de agua se disipa con el aumento de la profundidad dependiendo del tamaño de la onda. Otra parte pierde energía por fricción con el aire o si una velocidad excesiva del viento provoca la ruptura de las crestas. Por último, la energía termina por disiparse por interacción con la corteza sólida, cuando el fondo es poco profundo o cuando finalmente las olas se estrellan con la costa. Dentro de los principales procesos ondulatorios que sufren las olas al llegar a las costas están el efecto de fondo, la reflexión, la refracción y la difracción del oleaje, los cuales se explicarán a continuación.

Figura 2.21. Representación del área donde el viento genera oleaje o fetch.

Fuente: Adaptada por Juan Guillermo Franco Balanta

Deformación del oleaje al llegar a la costa

Cuando la profundidad disminuye, la ola que se propaga libremente “siente” el fondo y se rompe. Este fenómeno se denomina someramiento o efecto de fondo (*shoaling*). La zona donde ocurre este proceso se conoce con el nombre de rompiente (Figura 2.22).

En esta área la profundidad es menor que la longitud de la onda; en su recorrido circulan las partículas que afectan los niveles más bajos remueven el fondo marino y disminuyen la velocidad de las olas, acumulándose sus crestas, formando una masa única y rompiéndose finalmente. Las olas al llegar a las costas producen varios tipos de corrientes, entre ellas las corrientes de retorno, corrientes de deriva y corrientes helicoidales.

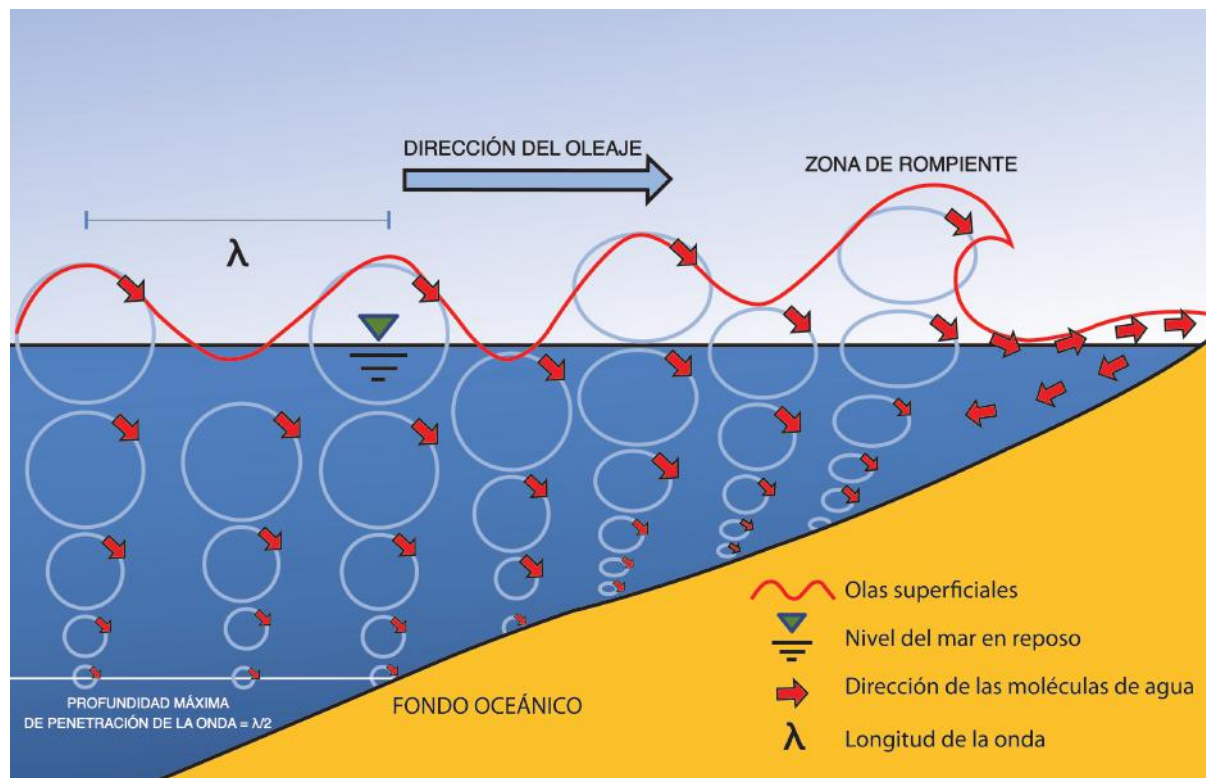


Figura 2.22. Representación de la zona de rompiente del oleaje en la costa, donde se observa la acción que tiene el cambio de profundidad en el comportamiento de la ola.
Fuente: Adaptada por el autor

Reflexión

Cuando las olas llegan a una costa recta y rígida, se produce su reflexión, es decir una onda que llegue o incida con un ángulo α , saldrá o será reflejada con el mismo ángulo α , en términos matemáticos el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión (Figura 2.23). En estos casos la ola no rompe, sino que golpea con fuerza un punto liberando parcialmente su energía en cada choque.

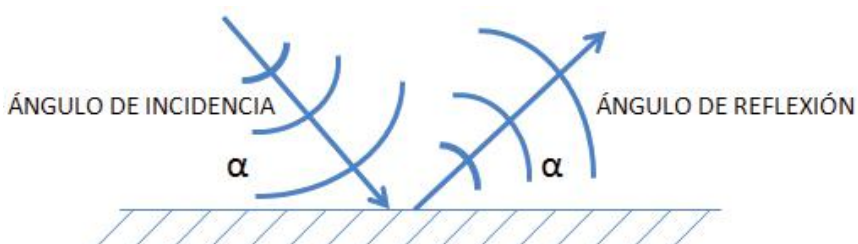


Figura 2.23. Esquema de la reflexión del oleaje

Fuente: El autor

Los accidentes geográficos, naturales o artificiales tales como cabos, islas, entradas estrechas a bahías, pasos estrechos entre dos islas, etcétera, así como las corrientes marinas son obstáculos comunes que se oponen al oleaje, produciendo su reflexión.

Refracción

La refracción del oleaje es la deformación del frente de ola por la acción del fondo marino, cuando el rayo de la ola forma un cierto ángulo con la normal a las líneas de igual profundidad (isobatas). Sobre el fondo variable, la parte de la ola que se encuentra en la zona profunda se desplaza más rápido que la delantera, por lo cual la onda tiende a ser paralela a las isobatas; esto significa que el ángulo entre el rayo de la ola y la normal a las isobatas tiende a disminuir (Figura 2.24).

Este proceso se produce debido a la fricción de las mismas con el fondo y puesto que la energía de las olas se encuentra distribuida en la columna de agua en bucles cada vez más pequeños, tiene un límite de penetración en el eje Z (en profundidad) en el mar. La batimetría por su parte, es variable y generalmente disminuye a medida que se aproxima a la costa, por lo tanto, a medida que avanzan hacia la costa y empezar a sentir con mayor o menor fricción el fondo, las olas modifican su dirección, porque algunas de ellas o partes de ellas avanzan más rápido que otras dependiendo de la profundidad que encuentren en su avance.

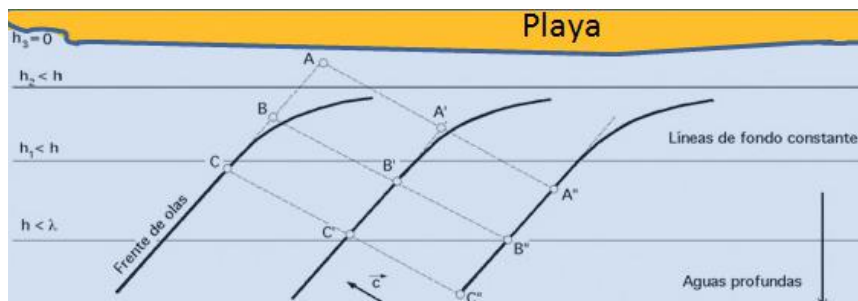


Figura 2.24. Refracción de un tren de olas a su llegada a la playa. Donde C es la velocidad o celeridad de las olas y h la profundidad de la zona costera.

Fuente: Modificada de “Energía de las Olas”, de Pedro Fernández Díez.

Haciendo un paralelo con las ondas de la luz o del sonido, al cambiar la densidad del medio en que se desplazan, cambian de dirección, es típico ver como al introducir un lápiz en un vaso de agua, pareciera que el lápiz se doblara y cambiara su ángulo dentro del vaso, con respecto al que tiene en el aire, esto se debe a la refracción de las ondas de luz (Figura 2.25).

Este proceso de refracción del oleaje en aguas que se hace progresivamente más someras puede describirse mediante una relación similar a la Ley de Snell. Esta fórmula simple utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto se define como:

$$\frac{C_1}{\text{Seno } \theta_1} = \frac{C_2}{\text{Seno } \theta_2}$$

Donde, C_1 = Velocidad de la ola en el medio 1; C_2 = Velocidad de la ola en el medio 2; θ_1 = Ángulo de desplazamiento de la ola en el medio; θ_2 = Ángulo de desplazamiento de la ola en el medio 2.

Difracción

Las olas se propagan en línea recta, como la luz, pero pueden bordear obstáculos mediante un fenómeno conocido como difracción. En el mar las olas también sufren este fenómeno, cuando en su paso encuentran un obstáculo. Gracias a este fenómeno las ondas de baja frecuencia sufren más difracción que las de altas frecuencias, en otras palabras, la trayectoria de sus ortogonales se curva más para rodear el obstáculo cuando las olas tienen bajas frecuencias que cuando tiene altas frecuencias. Por este fenómeno es que en un cuarto oscuro con

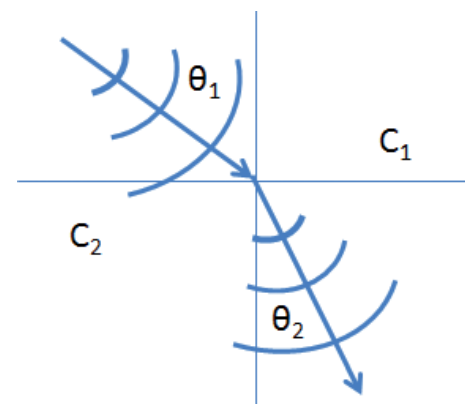


Figura 2.25. Esquema de la refracción del oleaje al acercarse a la costa.

Fuente: El autor

un agujero en la pared y luz al otro lado, se puede ver la luz desde cualquier punto del cuarto oscuro, sin que esté la luz y el agujero estén alineados directamente con el observador.

En el mar este fenómeno se observa cuando hay una boca de una bahía que recibe oleaje directo del mar abierto. Las olas entran en la bahía y a partir de la boca generan nuevas olas circulares que cubren la totalidad de la bahía. Otro ejemplo de ello es cuando un tren de ondas encuentra a su paso un obstáculo como un dique o una extensión rocosa de la costa, en este caso se forma una disociación de energía al chocar contra el obstáculo, lo cual hace que la altura de la ola se reduzca, en conjunto con su velocidad y consecuentemente empiece a rodear el obstáculo como se observa en la figura 2.26.

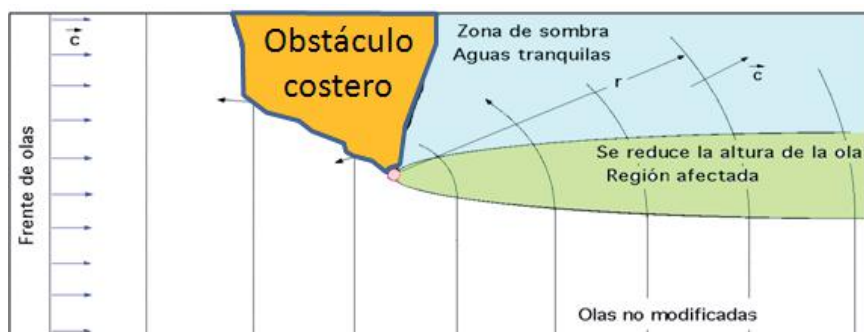
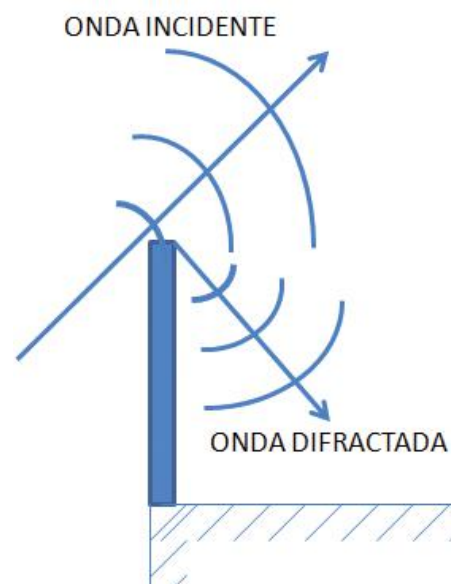


Figura 2.26. Arriba: Esquema de la difracción del oleaje. Abajo: Tren de olas difractadas al chocar con un obstáculo costero. c es la celeridad; r es la distancia del inicio de la difracción a un punto de referencia dado. **Fuente:** Modificada de “Energía de las Olas”, de Pedro Fernández Díez.

Deriva litoral

Con la llegada de las olas a la costa y su rompiente en las playas se produce un proceso de permanente suspensión de los sedimentos en el medio acuoso y su posterior arrastre por corrientes de olas. El arrastre de sedimentos se produce en un movimiento de *zig zag* que resulta en un vector de desplazamiento paralelo a la costa conocido como deriva litoral.

Por este proceso de deriva litoral es que las playas migran y se encuentran en constante renovación, de tal manera que requieren una alimentación permanente de sus componentes, que pueden provenir de ríos, o de restos de organismos marinos principalmente, en caso de suspender esta alimentación a las playas empezarán a retroceder, produciendo erosión costera (Figura 2.27).

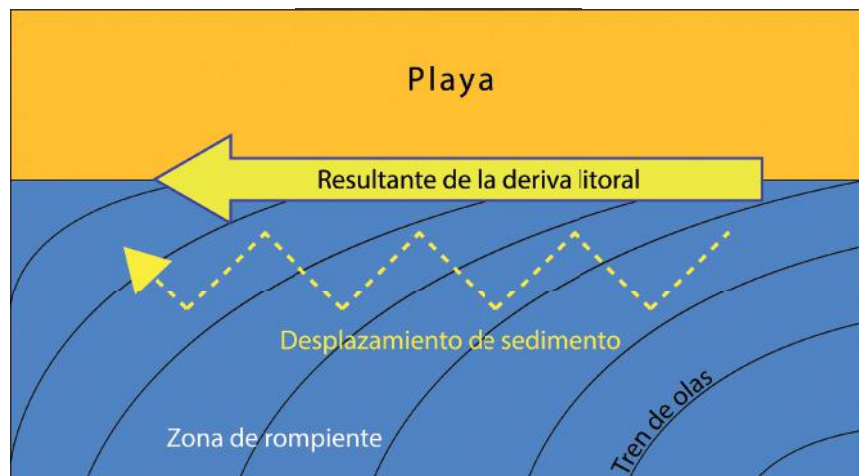


Figura 2.27. Esquema de la deriva litoral.
Fuente: El autor

La modificación de las fuentes de sedimentos, llámese canalización de ríos, modificación de caudales, o retiro de organismos marinos del medio, al igual que modificar la línea costera mediante la construcción de estructuras artificiales o destrucción de estructuras naturales, generará consecuencias erosivas sobre la costa.

No se pretende con este libro sembrar ideas completamente conservacionistas para hacer de la zona costera un sistema completamente intocable, pero sí es importante que los proyectos que se desarrollen en ella tengan una planificación integral, con base científica y criterio ambiental técnico, para prever sus consecuencias y costos de mantenimiento de las soluciones que permitan conservar el equilibrio entre desarrollo y conservación.

2.3.2. Las mareas

Las mareas o el movimiento oscilatorio de ascenso y descenso del nivel del mar se producen debido la fuerza de atracción gravitacional existente entre el Sol y la Luna sobre las moléculas de agua oceánica.

Según la ley gravitacional de Newton (siglo XVII) la fuerza de atracción F entre dos cuerpos de masa M_1 y M_2 (como la masa de la Tierra y la masa de la Luna) es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (d) que los separa.

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

En donde G es la constante de gravitación universal, definida como:

$$G = (6,67428 \pm 0,00067) \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Por este motivo a pesar de que la masa del Sol sea aproximadamente 27 millones de veces mayor que la de la Luna, su distancia a la Tierra es unas 400 000 veces mayor que la distancia de la Luna a la Tierra, por lo tanto la fuerza de atracción gravitacional del Sol sobre los océanos es un 46% menor que la de la Luna (Figura 2.28).

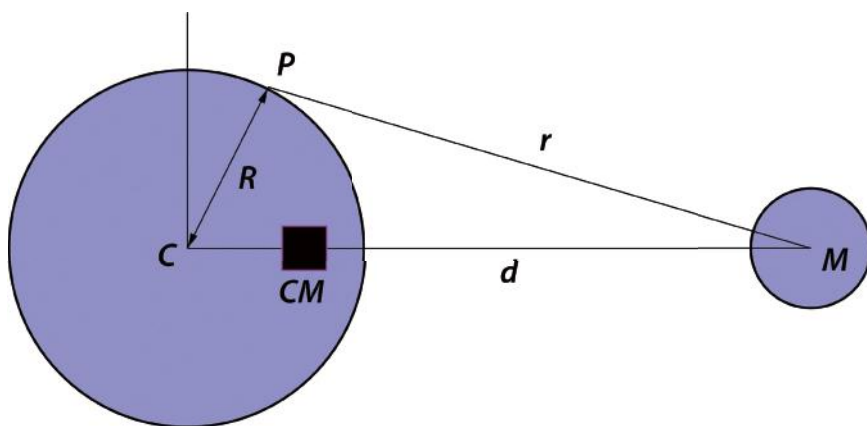


Figura 2.28. Ley gravitacional de las mareas. Todos los puntos en la superficie terrestre giran alrededor del centro de masa (CM) de la Tierra-Luna. M es el centro de gravedad de la Luna; C es el centro de gravedad de la Tierra; d es la distancia lineal entre los centros de gravedad de ambos cuerpos; R es el radio de la Tierra; P es su perímetro; r es la distancia desde el centro de masa de la Luna a un punto de la superficie de la Tierra.
Fuente: El autor.

El comportamiento de las mareas astronómicas depende, principalmente de la atracción gravitacional generada por la posición relativa de la Tierra con respecto al Sol y la Luna, que obviamente cambia a cada instante; también influye notablemente la batimetría, la topografía local y la profundidad de las cuencas oceánicas por las cuales viaja la onda.

Además de estos fenómenos astronómicos o fisiográficos, se pueden sumar otros fenómenos de diversas escalas, que también afectan el nivel del mar, como por ejemplo la variación de la presión atmosférica local, lo que genera mareas atmosféricas o meteorológicas, que al sumarse a la marea astronómica hacen que el mar se desborde y ocupe zonas del litoral que normalmente se encuentran secas.

Esto se conoce también como efecto del barómetro invertido, el cual explica que durante periodos de alta (baja) presión atmosférica el nivel del agua tiende a disminuir (aumentar) más de lo normal. En general se ha calculado que un cambio de 1 mbar de presión atmosférica causa aproximadamente un cambio de 1 cm en el nivel del mar.

La gravitación lunar atrae la porción de agua oceánica que se encuentra sobre la Tierra más próxima, en el punto de concentración de fuerzas gravitacionales llamado punto sublunar, alejándola del centro geométrico terrestre y de este modo, se produce una pleamar directamente debajo de la Luna (marea directa). Al mismo tiempo atrae a la Tierra como un todo, apartándola de la parte de la Tierra opuesta a la Luna o punto antípoda sublunar; así produce una pleamar debajo de la llamada anti-luna (marea opuesta).

Existe por lo tanto una pleamar en lados opuestos de la Tierra y dos bajamares en otros lugares ubicados a un cuarto de circunferencia terrestre ($\pi/2$ radianes) de los puntos de pleamar.

Por lo explicado hasta ahora en la teoría gravitacional de Newton, en la costa, dependiendo de las características geofísicas locales ya mencionadas, se pueden dar tres tipos de mareas que son:

Marea Diurna - Con una pleamar y una bajamar cada 24 horas.

Marea Semidiurna - Con dos pleamares y dos bajamares cada 24 horas.

Marea Mixta - Con una pleamar y una bajamar máximas, combinadas con una pleamar o una bajamar mínima, cada 24 horas.

Este es, por supuesto, un esquema muy simplificado en lo que a las mareas oceánicas se refiere. El cuadro sería mucho más preciso si se simplificara así:

- Toda la Tierra estuviera cubierta de agua.
- Si hubiera una Luna o un Sol, pero no ambos.
- Si el cuerpo que atrae (Sol o Luna) se desplazara en una órbita circular siguiendo el Ecuador.

Ahora, descartando cada una de estas idealizaciones, veremos cuánto más complejas son las mareas reales. El hecho de que la Luna y el Sol atraigan gravitacionalmente a la Tierra, significa que a veces sus fuerzas de atracción se refuerzan y otras veces se interfieren mutuamente, esto da origen a las mareas de sicigia o mareas vivas (máxima amplitud de la marea) y las de cuadratura o mareas muertas (mínima amplitud de la marea), respectivamente.

Durante las fases de Luna nueva y Luna llena, el Sol, la Luna y la Tierra están todos alineados, la fuerza de atracción gravitacional coinciden y sus efectos se suman, provocando pleamares más altas y bajamares más bajas que las de las mareas promedio. Estas son las mareas vivas o sicigias (Figura 2.29).

Cuando la Luna está cuarto creciente y cuarto menguante, el Sol la Luna y la Tierra forman un ángulo recto imaginario, con cada uno de los astros en un vértice, esto hace que las ondas de marea queden sometidas a fuerzas opuestas del Sol y de la Luna, con lo cual la amplitud de las mareas es menor que el promedio de las mareas normales. Durante estas mareas muertas las mareas altas son un poco más bajas y las mareas bajas son un poco menos bajas que los promedios normales, observándose entonces menores variaciones del nivel del mar. Estas son las mareas muertas (Figura 2.29).

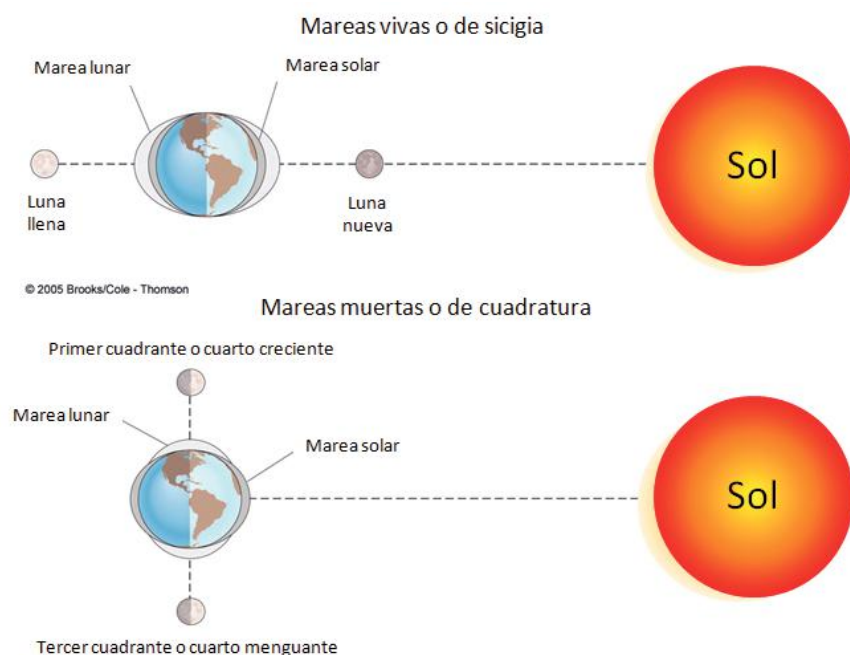


Figura 2.29. Tipos de mareas según las fuerzas de atracción gravitacional existentes entre la Tierra, la Luna y el Sol.

Fuente: Modificada por Brooks Cole Thomson, 2005.

Las mareas vivas y muertas se producen 60 horas después de las fases correspondientes de la Luna. A este lapso de tiempo se le conoce como edad de la marea o de la fase de desigualdad.

La marea denominada de **perigeo** se produce cuando la distancia entre la Luna y la Tierra es mínima y por lo tanto también la amplitud de la marea aumenta. La marea llamada de **apogeo** se presenta cuando la

distancia entre la Luna y la Tierra es máxima, por lo tanto la amplitud de la marea disminuye (Figura 2.30). Las mareas extraordinarias se producen cuando coinciden las mareas de perigeo con las mareas vivas, originando mareas supremamente altas. En caso contrario, cuando coinciden las mareas de apogeo con las mareas muertas se producen las mareas más bajas. Este tipo de mareas se presentan una vez al año.

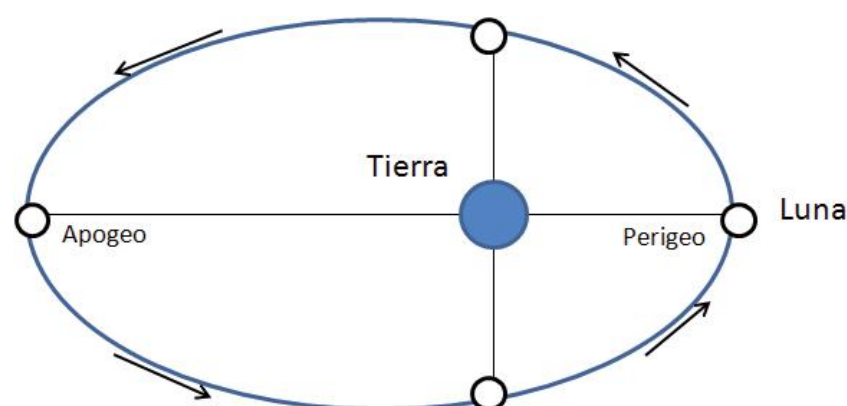


Figura 2.30. Posición de la Luna con respecto a la Tierra durante el apogeo y el perigeo.

Fuente: Adaptada por el autor.

En el siglo XVIII Bernoulli, Euler y Laplace desarrollaron la teoría dinámica de las mareas teniendo en cuenta la desviación de los flujos por el efecto de Coriolis, la configuración de las cuencas, la inercia y las fuerzas friccionales. Con estas aproximaciones los pronósticos de las mareas son realmente muy acertados. Los errores son de aproximadamente 3 cm o menos en altura y de 50 minutos o menos en el tiempo.

La altura de las mareas, es decir, la diferencia entre los niveles más altos (pleamar) y más bajos (bajamar) suele ser pequeña en medio del océano, pero puede alcanzar en determinados puntos del planeta, como en la Bahía de Fundy (costa Atlántica de Canadá), en donde el rango mareas es de hasta 17 metros. En lugares como estos, en donde la altura de la marea posee una gran energía potencial, se podrían aprovechar la transformación en energía cinética para generar energía mareomotriz, ya que las variaciones en el nivel del mar, generan flujos de mareas o corrientes de mareas, que pueden llegar a ser muy intensos (Figura 2.31).



Figura 2.31. Intensas corrientes de marea son observadas diariamente en la bahía de Fundy, Canadá. Estas condiciones son ideales para la extracción de energía renovable denominada mareomotriz.

Fuente: Nova Scotia Power.

En Colombia las mareas de la Costa Pacífica alcanzan los 4 metros de altura, mientras que en la Costa Caribe tiene unos 30 centímetros, esto se debe a que las islas Antillas dificultan el flujo del agua, mientras que en la zona colombiana del Pacífico, al no haber obstáculos geográficos importantes en tamaño, la onda de marea fluye con mayor facilidad hasta los bordes continentales. En general, las mareas en el Pacífico colombiano son del tipo semi-diurnas (Figura 2.32), mientras que en el mar Caribe colombiano son de tipo mixtas.

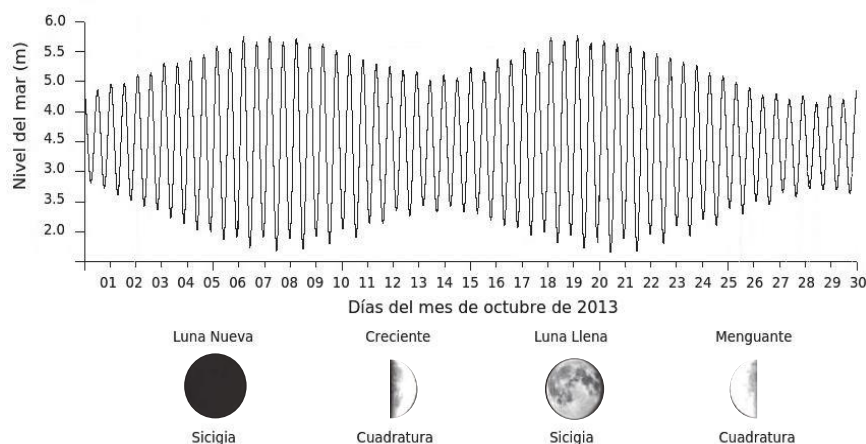


Figura 2.32. Variación del nivel del mar con sensor de presión observada en Tumaco, Colombia del 30 de septiembre al 30 de octubre de 2013.

Fuente: Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (SMPOMM). DIMAR, 2013.

2.3.3. La zona costera

Las zonas costeras desde los mismos inicios de la humanidad han sido relevantes para el hombre, a través de ellas, antes de conocer los continentes y trazar mapas, resultaba más sencillo llegar de un lugar a otro. Los asentamientos humanos resultaban más favorables cuando se efectuaban en la costa puesto que se poseía una vía de transporte económica y rápida en muchas direcciones, facilidad de captura de alimentación de calidad, disponibilidad de agua para fines de higiene, salud y obtención de clima saludablemente estable y oxigenado, entre otros.

Esta realidad en nada ha cambiado a través de los años y tal vez, por ese motivo, las zonas costeras siguen siendo de los lugares más apetecidos y por supuesto más costosos, para vivir. En la actualidad, es bien conocido que de la población mundial cerca de un 70% habita en las zonas costeras (Figura 2.33.), además porque brindan hermosos paisajes y lugares ideales para el descanso y el ocio llenos de sol y playa.

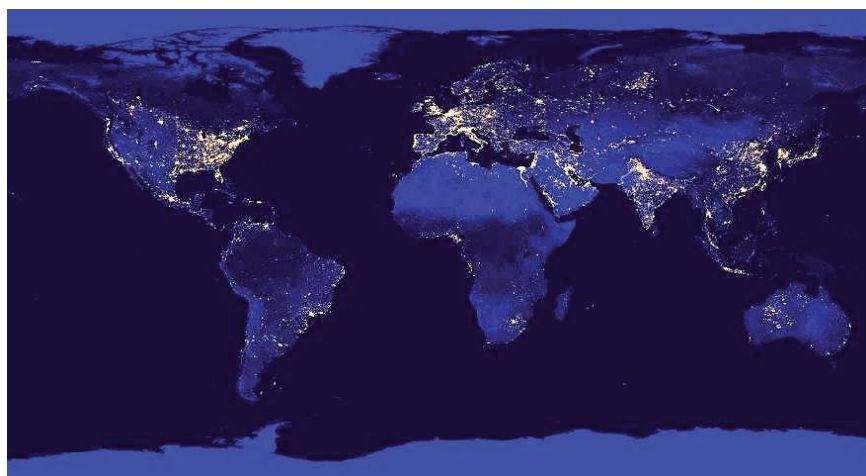


Figura 2.33. Imagen de la Tierra de noche muestra la mayor densidad poblacional en las zonas costeras, formada por múltiples fotografías con una cámara infrarroja especial a bordo del satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP).

Fuente: NASA Earth Observatory, NOAA National Geophysical Data Center

No existe una definición precisa de esta zona, debido a que sus límites no son definidos bajo características físicas que permitan tal estimación, pero generalmente se acepta que zona costera es la región comprendida entre el inicio de la plataforma continental dirigiéndose hacia tierra y llegando hasta donde las características geofísicas, ambientales, sociales, económicas y culturales la enmarcan.

Más específicamente esta zona incluye la plataforma continental, las zonas de bajamar, las playas marítimas, las lagunas costeras, el litoral (constituido desde la zona de rompiente hasta el límite más lejano de las lagunas costeras) y de allí en adelante hasta donde las características especiales de cada región la delimiten. El límite marítimo es relativamente claro y permite tener una buena aproximación sobre esta frontera, sin embargo, el segundo no lo es, debido a que no se pueden dejar de considerar los factores humanos que hacen que el conjunto de sus pobladores, no importa que tan lejos esté del mar, se consideren vecinos o no del mismo.

En Colombia, en la costa Caribe, en sus 1 600 km de extensión meridional existen diferencias geofísicas bien marcadas que incluyen tres subregiones: desierto en el extremo norte, zona semi-seca y plana en el centro, y un poco más húmeda y montañosa en el sur. Al realizar comparaciones en sentido zonal, la zona costera se extiende hasta muy adentro del continente, especialmente en la región central, superando los cientos de kilómetros, porque sus características geográficas son similares, pero también porque la gente de esta subregión mantiene costumbres de alimentación, vestido, música y tradiciones similares. A pesar de que varían un poco con respecto a las poblaciones de la



subregión norte y la subregión sur, en el imaginario colectivo de la gente del interior se les define e identifica a todos como a un mismo grupo social.

En la costa Pacífica, por su parte, también existen diferencias geofísicas en sus 1 500 km de longitud meridional, las costumbres de sus pobladores son posiblemente más homogéneas, en sentido meridional, pero no en sentido zonal, generalmente las características geofísicas de la zona norte incluyen altas montañas inmediatamente cercanas al mar y selvas muy húmedas, especialmente en la subregión norte, mientras que la subregión sur se caracteriza por llanuras aluviales, con inmensas planicies de inundación intermareal que las hace propicias para mantener vastas áreas cubiertas de manglar, esta última es de clima un poco más seco. En este caso el imaginario colectivo de la gente del interior los define como un grupo social, que no identifican como costeño, a pesar de serlo evidentemente, y al que se le denomina comúnmente como “del Pacífico”.

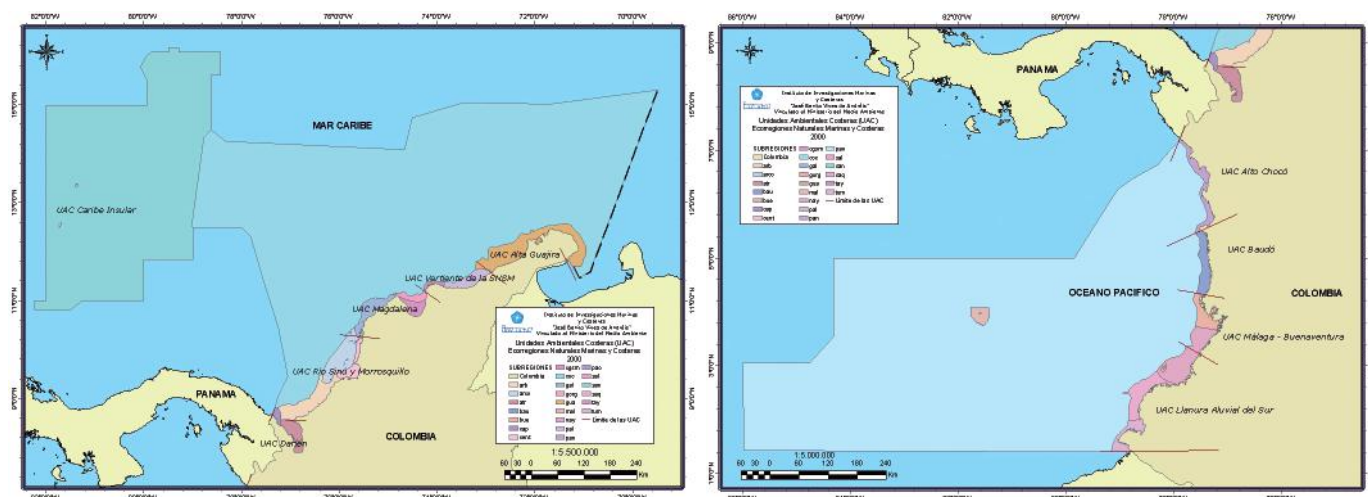
La población de la región insular del Caribe oceánico, tampoco se considera costeña, especialmente porque este término en Colombia, tiene un significado relativo a la población de la Costa Caribe Central continental, así los pobladores de las Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, quienes tienen costumbres ancestrales derivadas de ocupantes ingleses, lo que les aportó lengua propia (creole), perfecto inglés, música y comida diferente son considerados isleños, y en los casos de origen propiamente ancestral se denominan raizales.

En el primer caso la costa es amplia hacia el interior, mientras que en el segundo es estrecha hacia el interior, y en el tercero se trata de islas oceánicas muy pequeñas, pero en todos ellos se encuentra dificultad para definir los límites de la zona costera.

De acuerdo con el decreto 1120 de 2013, se definen dos tipos de zona costera, la zona costera continental para la cual se establecen las subzonas o franjas que la conforman, así: Subzona marino-costera o franja mar adentro, de ancho variable comprendida entre la Línea de Marea Baja Promedio (LMBP) y el margen externo de la plataforma continental, definido para la isobata de 200 metros; Subzona de bajamar o franja de transición, donde se condiciona su ancho según el rango de amplitud mareal y la pendiente de la costa; y Subzona terrestre-costera o franja de tierra adentro, comprendida

desde la Línea de Marea Alta Promedio (LMAP) hasta una línea paralela localizada a 2 kilómetros de distancia tierra adentro. La zona costera insular, correspondiente al Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” (INVEMAR), por su parte ha tratado de crear una definición integral que tiene como factor principal las características ecológicas del medio e integrarlo, en lo posible, a las poblaciones de la región, sin embargo, al final también existen divergencias entre las poblaciones que se pueden sentir desvinculadas de lo que consideran su entorno social. De cualquier forma esta propuesta ha ido alcanzando un reconocimiento y ganando más aceptación, especialmente por el hecho de tener una base científica que le permite argumentar con evidencia lo que denominan las Unidades Ambientales Costeras, que han sido trazadas bajo el mapa ambiental de las zonas marinas y costeras de Colombia, realizado por el mismo instituto en cooperación con el IGAC (Figura 2.34)



Una vez determinada la zona de interés, al dar una mirada un poco más amplia, se encuentran una serie de actividades que surgen debido a la naturaleza y características de las mismas, la pesca, la acuicultura, los puertos, la playa, los parques naturales, los deportes náuticos, las zonas industriales y zonas residenciales, residuos de la ciudad, los ambientalistas y la hotelaría son sólo algunas de las más relevantes. Lo que resulta curioso es que cada uno de ellos siente tener derecho a ocupar la primera línea de playa porque consideran que desde allí debe desarrollarse su actividad.

Figura 2.34. Unidades Ambientales Costeras (UAC). Mapas de ecorregiones naturales marinas y costeras 2000. Izquierda: Caribe colombiano. Derecha: Pacífico colombiano. Fuente: Cortesía INVEMAR.

2.3.4. Manejo integrado de la zona costera

El diseñar, preparar y llevar al cumplimiento eficiente de planes de ordenamiento territorial costero, negociando entre las diferentes comunidades para satisfacer sus intereses sin que se afecten los del otro, o afectándolos en un grado que resulte aceptable por las diferentes comunidades con unos y otros intereses particulares y comunes, es lo que se denomina manejo integrado costero.

Es un asunto de altísima complejidad, se requiere de la participación ciudadana, la de expertos, autoridades y tomadores de decisiones locales, y los representantes de sectores industriales públicos y privados, interesados en el borde litoral.

Dentro de los aspectos que se deben contemplar para realizar un adecuado manejo costero, se encuentra no solo la invasión de los bienes públicos marítimos, que en Colombia corresponde a las playas, zonas de bajamar y aguas marinas, sino también otros elementos muy importantes, entre los que se cuentan fenómenos marinos como huracanes, marejadas y tsunamis, u otros fenómenos como la contaminación marina y el calentamiento global, una de cuyas secuelas más graves es el ascenso del nivel medio del mar y la consecuente erosión costera (Figura 2.35).



Figura 2.35. El Pueblo de Tierra Bomba en Cartagena, al igual que muchas otras poblaciones costeras está siendo literalmente devorado por la erosión del mar.

Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

A propósito de este último elemento, se hace muy evidente y afecta seriamente a las poblaciones costeras, amenazándolas con la pérdida de los territorios que sienten propios y que en muchos casos han sido heredados por generaciones, por lo que no están dispuestos a perderlos, siendo así, los pobladores generan obras civiles propias, sin ningún criterio técnico o científico, enrocando las costas, generando espolones o diques que en su criterio les van a ayudar a solucionar el problema de erosión costera. Estas obras son replicadas indiscriminadamente vecino tras vecino, hasta el punto en que aquello que inicialmente era un ambiente puro, de hermosos paisajes y playas extensas, inmejorables para el reposo, hoy son sectores invadidos por casas a punto de caerse, con costas enrocadas y ambientalmente degradadas, que por supuesto nadie quiere visitar y que cada vez tienen menor valor. Además de hacerlas más vulnerables a fenómenos como los huracanes y los tsunamis (Figura 2.36).



Figura 2.36. Erosión costera, playa San Luis, Isla de San Andrés.
Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

Construyendo con la naturaleza

Se han encontrado algunas soluciones de ingeniería costera a esta problemática, que involucra la construcción de obras civiles adecuadamente evaluadas y calculadas para recuperar las zonas costeras erosionadas de hecho la construcción de algunos espolones puede resultar conveniente, sin embargo no la proliferación de los mismos, sin ninguna característica técnica que les den validez.

Las nuevas tendencias indican que las mejores posibilidades se encuentran en ayudar a la naturaleza a regenerarse, por lo que la recuperación de playas, seguramente funciona mejor con su regeneración mediante dragados adecuados realizados bajo rigurosos estándares ambientales, y la reconstrucción de zonas naturales de defensa y amortiguamiento como son las zonas de manglar, bancos de arena, vegetación de playa, bosques primarios y dunas, entre otros, que permitan sostener la retroalimentación natural de arena, y el pulso de erosión y sedimentación natural de la playa, que funciona con la variación de las olas en épocas de diferentes regímenes de vientos. La playa de Sprat Bight en la Isla de San Andrés, es un ejemplo de construcción con la naturaleza (Figura 2.37), la vegetación que ha sido sembrada, evita que la arena se escape de la playa por acción del viento, ayudando a conformar la duna para que el sistema se pueda autorecuperar.

A estas nuevas técnicas se les denomina construcción con la naturaleza (*Building with nature*) y es hacia donde debe tender la recuperación de las zonas costeras, que una vez obtenida, deben ser defendidas públicamente para evitar su re-invasión y hacer que realmente gane la comunidad en general, al tener nuevamente costas de calidad al servicio de todos, pero esta vez con el adecuado manejo integrado que queda como lección aprendida de todos los errores que se cometen al respecto cuando se obra con la convicción de que la costa, el litoral, las aguas costeras y la playa, le pertenecen a alguien que tiene derecho a invadirlas y afectarlas para proteger su interés particular.



Figura 2.37. Playa de Sprat Bight en la Isla de San Andrés. Se observa vegetación que protege la playa de la erosión por acción del viento.

Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

2.3.5. Formación de los fondos marinos y su influencia en el movimiento oceánico

La oceanografía geológica estudia el comportamiento de los fondos oceánicos. Por medio de sondeos del fondo de muestras de sedimentos profundos, fotografías del suelo oceánico, mediciones del magnetismo de los minerales y otros métodos se ha llegado al concepto de la deriva continental, la expansión del suelo oceánico y la tectónica de placas. Esto corresponde a la noción de que la corteza terrestre está formada por placas que se crean en un borde y se destruyen en otro.

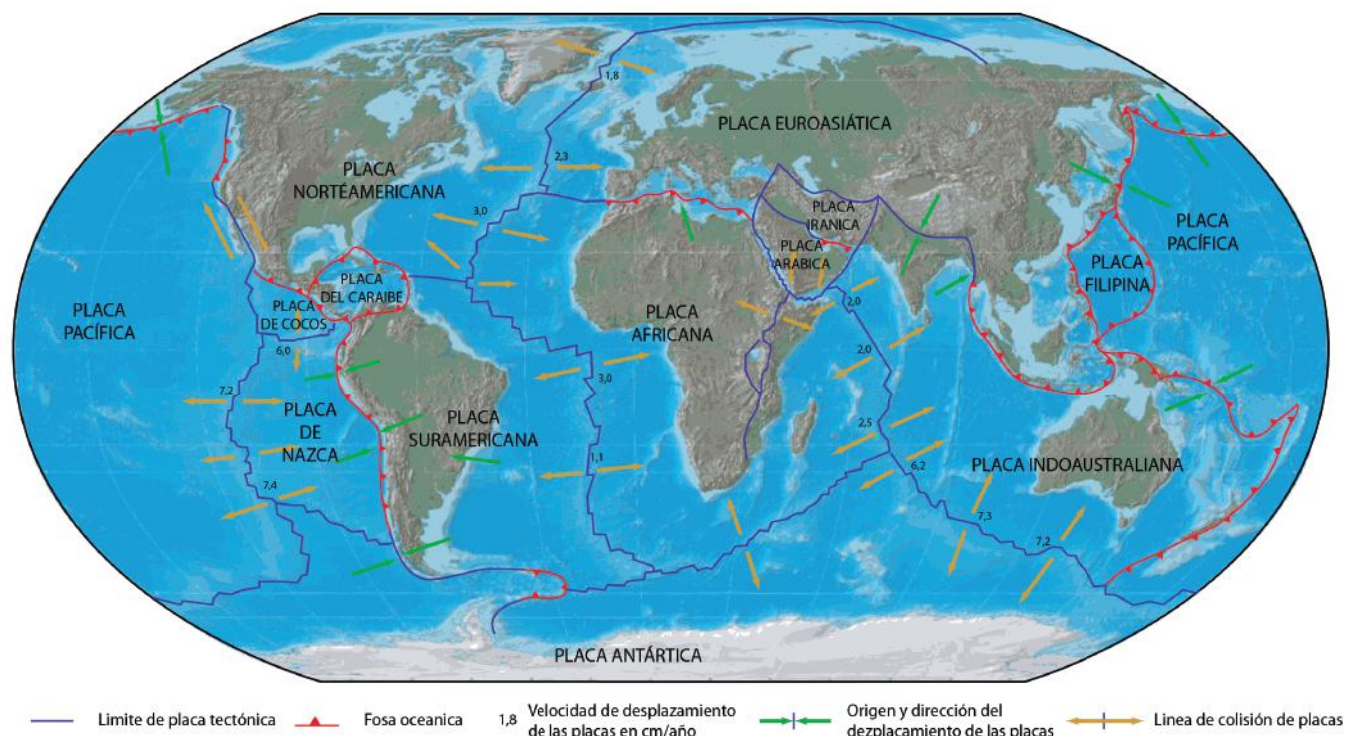
Antes de la teoría de la deriva continental dada por Alfred Wegener en 1912, que incluye la expansión del suelo oceánico y las placas tectónicas, los geólogos creían que la corteza terrestre era una capa claramente estable que envolvía al manto y al núcleo de la Tierra.

Según la teoría de tectónica de placas, la corteza terrestre está dividida en amplios segmentos que flotan sobre el manto; cuando una de estas placas se mueve sobre la esfera terrestre, cada uno de sus puntos describe una circunferencia (Figura 2.38). Este concepto tiene profundos efectos geológicos.

Cuando dos placas se mueven en direcciones opuestas, se abre entre ellas una fisura llamada centro de expansión del fondo oceánico. Los bordes más alejados del centro de expansión de dos placas vecinas interactúan (chocan) produciéndose movimientos relativos entre ellas. Se estima que se desplazan unas respecto a otras con velocidades de 2,5 cm/año.

Las placas tectónicas presentan bordes de tipo; divergentes (cuando dos placas se separan), convergentes (dos placas chocan una contra otra) y, transformantes (dos placas se deslizan una contra la otra). Los bordes de la placa son tectónicamente activos y están caracterizados por la presencia de terremotos, actividad volcánica y la formación de montañas y suelo oceánico.

En tiempos geológicos (miles a millones de años) las masas continentales se han desplazado drásticamente, lo que ha ocasionado la formación de grandes masas continentales (Pangea), la apertura o cierre de algunos mares y la separación de los océanos, produciéndose por ende, cambios en la dinámica de los océanos.



La posición de los continentes ha tenido un efecto muy marcado en la distribución del calor en el planeta por las diferencias existentes en la temperatura de la tierra versus la temperatura del agua. Esto ha ocasionado variaciones en los patrones climáticos y en transporte global de calor por parte de las corrientes de aire (viento) y las corrientes marinas.

La formación o cierre de algunos pasos oceánicos (como la formación del Istmo de Panamá o la apertura del paso de Drake entre Suramérica y la Antártica) han modificado las condiciones del clima global y han sido fundamentales en la variación del clima de tipo “invernadero” a climas más fríos del tipo glacial.

Figura 2.38 Principales placas tectónicas (India, Pacífica, Americana, Antártica, Africana y Euroasiática). Las flechas señalan la dirección del movimiento de las grandes placas, las cuales están normalmente limitadas por cordilleras (líneas azules) y fosas (zonas de subducción el líneas rojas). Algunas placas más pequeñas, de orden menor aparecen también rellenando y puntualizando este modelo.

Fuente: Vision Learning.

2.3.6. Tsunami

Definición

El término tsunami fue adoptado en 1964 por la Unión Geofísica Internacional. La palabra de origen japonés proviene de las palabras TSU = olas grandes y NAMI = puerto, haciendo alusión a las “grandes

olas en el puerto". A este fenómeno también se le denomina comúnmente maremoto.

Cabe aclarar que los tsunamis pueden ocurrir en cualquier océano o cuenca marítima del mundo pero es generalmente en las costas donde ocurre su mayor impacto. Más que una ola, el significado de la palabra Tsunami corresponde a la serie, conjunto o tren de olas de gran longitud y reducida amplitud, las cuales son causadas por la perturbación a gran escala de la superficie libre del mar. Estas olas se propagan en todas las direcciones desde el área generadora, siendo generalmente la dirección de propagación de la energía principal, ortogonal a la dirección del eje de perturbación (Figura 2.39).

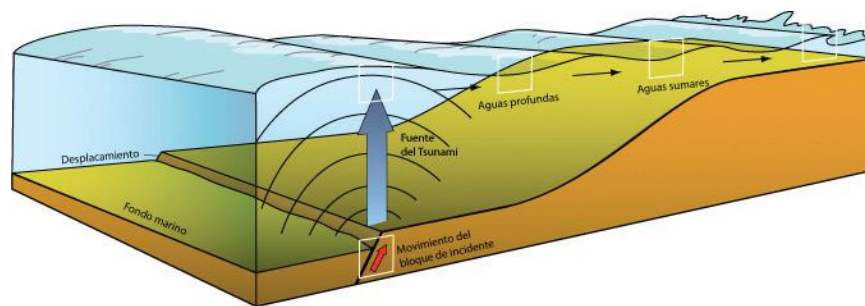


Figura 2.39. Representación de tsunami generado en la Isla de Monserrat por un flujo piroclástico y propagación de las olas 10 minutos después.

Fuente: Modificado de ITIC.

Generación

Los maremotos pueden ser generados por sismos o terremotos que abruptamente causan el desplazamiento vertical de la corteza terrestre. En algunas ocasiones las erupciones volcánicas de islas-cráteres o submarinas y los movimientos en masa de grandes proporciones en el fondo del mar pueden causar tsunamis. Muy poco frecuentemente ocurren por desprendimientos de un gran volumen de tierra costera o de un gran trozo de hielo o iceberg (Figura 2.40) o por fenómenos meteorológicos menos probables como el impacto de un meteorito sobre la superficie del mar.

Como se observa en la tabla 2.2, la mayoría de los tsunamis de gran magnitud se originan bajo la superficie acuática, de modo que una gran masa de agua del océano es impulsada fuera de su equilibrio normal e intenta recuperarse generando olas de gran tamaño.



Tabla 2.2. Principales causas que generan tsunamis. Fuente: Laboratorio Tsunami -Instituto de Matemáticas Geofísicas y Computacionales de Novosibirsk-Rusia.

Causa	Proporción
Sismos-Terremotos	75 %
Desprendimientos de tierra	8 %
Volcanes	5%
Fenómenos meteorológicos	2 %
Desconocida	10 %

El tamaño del tsunami estará determinado por la magnitud del movimiento telúrico y por la profundidad del lecho marino. No todos los terremotos bajo la superficie del mar generan maremotos, sino sólo aquellos de magnitud considerable con epicentro en el punto de profundidad adecuado.

Los sismos o terremotos pueden generar tsunamis con los mayores campos de olas, de más amplia propagación y cobertura en una cuenca oceánica. Aunque no todos los terremotos con epicentro cerca de la región costera producen tsunamis. Los sistemas de fallas asociados a las zonas de subducción pueden originar sismos de gran intensidad; la falla donde ocurre el sismo debe estar bajo o cerca del océano, y debe crear un movimiento vertical (de hasta varios metros) del piso oceánico sobre una extensa área (de hasta cien mil kilómetros cuadrados). Los sismos de foco superficial (profundidad menor de 70 km) a lo largo de zonas de subducción son los responsables de la mayor parte de los tsunamis destructores.

Propagación

La velocidad de propagación de las olas del tsunami depende de la profundidad del agua, por lo que varía según la morfología del fondo oceánico. En el océano profundo, las olas pueden oscilar entre 500 y 1 000 km/h, con longitudes de onda de entre 500 y 650 km y alturas de entre 30 y 60 cm, razón por la cual no son distinguibles en mar abierto ni siquiera desde el aire. En el lapso de unas pocas horas, un tsunami puede recorrer toda una cuenca oceánica desde una orilla hasta la otra (Figura 2.41). Los cambios en la profundidad del lecho

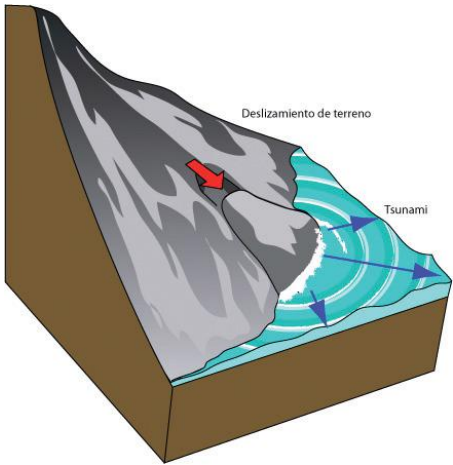


Figura 2.40. Tsunami originado por el deslizamiento de terrenos cerca de la costa. **Fuente:** Adaptada por el autor.

marino pueden generar un aumento o disminución de la velocidad de las olas, haya un enfoque o desenfoque de la energía transmitida o un cambio en la dirección de propagación.

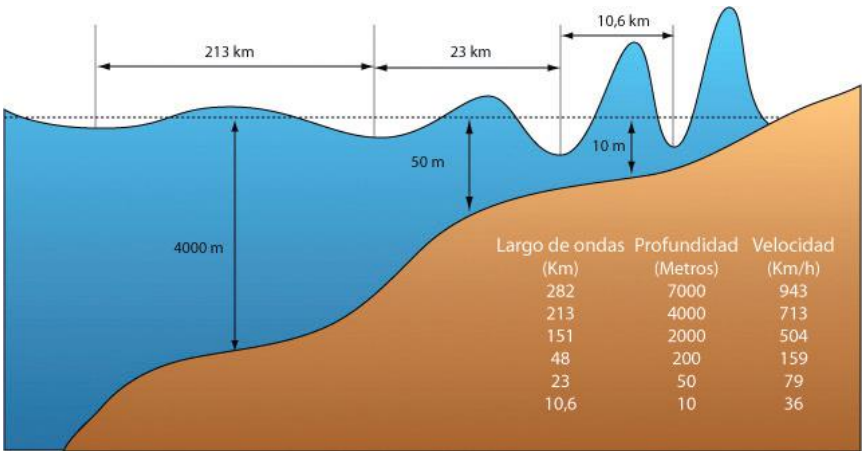


Figura 2.41. Características de la propagación de las olas de tsunami.
Fuente: Adaptada por el autor.

Por lo general antes de que un tsunami arribe a la costa se presenta un retiro súbito o una disminución repentina del nivel del mar (Figura 2.42). Esto se debe en ocasiones a que la zona de fractura que se ha producido por el sismo genera un espacio de grandes dimensiones (por ejemplo 0,05 km x 1 100 km x 0,015 km) que el mar tiende a ocupar, por lo cual el nivel del mar en la costa disminuye ostensiblemente. Otra causa del súbito descenso del nivel del mar puede deberse a que cuando un tsunami se acerca a la costa su velocidad disminuye puesto que la profundidad se va haciendo cada vez menor, pero parte de la energía que trae con la velocidad se transforma en energía potencial (se comprime la energía de onda en una distancia y profundidad pequeña), aumentando la altura de la ola, hasta que rompe finalmente en la costa.



Figura 2.42. Retiro del mar en costas de Sri Lanka, antes de la llegada del tsunami del 26 de diciembre de 2004.
Fuente: Digital Globe.

La manifestación de un tsunami en la costa puede presentarse como una rápida marea creciente o como el avance de una pared de agua turbulenta muy destructiva (Figura 2.43); esto depende de muchas variables como la transmisión de energía del sismo al mar, el periodo y longitud de las olas, la batimetría (relieve del lecho marino), la forma del litoral, el nivel de la marea en la cual arriba el tsunami, entre otras, las cuales inciden en el comportamiento final del oleaje como la altura de las olas, la velocidad de arribo y por ende la capacidad de destrucción.



Figura 2.43. Izquierda: Tsunami del 26 de Diciembre de 2004 acercándose a costas de Tailandia. Derecha: Tsunami del 26 de Mayo de 1983 acercándose a costas de la Isla Okushiri-Japón.

Fuente: Centro Internacional de Información de tsunami (ITIC).

El arribo sucesivo de las olas del tsunami puede variar entre 10 y 45 minutos, en consecuencia, el proceso de estabilización para alcanzar la normalidad de la superficie libre del océano, puede tomar horas.

Tipos de tsunami

Dependiendo del criterio, se pueden encontrar diversos tipos de clasificación de tsunami, pero la clasificación más usada es según su lugar de origen. Los tsunami de origen cercano ocurren cuando la fuente de perturbación se presenta a menos de 1 000 km de distancia de la costa. Pueden ser causados por flujos piroclásticos de erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra o pequeños terremotos. Cuando la perturbación inicial ocurre a más de 1 000 km de distancia se dice que es un maremoto de origen lejano. Éstos son originados principalmente por terremotos de gran magnitud que liberan grandes cantidades de energía a la columna de agua.

Esta clasificación es determinante al momento de considerar el sistema de alerta más adecuado y así establecer un tiempo mínimo de llegada con el cual se puedan tomar decisiones y salvar la mayor cantidad de vidas. Para el caso de tsunami de origen cercano se cuenta con pocos minutos o algunas pocas horas (2 horas como máximo), mientras que para los tsunami de origen lejano se pueden tener tiempos de respuesta de hasta 22 horas, como fue el caso del tsunami originado

en las costas de Chile en 1960, el cual atravesó todo el océano Pacífico hasta llegar a las costas de Japón (Figura 2.44).

Así mismo, los tsunamis se pueden clasificar según su zona de afectación en locales, regionales o de toda una cuenca (trans-oceánicos). Por lo general los tsunamis de origen cercano que son los que generan mayor destrucción y daños, ocasionan impactos de tipo local y algunas veces regional, mientras que los tsunamis de origen lejano generan principalmente impactos regionales y pueden llegar a afectar en algunos casos de toda una cuenca oceánica, siendo tsunami trans-oceánicos.

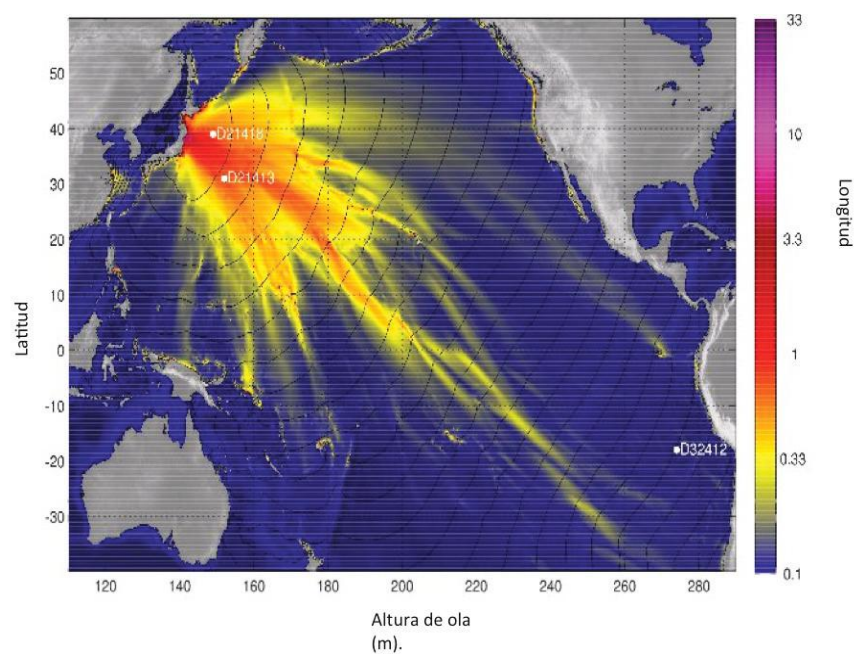


Figura 2.44. Modelación del tsunami ocasionado por el terremoto de 1960 en las costas de Chile, nueve horas después de su generación. Este tsunami se propagó por el océano Pacífico hasta alcanzar las costas de Hawai y Japón.

Fuente: ITIC-NOAA.

También están los denominados sismos-tsunami, que son aquellos que producen un tsunami extremadamente grande en relación a la magnitud del sismo generador. Por lo general, esa clase de sismos son bastante lentos y tienen un foco poco profundo.

Efectos

Generalmente el arribo de un tsunami no es la única causa de afectación o destrucción; a su vez los fenómenos asociados como son la licuefacción del terreno, la inundaciones, la destrucción causada por el impacto de las olas y la erosión dada después de la inundación son los causantes de las grandes catástrofes de estos fenómenos naturales (Figura 2.45).

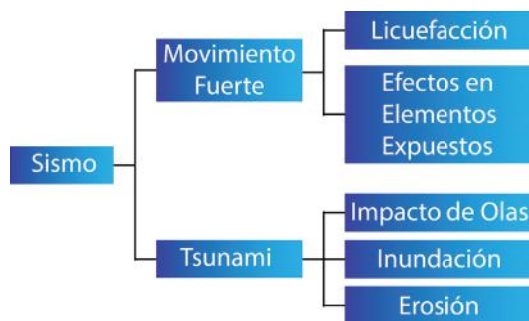


Figura 2.45. Fenómenos asociados a los sismos y consecuentes tsunamis.

Fuente: Adaptada de Plan Nacional para la Gestión del Riesgo por Tsunami (PNGRT).

Se puede concluir que el mayor impacto de los tsunamis se debe a las olas que golpean la línea de las costas ocasionando el deterioro o derrumbamiento de puentes o edificaciones, durante la inundación por las corrientes inducidas, las fuerzas de flotación, arrastre y las corrientes inducidas se produce un movimiento de viviendas, escombros y vehículos que podrían convertirse en una amenaza para los humanos y animales que han sido acarreados por las aguas. (Figura 2.46).



Figura 2.46. Aero fotografías de la ciudad de Banda Aceh en la Isla de Sumatra-Indonesia antes y después del tsunami del 26 de diciembre de 2004.

Fuente: Digital Globe

La licuefacción es un fenómeno en cual el terreno presenta pérdida de resistencia mecánica de un depósito de suelo. Esto ocurre cuando se recibe una carga dinámica rápida bastante alta, como la que se presenta durante un sismo. La resistencia mecánica debe entenderse como la capacidad física para resistir esfuerzos sin que se produzca falla o colapso. En síntesis, la licuefacción es cuando el suelo adquiere características de fluido y se comporta como tal, perdiendo cualquier rigidez; se evidencia mediante hundimientos, ebulliciones de arena (flujos ascendentes de arena y agua) y flujos de suelo, generando

debilitamiento de las estructuras; por lo general este fenómeno ocurre en suelos saturados o con un alto grado de humedad (Figura 2.47).



Figura 2.47. Efectos de la licuefacción de los suelos en el terremoto del 17 de Enero de 1995 en Kobe, Japón.
Fuente: USGS (U.S. Geological Survey)

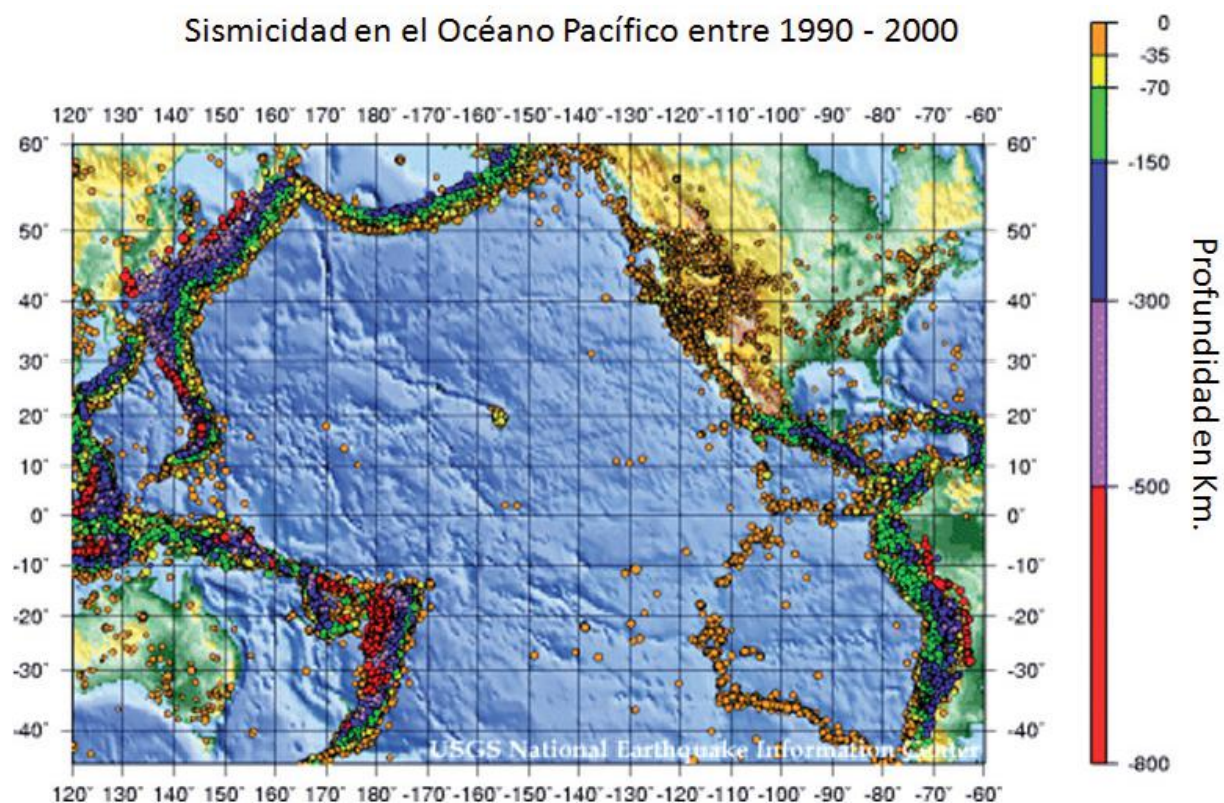
Los impactos sobre los elementos expuestos pueden ocasionar problemas durante la emergencia al impedir el acceso a los servicios que se distribuyen por intermedio de redes, esos servicios son para la comunidad como acueducto, alcantarillado, energía y comunicaciones; a su vez puede presentarse contaminación de las fuentes de agua como pozos, debido a la intrusión del agua marina, la cual a su vez puede transportar durante la penetración a la costa sustancias contaminantes y altas cargas de sedimentos.

En síntesis el costo social que se puede presentar por un fenómeno natural como el tsunami es bastante alto, ya que se pueden generar numerosas pérdidas de vidas humanas y heridos, a su vez un quebrantamiento del tejido social, familias sin hogar, desplazamiento y demás situaciones posteriores a la emergencia.

Lugares afectados por los Tsunami

Como se mencionó anteriormente el principal mecanismo tsunamigénico es el sismo o terremoto generado por subducción de placas. Las áreas más propensas a la ocurrencia de tsunami son las zonas donde se presenta esta condición en donde colisionan dos placas tectónicas, en zonas de subducción, donde la placa oceánica se desliza por debajo de la continental. En el margen continental del océano Pacífico se encuentra una zona de subducción muy activa a la que se le denomina comúnmente Cinturón de fuego del Pacífico

(Figura 2.48) y es el motivo de que los países costeros localizados en esta región estén continuamente amenazados por la ocurrencia de tsunamis.



Del total de tsunamis registrados en los océanos del mundo, en el periodo 1900 - 2000 la distribución geográfica es la siguiente (Tabla 2.3):

Tabla 2.3. Zonas afectadas por los tsunamis. Fuente: Laboratorio Tsunami -Instituto de Matemáticas Geofísicas y Computacionales de Novosibirsk-Rusia.

Zona geográfica	Proporción
Océano Pacífico	76 %
Océano Atlántico	9 %
Océano Índico	5 %
Mar Mediterráneo	10 %

Figura 2.48. Cinturón de Fuego del Pacífico. Se representa además la sismicidad ocurrida entre 1990 - 2000 y la profundidad a la que ocurren los sismos.

Fuente: USGS National Map.

La información de la tabla 2.3 muestra que a nivel mundial, la principal zona de amenazas de riesgos de tsunami, es la cuenca del Pacífico, ya que en los bordes de ésta se extiende el “Cinturón de Fuego”, el cual se caracteriza por la actividad sismo-tectónica asociada al mecanismo de subducción de las placas oceánicas, bajo las placas continentales de Suramérica y Asia mayoritariamente. Debido al alto riesgo de esta zona y a que el océano Pacífico ocupa cerca de 1/3 del total de la superficie terrestre, el 76% de los tsunami que se presentan en el mundo se dan en algún sector de esta gran cuenca oceánica.

Del total de los tsunami registrados en el período 1900 - 2001 para el océano Pacífico (796 tsunami) la mayoría de éstos se presentaron en las costas de Japón, Suramérica y las islas del Pacífico (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Regiones de la cuenca del Pacífico afectadas por tsunami. Fuente: Laboratorio Tsunami -Instituto de Matemáticas Geofísicas y Computacionales de Novosibirsk-Rusia.

Regiones afectadas en el Océano Pacífico	Proporción
Cerca de Japón	17 %
Suramérica	15 %
Nueva Guinea e Isla Salomón	13 %
Indonesia	11 %
Kamchatka e Isla Buriles	10 %
México y Centroamérica	9 %
Filipinas	9 %
Nueva Zelanda y Tonga	7 %
Alaska y Costa Oeste de Norteamérica	6 %
Hawai	3 %

Estrategias de mitigación

Debido a que no existen métodos para pronosticar la generación de un tsunami (ya que no se puede pronosticar la ocurrencia de sismos o de los deslizamientos de terreno), lo único que se puede hacer es tener un sistema de vigilancia continua y en tiempo real del comportamiento del nivel del mar con el fin de monitorear el arribo de oleaje característico de tsunami a las estaciones de la red mareográfica existente más próximas al epicentro del sismo tsunamigénico (Figura 2.49).

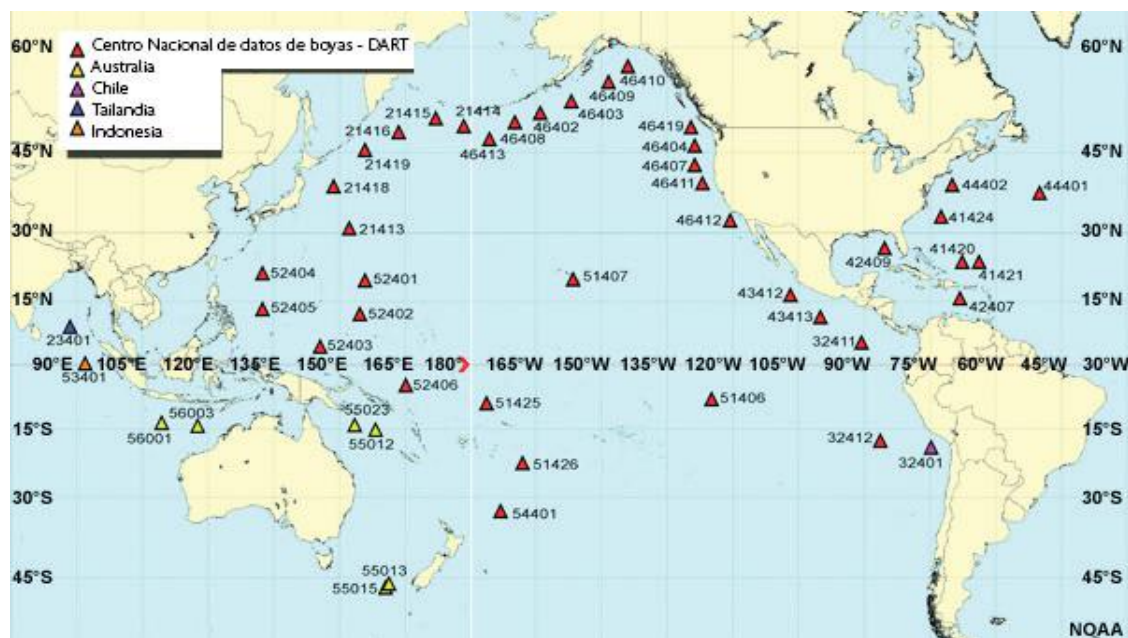


Sólo se dispone del método para calcular las coordenadas (latitud, longitud y profundidad) del epicentro del sismo y de su magnitud, elementos que en confrontación con registros históricos y estudios teóricos, permiten efectuar un análisis que indique, según el caso, la necesidad de activación de una alerta o alarma por probabilidad de ocurrencia del tsunami.

Frente a otros fenómenos peligrosos de origen geológico, los tsunamis tienen la gran ventaja de ser pronosticables a corto plazo y con una buena precisión, debido a que las ondas sísmicas en el interior de la Tierra, se propagan a velocidades superiores a las olas del tsunami en el océano, lo cual permite aprovechar la diferencia de tiempo entre el arribo de las ondas y de las olas, para la detección, difusión de una alerta y evacuación de la población amenazada.

Debido al gran riesgo por tsunamis al que estaban expuestos los países de la cuenca del Pacífico, que es el área más propensa a este tipo de fenómenos, y al tsunami que afectó a toda la cuenca en 1960, se estableció en 1965 con apoyo de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de las Naciones Unidas (UNESCO) el Sistema de Alerta por Tsunami del Pacífico (PTWS por sus siglas en inglés) y el Centro Internacional de Información de Tsunami (ITIC por sus siglas en inglés). Posteriormente se creó un Grupo de Coordinación Internacional para el PTWS (ICG-ITSU por sus siglas en inglés) establecido en 1968. El PTWS está conformado por 27 países (incluyendo Colombia) y posee su centro de operaciones que es el Centro de Alerta por Tsunami del Pacífico (PTWC) en Honolulu-Hawái, el cual trabaja con apoyo de la Administración Atmosférica y Oceanográfica de Estados Unidos (NOAA).

El PTWS utiliza la información de más de 100 estaciones sismográficas para localizar los epicentros de potenciales sismos tsunamigénicos en la cuenca del Pacífico y estaciones mareográficas y sensores de presión para monitorear el nivel del mar. La función del PTWS es difundir los boletines de alertas y observaciones a las autoridades de los estados por intermedio del PTWC; a su vez la función del ICG-ITSU es verificar que la información sea difundida a todos los estados miembros de acuerdo a los procedimientos previamente establecidos. También existen algunos sistemas regionales como en el Noroeste de Norteamérica, el Pacífico Centroamericano y sistemas nacionales de alerta como en el caso de Japón o Chile.



A raíz del tsunami del 26 de diciembre de 2004, la COI presta apoyo a los países de la cuenca del océano Índico, para el establecimiento y puesta en marcha del Sistema de Alerta por Tsunami para esa región con su respectivo Grupo de Coordinación Internacional. Inicialmente, el sistema de alerta para esa región estaba siendo suplido por el PTWS y por la Agencia de Meteorología del Japón.

Figura 2.49. Mapa del mundo con la ubicación de sensores de Tsunami.

Fuente: NOAA 2005.

El proyecto global a cargo de las Naciones Unidas a través de la COI contempla que todas las cuencas oceánicas del planeta tengan sus respectivos Sistemas de Observación y Alerta para diferentes tipos de amenazas naturales oceánicas.

Tsunami devastadores

Los tsunami más recordados son aquellos que han logrado propagarse alrededor de toda una cuenca oceánica generando grandes pérdidas socio-económicas, aunque como ya se ha dicho son los tsunami de origen cercano los que pueden ser más destructivos a nivel local y regional. Es así como en las últimas décadas se presentaron 13 tsunami trans-oceánicos que lograron atravesar parcial o totalmente el océano Pacífico (Tabla 2.5).

Se destaca el tsunami de 1960 en las costas de Chile, el cual se generó por el mayor terremoto jamás antes registrado ($M_g = 9,5$). El tsunami



que provocó el terremoto llegó 13 horas después a Hawai, matando a 61 personas y casi 22 horas después, arribando a las costas de Japón, donde cobro la vida de 122 personas. En conjunto, el terremoto y posterior tsunami terminaron con la vida de más de 2 000 personas y dejaron más de 500 millones de dólares en pérdidas (en dólares de 1960).

Tabla 2.5. Tsunami devastadores ocurridos desde 1945. Grados en la escala Richter. Fuente: ITIC-NOAA.

Fecha	Magnitud sismo*	Zona geográfica donde se generó	Pérdidas de vidas humanas
Abril 1 de 1946	7,8	Is. Aleutianas-Alaska, EE.UU.	156
Noviembre 4 de 1952	8,2	Península de Kamchatka-Rusia	2 300
Marzo 9 de 1957	8,3	Is. Aleutianas-Alaska, EE.UU.	300
Mayo 22 de 1960	9,5	Costa Chilena	5 891
Marzo 28 de 1964	8,4	Bahía Príncipe Guillermo-Alaska, EE.UU.	160
Agosto 16 de 1976	8,0	Islas Mindanau y Sulu. Filipinas	5 000
Diciembre 26 de 2004	9,0	Sumatra Océano Índico	230 000
Marzo 1 de 2005	8,6	Sumatra	1 300
Julio 17 de 2006	6,1	Isla Java	600
Abril 2 de 2007	8,1	Islas Salomón	28
Septiembre 29 de 2009	8,0	Pacífico Sur	194
Febrero 27 de 2010	8,8	Chile	524
Marzo 11 de 2011	8,9	Japón	Entre 15 000 y 18 000

También han destacado por su amplia área de afectación los siguientes:

- Tsunami del terremoto de Lisboa: ocurre por un terremoto que afectó a Europa; principalmente la ciudad de Lisboa, Portugal el 1 de Noviembre de 1755. El tsunami cruzó el océano Atlántico hasta las Antillas. El sismo pudo tener una magnitud de 8,5 grados en la escala de Richter.
- Tsunami de la explosión del volcán Krakatoa: el 27 de agosto de 1883 en el estrecho de Sonda al oeste de la isla de Java-Indonesia. Las olas alcanzaron en algunas zonas más de 30 m, ocasionando pérdidas de más de 36 000 vidas humanas. Cambios en el nivel del mar fueron percibidos en todo el océano Índico y en algunas áreas del océano Pacífico y Atlántico; se estima que la explosión del volcán fue equivalente a una bomba atómica de 200 megatones.
- Tsunami por terremoto en la Bahía de Lituya: el 9 de julio de 1958 se registró un sismo de magnitud 8,2 en la escala de Richter en las costas de Alaska. El desprendimiento de un muro de rocas de 1 000 metros de altura y su precipitación al mar generó una ola de aproximadamente 500 metros de altura que se proyectó violentamente sobre el norte de la bahía destruyendo la vegetación en un radio de cerca de un kilómetro tierra adentro.

Casos específicos de tsunami devastadores

Sumatra 2004

El terremoto con epicentro en la costa oeste de Sumatra (al norte de las islas Simeulue) ocurrido el 26 de diciembre de 2004 ocasionó tsunami devastadores en las costas de la mayoría de los países que bordean el océano Índico, inundando comunidades costeras y acabando con la vida de miles de personas (Figura 2.50). Un recuento de las Naciones Unidas deja a un total de 229 866 pérdidas humanas, incluyendo 186 983 muertos y 42 883 personas desaparecidas.

La magnitud del terremoto registrada fue de 9,0 a 9,3 en la escala de Richter, siendo el segundo terremoto más grande monitoreado después del terremoto de Valdivia, Chile en 1960. Es también el segundo movimiento telúrico más largo registrado, durando alrededor

de 10 minutos y dando lugar a terremotos en lugares tan alejados como Alaska. El tsunami resultante devastó las costas de Indonesia, Sri Lanka, la India, Tailandia con olas que llegaron a los 30 m.

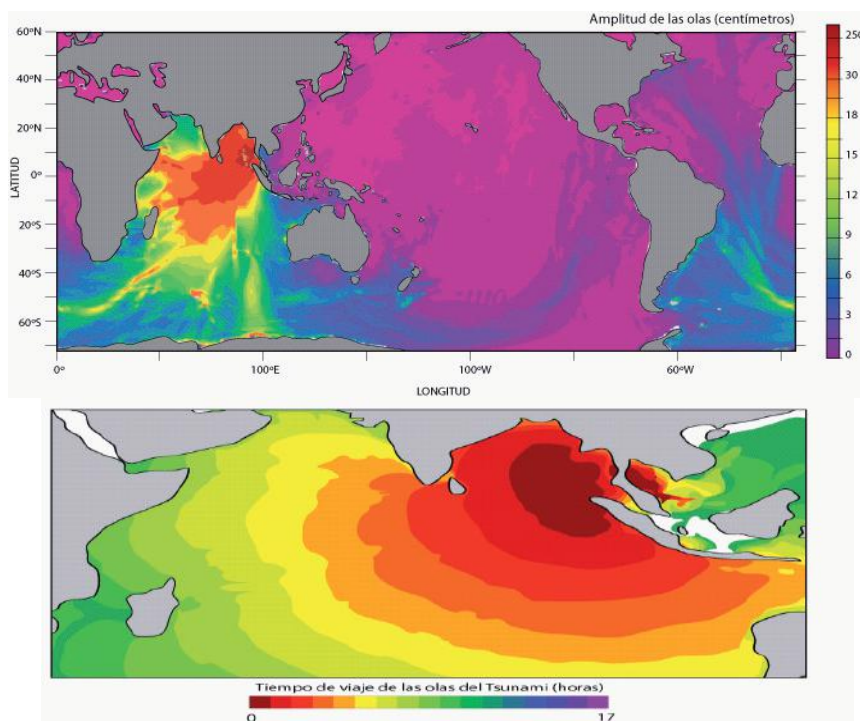


Figura 2.50. Tsunami de Sumatra 2004. Arriba: Amplitud de las olas del tsunami ocurrido el 26 de diciembre de 2004 en el océano Índico. Abajo: Tiempo de viaje de las olas de tsunami generadas por el fuerte sismo.

Fuente: Laboratorio Tsunami -Instituto de Matemáticas Geofísicas y Computacionales de Novosibirsk-Rusia.

Chile 2010

El terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010, que alcanzó una magnitud de 8,8 en la escala MW (sucesora de la escala Richter) ubicó su epicentro frente a Curanipe y Cobquecura, 150 km al noroeste de Concepción (VIII Región) a 47,4 km de profundidad bajo la corteza terrestre.

El sismo duró cerca de 3 minutos fue en lugares como Buenos Aires y Sao Paulo. Es considerado como el segundo más fuerte en la historia del país y uno de los cinco más fuertes registrados en todo el mundo.

El tsunami resultante impactó las costas, destruyendo localidades ya devastadas por el terremoto, como Talcahuano, Constitución, Cobquecura, Dichato, entre muchas otras. El archipiélago de Juan Fernández, fue impactado por las marejadas que arrasaron con su único poblado, San Juan Bautista.

Japón 2011

El terremoto de 9,0 en la escala MW ocurrido el 11 de marzo de 2011 originó un tsunami en Japón que dejó entre 15 000 y 18 000 muertos (Figura 2.51). Después del desastre natural hubo varios incidentes en la central nuclear de Fukushima, que ocasionaron el derrame del agua de enfriamiento del reactor nuclear contaminada con radiactividad.



Figura 2.51. Tsunami ocurrido en el noreste de Japón el 11 de marzo de 2011.

Fuente: Wordpress, Japón 2011.

Tsunami en Colombia

Durante el siglo XX ocurrieron cuatro sismos que afectaron destructivamente al litoral Pacífico colombiano y el norte de Ecuador. El primero de ellos fue el gran sismo-tsunami del 31 de enero de 1906 con longitud de ruptura de aproximadamente 500 km, desde Manta (0,59°S) hasta Buenaventura (3,54°N). No obstante que el tsunami llegó con la marea baja, arrasó todas las viviendas asentadas cerca de la playa en la bahía de Tumaco.

Posteriormente, al norte de Ecuador y en Colombia ocurrieron los sismos del 14 de mayo de 1942 y del 19 de enero de 1950. El 12 de diciembre de 1979 otro sismo-tsunami afectó la región costera desde Tumaco hasta Buenaventura ocasionando pérdidas humanas y millonarios daños económicos (Figuras 2.52 y 2.53).

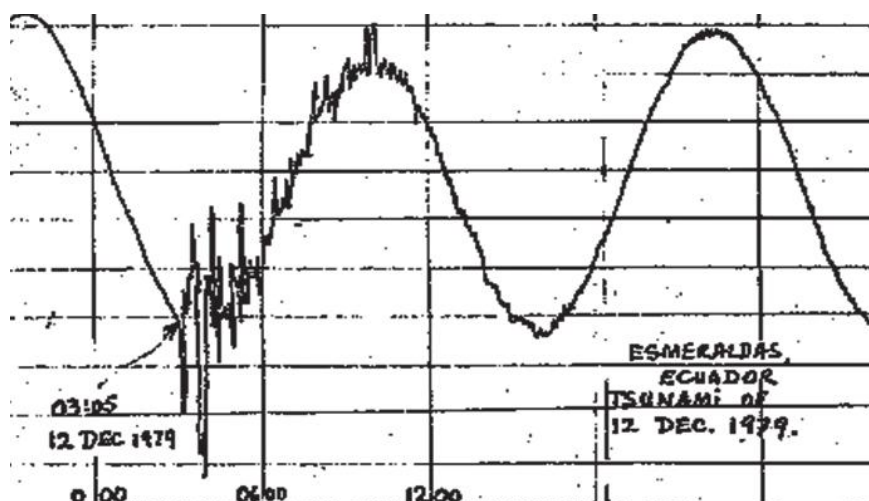


Figura 2.52. Registro obtenido del mareógrafo de Esmeraldas, Ecuador el 12 de diciembre de 1979. Se nota claramente la perturbación del tsunami en marea baja, esto favoreció a la población del Norte de Ecuador y del Sur de Colombia.

Fuente: Cortesía Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 1980.



Figura 2.53. Destrucción de viviendas costeras en Tumaco, Colombia, como consecuencia de tres fenómenos: sismo, licuefacción y tsunami de diciembre de 1979. **Fuente:** Fotografía *International Tsunami Information Center*, George Pararas-Carayannis, 1980.

Estudios realizados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP) en Tumaco, han demostrado que la costa del Pacífico colombiano se encuentra en situación de alto riesgo, por lo que se han desarrollado campañas de prevención y educación (simulacros de evacuación) en la comunidad con el fin de mitigar los daños materiales y las pérdidas de vidas ante la ocurrencia inminente de un próximo tsunami en la región.

Hasta el año 2008 en Colombia no existía un sistema de alerta integral que permitiera monitorear el nivel del mar, ni la actividad sísmica de manera simultánea, debido a la ausencia de una red mareográfica destinada para tal fin. Además, la información sísmica manejada por organismos no gubernamentales como el Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO), actualmente Corporación OSSO, y gubernamentales como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) permitía emitir alertas basadas en el estudio y conocimiento de las características sísmicas de eventos que podrían tener la capacidad de generar un tsunami, pero no se disponía de datos que permitieran identificar si realmente se había producido un evento de estas características.

Por esta razón, la Dirección General Marítima (DIMAR), consciente de la necesidad de contar con un sistema de alerta de tsunami más completo para el país, encargó al CCCC, la elaboración de un anteproyecto para la creación del Centro de Alerta de Tsunami (CAT). En marzo de 2009, se instaló y se puso en funcionamiento la red mareográfica específica para tsunami en el Pacífico colombiano, así como la central de monitoreo del CAT en las instalaciones del CCCC. Las estaciones mareográficas, compuestas por mareógrafos de radar y presión ubicados en la bahía de Tumaco, bahía de Buenaventura e isla Malpelo, con transmisión satelital fueron adquiridas para soportar una tasa de transmisión satelital de menos de diez minutos.

En el Caribe también ocurren tsunamis, generados por sus márgenes sísmicamente activos principalmente. Los catálogos históricos muestran que el fenómeno es comparativamente escaso. Además las costas colombianas están alejadas de las fuentes más importantes, en la zona de subducción de las Antillas Menores. Por tanto se puede concluir que el nivel de amenaza de tsunamis en el Caribe colombiano es bajo, pero no nulo.



2.3.7. El Niño-La Niña Oscilación Sur (ENOS)

Uno de los procesos de interacción más importantes a escala global por sus repercusiones en el clima de todo el planeta es las oscilaciones interanuales conocidas como El Niño, La Niña y la Oscilación del Sur (denominados eventos ENOS).

Colombia es uno de los países en donde se percibe sensiblemente dicho efecto y donde el impacto socioeconómico y ambiental es considerable. Por ello, es necesario que los diferentes sectores y regiones del país estén enterados sobre los aspectos relacionados con este fenómeno climático.

El Niño es el calentamiento del Pacífico tropical que ocurre cada 3 a 5 años y dura de 12 a 18 meses. La Niña es el enfriamiento anómalo que ocurre, algunas veces, posterior a un evento cálido. Esta dinámica está relacionada con la Oscilación del Sur, que es la diferencia en presiones atmosféricas existentes entre Australia (y la región oriental de Asia) y Tahití (Pacífico tropical). El Índice de Oscilación Sur (IOS) es positivo cuando ocurren eventos fríos La Niña y negativo durante periodos cálidos El Niño.

Para entender estos eventos anómalos, se necesita primero conocer las condiciones que se consideran neutrales (normales). La región ecuatorial recibe los máximos de radiación solar, por lo que las presiones atmosféricas son las más bajas del planeta, y los vientos soplan hacia esta región tropical formando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde convergen los vientos alisios del noreste (del Hemisferio Norte) y del sureste (del Hemisferio Sur).

A lo largo del Ecuador los alisios normalmente tienden a soplar zonalmente (de este a oeste) dirigiendo las corrientes oceánicas superficiales que fluyen hacia el oeste. Esta corriente apila las aguas cálidas ecuatoriales en el oeste, mientras que en el este los vientos favorecen la ocurrencia de surgencias costeras. Estas aguas frías en el Pacífico este y cálidas en el Pacífico oeste favorecen el contraste térmico y refuerzan aún más los vientos alisios ecuatoriales (los vientos soplan siempre de las altas a las bajas presiones) que soplan de este hacia el oeste. Este se conoce como proceso de retroalimentación positiva.

A nivel subsuperficial las aguas cálidas tienden a profundizarse hasta 150 m en el oeste, mientras que las surgencias costeras en Suramérica mantienen la termoclina muy cerca de la superficie. Así, la termoclina se hunde hacia el oeste y el nivel del mar disminuye hacia el este, observándose diferencias zonales de hasta 60 cm.

Durante El Niño, los vientos alisios se debilitan a lo largo del ecuador a medida que la presión atmosférica aumenta en el Pacífico oeste y disminuye en el Pacífico este (Oscilación del Sur negativa). Los vientos más débiles permiten que el agua superficial cálida, que normalmente se encuentra confinada al Pacífico oeste, migre hacia las costas de Suramérica. Las surgencias inducidas por el viento, proceso que lleva aguas frías y ricas en nutrientes en las costas occidentales de Norte y Suramérica también se pueden ver reducidas o son menos eficiente en traer agua profunda a la superficie, lo que ocasiona que las temperaturas de la superficie del mar (TSM) aumenten radicalmente (Figura 2.54).

En la atmósfera ocurren intensas precipitaciones y densa nubosidad sobre las aguas oceánicas más cálidas, lo cual es típico del Pacífico oeste. A medida que estas aguas empiezan a migrar hacia el este, así lo hace también la banda nubosa y las fuertes lluvias. El calor liberado hacia la tropósfera media y alta provee de una fuente de energía que dirige los patrones del viento, extendiéndose la influencia de El Niño a remotas regiones del planeta. A este fenómeno se le denomina teleconexiones.

Cambios en la circulación atmosférica producen sequías, inundaciones, tormentas inusuales, ondas de calor y otros eventos climáticos extremos con serias consecuencias socio-económicas a nivel mundial. Sin embargo, El Niño puede tener influencias positivas en el clima, como es el caso de inviernos menos severos en Norteamérica.

La Niña es el fenómeno con tendencias opuestas a El Niño en el Pacífico ecuatorial. Se caracteriza por vientos alisios más fuertes de lo normal y temperaturas de la superficie del mar más frías que el promedio climatológico. También se caracteriza por presiones atmosféricas inusualmente altas (bajas) en el Pacífico tropical oriental (occidental) asociadas con valores positivos de la Oscilación del Sur.



Los efectos de La Niña en el clima global son opuestos a los de El Niño, por lo que se dice que ambos eventos son parte de un ciclo que oscila de año a año entre condiciones cálidas, frías o neutrales en el Pacífico tropical.

Después de los desastres causados por El Niño de 1982 - 1983, se inició un programa internacional a 10 años 1985 - 1994 que buscaba mejorar el entendimiento, detección y pronóstico de la variabilidad asociada a eventos ENOS. El programa TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) y más recientemente el proyecto TAO (Tropical Atmosphere Ocean) cuenta con una extensa red de anclajes, boyas de deriva, estaciones fijas en tierra, mediciones realizadas en buques de investigación oceanográfica y observaciones satelitales, con las cuales se realiza el monitoreo en tiempo real de las condiciones del océano y la atmósfera en el Pacífico ecuatorial. Gracias a estas observaciones se han logrado mejorar los modelos de pronóstico y se ha alcanzado un nivel elevado de entendimiento de la evolución de los eventos ENOS de distinta magnitud.

En general, todas las teorías relacionadas con eventos El Niño y La Niña coinciden en que estas oscilaciones interanuales redistribuyen el contenido de calor oceánico superior (o volumen de agua cálida) de la franja ecuatorial (primeros 300 m de la columna de agua).

Antes del inicio de El Niño el contenido de calor se acumula en el Pacífico oeste debido a la intensificación de los vientos alisios. Coincidente con el inicio de El Niño se da la ocurrencia de unas series de eventos de viento del oeste (westerlies) en el Ecuador, que son manifestaciones superficiales de las oscilaciones Madden-Julian (MJO) que se propagan desde el Índico hacia el Pacífico este.

Estos vientos excitan secuencias de ondas Kelvin ecuatoriales de hundimiento que se propagan hacia el este, favoreciendo la redistribución del contenido de calor oceánico ecuatorial del oeste. Estas ondas ecuatoriales son el mecanismo por el cual las anomalías del viento en el Pacífico central asociadas con la Oscilación Sur producen el aumento del nivel del mar y del contenido de calor en el Pacífico ecuatorial oriental durante El Niño, disminuyendo simultáneamente en el Pacífico occidental.

Los eventos ENOS ha ocurrido desde hace miles de años, incluso cuando las condiciones climáticas eran muy diferentes al clima actual. Sin embargo, los eventos El Niño se han hecho cada vez más frecuentes en las últimas décadas y al mismo tiempo las temperaturas globales han aumentado rápidamente hasta niveles nunca antes vistos.

Los modelos estudiados indican que los eventos ENOS continuarán ocurriendo en el futuro a medida que el calentamiento global se intensifique, pero el impacto del cambio climático en El Niño es tema de discusión actual. Observaciones satelitales sugieren que la intensidad y frecuencia de los eventos El Niño en el Pacífico ecuatorial central ha sido doblada en las últimas tres décadas. Esto ha sido relacionado con la tendencia global de calentamiento.

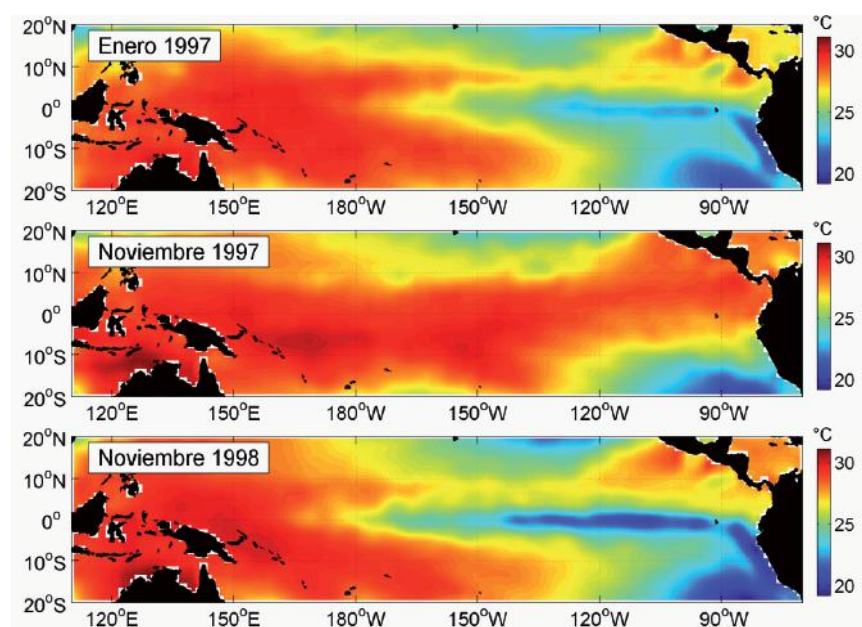


Figura 2.54. Variación de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico tropical durante enero 1997 (condición normal), noviembre 1997 (El Niño en etapa madura) y noviembre 1998 (condición La Niña).

Fuente: TSM de la NOAA calculada por Reynolds *et al.*, 2002.

El Niño y La Niña en Colombia

El Niño se manifiesta directamente en la costa Pacífica colombiana con incrementos de la temperatura superficial del mar y aumentos del nivel medio del mar. Igualmente, tiene un efecto climático sobre todo el territorio colombiano. Según estudios realizados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en los periodos de permanencia de El Niño, las temperaturas medias mensuales en la mayor parte del territorio nacional registran valores



entre 1°C y 2°C por encima de lo normal; en la región Pacífica pueden alcanzar anomalías superiores a 2°C o más.

El efecto de El Niño es variable en todo el territorio nacional, observándose déficit en los volúmenes de precipitación acumulados en las regiones Andina, Caribe y en la Orinoquia y exceso de lluvias en el sur de la región Pacífica colombiana, en la vertiente oriental de la cordillera oriental y en algunos sectores de la Amazonia.

Las manifestaciones de La Niña son las contrarias, con valores de TSM por debajo de los promedios históricos en la cuenca del Pacífico colombiano y excesos de precipitación en las regiones que sufren de déficit de precipitación durante El Niño y viceversa.

Las variaciones climáticas tales como cambios en los patrones de lluvia y evaporación relacionadas con El Niño, ocasionan alteraciones en el ciclo hidrológico y han afectado la dinámica y la distribución de la oferta hídrica en todo el país. El déficit en los rendimientos hídricos alcanza porcentajes mayores del 30% en regiones donde normalmente este recurso es escaso. Esto afecta principalmente los abastecimientos de agua potable, la generación hidroeléctrica, los sistemas de riego para la agricultura y la navegación, entre otros.

En el 2010 y 2011, la ocurrencia de La Niña creó una verdadera catástrofe en Colombia, al dejar un saldo de 464 muertos de acuerdo con datos oficiales del Ministerio del Interior y de Justicia, y aproximadamente \$616 000 millones de pesos necesarios para superar la emergencia sin que hasta la fecha de edición de este libro se tuviera aún un informe oficial nacional consolidado con el costo total de los daños causados al país por estas anomalías climáticas. La Sociedad de Agricultores de Colombia ha reportado 195 000 hectáreas afectadas y 155 000 kilómetros de vías (60% de las vías nacionales) en regular o mal estado y 14 puntos de bloqueo de vías.

De acuerdo con la Federación Nacional de Ganaderos de Colombia, debido a las inundaciones producidas por La Niña 2010 – 2011, quedaron dos millones de cabezas de ganado desplazadas, 40 000 animales muertos y seis millones de hectáreas propicias para la ganadería quedaron inundadas (Figura 2.55).

Este panorama ha sido recurrente en países como Chile, Perú, Ecuador, durante eventos anteriores El Niño o La Niña, por lo que resulta de gran importancia continuar incrementando la capacidad de investigación científica oceanográfica, con el fin de mejorar la modelación matemática de dichos eventos climáticos interanuales, para ofrecer mejores pronósticos y facilitar la preparación técnica, política y económica de los Estados para enfrentar este tipo de eventos.



Figura 2.55. Las inundaciones causadas por La Niña ocurrida entre mayo 2010 y junio 2011 en el territorio colombiano.

Fuente: Fotografía Ricardo Maldonado / EFE para Portafolio.co (Fecha: 3 de junio 2011).



PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

Calcular la longitud de la onda con un cronómetro

Con un cronómetro con el que se pueda medir con precisión de un segundo, determinar el periodo de las olas más grandes. Simplemente se toma el tiempo transcurrido entre la llegada de las olas a la zona de rompiente. Usando la fórmula $L = 1,56 T^2$, en donde L es la longitud de onda en metros y T el periodo en segundos, calcular la longitud de onda para las olas, cuyo periodo se ha medido.

Medición de la altura de las olas en la zona de rompiente

Desplazándose en dirección perpendicular a la playa haga coincidir con la altura de sus ojos la parte más alta de la ola rompiendo y la línea del horizonte. La diferencia de elevación entre sus ojos y el nivel del mar en la playa se aproxima a la altura de las olas en la zona de rompiente, calcule con este método la altura de la ola rompiente en la playa.

Si resulta factible, bajo todas las precauciones de seguridad, medir la profundidad del agua en la zona de rompiente, encontrará que allí corresponde aproximadamente a 1,3 veces la altura de la ola.

Repetir el ejercicio completo con dos o tres salidas de campo diferentes al mismo lugar, midiendo, período, longitud y altura de ola, así como profundidad en cada zona de rompiente, dirección de la ola, velocidad y dirección del viento, comparar los resultados y escribir conclusiones.

Observaciones

Parado en la playa, observar el hecho de que el frente de olas llega aproximadamente paralelo a la línea de la costa, no importa cuál sea la dirección de la que provengan las olas mar adentro. Explique este fenómeno en su reporte.

Explique el fenómeno de rompimiento de las olas al llegar a la playa incluyendo sus medidas, apóyese en la figura 2.56.

Según sus observaciones de campo describa la forma en que llegan las olas a la playa y nombre el fenómeno que hace que eso suceda y describa el fondo marino, apóyese en la figura 2.57 para realizar un gráfico similar que acompañe las explicaciones de sus conclusiones.

Nota de seguridad: Recuerde no entrar al mar sin que se haya obtenido permiso para ello y se cumplan todas las medidas de seguridad que sean fijadas, según el caso. De ninguna manera es obligatorio entrar al mar, aún con supervisión, si no se ha preparado para ello.

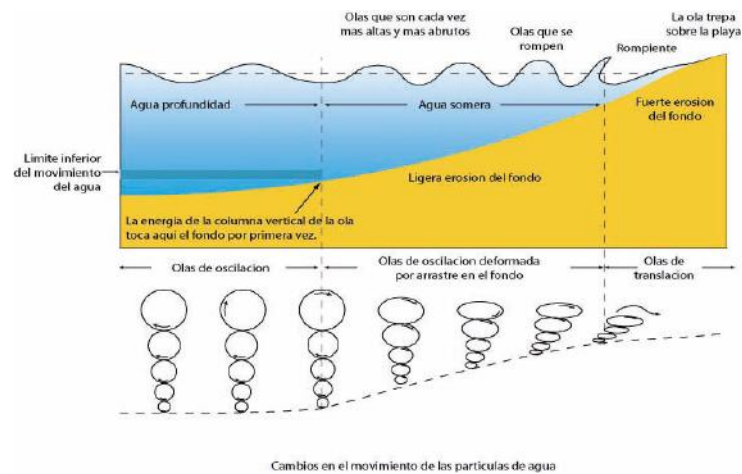


Figura 2.56. Cambio de las olas en su paso de aguas profundas a aguas someras.
Fuente: Modificada de Longwell & Flint (1981).

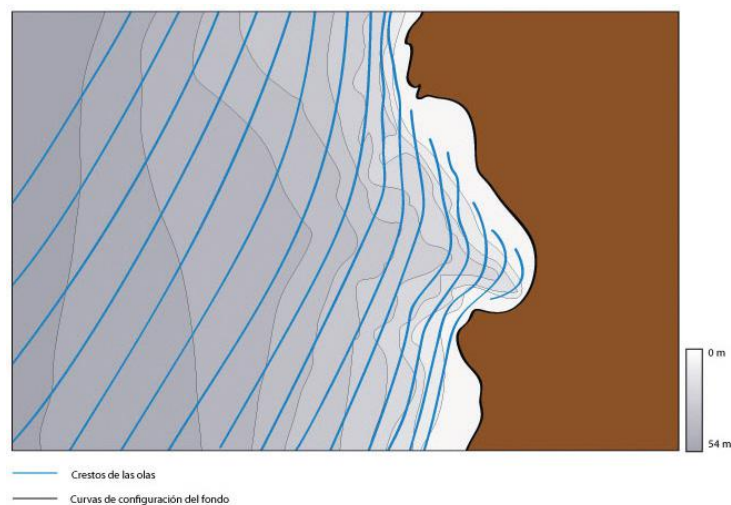


Figura 2.57. Refracción de las olas biométricas.
Fuente: Modificada de Longwell & Flint (1981).



Manejo Integrado de las zonas costeras

Investigar por qué el calentamiento global se relaciona con el aumento del nivel del mar y la erosión costera, escriba un ensayo de tres páginas.

Medición de la dirección de la deriva litoral

Tome una botella plástica de un litro o más y píntela de color rojo o amarillo fosforescente de tal manera que se haga muy visible y facilite su seguimiento, déjela secar para evitar que pierda fácilmente el color. Llénela de arena y pruebe su flotación hasta que quede sumergida aproximadamente en un 70%, luego tápela herméticamente y láncela más allá de la zona de rompiente, observe sus movimientos y desplazamientos y describa la experiencia en su informe de salida de campo.

Tome una pelota de aproximadamente 5 cm de diámetro y que flote medianamente en el mar de su salida de campo, píntela de rojo o amarillo fosforescente de tal manera que se facilite su seguimiento y déjela secar bien para evitar que pierda fácilmente el color, láncela entre la zona de rompiente y la playa, hágale seguimiento y descríballo en su informe de campo.

UNIDAD 3

LA VIDA EN EL MAR



INTRODUCCIÓN

En esta unidad se revisan los principales temas relacionados con la biología marina u oceanografía biológica, que se ocupa del estudio de los seres vivos que habitan el medio ambiente marino. Existen diferentes especialidades dentro de este campo de estudio apasionante, tales como: la ictiología, (estudio de los peces), malacología (estudio de los moluscos), ficología (estudio de las algas), ornitología (estudio de las aves marinas), cetología (estudio de los cetáceos), entre otras.

Los océanos comprenden el hábitat más grande de la Tierra, tanto en área como en volumen. Cerca del 71% está cubierta por agua de mar, haciendo del bentos marino (organismos que viven en el fondo) la colección de organismos más extensa del planeta. Los organismos pelágicos (que viven en la columna de agua) ocupan el resto del ambiente marino, que representa cerca del 99,5% del hábitat ocupado del planeta.

Con estos ambientes bénticos y pelágicos, existe una gran variedad de tipos de hábitats que ocupan los ambientes tropicales hasta los polares, que van desde la banda rocosa del intermareal y las vastas aguas en mar abierto hasta los terrenos lodosos con sedimentos depositados en los fondos marinos. Así, la composición de especies y la diversidad marina varía considerablemente entre hábitats, aunque nuestro entendimiento de estos patrones de distribución es aún muy limitado.

Dado el rango y tamaño de los diversos hábitats que ocurren en los océanos, esta unidad se centra principalmente en la biodiversidad de especies y las características medioambientales que influyen sobre los

organismos marinos. Se estudiará la clasificación de la vida en el mar, su distribución biogeográfica, su zonación vertical y los principales grupos y especies que dominan cada ambiente marino

Objetivos

- Que el estudiante conozca las principales características biológicas del medio ambiente marino.
- Que el estudiante aprenda a diferenciar los distintos ecosistemas marinos, las especies que la componen y las características biológicas de los mismos.
- Que el estudiante aprenda la diferencia entre bentos y pelágos.
- Que el estudiante conozca cómo se distribuyen horizontalmente y en la columna de agua los distintos organismos que existen en el medio ambiente marino.

3.1. BIODIVERSIDAD MARINA Y COSTERA

La riqueza de la vida de la Tierra es el producto de cientos de millones de años de evolución biológica. La biodiversidad se puede entender como la totalidad de la variación de los genes (diversidad genética), la abundancia o riqueza de especies (diversidad específica) y la variedad de los ecosistemas (diversidad ecosistémica) del planeta o de una región. Existen otras expresiones de la biodiversidad. Entre ellas figuran la abundancia relativa de especies, la estructura de edades de las poblaciones, la estructura de las comunidades en una región, la variación de la composición y la estructura de las comunidades a lo largo del tiempo y hasta procesos ecológicos tales como la depredación, el parasitismo y el mutualismo. Algunos autores consideran que la diversidad cultural humana puede considerarse como parte de la biodiversidad. La diversidad cultural incluye el lenguaje, las creencias religiosas, prácticas del manejo de la tierra, arte, música, estructuras sociales, etcétera.

Comprender la importancia de la biodiversidad de la Tierra, así como el mantenimiento de esta diversidad exige saber qué especies están presentes en los océanos, ya que representan más de 90% en



volumen de la biosfera. La Tierra tiene un estimado de 10 millones de especies, de las cuales se han identificado y han sido nombradas entre 1,5 millones y 1,8 millones. El número total de especies en los océanos es todavía desconocido, sólo entre 250 000 (Mongabay.com, 2010) y 300 000 (Kenchington, 2002) especies marinas han sido descritas.

Los océanos y sus mares representan un medio ambiente dinámicamente complejo y heterogéneo puesto que variados ambientes están disponibles para la colonización por organismos brindando la posibilidad de tener una alta diversidad de organismos. Los arrecifes de coral, las zonas costeras, los estuarios, los manglares, las praderas de pastos marinos, las aguas abiertas, los fondos marinos profundos, y las fuentes hidrotermales son ecosistemas claramente diferentes.

Casi el 90% del agua de los océanos se encuentra por debajo de 100 m, donde el ambiente es frío, oscuro y uno de los más homogéneos en la Tierra. Sin embargo, los aportes de nutrientes causados por hundimiento del fitoplancton y esqueletos de peces y mamíferos marinos y otros tipos de materia orgánica proporcionan el ambiente adecuado para la vida para cientos de especies de peces, pequeños crustáceos y calamares. La disposición de los continentes y los océanos en combinación con la latitud, la topografía, las zonas climáticas dividen los océanos en una serie de áreas con diferentes patrones de circulación del agua y de sus distintas propiedades, constituyéndose así barreras geográficas.

Durante mucho tiempo se ha pensado que los seres humanos no podían agotar los recursos marinos y menos que pudiese causar la extinción de especies marinas. Apenas ahora, después del año 2000, se han empezado a hacer estimaciones de organismos marinos extintos local o globalmente y su número es aún muy bajo (Castellanos-Galindo *et al.*, 2011) Si se tiene en cuenta que las principales causas de extinción de especies son la degradación del hábitat, la utilización incontrolada de organismos como recursos para poblaciones humanas y la contaminación, todos factores presentes en abundancia en zonas marinas costeras, la única razón para pensar que sólo pocas especies marinas han sido registradas como globalmente extintas o en peligro de extinción se debe a falta de conocimiento.

En esta unidad se presentan los principales factores que regulan la vida en el medio ambiente marino, los principales grupos vegetales y animales que habitan los ecosistemas marinos, la distribución de

organismos en el mar y las áreas costeras, los principales ecosistemas costeros y marinos y finalmente, las principales adaptaciones que los organismos presentan para vivir en el medio marino y en sus áreas de distribución.

3.1.1. Características biológicas del medio ambiente marino

Salinidad y Ósmosis

La mayoría de los peces poseen fluidos corporales con una concentración de sal intermedia, entre la del agua dulce y la del agua de mar. En agua salada, sus tejidos pierden agua a medida que se mueven a lo largo de un gradiente osmótico interno; de alta concentración de agua y baja concentración de sal, a baja concentración de agua y mayor concentración de sal. Los peces deben constantemente gastar energía para prevenir deshidratación y un aumento de la concentración de sal de sus tejidos. Para mantener el equilibrio de líquidos los peces beben agua de mar casi continuamente. Los peces deben excretar el exceso de sal y debido a que su piel no es completamente permeable al agua de mar, la excreción de sales ocurre en las branquias. Los tiburones y las rayas tienen concentraciones internas muy equilibradas con respecto a la externa.

La mayoría de los organismos bentónicos como equinodermos (estrellas de mar, erizos, etc.) y esponjas tienen el mismo contenido de sales que el agua de mar. No hay gradiente de concentración y el flujo de agua ocurre de manera similar en ambas direcciones.

Algunos organismos pueden adaptarse notablemente a los cambios de salinidad. De estas especies algunas migran del agua dulce al agua de mar (catádmomos) como las anguilas que van a reproducirse en el mar de los Sargazos. Al contrario, el salmón que vive en aguas marinas va a reproducirse en lagos y ríos (anádmomos). Muchas especies de agua dulce y marina utilizan los estuarios para reproducirse adaptándose a los cambios de salinidad.

Temperatura

La temperatura del agua de mar afecta de manera diferente a los organismos marinos dependiendo del lugar donde se encuentran. En la superficie y cerca de la costa, la temperatura del agua varía con los



cambios estacionales. En los océanos de gran profundidad es baja y casi constante. La temperatura, al igual que la salinidad, afecta a la densidad del agua de mar y su viscosidad. En las latitudes polares, la superficie del agua es fría, densa, y viscosa, y los organismos flotan más fácilmente. En las latitudes tropicales, las aguas son cálidas, menos densas, menos viscosas y en este clima habitan especies con adaptaciones para flotar como muchos apéndices, más grandes superficies, y mayor producción de burbujas de gas, puesto que el agua ofrece menos flotabilidad.

Cuando las condiciones de la superficie producen una capa de mezcla cálida, de baja densidad sobre una capa más densa, la columna de agua es estable y los organismos flotantes se mantienen en las capas superiores iluminados por el Sol. En estas condiciones el fitoplancton aumenta sus tasas de fotosíntesis y reproducción.

Los animales marinos tienen diferentes maneras de regular su temperatura corporal. La mayoría de los peces y todos los invertebrados marinos son conocidos como poikiloterms y pueden variar su temperatura corporal de acuerdo con el medio ambiente. Las aves marinas y mamíferos son homeoterms y mantienen casi constante la temperatura corporal por encima de la temperatura del agua de mar. Estos organismos están menos limitados por la temperatura del agua y a menudo cubren amplios rangos geográficos. El ejemplo típico son las aves marinas y las ballenas que cada año migran entre las aguas polares y tropicales.

A mayores profundidades, la uniformidad de la temperatura con la latitud crea un amplio entorno no afectado por los cambios estacionales. En la superficie del mar, los cambios de temperatura con la latitud ocurren de la misma manera que los cambios climáticos de la Tierra. La variación anual de las temperaturas de la superficie en el mar abierto, es pequeña en altas y bajas latitudes. En las latitudes medias, los cambios anuales son más grandes. Las áreas costeras presentan mayores cambios de la temperatura debido a la menor profundidad del agua y la influencia con zonas terrestres.

Presión

Los organismos marinos de las profundidades como vermes, crustáceos, y equinodermos no se ven afectados por las grandes presiones de las profundidades porque no tienen cavidades llenas

de gas o pulmones. Cuando los seres humanos descienden hacia el mar profundo, necesitan protección para evitar que la presión colapse las cavidades o deben inyectar aire a una presión igual a la del agua externa. Submarinos y sumergibles tienen protección, y el buceo autónomo (en virtud de aparato de respiración) tiene el segundo tipo de suministro. Después de respirar los gases a esas presiones, los seres humanos pueden experimentar graves problemas de descompresión o la narcosis del nitrógeno.

Mamíferos y aves marinas que respiran aire pueden hacer inmersiones notables tanto en profundidad como en duración sin encontrar tales dificultades. Los mamíferos y aves buceadoras tienen formas muy estilizadas (en forma de gota de agua). Esta forma reduce la fricción de su cuerpo, disminuyendo su esfuerzo para nadar y su tasa de consumo de oxígeno. Los organismos que pasan largos periodos bajo el agua, presentan una diferencia significativa en la distribución y concentración de la proteína mioglobina, en comparación con animales terrestres. La mioglobina se encuentra principalmente en el tejido muscular y su función principal es vincular oxígeno durante el buceo. La concentración de mioglobina en los mamíferos marinos y aves buceadoras es de tres a diez veces mayor que en organismos terrestres.

Gases

La vida en el agua, al igual que en la tierra, requiere de dióxido de carbono y oxígeno. El dióxido de carbono es necesario para la fotosíntesis y es aportado por los animales y por los procesos de descomposición, pudiendo ser absorbido y almacenado por el agua de mar desde la atmósfera. Además es importante porque actúa como un amortiguador del pH de los océanos. El oxígeno es requerido por todos los organismos para liberar energía de los compuestos orgánicos. Está disponible sólo en la superficie del océano como un subproducto de la fotosíntesis y por intercambio con la atmósfera.

Los pequeños organismos y las larvas dependen de la difusión para la captación de oxígeno. Las especies activas como los peces, calamares y cangrejos, necesitan altas concentraciones de oxígeno, en comparación con los organismos sésiles o poco móviles y han desarrollado sistemas branquiales. Los invertebrados más grandes y los peces presentan branquias muy desarrolladas y los mamíferos



marinos poseen pulmones por lo que deben regresar frecuentemente a la superficie a tomar oxígeno de la atmósfera.

Nutrientes

Los nutrientes principales requeridos por las plantas marinas y el fitoplancton son los nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4). Estos elementos son utilizados en aguas superficiales por las plantas, que los incorporan a sus tejidos. Con la muerte y la descomposición de estos organismos, estos nutrientes son nuevamente depositados en zonas más profundas o son devueltos al agua en forma de productos de desechos (se reciclan).

La circulación y el transporte vertical llevan los nutrientes a la superficie en las zonas de afloramiento o surgencias donde se eleva la productividad de las aguas y en consecuencia la biodiversidad. Los estuarios y las aguas costeras, en donde los nutrientes son suministrados en forma abundante por la escorrentía terrestre y la mezcla con el agua de la plataforma continental, son también ricos en los organismos.

Luminosidad

La existencia de plantas se limita a la zona fótica (220 m de profundidad) en la que hay suficiente energía lumínica para la fotosíntesis. La intensidad lumínica recibida en una región marina depende de los siguientes factores:

- El ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la superficie de la Tierra, que está relacionado con la latitud y las estaciones;
- Las distintas longitudes de onda de luz y sus posibilidades de absorción dependiendo de las propiedades del agua, y la cantidad de partículas en suspensión.

La sola presencia de la luz no garantiza la productividad de la vida acuática, los nutrientes también deben estar disponibles.

Bioluminiscencia

La luz del Sol sólo ilumina la superficie del mar, pero otra fuente de luz existe en los océanos. Algunos organismos pueden llevar a cabo un proceso enzimático que genera luz. Esto se conoce como bioluminiscencia y es producida por la interacción del compuesto luciferina y de la enzima luciferasa. Algunos organismos bioluminiscentes en el mar son los calamares, camarones, peces y dinoflagelados, en especial del género *Protoperdinium*. Muchos peces de aguas profundas son especies productoras de luz que la utilizan como señuelo para cazar presas.

Por otro lado cabe destacar que la luciferina cambia según el organismo. Esa es la razón de que el color de la luz que se produce en la bioluminiscencia sea diferente según la especie. En todas las especies animales investigadas hasta hace poco tiempo, los colores se encontraban en la sección visible del espectro y siempre va del verde al azul. Cuando se observaban otros colores se debían a la alteración del tono original mediante diversos órganos que actuaban como filtros o superficies reflectantes distorsionadoras. Sin embargo, recientemente se han descubierto especies como en la medusa abisal *Periphylla periphylla* que puede producir tonalidades rojizas.

Color

El color es variable en los organismos marinos. Algunos son transparentes como las medusas y la mayoría del plancton. En las aguas de las zonas tropicales, donde la luz penetra a aguas más profundas, los colores brillantes son importantes para evitar la predación. Algunos peces pueden ocultarse gracias a bandas de colores brillantes y manchas, otros peces usan colores como información sexual para la pareja o como método de camuflaje con el ambiente.

En las aguas turbias costeras de zonas templadas, menos luz penetra y los colores pueden ser marrones o grises para ocultarse en áreas de algas y rocas. Los peces planos y los pulpos son bien conocidos por su capacidad de cambiar su color, lo que les permite ocultarse en el fondo en el que viven.



3.1.2. Clasificación de los organismos según el tipo de vida

Esta clasificación se basa en las relaciones entre los organismos y el medio líquido o sustrato sólido donde viven. Según la zona del mar donde habitan, los seres vivos se clasifican en cuatro grandes grupos: el bentos, el pelágos (que incluye el plancton y el necton), el neustón y el pleistón.

Bentos: está constituido por los organismos que viven en contacto directo con el fondo, estos pueden ser:

Sésiles: como los balanos y las ostras, viven adheridos al fondo por la acción de biocementos.

Pivotantes: como los mejillones y las anémonas que viven adheridos al fondo por un material proteico y flexible que les permite inclinarse en varias direcciones.

Endobentos: como las almejas, las pianguas y los teredos que perforan el sustrato y viven enterrados.

Sedentarios: como los caracoles y los cangrejos que caminan sobre el suelo desplazándose poca distancia.

Vágiles como las rayas, las jaibas y los pectenes que nadan muy cerca del fondo, pudiéndose desplazar relativamente grandes distancias.

Los organismos sésiles, pivotantes, sedentarios son conocidos como “ectobentos”.

Pelágos: los organismos que viven en la columna de agua. Está constituido por dos formas de vida marina:

Plancton: organismos con movimiento limitado, incapaces de contrarrestar la acción hidrodinámica marina y por tal razón flotan en el mar siendo desplazados por las corrientes. Si son autótrofos se conocen como fitoplancton y si son heterótrofos constituyen el zooplancton.

Necton: conjunto de organismos acuáticos que cuentan con la capacidad de contrarrestar las corrientes mediante movimientos propios.

Neuston: son los que reposan o se desplazan, gracias a la tensión superficial del agua en la superficie del mar (epineuston) como los insectos hemípteros (*Halobates*, *Gerris*) o ligeramente debajo de ella (hiponeuston) como ciertos copépodos o ciertas larvas de decápodos, moluscos y equinodermos.

Pleistón o pleustón: son las formas flotantes que ocupan la interface entre el agua y el aire y son desplazadas por la superficie del mar, movidos por el viento adheridos a otros organismos flotantes, como algas, caracoles. Uno de los organismos pleustónicos más conocido en el medio marino es el hidrozoo, *Physalia*, mejor conocida como “agua-mala”, la fragata portuguesa. La *Physalia* es en realidad una colonia de organismos que posee un pólipo en forma de vejiga flotadora, que mantiene la colonia en la superficie. De ese pólipo flotador cuelgan otros pólipos en forma de tentáculos, que se encargan de atrapar el alimento. Estos son muy tóxicos y urticantes por lo que se debe evitar su contacto.

La diferencia entre bentos y pelágos no es evidente. Un animal puede pasar una parte de su ciclo vital como parte del pelágos y otro periodo como bentónico. Esto puede suceder durante uno de estos estados:

- Estado larvario; generalmente es planctónico como larva y bentónico como adulto.
- Estado de reproducción (epitoquia); aparición de formas planctónicas para la reproducción en algunos grupos de gusanos poliquetos.
- Pueden ser planctónico en la noche y bentónico en el día.

3.1.3. Distribución de los organismos en el mar

La distribución de los organismos marinos, tanto a lo largo de los océanos del mundo, como de las diferentes profundidades es un tema que ha apasionado tanto a biólogos como a naturalistas y ha sido uno de los frentes más estudiados de toda la biología marina. La biogeografía es el estudio de los fenómenos biológicos en su dimensión espacial, considerando un espacio de grandes dimensiones.



Así como en los ecosistemas terrestres, los organismos marinos pueden distribuirse a lo largo del planeta, ocupando diversas latitudes y longitudes. Los factores ambientales y climáticos determinan las principales características de los organismos que lo habitan como consecuencia de largos y profundos procesos de cambio, selección y adaptación. La distribución puede considerar diferentes regiones del océano desde el ecuador hasta los polos o entre los diferentes océanos (distribución horizontal), o desde la superficie al fondo del mar (zonación vertical).

Distribución horizontal: Biogeografía marina

Al igual que en las zonas biogeográficas continentales, las diferencias en las características de las masas de agua de las diferentes zonas geográficas, hacen que se presenten diferencias entre los organismos de las distintas regiones del mundo. Como consecuencia del calentamiento desigual que sufren las aguas oceánicas en distintas partes del mundo, el promedio anual de temperatura de la superficie del mar cambia abruptamente entre regiones oceánicas. Las isothermas superficiales actúan como barreras geográficas que aíslan la fauna de los mares, permitiendo la división de los océanos de acuerdo con la composición y las características de la biota que los habitan. Las principales zonas biogeográficas marinas en que se puede zonificar la superficie del mar (Figura 3.1) son:

Conjunto polar:

Comprende el mar Ártico en el Norte y los océanos Pacífico, Índico y Atlántico al Sur de la Convergencia Antártica. En estos mares la temperatura superficial anual promedio es menor a 5°C. Comprende las regiones Ártica (1) y Antártica (16).

Conjunto subpolar:

Comprende los océanos Pacífico y Atlántico Norte, y las regiones Antiboreal (14) y Kergueleniana (15) en el Hemisferio Sur. En estas áreas la temperatura superficial anual promedio es inferior a 10°C.

Conjunto de océanos templados:

Su temperatura superficial anual promedio varía entre 10 y 23°C. Comprende los océanos fríos (entre 8 y 18°C en promedio) y los océanos

cálidos (13 y 23°C en promedio). En éste conjunto se encuentran las regiones denominadas región Boreal de Asia Nororiental (2), región Boreal Atlántica, región Boreal de América Noroccidental (3), región Norpacífica Asiática cálida (5), región Norpacífica Americana cálida (6), región Pacífica Sur cálida (11), región Atlántica Sur cálida (12) y la región Indo-Australiana cálida (13).

Conjuntos de océanos tropicales:

En esta zona la temperatura anual promedio es superior a 23°C. Comprende las regiones Pacífica oriental tropical (9), región Indo-Pacífica tropical (8) y la región Atlántica tropical. Ambas cuencas marítimas colombianas se encuentran en este conjunto biogeográfico. En promedio la temperatura superficial oscila entre 26,6 y 28,5°C en el mar Caribe y entre 26 y 28°C en la cuenca del Pacífico colombiano.



Figura 3.1. Regiones biogeográficas marinas en el mundo.
Fuente: El autor



Si bien la temperatura promedio del océano aumenta de manera regular desde los polos hacia el Ecuador, debido a la influencia de las corrientes marinas que distribuyen el calor del océano, el aumento de la temperatura no es uniforme, por esta razón las isotermas no se encuentran sobre la misma línea de los paralelos.

En los océanos polares y tropicales la variación de la temperatura superficial promedio es de 4 o 5°C, mientras que en los océanos templados la diferencia anual es muy grande, por ejemplo en el Canal de La Mancha se presenta 9°C invierno y 17°C en verano y en el mar Mediterráneo el cambio es entre 12°C en invierno y 25°C en verano. En estas condiciones los organismos que se encuentran en estas regiones poseen algunas características comunes tales como:

- La fauna de zonas polares es estenotérmica para bajas temperaturas, presenta un dominio de organismos con esqueleto silíceo y de especies profundas, y algunas pocas especies migratorias.
- La fauna de zonas templadas está compuesta por organismos euritermos, con ligero predominio de especies con esqueleto de sílice, predominio de especies profundas y abundancia de especies migratorias. La fauna del conjunto tropical está constituida por organismos estenotermos para temperaturas relativamente altas, con predominio de especies con esqueletos calcáreos, de hábitats poco profundos y muy pocas especies migratorias.

Las regiones pueden dividirse en provincias basadas en las poblaciones bentónicas. Las costas Pacífica colombiana se encuentra dentro de la región Pacífico tropical Oriental, en la Provincia Panámica que va desde el sur del golfo de California hasta Tumbes en el Perú. El Caribe colombiano se encuentra en la región Atlántica tropical, en la provincia Caribe, la cual va desde el Sur del golfo de México hasta el Norte de Brasil.

Zonación vertical

A medida que nos adentramos en el mar varios factores cambian regularmente. Los principales son: la luz que disminuye a medida que se profundiza; la presión que aumenta con la profundidad; la

temperatura que disminuye gradualmente en las primeras capas del agua y después se mantiene casi constante y la agitación del agua la cual solamente se siente con intensidad en la capa superficial del océano.

Existen varias clasificaciones de las zonas en que se distribuyen los organismos, de acuerdo con la zonación vertical, las cuales resultan de considerar simultáneamente los factores que varían con la profundidad.

Zonación según la iluminación

Zona eufótica o iluminada:

La profundidad de esta capa varía entre 20 y 150 m dependiendo de las condiciones locales, con una profundidad promedio de 50 m. Se caracteriza por:

- Poseer la mayoría de los vegetales desde las plantas superiores hasta las bacterias autotróficas.
- Es la zona de reducción más rápida de luz.
- Es la zona con más alta cantidad de materia orgánica en suspensión.
- Los factores ambientales son muy variables en esta zona.

Zona oligofótica o crepuscular:

En esta franja el espectro solar está representado solamente por la fracción más penetrante, es decir, por las ondas de menor longitud de onda: azul y violeta. El límite inferior puede variar entre 200 y 600 m. Las condiciones medioambientales son menos variables. No está desprovista, como se había creído desde hace mucho tiempo, de autótrofos: se encuentran bacterias y cocolitos con pigmentos capaces de usar las radiaciones penetrantes.

Zona afótica u oscura:

Es una zona de absoluta oscuridad donde la temperatura del agua es muy baja y las corrientes son generalmente débiles, aunque no es una zona de quietud absoluta como se creía en el pasado.



Zonación según la proximidad a la zona costera:

De acuerdo con este criterio los componentes biológicos oceánicos pueden ser separados en dos provincias:

Provincia nerítica:

Incluye las aguas por encima de la isobata de los 200 m la cual coincide precisamente con la parte limitada con el talud continental, es decir, la parte del océano sobre la plataforma continental. El agua de mar en esta provincia se caracteriza por:

- Ser poco transparente ya que es rica en materia orgánica.
- Presentar poca penetración de luz.
- Ser muy variable con respecto a las propiedades físico-químicas por influencia del fondo y continental.
- Presentar fuerte circulación con renovación de los elementos minerales.

Provincia oceánica:

Ocupa el resto de océanos y mares, es decir todo lo que queda en altamar, desde el límite vertical que corresponde a la isobata del borde de la plataforma. El agua marina de esta provincia se caracteriza por:

- Ser transparente, pobre en material en suspensión.
- Fuerte penetración de luz.
- Presentar poca variabilidad de las variables físico-químicas.
- Salinidad alta.
- Ser relativamente pobre en nutrientes (oligotróficas).

3.1.4. El dominio bentónico

El dominio bentónico comprende todo el ambiente de los fondos marinos; desde la costa hasta las zonas más profundas del océano (Figura 3.2.a). Los organismos bentónicos pueden ocasionar modificaciones importantes al sustrato en el que habitan. El fondo marino puede estar cubierto por 3 tipos de estructuras geológicas:

- Sedimentos terrígenos y pelágicos (inorgánicos y orgánicos).
- Rocas eruptivas o sedimentarias (arcillas en los fondos profundos).
- Modificaciones de origen orgánico.

En el fondo, la naturaleza sólida dura o blanda del sustrato es muy importante ya que de esto depende la distribución de organismos que en estos habitan. Existen sustratos duros que permiten la fijación y perforación y los blandos que se caracterizan por la consistencia (talla de partículas) y la presencia de materia orgánica.

Al igual que la naturaleza del sustrato, la profundidad a la cual se encuentran los diferentes organismos juega un papel muy importante en la distribución de los organismos marinos bentónicos. Aunque existen varias clasificaciones de las zonas de distribución de organismos, basadas en diferentes criterios, todas tienen en común el objetivo que es tratar de clasificar a los organismos de acuerdo con su distribución a lo largo de gradientes de profundidad.

Un resumen de las zonas de distribución de los organismos bentónicos se presenta a continuación, dirigiéndose desde la tierra hacia el mar (Figura 3.2.b).

- **Zona adlitoral:** zona de transición entre la vegetación terrestre y comunidades marinas. Los organismos dominantes son terrestres, pero tienen adaptaciones que les permiten sobrevivir en condiciones ocasionales de presencia de agua marina. Muchos sistemas no consideran esta zona como parte del medio marino.

- **Zona supralitoral:** es la zona localizada en la región cercana al nivel del mar durante las mareas altas o en la zona donde salpican las olas. Habitan organismos marinos de transición que permanecen durante una gran parte de su vida fuera del agua y son humedecidos solamente durante las mareas altas. La periodicidad de la influencia del agua marina puede ser diaria, o dos veces al día (como en la costa Pacífica colombiana) durante las mareas altas. En el Caribe colombiano esta franja se humedece por el golpe de las olas contra las rocas.

- **Zona mesolitoral:** también conocida como zona intermareal, zona intertidal o intercotidal. Es toda la franja costera que soporta las



variaciones del nivel del agua durante las mareas, es decir la franja que está sumergida en el mar durante las mareas altas y en contacto con el aire durante las mareas bajas. El nivel mesolitoral está ocupado por organismos que soportan o exigen emersiones e inmersiones periódicamente y presentan adaptaciones para la vida anfibia.

- **Zona infralitoral:** esta zona permanece sumergida o muy raramente emergida sin importar el nivel de la marea. El límite superior es la línea de más baja marea y el límite inferior es la profundidad compatible con la vida de fanerógamas marinas o de algas fotófilas. De acuerdo con la latitud y las condiciones regionales de iluminación, este límite inferior está localizado más o menos a 15 - 20 m en algunas partes de las altas latitudes, a los 30 - 40 m en zonas templadas como el mar Mediterráneo y puede llegar a 80 m en regiones tropicales muy iluminadas y con poca sedimentación como en el Caribe colombiano. Las fanerógamas marinas y los corales son organismos típicos de esta zona.

Las fanerógamas marinas son plantas superiores, con raíz, tallo, hojas y flores, nada que ver con las algas con las que se las confunden. Sólo hay 60 especies de fanerógamas marinas que se han adaptado a la vida en el mar, implantándose en sustratos que no habían sido colonizados por las tradicionales algas.

Los corales marinos son animales coloniales pertenecientes al filo Cnidaria, clase Anthozoa. Las colonias están formadas por miles de individuos zooides y pueden alcanzar grandes dimensiones. El término coral no tiene ningún significado taxonómico y es poco preciso; suele usarse para designar los antozoos que generan un esqueleto calcáreo duro, especialmente los que construyen colonias ramificadas; pero también es común denominar coral a especies con colonias compactas (coral "cerebro") e incluso con esqueleto córneo y flexible, como las gorgonias.

- **Zona circalitoral:** esta zona se localiza desde la profundidad extrema de vida de fanerógamas marinas y algas fotófilas hasta la profundidad compatible con la existencia de especies vegetales más tolerantes a poca iluminación. Hay que notar que estas algas pueden estar presentes o no dependiendo de las condiciones del fondo, las corrientes, etc.

Los cinco niveles anteriormente mencionados forman el llamado sistema litoral o sistema fital, en el cual las zonas se establecen

principalmente utilizando los organismos vegetales, que por su carácter sésil y limitación de la luz, facilitan la definición y localización de las zonas.

Del límite inferior del circalitoral hacia abajo se encuentra el denominado sistema Afital o sistema profundo el cual consta de las siguientes zonas:

- **Zona batial:** esta zona corresponde a las comunidades que constituyen los fondos del talud continental y de la primera parte de la zona de pendiente más débil que se encuentra directamente después. El límite inferior de la zona batial está constituido por ser el límite inferior de las especies euribatas litorales; es decir, aquellas especies que siendo litorales pueden habitar en zonas profundas, porque soportan presiones más elevadas.

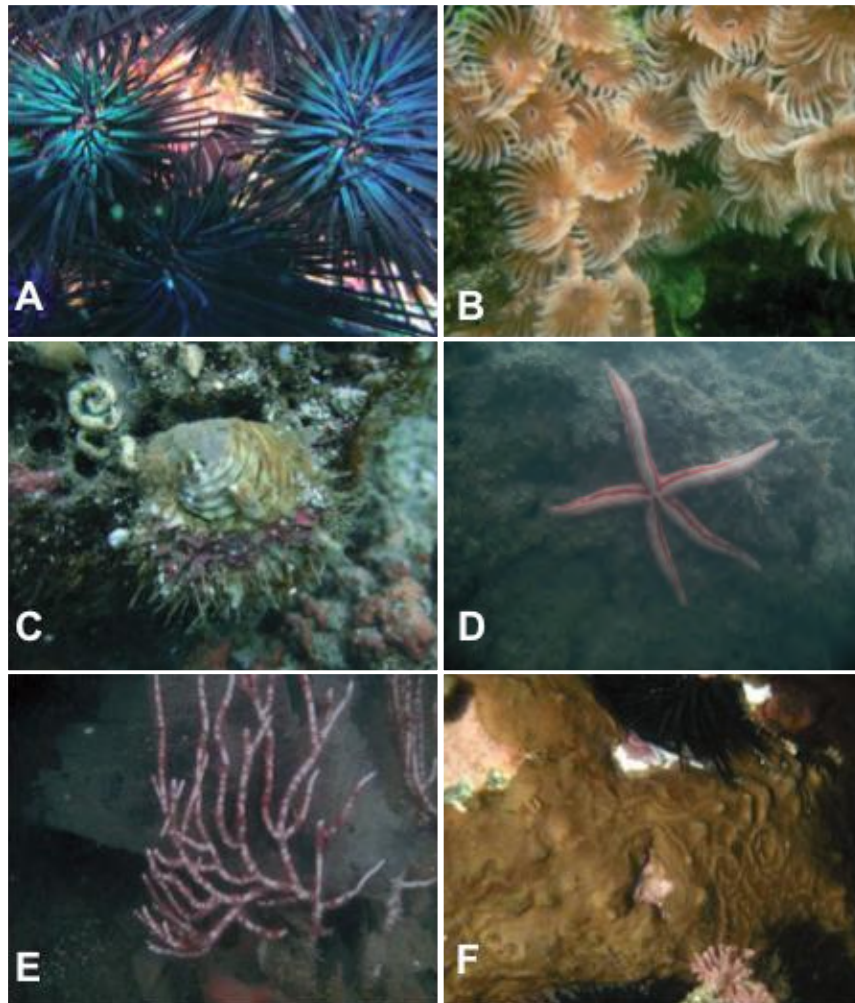
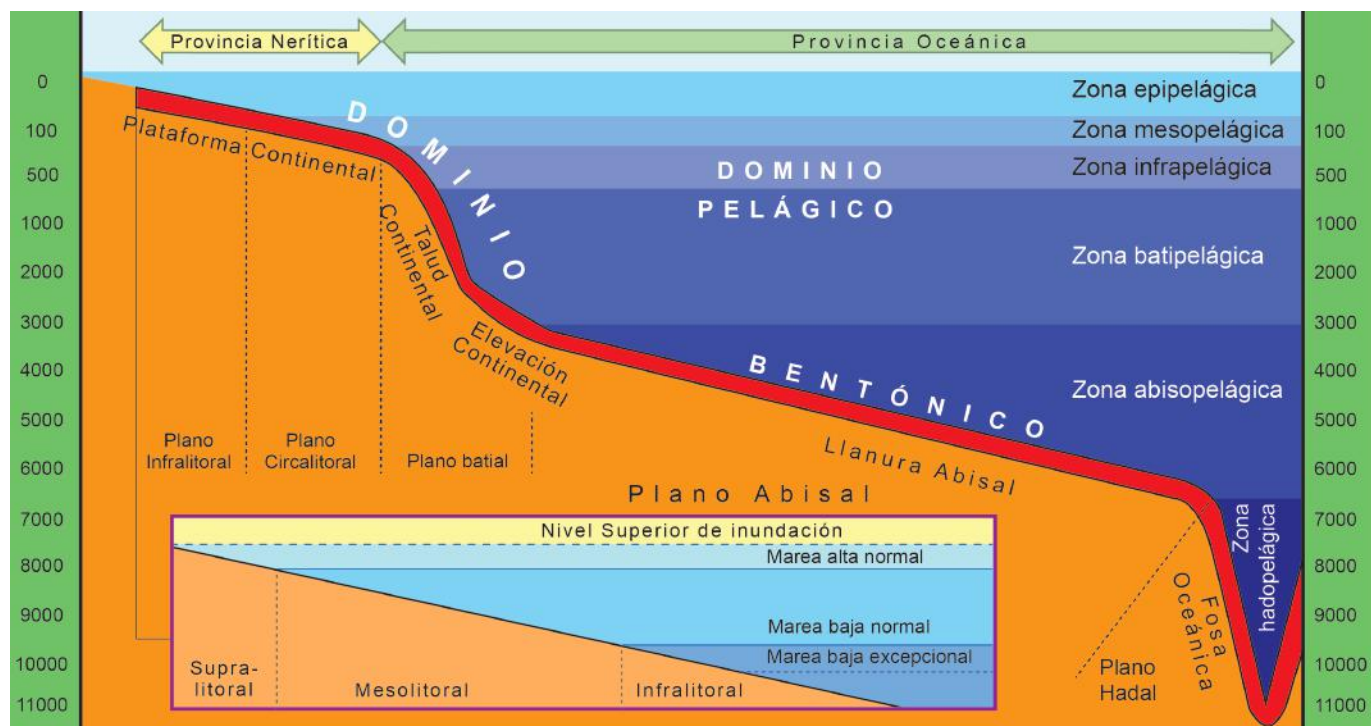


Figura 3.2.a Fauna bentónica. A: Erizo (*Diadema* sp.), B: Anélidos poliquetos (Sabellidae), C: Ostra perlera (*Pinctada* sp.), D: Estrella de mar (*Phataria* sp.), E: Abanico de mar (*Leptogorgia* sp.), F: Esponja (*Placospongia* sp.). Cortesía: Jaime Cantera Kintz.



- **Zona abisal:** son las poblaciones de la llanura abisal. Se hunde desde la zona de la elevación continental hasta los 6 000 – 7 000 m. Se caracteriza por un empobrecimiento bastante marcado tanto cualitativo como cuantitativo de las comunidades existentes.

- **Zona hadal:** son las poblaciones de los fondos de las fosas profundas, desde los 6 000 – 7 000 m hasta cerca de 11 000 m. Se caracteriza por un nuevo enriquecimiento tanto cualitativo como cuantitativo de comunidades debido a las aguas hidrotermales que elevan la temperatura y aportan grandes cantidades de minerales al entorno.



3.1.5. El dominio pelágico

El dominio pelágico (Figura 3.3) presenta una división de acuerdo al tipo de vida de los organismos planctónicos (fitoplancton y zooplancton) y nectónicos (peces, crustáceos, cetáceos, etcétera).

En general, el plancton incluye aquellos organismos que aunque tienen capacidad de movimiento propio, su desplazamiento está determinado por las corrientes, puesto que no son capaces de contrarrestarlas, por esta razón se dice que son organismos que flotan. El holoplancton

Figura 3.2.b. Zonas de distribución de los organismos bentónicos y pelágicos.

Fuente: Adaptada por el autor.

reúne a los organismos que pasan toda su vida flotando en la columna de agua. El meroplancton está constituido por organismos que pasan parte de su vida flotando como larvas y que después se fijan al sustrato (bentos) o pasan a formar peces adultos (necton).

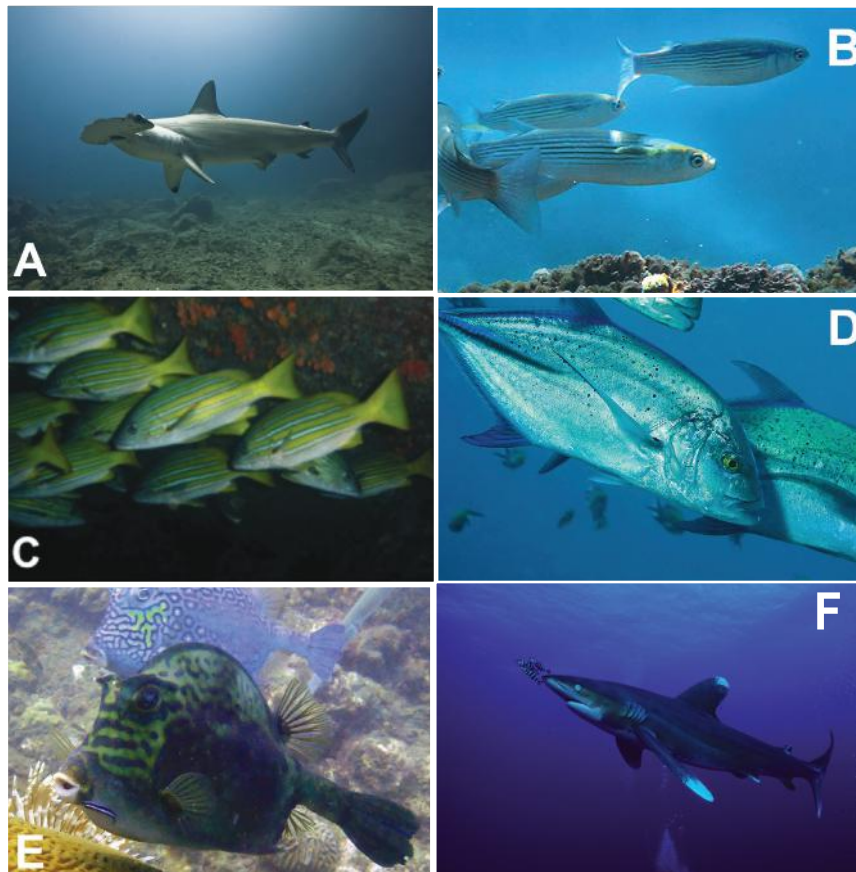


Figura 3.3. Fauna de la columna de agua. Algunas especies del dominio pelágico son: A: Tiburón martillo (*Sphyrna sp.*) Fuente: Cortesía Fred Buyle - Fundación Malpelo y otros ecosistemas marinos, B: Lisas (*Mugil sp.*) Fuente: Waste Magazine, C: Peces arrecifales (*Haemulon p.*), D: Jureles (*Caranx sp.*), Fuente: Jaime Cantera Kintz. E: Pez cofre (*Acanthostracion sp.*) Fuente: Cortesía Instituto de Investigaciones marinas y costeras "José Benito Vives de Andréis, INVEMAR, F: Tiburón de aleta blanca (*Carcharhinus sp.*) Fuente: Cortesía Yves Lefèvre - Fundación Malpelo y Otros ecosistemas marinos

El periodo larval planctónico puede darse en unas pocas horas como en ciertos poliquetos, o cuatro a cinco meses como en algunos cangrejos. Mientras pasan por el estado planctónico constituyen excelentes presas para una gran cantidad de depredadores. Por esta razón los organismos con larvas planctónicas tienen como estrategia reproductiva la producción de un número elevado de huevos o larvas.

El plancton puede dividirse de acuerdo con la talla que poseen en:

Ultraplanton < 5 micras; flagelados y bacterias.

Nanoplanton 5 - 60 micras; flagelados, diatomeas, cocolitofóridos, ciliados.

Microplanton 15 micras - 1 mm; diatomeas, medusas, copépodos.



Mesoplancton 1 - 5mm; larvas.

Macroplancton > 5 cm; medusas.

Megaloplancton > 1 m como, algunas medusas gigantes (*Medusa chrysaora*).

La zonación de los organismos pelágicos es mucho más difícil de establecer que la zonación de organismos bentónicos debido a la movilidad y a las posibilidades de migración vertical que poseen muchas formas de vida pelágicas. Sin embargo, se han definido algunas zonas:

- **Zona epipelágica:** está localizada entre los 0 y los 50 m de profundidad en promedio, aunque puede variar entre 20 y 120 m, y está limitada por la profundidad de compensación para los organismos autotróficos clásicos. Abundan las diatomeas y dinoflagelados.
- **Zona mesopelágica:** entre 50 y 200 - 300 m. En latitudes medias esta zona está limitada por la isoterma de los 10°C. Para los autores rusos las zonas epipelágica y mesopelágica son una sola denominada “zona superficial de enfriamiento invernal”.
- **Zona infrapelágica:** entre los 200 y 500 - 600 m. Es la zona por debajo de la capa de aguas de superficie siendo aguas de características oceánicas pero cálidas. Es la zona de refugio diurno de especies que migran hacia la superficie durante la noche.
- **Zona batipelágica:** se encuentra entre los 500 - 600 y los 2 000 - 2 500 m. Su biomasa es todavía con predominancia de copépodos.
- **Zona abisopelágica:** entre los 2 000 - 2 500 y 6 000 - 7 000 m. Biomosas dominadas por macroplactontes que son organismos planctónicos grandes como los chaetognatos y crustáceos.
- **Zona hadopelágica:** entre 6 000 - 7 000 m hasta las fosas más profundas. Caracterizados por la pobreza cualitativa y cuantitativa de organismos. Predominan los copépodos y anfípodos.

Debido a las condiciones medioambientales a los que son sometidos los organismos pelágicos, éstos han desarrollado algunas adaptaciones fisiológicas que les permite su pleno desarrollo. Las

principales adaptaciones de los organismos fitoplanctónicos se mencionan a continuación:

Fitoplancton

El principal problema para el fitoplancton es que normalmente el protoplasma celular es más denso que el medio marino, en una relación de 1,02 a 1,06 g/cm³ por lo tanto debe desarrollar mecanismos para retardar al máximo posible el hundimiento. Estas adaptaciones son influenciadas por la talla, la estructura y la densidad.

- **Talla:** la tasa de hundimiento de un cuerpo está dada por el peso con relación al área que posee. El peso determina la velocidad del hundimiento, porque los cuerpos son atraídos por la gravedad. En esta forma, lo importante para guardar la flotación es poseer una alta relación superficie a volumen. Esto determina porqué la mayoría de organismos del plancton son pequeños. Esta relación entre área y volumen también es muy importante para el fitoplancton y en general para organismos de pocas células (nutrición).

- **Estructura:** la forma es importante para disminuir la velocidad del hundimiento. Algunas formas clásicas del plancton son: forma de disco (se mueve en zig zag), por ejemplo *Coscinodiscus*; forma de aguja (se mueve en grandes círculos) como *Asterionella* y con presencia de apéndices (espinas o pelos) como *Rhizosolenia* y *Chaetoceros*. La longitud de los apéndices para la flotación puede variar con las zonas; los organismos de aguas cálidas con viscosidad baja presentan apéndices y espinas más largos (Figura 3.4).

- **Densidad:** muchas especies de plancton poseen sacos con aceite que disminuyen la densidad y le sirven también como reserva natural de alimentos, los cuales pueden variar estacionalmente. Algunos copépodos tienen los huevos en sacos similares.

La producción fitoplanctónica está fuertemente afectada por factores externos que pueden tener un origen diferente al de otros organismos. La mayoría de las variaciones ocurren estacionalmente. Los principales factores de variación son: la luz solar o energía radiante, los nutrientes, los aportes continentales, la riqueza fitoplanctónica en estuarios y zonas de transición, la mezcla de aguas y capas de turbulencia y el consumo (pastoreo) por el zooplancton.

Zooplankton

El zooplankton incluye una variedad mucho más grande de organismos que el fitoplancton, incluyendo muchos grupos taxonómico de los que daremos algunos ejemplos:

Crustácea

Clase Copépoda: es la clase dominante ya que constituye el 70% del zooplankton; géneros típicos del zooplankton: *Calanus*, *Acartia*.

Clase Euphausiacea: también abundante. La especie más importante es *Euphasia superba* ("Krill" o alimento de ballenas). Se encuentran en gran cantidad en el Hemisferio Sur, en la zona cercana a la Convergencia Antártica. Igualmente hay representantes importantes de las clases Cladocera (géneros *Podon*, *Evadne*), Clase Ostrácoda (géneros *Conchoesia*, *Philomedes*) y de la clase Amphipoda.

Chaetognatha

Estos organismos son muy interesantes como indicadores de masas de agua. Son muy útiles porque es generalmente más fácil obtener muestras de plancton que análisis complejos de las características físico-químicas de las aguas. Permiten reconocer las características ambientales por las asociaciones de estos organismos con las regiones donde se han obtenido las muestras.

Protozoa

Foraminíferos y radiolarios habitan en el plancton, pero han formado sedimentos del fondo de los océanos del mundo a lo largo de la historia. Los ciliados se encuentran principalmente en aguas costeras.

Cnidaria

Trachimedusas y Siphonophoros que son muy abundantes en el plancton tropical.

Ctenophora

Ampliamente distribuidos con gran importancia en la región tropical.

Moluscos

Gasterópodos (Pteropoda, Thecosomata, Gymnostomata, Heteropoda).

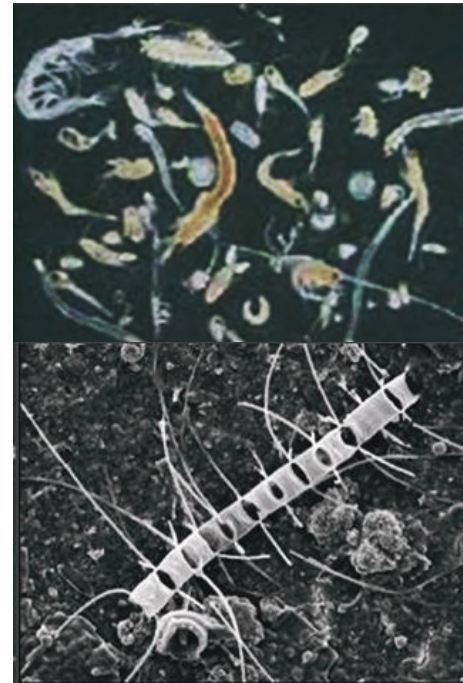


Figura 3.4. Formas planctónicas.
Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

Urochordata

Son también abundantes con tres órdenes planctónicos: Larvacea: Fritillaria, Oikopleura, Thaliacea: Doliolum, Salpa, Lucida: Pyrosoma. Estas son algunas de las phylas que pertenecen al grupo de los holoplanctónicos. Los grupos meroplanctónicos son: Cnidaria, Artropoda, Mollusca, Equinodermata, Annelida, Porifera, Urochordata.

Las principales adaptaciones de los organismos zooplanctónicos son:

- **Flotación:** como el fitoplancton, el zooplancton debe solucionar problemas relacionados con la flotación; es decir, debe minimizar la densidad, mantener agua dentro de sus células, alta relación área/volumen con pequeña talla, existencia de apéndices. El caso más evidente es en los crustáceos y principalmente en los copépodos los cuales cuentan con estructuras como pelitos, plumas, espinas, antenas, que les permiten aumentar su área y les brinda mejor capacidad de movimiento.

- **Movimiento:** los organismos del zooplancton poseen capacidad de movimiento desarrollado en muchas formas; los copépodos y eufásidos por acción muscular; los ctenóforos y anélidos por acción ciliar, las medusas por acción hidrostática y por acción del viento.

- **Migraciones nictimerales:** muchos organismos pueden cambiar su posición en la columna de agua entre el día y la noche. Los crustáceos pequeños pueden nadar a una velocidad de 16 m/h, mientras que los grandes pueden nadar a 95 m/h. Un buen ejemplo de migración diaria del zooplancton la presenta el copépodo del género *Calanus*.

Necton

El necton está constituido por peces, cetáceos, carnívoros del orden fócidos y por invertebrados como calamares y algunos cangrejos nadadores. Está integrado por aquellos animales dotados de medios de locomoción capaces de contrarrestar los movimientos del mar, es decir, animales nadadores que viven en la zona pelágica, región del océano que representa un medio ecológico de alta uniformidad. Por esta razón, las formas nectónicas se reducen a pocos modelos de organización tanto en estructuras como en funciones, presentándose múltiples casos de convergencia evolutiva, como por ejemplo las similitudes en forma de los peces con los cetáceos.



La condición de seres nadadores, que se mueven en un medio tan denso como el marino, imprime a estos organismos características determinadas en su anatomía y en el funcionamiento del cuerpo, para contar con los elementos propulsores que les permitan su locomoción. Frecuentemente se presentan en ellos las formas hidrodinámicas pisciformes en forma de gota de agua, en sus más diversas modalidades y su cuerpo se encuentra lubricado por recubrimientos mucosos, que reducen la fricción con el agua al mismo tiempo que protegen a la piel contra traumatismos e infecciones. Adoptan agrupaciones defensivas como los cardúmenes o logran increíbles métodos de camuflaje.

Los principales grupos de animales que forman la asociación ecológica del necton son los crustáceos, moluscos, peces, reptiles y mamíferos, dotados de adaptaciones especiales para su desplazamiento por medio de la natación, para la captura de su alimento, para su defensa y el ataque de sus presas, lo que les permite aprovechar las características del medio ambiente.

La mayor parte de estas especies presentan gran desarrollo de la musculatura para poder efectuar sus movimientos, de los sistemas circulatorio y respiratorio para contar con el oxígeno suficiente que les permita liberar la energía que necesitan para sus actividades, y del sistema nervioso, con gran desarrollo de los órganos de los sentidos y especialmente de los de la visión. También en estos organismos se acentúa el proceso de cefalización, es decir la diferenciación de la región anterior del cuerpo o cabeza, lo que está relacionado con su condición de organismos depredadores, que necesitan una boca especialmente dispuesta para capturar las presas de su alimentación. En los peces óseos, las aletas dorsal, anal y ventral actúan como quillas para que no pierdan el equilibrio, mientras que la caudal les ayuda a la propulsión; las aletas pectorales están atrás de las aberturas branquiales que corresponden a las extremidades anteriores y les sirven para frenar de repente y girar con brusquedad, y las pélvicas, situadas abajo de las pectorales, correspondientes a las extremidades posteriores, se utilizan también para frenar.

En los tiburones, la aleta caudal está muy desarrollada y por su estructura aumenta la fuerza del empuje hacia abajo. En otros peces, como los llamados voladores, la forma de la aleta es al contrario, es decir se desarrollan más los rayos ventrales, lo que hace que el impulso sea hacia arriba y la parte inferior de la aleta caudal vibra

rápidamente para ayudar al despegue del pez que, una vez en el aire, puede recorrer más de 150 m fuera del agua a velocidades de 50 km/h.

Sin embargo, la mayoría de los peces tienen igualmente desarrollados sus radios, por lo que el impulso es en sentido horizontal. La vejiga natatoria desempeña un papel importante en la natación de muchos peces, la utilizan como órgano hidrostático que les permite flotar a un nivel determinado, sin hundirse ni ascender. La vejiga natatoria tiene en su pared vasos sanguíneos que permiten a los peces regular la cantidad de gases que entran y salen de ella, lo que hace que el pez ascienda o descienda en el agua.

Además de los peces, a este grupo pertenecen algunos crustáceos y moluscos. Dentro de los crustáceos se encuentran los cangrejos nadadores (género *Callinectes*) y las langostas; éstos no tienen órganos especiales para la flotación, sin embargo, su densidad es muy pequeña en relación con la del agua, por lo que se mantienen fácilmente en la superficie, únicamente se advierte la adopción de una forma laminar y aplanamiento de sus patas que actúan como remos, pero que también aumentan la superficie horizontal del animal y favorecen la flotación.

Los moluscos cefalópodos, a los que pertenecen el pulpo, el calamar y el nautilus, principalmente estos dos últimos, tienen una organización muy especializada para formar parte del necton. Su cefalización es clara y en ellos se distingue una cabeza caracterizada por contener un sistema nervioso central muy desarrollado, protegido por una cápsula cartilaginosa que recuerda el cráneo de los vertebrados inferiores, y por tener un par de ojos grandes parecidos a los ojos de los vertebrados. De esta cabeza salen de 8 a 10 tentáculos implantados alrededor de la boca, su cuerpo es de forma alargada, fusiforme y está perfectamente acomodado para surcar las aguas en las que nadan con gran agilidad.

Los reptiles, como las tortugas marinas, también tienen adaptaciones para desplazarse en el mar. Su cuerpo presenta un caparazón, dentro del cual pueden guardar su cabeza y extremidades, las cuales están modificadas para la natación, tomando un aspecto de aletas, que les sirven para desplazar fácilmente el agua.



Los mamíferos acuáticos también presentan adaptaciones a la vida nectónica; por ejemplo, los pinnípedos presentan un cuerpo pseudopisciforme, con extremidades torácicas en forma de aleta sin uñas y el extremo posterior del cuerpo transformado en una aleta caudal horizontal. Los cetáceos están totalmente adecuados a la vida nectónica, su cuerpo es pisciforme con extremidades anteriores en forma de aleta, como en los delfines y las ballenas.

Los delfines se desplazan en el agua a gran velocidad, sin gran esfuerzo muscular exagerado, debido a que su piel está estructurada de modo que les permite reducir la fricción con el agua. En la mayoría de ellos, los agujeros nasales (espiráculos), se encuentran a la parte alta del cráneo para hacer posible la respiración aérea sacando del agua una mínima porción del cuerpo y están provistos de esfínteres que se cierran cuando el animal se sumerge. La posibilidad de inmersión durante largos periodos de tiempo y llegar a profundidades considerables, se debe a la capacidad que poseen para almacenar oxígeno en diversas partes del cuerpo como los músculos (gracias a la mioglobina) y en la sangre.

3.2. PRINCIPALES ECOSISTEMAS COSTEROS

Estos ecosistemas pueden estar basados en acumulaciones de materiales de naturaleza inorgánica o en organismos vegetales o animales. Del primer grupo encontramos en el Pacífico colombiano los acantilados, las playas arenosas y rocosas (bloques rocosos y de lodolita, cantos gravas), los planos de lodo, y los fondos permanentemente sumergidos, tanto rocosos como de arena y lodos. Del segundo grupo, los principales son indudablemente, los manglares y los arrecifes coralinos.

En la primera unidad se realizó la caracterización geomorfológica de la zona costera. En esta sección se describirán las principales características ambientales y biológicas de los ecosistemas costeros. Inicialmente, se tratarán los ecosistemas sustentados en sustratos inorgánicos y terminamos con los principales factores que determinan la riqueza y la alta productividad de los ecosistemas de manglares y de corales.

3.2.1. Las playas arenosas

Este ecosistema se encuentra generalmente en costas abiertas donde la acción del oleaje tiene un papel importante en el movimiento de las partículas, como en las aberturas (bocanas) de los estuarios, en bahías, golfos, desembocaduras de los ríos donde forman deltas y en el mar Caribe son comunes a lo largo de la mayor parte de la línea costera debido a la intensidad de las olas. Son formadas principalmente por el aporte de material silíceo de origen continental traído por los ríos que desembocan en los estuarios o por materiales que resultan de la erosión costera, o por la descomposición de los esqueletos de arrecifes coralinos.

En algunas regiones, el material arenoso no se acumula en el borde costero sino que lo hace a poca distancia en frente de la playa como consecuencia del patrón de corrientes marinas y del oleaje (Keulegan, 1948). Este proceso forma bancos arenosos paralelos a la costa que continúan creciendo como resultado de la deposición del material, formando inicialmente los “bajos” y posteriormente, las llamadas “barras”, verdaderas barreras arenosas elevadas, que sirven de protección contra la acción del oleaje, al funcionar como rompeolas. Con el tiempo, las barras superan el nivel máximo del mar, permitiendo el crecimiento de organismos vegetales rastreros que la estabilizan.

Estas barras juegan un papel muy importante en el mantenimiento de la alta productividad de los estuarios de la costa Pacífica colombiana puesto que retienen el material detrítico originado por la descomposición de la “hojarasca” de los manglares, que sería exportado, naturalmente, hacia el mar abierto por las corrientes de mareas (Prahl *et al.*, 1990). La barra actúa como una trampa de nutrientes durante la bajamar y luego, cuando se produce la entrada de agua marina con las mareas altas, devuelve parte de ese material en descomposición hasta las zonas costeras y los manglares donde, tanto la energía como los nutrientes químicos, pueden ser aprovechados nuevamente por las comunidades del interior de los estuarios.

En el mar Caribe las costas son en su mayoría playas arenosas interrumpidas por puntas rocosas o manglares (Márquez, 2002). Cerca del 65% del litoral Caribe colombiano está formado por playas de arena, unas formadas por sedimentos de origen fluvial como en



el Golfo de Urabá y la región de Santa Marta, otras, como las de La Guajira están formadas por erosión eólica de la costa. En otros sectores como San Bernardo del Viento, Islas del Rosario, San Andrés y Providencia, las playas son de origen coralino, mientras que las playas que se presentan a lo largo de todo el litoral cerca de los bosques de manglar y desembocadura de ríos y lagunas costeras son arenofangosos. En las playas de arena habitan comunidades características muy similares en cualquier parte del mundo.

El factor más importante que determina las condiciones de vida en estas playas es la intensidad del oleaje; éste incide en el tipo de arena, en la pendiente de la playa y en la movilidad del sustrato que serán más gruesas, más pendientes y más móviles, respectivamente, mientras mayor sea el oleaje (Ceballos, 2008). Los principales factores ambientales que determinan la composición y la diversidad biológica en las playas arenosas son:

- **La granulometría, porosidad y naturaleza del sustrato**

Estos tres factores determinan la capacidad de retención de agua durante la marea baja. Las playas con partículas grandes son más porosas que las playas con partículas pequeñas y no pueden retener casi agua cuando la marea se retira calentándose con facilidad y haciendo condiciones difíciles para la vida (Bruce, 1928 a y b; Rodríguez, 1972). El agua que es retenida contribuye a evitar la desecación de los organismos habitantes de la playa y facilita el enterramiento de la mayoría de las especies; mecanismo de protección contra la desecación, los predadores y los movimientos de partículas ocasionados por el oleaje.

- **La acción mecánica de las olas y de las mareas**

La acción natural de las olas y las mareas junto con la inclinación del sustrato son factores fundamentales en la determinación del tamaño de las partículas arenosas y de la estabilidad de la playa. Las playas sometidas a oleajes más fuertes presentan generalmente arenas más gruesas y tienen mayor pendiente.

En las playas del Pacífico colombiano, donde el rango mareal es muy amplio, la parte superior de la playa se seca más durante la bajamar y la arena queda a merced del arrastre por los vientos formando

dunas eólicas, que se distinguen por marcas sobre la arena en forma de líneas paralelas, delgadas, sinuosas y superficiales de material muy fino acumulado. Las partes más cercanas al mar, al contrario, permanecen más húmedas y son movidas únicamente por el mar (*dunas hidrólicas*) formando verdaderos montículos secuenciales de arena, generalmente con agua entre ellos. Estas marcas se conocen como “*ripple-marks*”.

Los desplazamientos de arena por la acción conjunta de oleaje y marea pueden ser espectaculares, como los que ocurren en la isla de Palma (bahía de Málaga, Pacífico colombiano) durante ciertas épocas del año, cuando se deposita arena en sus bordes. En otras épocas, las corrientes de mareas generadas durante las “pujas” grandes son capaces de arrastrar esta arena dejando las rocas de la isla al descubierto (Cantera, 1991a). En el mar Caribe colombiano, donde el rango mareal es más estrecho (≈ 30 cm) las playas son movidas por la intensidad del oleaje y del viento, dejando verdaderos montículos de arena, más gruesa, y con muchos elementos calcáreos como restos de coral.

- **El contenido de gases disueltos**

El contenido de gases disueltos, principalmente el oxígeno, es otro factor de mucha importancia para la vida de las playas. En muchas de ellas, el contenido de este gas es muy bajo puesto que el intercambio con el agua o con el aire disminuye a medida que se profundiza en el sedimento. A pesar de que en la superficie de la playa los pozos de agua estén sobresaturados en oxígeno, como consecuencia de la fotosíntesis que hacen las diatomeas en la superficie (Brafield, 1964), a sólo 2 cm se pueden encontrar valores inferiores a 1/6 del valor de la superficie; y a 5 cm ya no hay casi oxígeno.

- **La temperatura**

Puede experimentar variaciones marcadas, sobre todo, a nivel superficial. En los momentos en que las mareas bajas coinciden con las horas del mediodía, las temperaturas pueden elevarse por encima de 40°C; pero, si coinciden con las últimas horas de la noche o al amanecer, pueden tener valores cercanos a 18°C. Lo mismo sucede con las partes altas de las playas del mar Caribe.



- **Salinidad**

Aunque la salinidad intersticial es un parámetro que se mantiene más o menos estable también puede presentar algunas variaciones dependiendo de las condiciones ambientales. En el Pacífico colombiano, puede ser muy baja en épocas o en horas de lluvia, pero puede elevarse considerablemente cuando coincide con las horas del mediodía bajo un Sol muy fuerte. Igualmente, puede ser alta en horas de marea alta al igual que en el Caribe, puesto que la mayoría de estas playas están en zonas de mar abierto, y en el Caribe en zonas más secas, donde el agua marina es más salada.

- **Iluminación**

A excepción de la superficie de la playa y de los primeros centímetros de arena en las capas subyacentes de arena, la oscuridad es total. Por esta razón los vegetales, como las diatomeas, se encuentran solamente en la superficie pues necesitan la luz para la fotosíntesis. La mayoría de animales presentan reacciones de escape a la luz, que les permiten enterrarse cuando son sacados, accidentalmente o dentro de los procesos naturales de vida, a la superficie como consecuencia del oleaje.

La vida en las playas arenosas

Las condiciones de vida en una playa arenosa son difíciles; exigen adaptaciones muy especiales, tanto estructurales como fisiológicas, y por esta razón no se caracterizan por su alta diversidad de organismos. Los principales vegetales que habitan en estas playas son plantas arbustivas, herbáceas o rastreras que viven en partes más altas donde la acción del mar sólo se manifiesta por la aspersion de las olas en marea alta o por inundación durante las grandes mareas que se presentan una o dos veces al año.

El otro grupo importante de vegetales son las diatomeas, que cubren en forma de película la superficie, dándole una coloración gris-verdosa. Los animales que habitan en estas playas arenosas (Figura 3.5) pueden considerarse en tres grupos de acuerdo con el tamaño que presenten.

- La microfauna (inferiores a 0,05 mm), constituida principalmente por protozoarios.

- La meiofauna, (retenidos por un tamiz de 0,05 mm pero que pasan a través de uno de 0,5 mm; en algunos casos, pueden medir 1 a 2 mm pero pasan por ser delgados). Muchos phyla poseen representantes dentro de este grupo, gusanos (Nemátodos, Tardígrados, Gastrotrichos, Kinorhynchos), artrópodos, moluscos, celenterados y equinodermos (Swedmark, 1964). Este grupo de organismos es de gran importancia porque representa la principal fuente de alimentación para los otros organismos residentes y visitantes de las playas.

- La macrofauna reúne a todos los animales de tallas mayores a 0,5 mm aunque, en términos prácticos, en muchos estudios se considera a los superiores a 1 o 2 mm. También incluye crustáceos, moluscos, equinodermos, poliquetos, sipuncúlidos e insectos.

Los organismos se distribuyen en las playas arenosas siguiendo un gradiente de humedad creciente desde la frontera de la playa con la vegetación terrestre hasta el límite con el mar. La mayoría de la fauna permanece enterrada en la playa aunque puede ir a la superficie a alimentarse o a respirar. Hay otros organismos, como las aves playeras, que visitan las playas cuando la marea está bajando para alimentarse de los invertebrados y peces bentónicos.

Las zonas más altas están ocupadas por plantas herbáceas *Cenchrus pauciflorus*, *Homolepis aturensis*, y rastreras *Ipomoea pes caprae*, *Canavalia maritima*, y *Pectis arenaria*. Algunas de estas son reconocidas por su papel de fijadoras de sustrato arenoso impidiendo su desplazamiento por el viento en otras partes del mundo, como Florida (Carlton, 1977) y en Vietnam (Barry et al., 1961). En esta zona se encuentran abundantes insectos principalmente dípteros, coleópteros y ortópteros (Naranjo, 1987); cangrejos semiterrestres, cangrejos ermitaños y algunos isópodos. La mayoría de estas especies alcanzan números muy grandes de individuos en algunas épocas del año y son casi ausentes en otras. Por ejemplo, en la costa Pacífica de Panamá, se han reportado densidades cercanas a 5 000 ind/m² en promedio del isópodo *Excirolana braziliensis*, pudiendo representar hasta el 98% de la población (Dexter, 1974, 1979).

En el límite donde llegan las olas durante la pleamar, se encuentra la berma de la playa, marcada por la acumulación de material detrítico, restos de vegetales como algas o mangles, madera y basura. Debajo de esta acumulación se encuentran crustáceos anfípodos, insectos

collémbolos y dípteros. También se encuentran las perforaciones de los cangrejos rojos (género: *Ocypode*) de playas. Estos representan un papel importante en las redes tróficas de las playas, como regulador de las poblaciones de otros organismos al ocupar varios nichos, pudiendo alimentarse además de la meiofauna, de cadáveres de otros organismos que quedan sobre las playas al bajar la marea.

La zona central de la playa está ocupada principalmente por poblaciones de moluscos bivalvos, conocidos como almejas, que pertenecen al género *Dona*; gasterópodos de los géneros *Oliva* y *Olivella* y crustáceos de arena del género *Emerita*. Estos organismos tienen la capacidad de enterrarse rápidamente en el sustrato y se alimentan por filtración de fitoplancton o de materia orgánica en suspensión gracias a estructuras especializadas (sifones y antenas).

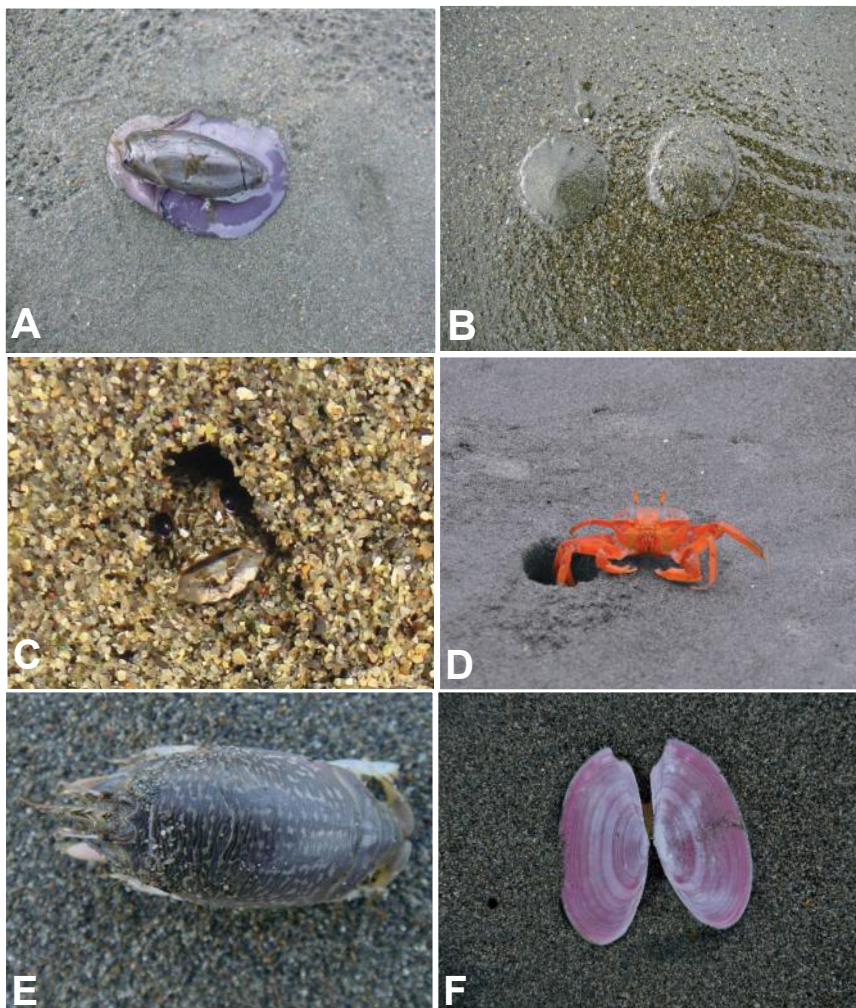


Figura 3.5. Fauna de las playas arenosas. A: Oliva de playa (*Agaronia* sp.), B: Dólar de mar (*Encope* sp.), C: Pez gobidae que vive en agujero de la arena, D: Cangrejo fantasma (*Ocypode* sp.), E: Crustáceo de playa “Reculambai” (*Emerita* sp.), F: *Tellina* sp. Bivalvo que habita en zonas arenosas sumergidas a poca profundidad.

Cortesía: Jaime Cantera Kintz.

En las partes más bajas de las playas, que permanecen poco expuestas a la desecación, se encuentra un número mayor de especies marinas, incluyendo poliquetos de la familia Nereidae y algunos gusanos tubícolas, los moluscos *Lophigia* y *Sanguinolaria* y los equinodermos *Encope* y *Mellita* (galletas de mar) que pueden ser muy abundantes en algunas regiones, como en Piangua Grande en la bahía de Buenaventura (Pardo, 1990; Cantera, 1991a).

Muchas aves marinas visitan las playas arenosas para su alimentación (como los chorlos) o para reposo en los viajes migratorios (gaviotas, pelícanos y cormoranes). Otro habitante temporal, y no por eso menos importante, son las tortugas de las cuales al menos dos especies desovan en las playas en algunas zonas del sur del país, como en Vigía (Nariño).

3.2.2. Las costas rocosas

Este hábitat, muy importante en ambas costas colombianas, está constituido por rocas de origen ígneo depositadas en periodos geológicos antiguos, (Secundario o Terciario), por rocas sedimentarias formadas durante el Terciario y por restos esqueléticos de algunos organismos bioconstructores como corales o algas. Se puede decir que, las rocas volcánicas forman las costas de la zona norte y de las islas Gorgona y Malpelo en el Pacífico colombiano; las sedimentarias en bahía de Málaga, el istmo de Pichidó, el golfo de Tortugas y la isla del Gallo en Tumaco. Las bioconstrucciones son muy comunes en el Caribe colombiano, tanto continental como insular donde se encuentran importantes restos de arrecifes coralinos, de algas y de moluscos verméticos.

Los acantilados son formaciones rocosas compactas que presentan una pendiente muy marcada, razón por la cual caen directamente al mar, formando costas altas. Las playas rocosas son originadas por la erosión o por acumulación histórica de rocas, y forman playas de bloques (si tienen un diámetro superior a 10 cm); de cantos rodados (si son inferiores a 10 cm y superiores a 30 mm) y de gravas (si el diámetro varía entre 30 y 2,0 mm).

Los factores físicos que determinan las condiciones de vida en esas zonas rocosas son: amplitud de las mareas, acción de las olas, tipo de sustrato, temperatura, salinidad y vientos. Estos tres últimos factores



son secundarios. Los principales factores biológicos importantes son la presencia de asociaciones vegetales, la competencia por la superficie de fijación y la alimentación. La bioerosión es un factor determinante de la composición y de la estructura de las comunidades que ocupan las costas rocosas, en la costa Pacífica colombiana las rocas que presentan este fenómeno son las rocas sedimentarias mientras que en la costa del Caribe son las rocas calcáreas.

- **La amplitud de las mareas**

Las variaciones del nivel del mar, debidos a las mareas, determinan la cantidad de humedad que recibe cada zona de la costa rocosa ocasionando una distribución vertical desigual (zonación). En las costas con amplitud de mareas alta, como el Pacífico colombiano, las zonas altas de los acantilados o de las playas rocosas permanecen más tiempo sin la influencia del agua marina, mientras que las zonas bajas permanecen más tiempo cubiertas por el agua estableciéndose, además el gradiente lógico de humedad, gradientes de las otras características asociadas al agua marina y que actúan exclusivamente durante las horas de la pleamar, como la salinidad, la temperatura y la acción del oleaje. Durante la bajamar, los seres vivos que habitan la costa rocosa deben resistir el rigor de los factores climáticos (viento, precipitaciones, insolación). La variación mareal también trae modificaciones de carácter biótico como por ejemplo, la llegada de elementos nutritivos disueltos o suspendidos y de predadores. En las zonas con baja amplitud de mareas, como el Caribe colombiano, el factor más importante es el viento, porque la altura de las olas y el impacto del choque contra el acantilado determinan la anchura de la franja humedecida.

- **La acción de las olas**

Este factor es muy importante porque causa variaciones directas en la composición de las comunidades y en la estructura ecológica. La altura de las olas, la velocidad con que llegan a la zona costera y la fuerza del impacto, junto con la inclinación de la formación rocosa afectada, determinan que la pared rocosa sea afectada por las olas desde unos pocos centímetros donde el oleaje es débil hasta más de un metro en zonas de oleaje fuerte.

• **Naturaleza e inclinación del sustrato**

La composición geológica y la dureza de las rocas son también factores muy importantes en las posibilidades de erosión y en la composición de la fauna que habita este ecosistema. La inclinación presenta también fuertes limitaciones interactuando con la fuerza del oleaje: las especies que habitan en superficies verticales y mar poseen adaptaciones importantes para sostenerse; mientras que, en zonas menos agitadas o menos inclinadas no las presentan.

• **La salinidad y la temperatura**

Estos factores afectan la fauna de las costas rocosas puesto que, en mareas bajas a ciertas horas del día, la temperatura de las paredes rocosas puede elevarse mucho y alcanzar valores superiores a 30°C lo cual supone adaptaciones por parte de los habitantes de estas zonas para evitar la desecación. La salinidad también puede variar como consecuencia de las mareas y la cantidad de lluvias que se presenta en el área costera. En mareas bajas, las salinidades pueden aumentarse, especialmente, en los pozos intermareales por la evaporación si se tienen condiciones de fuerte radiación o puede disminuirse a casi cero, cuando durante la marea baja se presentan fuertes lluvias. En los charcos intermareales la temperatura puede alcanzar valores cercanos a 40°C y la salinidad a 35 %.

La vida en las costas rocosas

Al contrario de las playas arenosas, las costas rocosas presentan una diversidad faunística y florística notable por su riqueza. Los organismos habitan en franjas muy claras, desde las partes más altas y menos influenciadas por el mar hasta las zonas que reciben continuamente su acción (Figura 3.6).

En muchos casos las franjas están claramente delimitadas por el color. Estas costas han servido como modelo para la mayor parte de patrones de zonificación de organismos que existen en el mundo. Las obras más conocidas en este aspecto son los trabajos de Stephenson (1954), Lewis (1964) y Pérez y Picard (1964), que se convirtieron en libros clásicos de biología marina. De acuerdo con estos autores las costas rocosas pueden dividirse en zonas

y cada una de ellas en subzonas (llamadas también niveles u horizontes) dependiendo de los factores citados anteriormente.

En términos generales, la zonación de un sitio se repite con especies animales y vegetales emparentadas en muchas otras partes del mundo en condiciones similares (Vegas, 1971). Los acantilados son erosionados por la hidrodinámica marina (corrientes, cambios mareales, oleaje) pero la acción del mar puede ser reforzada por algunos organismos que aceleran la caída y meteorización de las rocas. Este proceso de bioerosión se puede dividir en dos fases: bioabrasión superficial y bioperforación con la participación de una gran variedad de organismos (Cantera y Prahl, 1986).

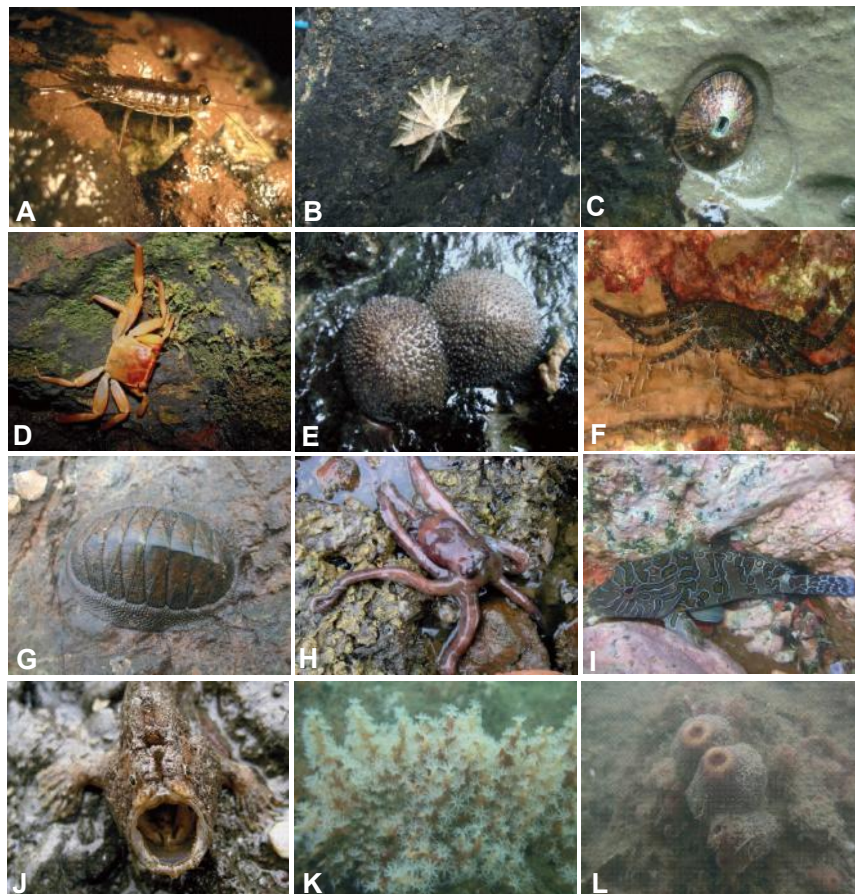


Figura 3.6. Fauna de las costas rocosas. A: Crustáceo trepador (*Ligia* sp.), B: Lapa pulmonada (*Siphonaria* sp.), C: Lapa (*Fissurella* sp.), D: Cangrejo (*Sesarma* sp.), E: Babosa marina intermareal (*Onchidella* sp.), F: Cangrejo plano (*Grapsus* sp.), G: Quitón (*Chiton* sp.), H: Pulpo (*Octopus* sp.), I: Pez de costa rocosa (*Cirrhitis*), J: Pez en costa intermareal (*Antennaridae*), K: Cnidario invasor (*Caryjoa* sp.), L: Esponja (*Suberea* sp.).
Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

Para el caso de las costas colombianas, las principales zonas y las especies que se pueden distinguir en cada una de ellas son:

- Zona supralitoral: es una zona de amplitud variable dependiendo del oleaje que constituye una transición entre la tierra y el mar. Solamente

recibe humedad por la aspersión o vaporización de la ola. El número de especies es bajo; solamente unas especies marinas que poseen buena capacidad de resistir la desecación pueden habitar en ellas. Se pueden encontrar cianobacterias, algunas algas verdes, líquenes moluscos de la familia Littorinidae, cangrejos Grapsidae e isópodos del género *Ligia*.

- **Zona mediolitoral o mesolitoral:** esta zona es cubierta por el agua de mar durante la marea alta pero permanece descubierta y expuesta a condiciones aéreas durante la marea baja. Puede medir entre 3 y 4 metros de altura en el Pacífico y unos centímetros en el Caribe colombiano. Se pueden encontrar dos franjas de acuerdo con los organismos que las habitan: Una zona superior, con balanos del género *Tetraclita*, caracoles de las familias Fissurellidae, Acmaeidae y Siphonariidae y cangrejos de la familia Grapsidae y una zona inferior, habitada por bivalvos de las familias Mytilidae (*Brachiodontes*), Isognomonidae y Ostreidae algas calcáreas de coloración rosada, cangrejos de las familias Xanthidae y Grapsidae, gasterópodos (Muricidae, Neritidae) y quitones (moluscos poliplacóforos). En la parte más baja se encuentra una multitud de perforaciones y cavidades. Estas perforaciones son realizadas por organismos, lo cual contribuye a acelerar los procesos erosivos que se presentan en estos acantilados. Este proceso, denominado *bioerosión*, presenta grandes proporciones en el Pacífico colombiano principalmente en los acantilados formados por rocas sedimentarias. También puede presentarse en el Caribe en rocas calcáreas.

- **Playas rocosas:** las playas rocosas pueden ser la continuación de un acantilado que ha sufrido erosión o la acumulación de rocas por algún proceso de transporte. Estas playas presentan una composición faunística similar a la de los acantilados. La parte alta de la playa está ocupada por cangrejos Grapsidae y moluscos Littorinidae, Neritidae y Muricidae. La parte inferior de estas playas constituye uno de los ecosistemas costeros con mayor biodiversidad en las costas colombianas presentando una fauna de casi todos los grupos de organismos bentónicos marinos, principalmente, gasterópodos, bivalvos, camarones, anomuro, cangrejos, equinodermos (estrellas frágiles, pepinos de mar y erizos), gusanos planos, poliquetos, briozoarios, esponjas, ascidias e hidrozoarios. Todos estos organismos pueden habitar sobre cavidades de las rocas, debajo o dentro de estas, como protección contra la desecación y los predadores.



3.2.3. Los ecosistemas de manglar

El nombre “manglar” se aplica a las asociaciones vegetales costeras de los trópicos y subtrópicos, que tienen determinadas características comunes a pesar de pertenecer a diferentes grupos taxonómicos (Prahl *et al.*, 1990). Estas características son:

- Tolerancia al agua salada y salobre, sin ser plantas halófilas obligadas (como glándulas adaptadas a la expulsión de sales).
- Raíces que permiten aumentar considerablemente la superficie de fijación sobre sustratos inestables; raíces en zanco o fúlcreas del mangle rojo, género *Rhizophora*, raíces subterráneas dispuestas radialmente como el mangle negro, del género *Avicennia* y el mangle blanco del género *Laguncularia*.
- Adaptación para intercambiar gases en sustratos anaeróbicos (lenticelas, tejidos fibroesponjosos, neumatóforos).
- Embriones capaces de flotar por tiempos relativamente largos, que se pueden dispersar transportados por el agua. Los embriones del mangle rojo son alargados y puntiagudos, los embriones del mangle negro y blanco son pequeños y tienen pericarpos flotantes, el piñuelo y el nato tiene cámaras de aire, lo que facilita la flotación.

Las especies que forman los manglares de las costas colombianas pertenecen a cinco familias: Rhizophoraceae (*R. mangle* y *R. racemosa*), Avicenniaceae (*Avicennia germinans*, *A. bicolor*), Combretaceae (*Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erecta*), Theaceae (*Pelliciera rhizophorae*) y Caesalpinaceae (*Moraoleifera*). Estas especies se distribuyen dependiendo de las características medio ambientales, como amplitud y rango de protección de las mareas, composición del suelo, oferta de agua dulce, protección de la acción directa del oleaje y del acarreo de arena, flujo de nutrientes, topografía y clima entre otros (Prahl, 1989). Dependiendo de estas condiciones pueden formar los siguientes tipos de bosques de manglar:

- **Manglares de barras:** situados detrás de barreras, playas o dunas arenosas que actúan como trampas de sedimentos ocasionando la formación gradual de planos lodosos protegidos del oleaje en los que se fijan embriones de manglares.

Los planos de lodo que rodean los manglares representan el área donde se encuentra una alta diversidad de especies del llamado nivel trófico intermedio. Estos organismos aprovechan el material proveniente de la descomposición de la hojarasca del manglar por la acción mecánica de las mareas y de la abrasión con el sustrato; los cuales la van fragmentando en el suelo. Al mismo tiempo va siendo colonizado por hongos y bacterias y atacado también por organismos que lo fraccionan como nematodos, anfípodos, gasterópodos, poliquetos, crustáceos decápodos e insectos. Estos organismos sirven después de alimento a crustáceos, moluscos, peces y aves playeras que incorporan dicha materia a las redes tróficas estuarinas (Figura 3.7).

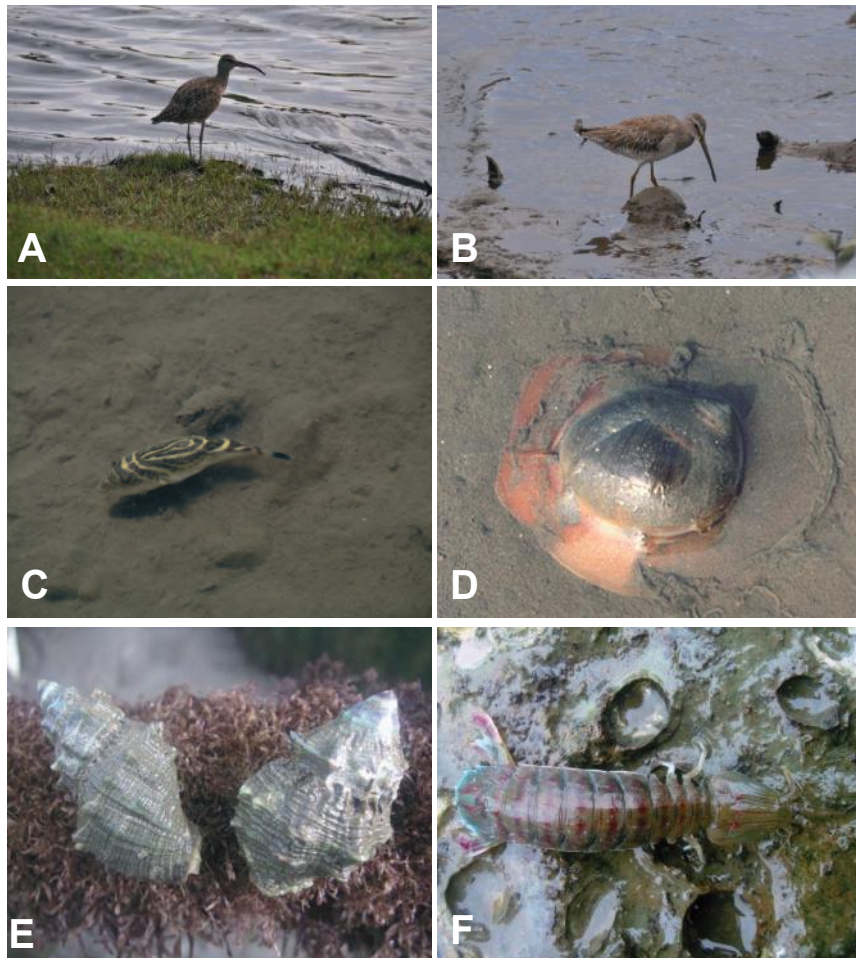


Figura 3.7. Fauna asociada a planos lodosos que rodean los manglares. A: Chorlo grande de pico curvo (*Numenius phaeopus*), B: Chorlo grande de pico recto (*Tringa* sp.), C: Pez Tamborero (*Sphoeroides anulatus*), D: Caracol burgao (*Natica unifasciata*), E: Caracol predador (*Thais* sp.) sobre restos de madera en plano de lodo en área de manglar, F: Camarón bravo (*Squilla* sp.).

Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

- **Manglares ribereños** que son los más desarrollados debido al continuo suministro de nutrientes por los ríos y el intercambio de mareas. Presentan una clara zonación con mangle rojo (*Rhizophora*) en la parte externa donde los sustratos son más inestables (fangosos), seguidos por mangle negro (*Avicennia*) y blanco (*Laguncularia*) donde los sustratos son más arenosos. En el Pacífico colombiano, detrás de estos cinturones, donde los sustratos se encuentran más estabilizados, se encuentra mangle piñuelo (*Pelliciera*) y después nato (*Mora*).

Los mangles tienen flores bien definidas que pueden ser solitarias en inflorescencias apareciendo en determinados periodos del año. Se puede decir que los mangles son vivíparos, reproduciéndose gracias a embriones con capacidad de resistir un tiempo prolongado una vez que han sido liberados del medio ambiente. Esto ha sido determinante para la dispersión geográfica de las especies (Figura 3.8).

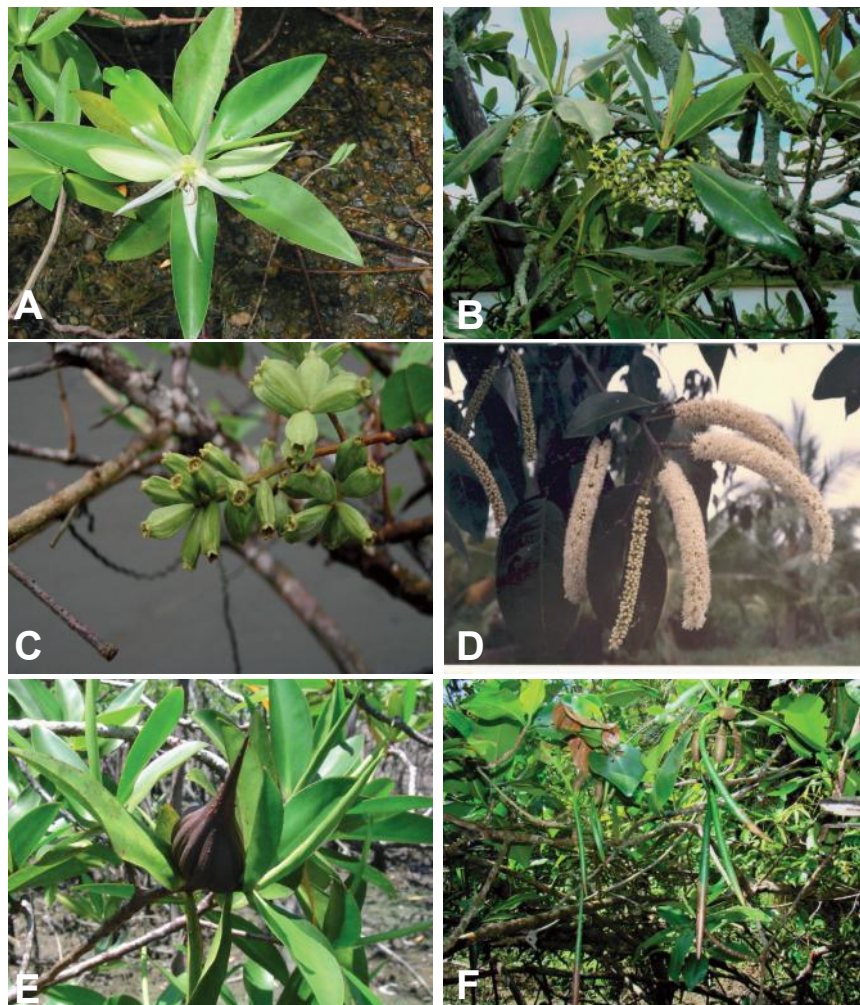


Figura 3.8. Floración de los mangles. A: Flor de piñuelo (*Pelliciera*), B: Inflorescencia de mangle rojo (*Rhizophora*), C: Inflorescencia de mangle blanco (*Laguncularia*), D: Inflorescencia de nato (*Mora*), E: Embrión de piñuelo (*Pelliciera*), F: Embriones de mangle rojo (*Rhizophora*).

Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

- **Manglares de borde:** se forman sobre sustratos erosionados a lo largo de la costa, en bahías protegidas o rodeando a islas con plataformas bajas dentro de cuerpos de agua protegidos.

Los manglares son conocidos en todo el mundo por su alta productividad y los de Colombia no son la excepción (Tabla 3.1). La hojarasca del manglar es sometida a la acción mecánica de las mareas, del viento, del Sol y de la abrasión con el sustrato que fraccionan el detritus. Los fragmentos son colonizados, nuevamente, por microorganismos los cuales actúan descomponiendo los tejidos vegetales y formando proteína microbiana. Al mismo tiempo, van siendo colonizados por hongos y bacterias y atacados, también, por organismos (nemátodos, anfípodos, gasterópodos, poliquetos, crustáceos decápodos e insectos). Estos fragmentos son ingeridos nuevamente por los organismos detritívoros, que se nutren principalmente de esta película superficial (cera, taninos, hongos, bacterias y microorganismos).

Tabla 3.1. Producción de hojarasca en varias localidades del Pacífico colombiano comparados con otros manglares del mundo. Fuente: Datos recopilados en Cantera, 2008.

Localidad	Producción hojarasca (Ton/Ha/año)	Especies	Tipo de bosque
COLOMBIA			
Pasacaballos (Nariño)	12,1	R.spp, M.o., P.r	Ribereño
Sanquianga (Nariño)	12,9	R.r.	Ribereño
Hojas Blancas (Nariño)	10,1	Mixto intervenido	Ribereño
Bocagrande (Nariño)	9,6	R.spp.	Ribereño
Tumaco (Nariño)	9,3	R.spp.	Ribereño
Río Limones (Valle)	7,5	Mixto intervenido	Ribereño
Parque Utría (Chocó)	10,3	Pr.	Borde
Guapí (Cauca)	14,1	A.g.	Ribereño
Isla Soldado (Valle)	9,6	R.m, A.g., L.r., P.r.	Barra
Isla Soldado (Valle)	11,3	R.m, A.g., L.r., P.r.	Ribereño
Ciénaga Grande S. Marta	28,8 (1980) 15,7 (1983) 9,1 (1988)	R.m, A.g., R.m, A.g., R.m, A.g.,	Borde Borde Borde
ANTILLAS FRANCESAS			
Guadalupe	8,4	R.spp.,A.g.,L.r.	
MÉXICO			
Teacapan	14,2	R.m., A.g.	Ribereño
FLORIDA			
North River	8,8	R.m.	Ribereño

Los restos vegetales no digeridos son liberados al medio, donde pueden ser recolonizados por microorganismos (bacterias, hongos, etcétera.) pudiéndose repetir el proceso hasta que el núcleo vegetal quede convertido en macromoléculas orgánicas, las cuales se exportan con las mareas como materia orgánica en forma de coloides, en suspensión o en disolución. Así, los manglares no sólo representan una fuente de energía y un sustrato de sostén, sino que son conocidos mundialmente como áreas nodrizas o “sala-cunas” donde se lleva a cabo la reproducción de muchos organismos y se desarrollan las larvas de peces, crustáceos y moluscos, muchos de ellos de importancia comercial, y medio de protección a una gran cantidad de organismos que encuentran en sus troncos, entre sus raíces o en el fango, un refugio natural (Figura 3.9).

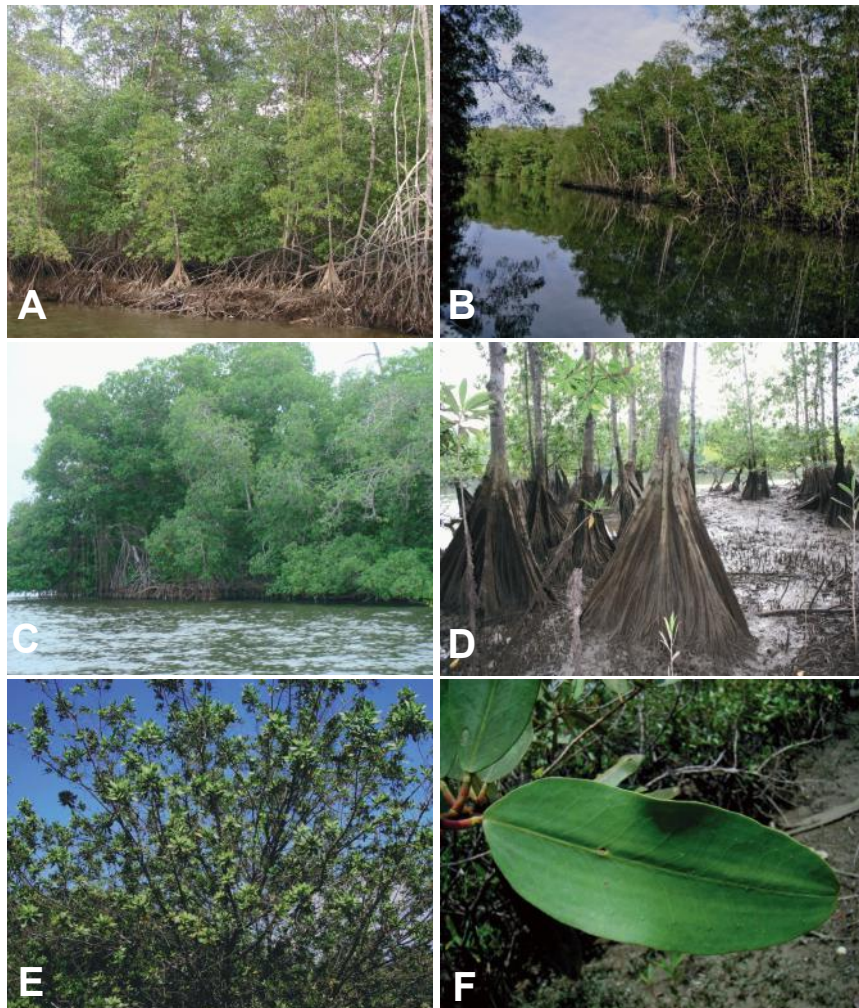


Figura 3.9. Manglares encontrados en Colombia: A: Manglar en la costa Pacífica (PNN Sanquianga), B: Raíces aéreas o en zancos de mangle rojo (*Rhizophora*) en la costa Pacífica, (PNN Sanquianga), C: Raíces aéreas o en zancos de mangle rojo (*Rhizophora*) en la costa Caribe, (Bahía de Cispata), D: Raíces en contrafuertes de mangle piñuelo (*Pelliciera*) en el PNN Sanquianga, E: Árbol de mangle Zaragoza o mangle bobo (*Conocarpus*) en Bahía Málaga, F: Hojas y glándulas para expulsión de sales en mangle blanco (*Laguncularia*) en Bahía de Cispata.

Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

Los principales organismos que habitan en los manglares colombianos son:

- **Organismos bentónicos de zonas de manglares:** a pesar de ser pocas las especies de animales exclusivas de manglares, este ecosistema cobija un número alto de animales bentónicos gracias a la elevada productividad primaria que presenta esta asociación vegetal. La flora y la fauna de los árboles de mangle son de origen mixto; los organismos de las raíces y troncos y el suelo de manglares son marinos; mientras que, el follaje es ocupado por organismos de zonas terrestres. En las zonas altas donde la influencia de la humedad marina es mínima, se encuentran epífitas, orquídeas, bromeliáceas y plantas parásitas, como lorantáceas. Los principales visitantes del follaje son aves, insectos y algunos reptiles y mamíferos.

Existe una alta diversidad de organismos de origen marino que habitan en las ramas, troncos y raíces de los mangles (Cantera *et al.*, 1999). Varias especies de algas viven asociadas a las raíces aéreas de los árboles de mangle rojo o a los pneumatóforos de mangle negro. Estas algas pueden ser:

- **Algas Verdes** (*Chlorophyceae*) que pueden crecer en forma de mechones colgados, en las raíces de mangle rojo; o que forman cojines sobre los pneumatóforos de *Avicennia*.

- **Algas rojas** (*Rhodophyceae*) que pueden llegar hasta el nivel de la máxima marca alta formando mechones colgantes dispuestos hacia el suelo. Los principales invertebrados de este hábitat son crustáceos (cangrejos Grapsidae y Cirripedios del género *Chthamalus*), caracoles (Littorinidae, Muricidae), bivalvos (Ostreidae y algunos perforadores de madera como los bivalvos “broma” de la familia Teredinidae).

En el Caribe colombiano donde una buena parte de las raíces de manglares permanecen sumergidas permanentemente, la fauna asociada a ellas es muy diversa estando constituida por casi todos los grupos de organismos bentónicos marinos, principalmente, gasterópodos, bivalvos, camarones, anomuro, cangrejos, equinodermos, gusanos planos, poliquetos, briozoarios, esponjas, ascidias e hidrozoarios.



En las zonas fangosas con vegetación de mangle se encuentran organismos que pueden ocupar la superficie (ectofauna) o vivir enterrados a profundidades entre 10 y 30 cm (endofauna). En el fango se presentan fuertes variaciones ambientales que dependen de: altura mareal, energía de las olas, salinidad, temperatura e inclinación del terreno (Cantera et al., 1999). En esta zona son abundantes los cangrejos “violinistas” (familia Ocypodidae género *Uca*). Estos cangrejos, generalmente pequeños, viven sobre planos de lodo de manglares y se reconocen fácilmente de otros cangrejos por el especial desarrollo, en los machos, de una quela (quelípedo) la cual es mucho más grande y más coloreada que la otra. Esta quela juega un papel fundamental para mantener la estructura social en las poblaciones y es parte importante en el cortejo (Crane, 1975).

En estas áreas también se encuentran caracoles del género *Cerithidea* en grupos grandes, obteniendo su alimento del material detrítico que se acumula durante la marea baja, algunos gusanos poliquetos, insectos hemípteros, bivalvos Veneridae (“cholgas”) y Arcidae (“pianguas” y “sangaras”) y peces con características anfibias como algunos lenguados (Bothidae, Soleidae y Cynoglossidae) los “pejesapos” (*Batrachoides*) y los sapitos o góbidos.

En la hojarasca, caída de los manglares, se encuentran caracoles de las familias Melampidae (*Melampus* y *Marinula*) y Neritidae, anfípodos e insectos colémbolos que se alimentan principalmente de la materia orgánica liberada durante la descomposición de los restos de mangle o de otros organismos y que son parte importante de la red detritívora del manglar (Figura 3.10).

En los canales y los cuerpos de agua se encuentran peces, como “lisas” (familia Mugilidae), “róbalos” (Gentropomidae), “tamboreros” (Tetradontidae), “agujas” (Hemiramphidae) y algunos crustáceos, como las “jaibas” (Portunidae), camarones de agua salada (Penaeidae) y de agua dulce (Palaemonidae), que van al estuario a reproducirse.

La utilización de la productividad de los manglares ocurre más frecuentemente durante las fases tempranas del desarrollo de las especies. En esta forma los manglares se constituyen en áreas nodrizas o incubadoras para un número considerable de peces, crustáceos y moluscos de importancia comercial.

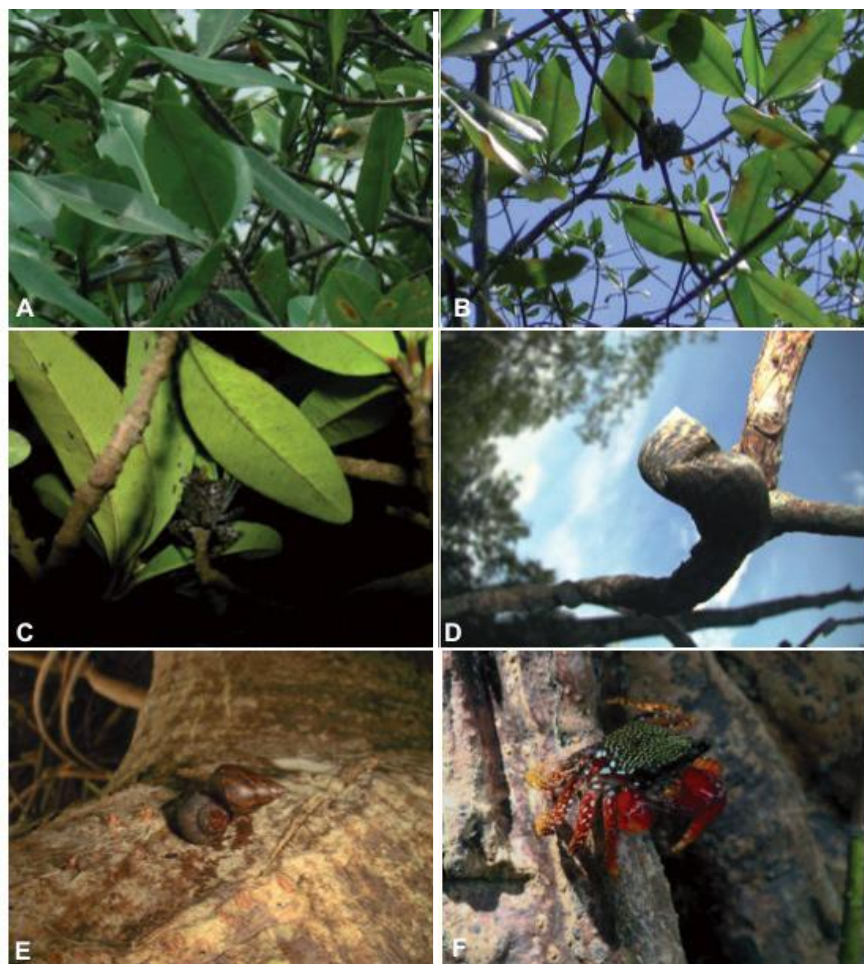


Figura 3.10. Fauna encontrada en los manglares. A: Garza estriada (*Butorides striatus*) en árbol de mangle rojo, B: Nido de colibrí (*Amazilia tzacatel*) en árbol de mangle rojo, C: Cangrejo trepador (*Aratus pisonii*), D: Caracol piaquil (*Littorina fasciata*) en rama de mangle rojo, E: Caracol piaquil (*Littorina zebra*) en rama de mangle rojo, F: Cangrejo tasquero (*Goniopsis pulchra*) que recorre todo el árbol y desciende hasta el fango en marea baja

Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

3.2.4. Los arrecifes coralinos

Los arrecifes coralinos son ecosistemas costeros que se encuentran en zonas tropicales, donde la temperatura media anual es siempre mayor a 20°C. Por sus características de vida, los corales ocupan áreas donde las aguas son someras, presentan baja turbiedad y las salinidades relativamente elevadas. Por estas razones, los arrecifes coralinos son ecosistemas muy abundantes en el Caribe y poco abundantes en el Pacífico colombiano.

En las aguas del Caribe, las áreas coralinas ocupan en conjunto una extensión aproximada de 1 820 km², distribuidos en 21 áreas tanto en la región insular (San Andrés, Providencia, Cayos, Archipiélagos del Rosario y San Bernardo donde representan casi el 70%, como en la región continental (Parque Tayrona, bahía de Santa Marta y Taganga, bahía de Cartagena, golfo de Urabá) mientras que en el



Pacífico están limitados a algunas regiones de la zona norte de la costa del Chocó y a los fondos someros insulares de Gorgona y Malpelo (Díaz *et al.*, 1996) y son relativamente pequeños, teniendo longitudes cercanas a un kilómetro, a pesar de que se consideran relativamente antiguos. Glynn *et al.*, 1982, estimaron la edad de los arrecifes de la isla de Gorgona aproximadamente 6 000 años.

Estos arrecifes pueden estar formados por dos grandes tipos morfológicos de corales: los corales de crecimiento ramificado y los corales de crecimiento masivo. Al primer grupo pertenecen los géneros *Pocillopora* y *Psammocora* que habitan generalmente, en zonas poco profundas y que adquieren diferentes formas (llamadas ecoformas) de acuerdo con las condiciones ambientales del hábitat, principalmente profundidad y corrientes). Al segundo grupo pertenecen tres géneros: *Pavona*, *Porites* y *Gardinoseris*, aunque se han citado otras especies.

La belleza natural y la importancia ecológica del ecosistema coralino ha provocado una gran cantidad de literatura al respecto, por lo cual este tema será tratado aquí someramente, sabiendo que en general para Colombia existen las siguientes obras que son excelentes referencias para el conocimiento de la composición y ecología de los arrecifes. Existen muchos trabajos relacionados con los arrecifes del Caribe colombiano entre los cuales podemos resaltar las siguientes obras: Díaz, 2000; Prah, 1988 y en el Pacífico colombiano existen varias obras tanto a nivel científico como informativo: Prah y Erhardt, 1985; Prah, 1986; Cantera *et al.*, 1989; Prah y Estupiñán, 1990, Zapata y Vargas 2001.

Este ecosistema tiene su base en la existencia de los pólipos coralinos capaces de secretar un esqueleto calcáreo y de formar colonias, gracias a la energía y al aporte de carbonato de calcio (CaCO_3) que les proporcionan algunas algas simbióticas que viven dentro de los pólipos denominadas zooxanthelas. El esqueleto construido puede llegar a ser muy grande formando grandes arrecifes, como los encontrados en la barrera arrecifal de Australia.

La vida en los arrecifes coralinos

Aunque la mayor parte de la matriz principal de los arrecifes está constituida por los corales madreporarios, en la formación se

encuentran algas calcáreas y otros numerosos grupos de invertebrados principalmente hidrozoarios, poliquetos serpúlidos, briozoos, moluscos y otros grupos menos frecuentes.

La fauna que habita en zonas arrecifales se caracteriza por la alta diversidad específica y su gran colorido (Figura 3.11). En los arrecifes del Caribe colombiano se han registrado más de 200 especies de peces, 600 de moluscos, 30 de equinodermos, 12 de octocorales. En las aguas que bañan las zonas coralinas del Pacífico colombiano (isla Gorgona, isla de Malpelo y en la ensenada de Utría) se han registrado más de 300 especies de peces, 600 de moluscos, 30 de equinodermos, 12 de octocorales y quedan aún muchos grupos por ser estudiados más intensamente. Estas especies, presentan una multitud de nichos ecológicos, pudiendo alimentarse del mucus del coral, del zooplancton que habita en las aguas arrecifales, y principalmente, de la gran cantidad de invertebrados y pequeños peces asociados tanto a las colonias vivas de los corales como a las masas basales muertas, donde encuentran protección.

Muchos de los peces se encuentran directamente asociados a la matriz coralina, pero algunos de ellos, sobre todo las grandes especies, (tiburones, mantarrayas, barracudas, jureles, bravos y algunos atunes) se encuentran en los bordes externos del arrecife donde acuden en busca de alimento. Algunas pocas especies de moluscos y equinodermos pueden alimentarse de los tejidos vivos de los corales y pueden llegar a ocasionar verdaderos desastres en algunos arrecifes; como ha sido registrado para algunas especies en el mundo pero, este tipo de ataques masivos por predadores de corales no se ha presentado aún en las formaciones coralinas de los mares colombianos, aunque algunas especies conocidas por hacer estas destrucciones han sido registradas *Acanthaster planci* y *Jenneria pustulata* en el Pacífico, y *Cyphoma gibbosum* en el Caribe. Actualmente, se registra una importante invasión del pez León (*Pterois antennata*) en las aguas del Caribe colombiano.

Los corales se encuentran afectados por perturbaciones sucesivas (Cantera, 1991b): enfriamientos del agua en ciertas épocas debido a la influencia de la surgencia de Panamá, que desciende en los primeros meses del año a lo largo de la zona externa de la costa Pacífica colombiana, disminuyendo la temperatura de las aguas que circundan los arrecifes a cerca de 18°C por periodos superiores a una semana.

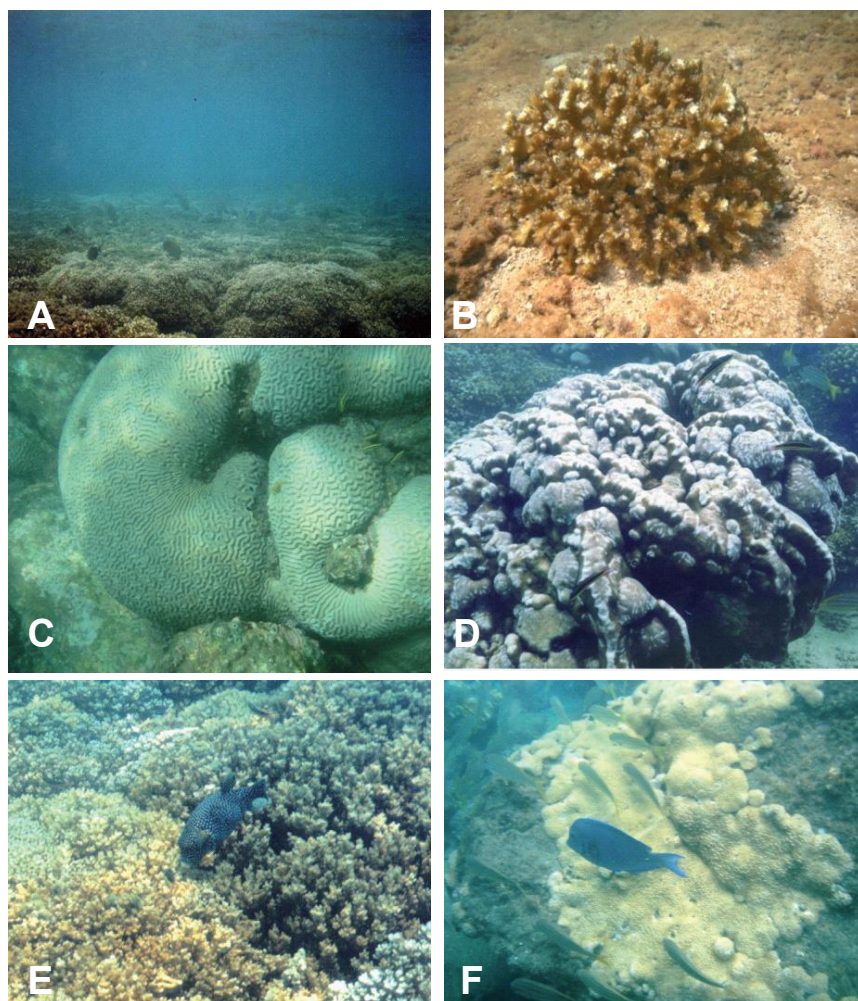


Figura 3.11. Arrecifes coralinos. A: Arrecife coralino en Gorgona, Pacífico colombiano, B: Coral ramificado (*Pocillopora* sp.), C: Coral masivo cerebriforme (*Diploria* sp.), D: Coral masivo (*Porites* sp.) con mordeduras de peces loros, E: Pez tamborero mordiendo corales ramificados (*Arothron* sp.), F. Pez cirujano (*Acanthurus*).

Fuente: Cortesía Jaime Cantera Kintz

De otra parte, durante la ocurrencia de eventos El Niño en algunos años, se produce una elevación en la temperatura del agua marina que puede sobrepasar los 24°C. Este calentamiento causa, según algunos autores, la pérdida de las zooxanthelas o blanqueamiento, que puede ocasionar la muerte de los pólipos.

En las grandes mareas de puja, de algunos meses del año, se presenta que algunos de los corales, principalmente en la isla Gorgona, llegan a quedar expuestos al aire durante la marea baja.

Las altas temperaturas y la insolación, al mismo tiempo que la falta de agua (que puede prolongarse por algún tiempo), pueden llegar a ser causante de mortalidad coralina. Además, los corales están sujetos a la acción de fuerte predación por algunos peces (principalmente los peces loros de la familia Scaridae) y algunos moluscos (familia

Ovulidae) y sus bases muertas son erosionadas por moluscos bivalvos (género *Lithophaga*) y erizos de mar (*Diadema*). Las partes vivas son destruidas por algunos peces.

Los factores naturales citados anteriormente, al igual que las perturbaciones antropogénicas que sufren estas comunidades hacen que en conjunto, los arrecifes del Pacífico colombiano tengan un desarrollo relativamente menor y no hayan podido lograr la exuberancia de otras zonas del Pacífico tropical.

3.3. LAS MIGRACIONES DE LOS ANIMALES MARINOS

Sea cual sea el régimen de vida de los animales marinos, planctónicos, nectónicos o bentónicos, existe como norma general el hecho de que realizan una serie de desplazamientos, unas migraciones de diversos tipos, según las cuales, cada fase de su vida se desarrolla en un determinado lugar; estos lugares dependen a su vez de ciertas condiciones ambientales tanto de orden fisicoquímico como biológico y, sobre todo en este último aspecto, de la alimentación. La primera migración, desde los lugares de nacimiento a los de crecimiento y maduración donde buscan el alimento, recibe el nombre de migración trófica. La opuesta, encaminada al retorno a los lugares de reproducción se llama migración genética.

Los seres marinos pueden realizar su vida totalmente en el mar o parcialmente en el agua dulce y en la marina, en este caso, nacen en el mar y se desarrollan en el agua dulce o lo contrario; a los seres que nacen en agua dulce y marchan al mar a desarrollarse se les denomina anádromos y anádroma la migración que en este sentido realizan. A los que nacen en el mar y se desarrollan en los ríos se les llama catádromos y catádroma su correspondiente migración.

Los desplazamientos que realiza el plancton dependen fundamentalmente de las corrientes marinas. Por la influencia de éstas el plancton se transporta constantemente por el mar en forma involuntaria, pudiendo acumularse, en determinadas circunstancias, en áreas o regiones a las que acudirán inmediatamente los seres planctófagos. Algunas especies planctónicas transportadas por las corrientes determinadas por las condiciones fisicoquímicas



del medio pueden llegar lejos; otras pueden ser detenidas por las fronteras de un medio ambiente adverso.

Las migraciones de los peces responden principalmente a dos causas: la alimentación y la reproducción. Un ejemplo de esto es la migración que realiza el atún que en ocasiones puede ser de 14 a 50 km diarios. Las migraciones se presentan en dos etapas: la primera, es un viaje de concentración genética, donde los atunes se reúnen en ciertos lugares favorables para la reproducción y, la segunda es el viaje de alimentación siguiendo las aguas que les ofrecen mejores posibilidades. Así se determinan las condiciones de pesca de los atunes, realizados por investigadores de los países interesados en capturar y conservar esta valiosa especie comercial.

Otros animales marinos que migran son las tortugas, aunque las causas de este interesante proceso no están totalmente aclaradas. Las tortugas marinas se encuentran distribuidas en todos los mares tropicales y vuelven a las costas donde nacieron para aparearse y realizar la puesta. Un aspecto destacado del comportamiento de las tortugas es su capacidad para regresar a su lugar de nidación, esto les permite nadar miles de kilómetros a través del mar hasta una playa particular, siendo una de las migraciones que rivaliza con las realizadas por las aves, las anguilas y el salmón. Resultaría interesante averiguar con exactitud cómo consiguen estos animales trasladarse desde los lugares donde viven habitualmente hasta la zona de cría, saber cómo escogen las rutas que deben seguir y los procedimientos que utilizan para orientarse en el gran océano.

La migración de la ballena gris (*Eschrichtius robustus*) es la más larga efectuada por cualquier mamífero y es uno de los acontecimientos naturales más impresionantes del mundo actual. En las heladas aguas de Ártico y del mar de Bering, en el casquete polar de Alaska, cada año se inicia una de las migraciones más extraordinarias que se realizan, desplazándose cerca de 20 000 km (cerca de 150 km diarios). Es una asombrosa migración que los cetáceos emprenden puntualmente en los meses invernales desde el Polo Norte hasta las cálidas aguas mexicanas en la península de Baja California, México. El recorrido se prolonga por tres meses y durante este lapso las ballenas se enfrentan a una serie de adversidades.

Las ballenas grises inician su viaje en la península de Kamchatka, bordean las Islas Aleutianas, navegan por el Pacífico septentrional y

llegan a California: y a la península de Baja California, doblan en el Cabo San Lucas y penetran al Golfo de California, en México (Figura 3.12).

Los científicos consideran que estas ballenas realizan la migración hasta las aguas localizadas alrededor del paralelo 28°N por presentar un clima benigno para ellas y por tener una salinidad que permite gran flotabilidad, fundamental para el entrenamiento de la cría antes de emprender la larga migración de regreso al mar de Bering. El reloj con que la naturaleza ha dotado a las ballenas grises, es de una exactitud extraordinaria; según estudios científicos los cetáceos nunca tienen un retraso mayor de 5 días al inicio o al final de su migración, que ocurre entre el 20 de diciembre y el 20 de marzo, constituyendo uno de los espectáculos más maravillosos del planeta.

En Colombia entre agosto y octubre, se presenta una migración similar a las de las ballenas grises, por parte de las ballenas jorobadas o yubartas, las cuales viajan del océano Antártico a las aguas tropicales del Pacífico colombiano para parir sus crías en aguas cálidas (25°C y 28°C) y con mucho alimento. Cuando se han fortalecido, regresan con sus ballenatos a las aguas frías del polo sur.

De otra manera, el charrán ártico, también llamado golondrina de mar (*Sterna paradisaea*), es conocido por hacer la migración anual más larga en el reino animal. Sus viajes equivalen a tres viajes de ida y vuelta a la Luna durante toda su vida.

El charrán ártico es un ave marina de tamaño mediano con un peso promedio de 95 - 125 gramos y una envergadura de 75 - 85 cm. Durante su época de reproducción se encuentra al norte, donde los días de verano son largos, y durante los inviernos viaja hasta el Hemisferio Sur, donde aquí los días son más largos de noviembre a febrero. Esto significa que el charrán ártico, probablemente reciba en su cuerpo más luz solar durante un año natural que cualquier otra criatura en la Tierra, de ahí que algunos le llamen el ave del Sol.

Los viajes de larga distancia de las gaviotas o golondrinas del Ártico son bien conocidos, tanto entre los investigadores como el público en general. Ahora, por primera vez, los avances tecnológicos han permitido seguir el charrán ártico en su viaje inmenso, casi de polo a polo, abarcando cerca de 70 000 km en su recorrido anual (Figura 3.13).



Figura 3.12. Migración ballena yubarta (*Megaptera novaeangliae*) y gris (*Eschrichtius robustus*) en América. **Fuente:** Adaptada por Raul M. Benedetti.

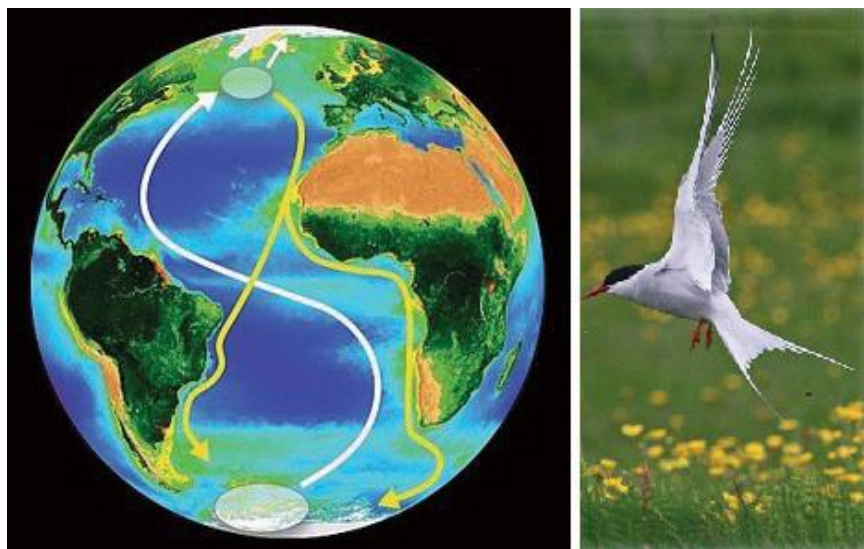


Figura 3.13. Migración anual que realiza el charrán ártico o golondrina de mar (*Sterna paradisaea*). **Cortesía:** PlanetEarth, EDroper and Drunk On Blue.

PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

1. Mencione cuáles son los principales temas de investigación actuales en el ámbito de la oceanografía biológica a nivel global.
2. Investigar en los Centros de Investigaciones Oceanográficas de Colombia los principales proyectos científicos que se están desarrollando a nivel nacional relacionados con las poblaciones marinas.
3. Elabore una exposición corta explicando la Paradoja del Plancton (Hutchinson, 1961).
4. Explique cuál es la diferencia entre productividad primaria y secundaria y cuáles son los métodos más utilizados para su cuantificación.
5. Diga cuáles son los principales factores que determinan la tasa de productividad primaria en los océanos.
6. Explique cuáles son los principales ecosistemas de las cuencas marítimas colombianas, sus características y principales organismos que los habitan.
7. Investigar cuáles son las especies marinas en peligro de extinción en Colombia; explique las causas y las acciones que se están tomando para solucionar esta problemática.
8. Investigue qué efectos tiene el fenómeno de las surgencias en la producción biológica.
9. Investigue el efecto de los eventos El Niño y La Niña en las poblaciones biológicas de la cuenca del Pacífico colombiano.
10. Investigue cuáles son las principales especies biológicas marinas de interés comercial en Colombia; cuál es su producción anual, las problemáticas y retos que enfrentan.

UNIDAD 4

FACTORES FISICOQUÍMICOS QUE REGULAN LOS ECOSISTEMAS MARINOS



INTRODUCCIÓN

La vida en el mar está regulada por la compleja suma de factores biológicos, físicos y químicos que determinan el medio ambiente marino. Algunas propiedades del agua de mar son la salinidad, la temperatura, la densidad, la iluminación vinculada a la transparencia, la capacidad de absorción de calor, la profundidad y la topografía submarina, estrechamente relacionada con la composición de los fondos marinos y sedimentos. La presencia o ausencia de componentes químicos como fosfatos y nitratos (sales nutritivas) favorecen la presencia de organismos marinos.

La conjugación de los factores mencionados determina una serie de adaptaciones morfológicas y fisiológicas especiales que afectan tanto a la flora como a la fauna marina. Así, la densidad del agua, y sus movimientos moldean las diferentes morfologías. Los seres marinos adoptan una u otra forma; son sedentarios o móviles, permanecen en el fondo o flotan libremente en las aguas, etcétera. La presencia o ausencia de luz y las necesidades defensivas dan origen a las diversas coloraciones; así como la salinidad y la temperatura dan lugar a determinadas adaptaciones fisiológicas.

Objetivos

- Familiarizarse con los efectos de las variables físicas y químicas sobre los organismos marinos.

- Familiarizarse con las principales características de los procesos de la producción primaria en los ecosistemas marinos.
- Desarrollar habilidades para utilizar técnicas sencillas, con el fin de observar y medir las características químicas y físicas de un ecosistema marino real.

4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE MAR

El agua se caracteriza por llevar en disolución una gran cantidad de sólidos y gases, pudiendo admitirse en principio, que en la Tierra, todos los elementos químicos existentes se encuentran en ella.

Naturalmente los elementos disueltos en cantidades tan ínfimas son, con frecuencia, imposibles de reconocer por un análisis químico normal, pero la presencia de algunos de estos elementos, tan escasos, está probada porque forman parte de la composición química de los seres vivos que habitan el mar, que no han podido tomarlos más que de su medio ambiente.

Por ejemplo, el cobre se halla concentrado en determinados animales como los moluscos, y forma parte fundamental de la hemocianina de su sangre; la hemocianina es el pigmento circulatorio que sustituye en ellos la hemoglobina que lleva hierro en lugar de cobre. Algunos de los principales componentes, sodio y potasio son difíciles de determinar con exactitud; otros elementos están ligados por próximo parentesco con compuestos difíciles de separar tal como ocurre con los fosfatos y arseniatos, o el calcio y el estroncio.

El mar es salado debido a la disolución de los elementos de la tierra en el agua. La salinidad media o contenido en sal es de 34,5 partes de sal en peso por 1 000 partes de agua. El agua dulce suele tener una salinidad de menos de 0,5 por 100 partes de agua. Aproximadamente el 27 por 1 000 es cloruro de sodio y el resto consta de sales de magnesio, calcio y potasio, entre otros. Ya que las sales se disocian en iones, la mejor manera de representar la composición química del agua de mar es como sigue (Tabla 4.1), en partes por 1 000.



Tabla 4.1. Principales iones negativos y positivos del agua de mar.
Fuente: Adaptada por el autor.

IONES NEGATIVOS	
Cloro	19,3
Sulfato	2,7
Bicarbonato	0,1
Carbonato	0,007
Bromuro	0,07
Total	22,177
IONES POSITIVOS	
Sodio	10,7
Magnesio	1,3
Calcio	0,4
Potasio	0,4
Total	12,8

Como la proporción de los radicales permanece constante, la salinidad total puede ser calculada averiguando el contenido de cloro (que resulta más fácil de verificar que la salinidad total). Así, por ejemplo, 19 partes por 1 000 de cloruro se aproximan a 35 partes por 1 000 de salinidad.

Existe siempre una constancia en las proporciones relativas en que se encuentran disueltos los principales componentes. Estas se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Proporción existente entre la clorinidad y los principales componentes del agua de mar. La clorinidad igual a 19 partes por mil se aproxima a una salinidad de 35 partes por 1 000 (ppm). Fuente: Adaptada por el autor.

IONES		
	Cl=19%	*%
Cl ⁻	18,980	88,04
Br ⁻	0,065	0,19
SO ₄ ⁻	2,649	7,68
CO ₃ ⁻	0,071	0,21
HCO ₃ ⁻	0,140	0,41
Fl ⁻	0,001	0,000
H ₃ BO ₃	0,026	0,077
Mg ⁺⁺	1,272	3,69
Ca ⁺⁺	0,400	1,16
Sr ⁺⁺	0,013	0,04
K ⁺	0,380	1,10
Na ⁺	10,556	30,61

La importancia de este hecho es extraordinario, ya que de ésta forma, basta determinar la concentración de un componente cualquiera (como la clorinidad), para determinar las cantidades restantes y por ende, estimar la concentración total de sales o salinidad del mar.

Según el oceanógrafo francés Thoulet, la composición media del agua de mar, considerando la salinidad media como de 35,0639 gr/L, es la siguiente (Tabla 4.3):

Tabla 4.3. Gramos de sales encontrados en un litro de agua de mar según el oceanógrafo francés Thoulet (1904). Fuente: Adaptada por el autor.

Gramos por litro	
Cloruro de Sodio	27,373
Cloruro de Magnesio	3,363
Sulfato de Magnesio	2,2437
Sulfato de Calcio	1,3229
Cloruro de Potasio	0,592
Carbonato de Calcio	0,0625
Bromuro de Magnesio	0,0547
Cloruro de Rubidio	0,019
Metafosfato de Calcio	0,0156
Sílice	0,0149
Bicarbonato de Hierro	0,026
TOTAL 35,0639	

4.2. EFECTOS SOBRE LOS ORGANISMOS MARINOS

Los organismos del mar abierto suelen ser estenohalinos (esto es, tiene límites de tolerancia estrechos respecto a los cambios de salinidad); en tanto que los organismos de las aguas salobres cerca de la costa suelen ser eurihalinos (soportan amplios rangos de salinidad).

La mayoría de los organismos marinos tienen un contenido interior de sal similar al del agua de su medio (esto es, son isotónicos con el agua de mar) y de ahí que la osmorregulación no plantee problema alguno. Sin embargo, el pez marino de espina tiene una concentración menor de sales en la sangre y en los tejidos (es decir, es hipotónico). Estos peces tienen un “problema” por lo que se refiere a la osmorregulación, en cuanto a concentración de sales. La deshidratación se evita mediante la ingestión de agua y una aceptación activa de sales a través de las branquias.



La concentración de nutrientes disueltos en el agua es baja y constituye un factor limitativo importante en la relación con el volumen de las poblaciones marinas. Mientras la concentración de cloruro de sodio y de otras sales se mide en partes por mil (ppm), los nitratos, fosfatos y otros elementos nutritivos están tan disueltos, que se miden en partes por 1 000 millones. Por otra parte, las concentraciones de estas sales biogénicas vitales varía mucho de un lugar a otro y de una estación a otra.

A pesar del hecho de que los nutrientes son continuamente arrastrados por el agua hacia el mar, su importancia como factores limitativos no es menor en los medios marinos que en los terrestres o los de agua dulce. La baja concentración de estos elementos, no indica necesariamente una escasez total, ya que éstos materiales están sujetos a “demanda” por parte de los organismos, que pueden ser eliminados de la circulación con la misma rapidez en que son liberados. Las corrientes impiden la pérdida permanente de muchos elementos nutritivos, aunque el carbón y el silicio pueden perderse por el depósito de conchas en el fondo del mar. Únicamente en algunos lugares de corriente ascensional vigorosa (afloramientos), los nutrientes son tan abundantes y en ocasiones, el fitoplancton no puede agotarlos.

4.3. SALINIDAD

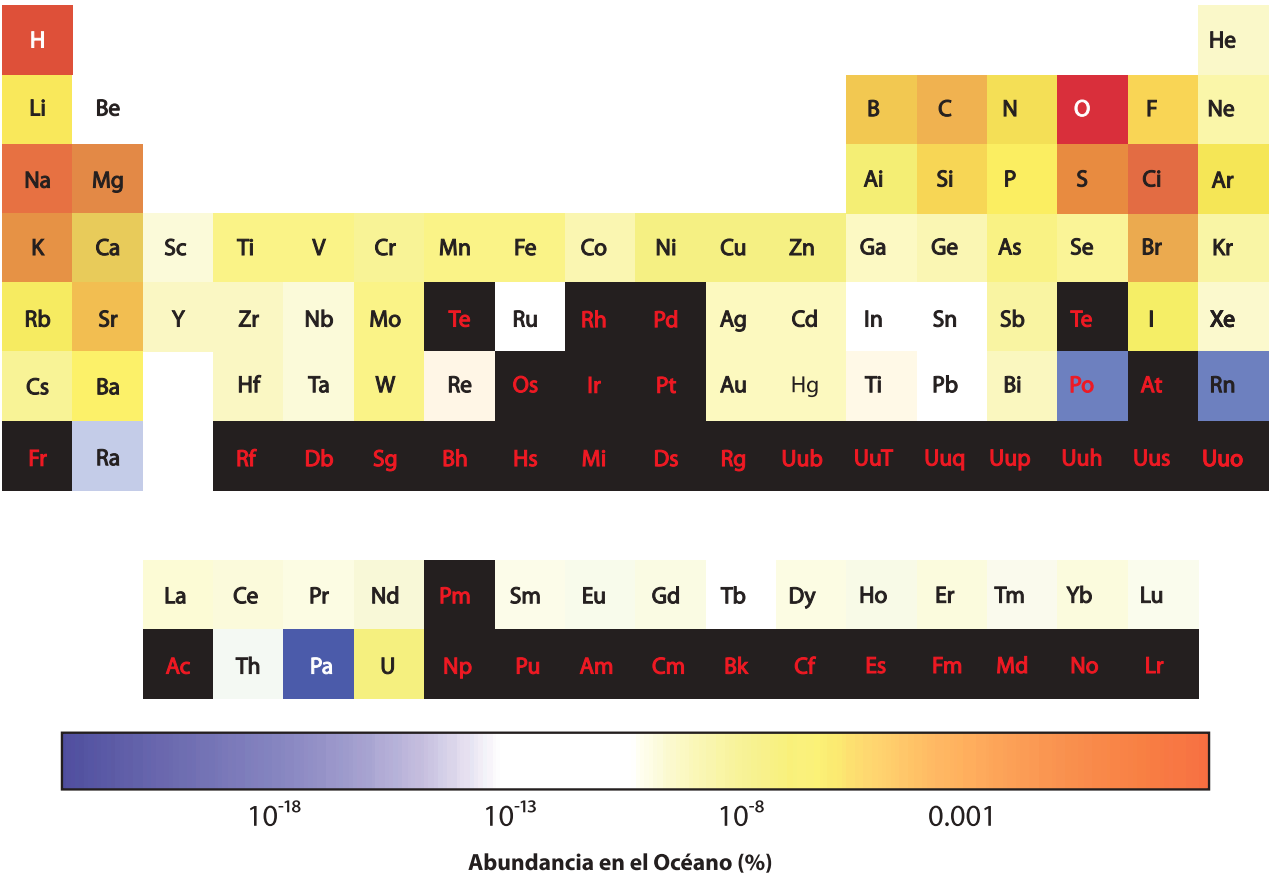
En oceanografía, la salinidad es uno de los parámetros más importantes para describir el agua de mar, junto con la temperatura y la presión.

En 1899, la Comisión para la Exploración de los Mares define la salinidad como la cantidad total en gramos de las sustancias sólidas contenidas en un kilo de agua de mar, cuando todos los carbonatos se han convertido en óxidos, el bromo y el yodo han sido sustituidos por el cloro, y la materia orgánica ha sido completamente oxidada.

A pesar del gran número de elementos disueltos en el agua de mar, sólo unos pocos están en cantidades notables. Hay seis elementos que constituyen más del 99% de las sales marinas (Cl, Na, Mg, S, Ca, K). Estos elementos se conocen como componentes principales debido a que su concentración en el agua de mar es mayor que 1 parte por millón (Tabla 4.4).

El agua de los océanos se encuentra bien mezclada, en consecuencia, la abundancia relativa de los componentes más importantes de las sales marinas es esencialmente constante, con independencia del punto del océano donde se ha recogido la muestra. Solamente varía el contenido del agua de la mezcla, dentro de límites bastante restringidos. Esta cuasi-constancia de la composición, con respecto a los componentes principales, proporciona al oceanógrafo un método sumamente útil para determinar el contenido de sal del agua de mar.

Tabla 4.4. Abundancia de los elementos en el océano. Fuente: Mathematica’s ElementData, función de Wolfram Research.



Aprovechando las proporciones constantes de las sales más importantes en el agua del mar (Figura 4.1), los oceanógrafos utilizaron, por muchos años, la clorinidad para determinar el contenido de sal del agua marina.

Proporciones relativas de agua y sales disueltas en el agua del mar

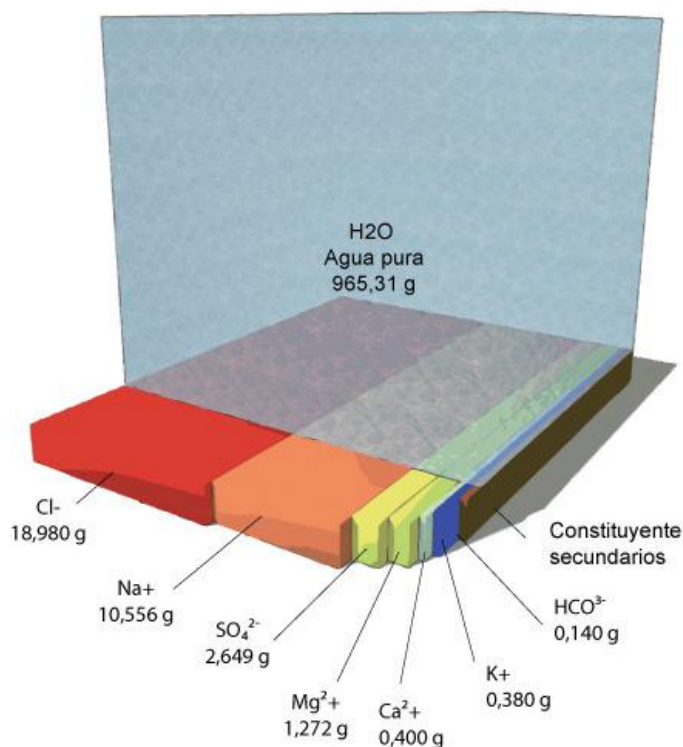


Figura 4.1. Proporción de los principales constituyentes del agua de mar.

Fuente: Adaptada por el autor.

4.3.1. Determinación de la salinidad

Hay diferentes procedimientos para determinar la salinidad, como son la titración química (método Knudsen), la conductividad eléctrica, el método de la densidad y el índice de refractividad.

- **Clorinidad**

La clorinidad es la cantidad total en gramos de cloro, bromo y yodo, que se encuentra en un kilogramo de agua de mar, ocurre que el bromo y el yodo son suplidos por el cloro.

El profesor Martin Knudsen desarrolló el método volumétrico para la estimación del contenido de cloruro. Knudsen sugirió que gracias a las proporciones constantes de los componentes de agua de mar, la salinidad puede estimarse mediante la medición de la clorinidad.

$$\text{Salinidad} = 1,80655 \times \text{Clorinidad}$$

- **Conductividad**

Knudsen descubre en 1902 que la conductividad eléctrica puede emplearse como método alternativo para medir la salinidad. El agua pura es un pobre conductor de electricidad. Sin embargo, la presencia de iones en el agua permite el paso de una corriente eléctrica.

En 1930, se desarrolló el primer salinómetro conductímetro para agua de mar. La conductividad es inversamente proporcional a la resistencia, y por décadas, estos salinómetros se basaron en un simple puente de circuitos eléctricos, y para su calibración, usaron como referencia una muestra de salinidad estándar ($S=35$). Se demostró que este método es tan preciso como la titración o titulación y puede ser fácilmente usado a bordo de buques de investigación científica.

La conductividad puede también verse alterada por la temperatura, dando lugar a errores apreciables. Idealmente, un oceanógrafo requiere mediciones de salinidad con una precisión de $\pm 0,001$, lo que implica que la conductividad sea medida a 1 parte en 40 000. Un cambio de esta magnitud puede ser inducida por cambios en la temperatura de sólo $0,001^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, es esencial un control de este parámetro.

En el pasado, se usaban termostatos de precisión para mantener las muestras y los estándares a temperatura constante, pero estos equipos eran rudimentarios y poco práctico.

Desde los sesenta, la definición de salinidad se basa en la determinación empírica de la conductividad. La salinidad de una muestra de agua de mar se mide en términos de la razón de conductividad (R) que se define como sigue:

$$R = \frac{\text{conductividad de la muestra de agua}}{\text{conductividad solución estándar KCl}}$$

siendo la concentración de la solución estándar de KCl = 32,4356 g /kg.

La salinidad (S) se relaciona con R a 15°C y 1 atmósfera de presión (R_{15}) por la siguiente ecuación:

$$S = 0,0080 - 0,1692 R_{15}^{1/2} + 25,3851 R_{15} + 14,0941 R_{15}^{3/2} - 7,0261 R_{15}^2 + 2,7081 R_{15}^{5/2}$$



Un valor de salinidad determinado por conductimetría depende de la temperatura y de la presión a la cual la conductividad es medida, y por tanto, se aleja de la idea simple fundamental de ser la cantidad total de sales disueltas en una muestra de agua. De hecho, para el agua de mar de regiones abiertas, estas dos están estrechamente relacionadas; tanto que la concentración total de sales disueltas en g/kg de agua de mar es igual a $1,00510 \times S$.

En la actualidad, el método para determinar la salinidad es a partir de la medición *in situ* de la conductividad del agua de mar y se hace con un sensor de alta precisión ($\pm 0,003^\circ\text{C}$) denominado CTD (perfilador de conductividad, temperatura y profundidad).

El conductímetro consiste de dos bobinas; una inyecta una señal a la otra bobina por medio del agua de mar. La magnitud de la señal detectada por la segunda bobina es proporcional a la conductividad del agua de mar. Unos termistores colocados en el mismo CTD son usados para medir la temperatura y estimar con mayor precisión la salinidad ($\pm 0,002$).

4.4. DENSIDAD

La densidad del agua del mar depende de tres factores: temperatura, salinidad y presión. En el mar abierto, la densidad del agua varía solamente dentro de límites relativamente estrechos. La determinación cuantitativa de este parámetro debe hacerse con precisión trabajando con variaciones pequeñas.

Normalmente, la densidad del agua del mar se estima a partir de mediciones exactas de la temperatura (con un error $\pm 0,003^\circ\text{C}$) y de la salinidad (con un error de $\pm 0,002$) de las muestras de agua tomadas con botellas muestreadoras, o mediante las mediciones de alta precisión realizadas con el CTD. Valiéndose de estos datos se calcula la densidad con una precisión de uno por 50 000.

La unidad de densidad en el Sistema Internacional es kg m^{-3} . La densidad del agua de mar en el océano abierto tiene valores típicos entre 1 025 a 1 027 kg m^{-3} . Para estandarizar las mediciones de densidad tomadas a diferentes profundidades en el océano, se pueden ignorar los efectos de

la compresibilidad y para ello se utiliza una unidad denominada σ_t (se lee sigma-t), que conserva la salinidad y la temperatura medidas *in situ*.

$$\sigma_t = \sigma(S, t, 0)$$

Así, si la densidad de una muestra de agua es $1,02493 \text{ kg m}^{-3}$, esto equivale a $\sigma_t=24,93$. En efecto, se ha simplificado la expresión de la densidad. Es más fácil operar numéricamente con la diferencia entre las $\sigma_t = 25,61$ y $26,93$ que son sus equivalentes $1,02561$ y $1,02693 \text{ kg m}^{-3}$ escritos como densidad.

La figura 4.2 a continuación muestra los cambios de densidad del agua para salinidades comprendidas entre 33 y 37, así como temperaturas entre -3°C y 30°C , que abarcan la gama de temperatura y salinidad de la mayor parte de los océanos.

Se pueden comparar los efectos relativos de la temperatura y de la salinidad sobre la densidad del agua de mar. Las variaciones de densidad son principalmente debidas a las variaciones en la temperatura; a mayor temperatura, menor será la densidad del agua de mar. Sin embargo, en regiones donde la temperatura es muy baja (regiones polares), los cambios de densidad se deben principalmente a las variaciones en la salinidad. Así mismo, se puede apreciar que el contenido de sal ocasiona la disminución del punto de congelación del agua de mar, el cual es de $-1,8^\circ\text{C}$.

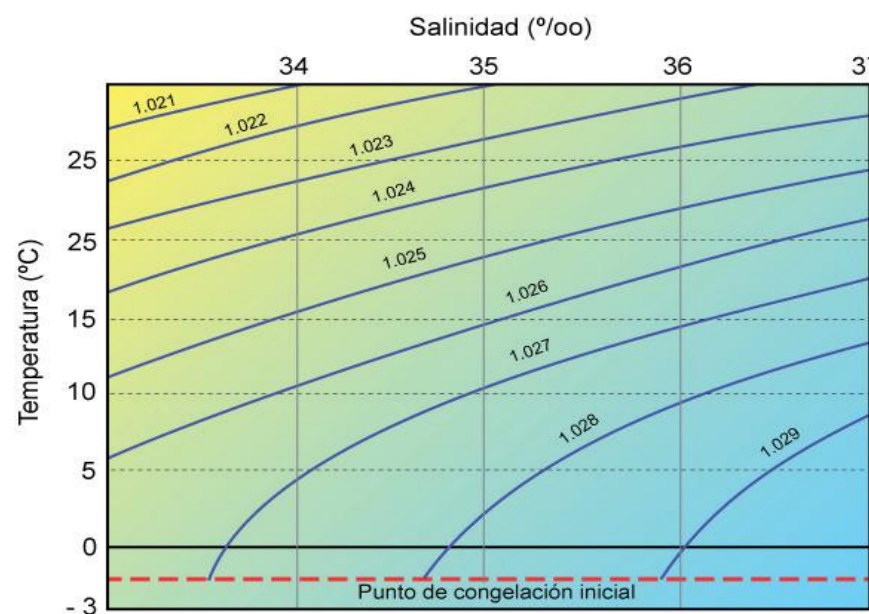


Figura 4.2. Variaciones de densidad (kg/m^3) del agua de mar en función de la temperatura y salinidad.

Fuente: Modificado de U.S. Naval Oceanographic Office, *Instruction Manual for Oceanographic Observations*.



4.4.1. Densidad y estabilidad del agua

La densidad de una porción de agua de mar controla la profundidad a la cual se ubicará en la columna de agua. Dicha densidad crece cuando aumenta su salinidad o cuando disminuye la temperatura. Inversamente, el agua del mar se hace menos densa cuando se calienta o disminuye su salinidad por aportes de agua dulce (por ríos o lluvias). Los cambios horizontales de densidad resultantes de procesos que se desarrollan principalmente en la superficie del océano son la causa primaria de las corrientes profundas.

Los movimientos de convección del aire son importantes en la atmósfera, la cual, se calienta en la parte inferior y se enfría en la superior. Sin embargo, los océanos son simultáneamente calentados y enfriados en la parte superior. Por lo tanto, las corrientes de convección generalmente son menos evidentes en los océanos que en la atmósfera. Se puede simular la situación de los océanos encendiendo una lámpara de infrarrojos sobre la superficie de un plato lleno de agua fría. Se crea así un sistema estable con agua caliente encima de agua fría.

4.5. COMPUESTOS DISUELTOS EN EL AGUA DE MAR

4.5.1. Fosfatos

La zona fótica (con incidencia de luz) está siendo desgastada continuamente en cuanto a sus nutrientes, en principio, por la productividad primaria fotosintética, si no fuera por la mezcla vertical, o por la advección vertical de nutrientes de aguas profundas (surgencias). El término bio limitante se usa con aquellos nutrientes cuya disponibilidad en el agua de mar limita la productividad biológica. Estos son los nitratos, fosfatos y silicatos.

Los perfiles característicos de los fosfatos y nitratos (Figura 4.3) muestran un consumo casi total en la capa de mezcla superficial controlados principalmente por procesos biológicos. Estos nutrientes son utilizados en la formación de tejidos suaves de organismos. La razón de concentración molar de nitrato y fosfato en aguas abiertas es 15:1.

Los fosfatos se encuentran disueltos en el agua de mar en la forma de metafosfato cálcico y según Thoulet, su cantidad es de 0,0156 gr/L

a una salinidad de 35,063 gr/L. La distribución de los fosfatos en el mar no es uniforme, existiendo diferencias grandes, una debida a la distribución vertical de las aguas y otras de carácter estacional. Los fosfatos son utilizados por el fitoplancton o plancton vegetal, en los procesos de la fotosíntesis, lo que hace que su concentración sea muy variable, tanto horizontal como verticalmente.

Desde el punto de vista de la distribución vertical de los fosfatos, pueden ser consideradas cuatro capas diferentes: la primera superficial, donde las concentraciones son pequeñas y uniformes. La segunda que alcanza hasta los 500 m de profundidad y en la que el contenido de fosfatos aumenta rápidamente con la profundidad (nutriclina). La tercera, comprende desde los 500 a los 1 500 m, y alcanza las máximas concentraciones de fosfatos. Finalmente, la cuarta, una capa de fondo de gran espesor donde la concentración se mantiene relativamente uniforme (Figura 4.3, izquierda).

En el océano Atlántico, las máximas concentraciones corresponden a la capa de 1 000 m de profundidad; en el océano Pacífico, difiere debido al distinto régimen de corrientes. El máximo de concentraciones se encuentra en la región ecuatorial.

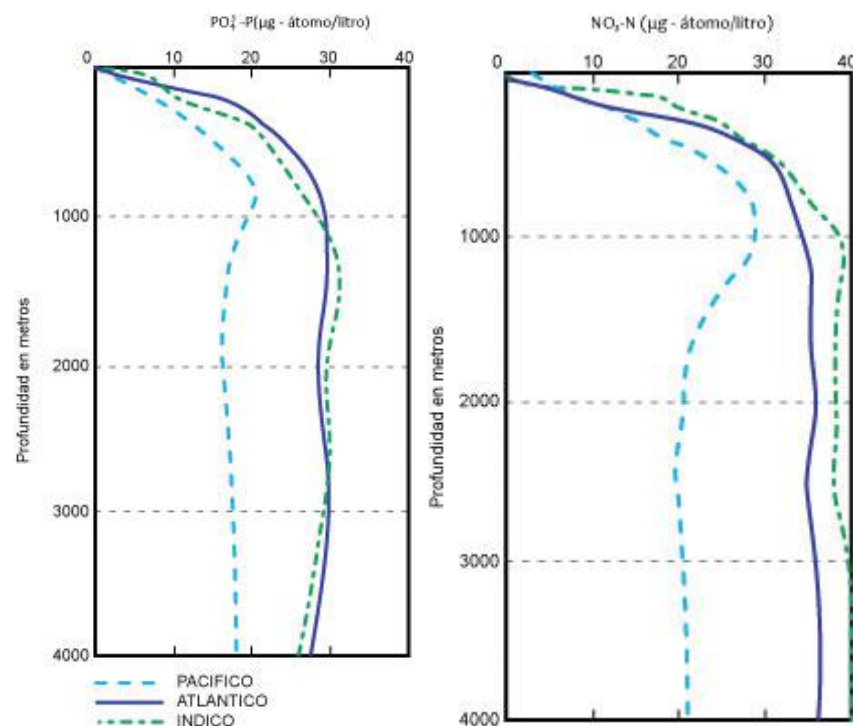


Figura 4.3. Distribución vertical de los fosfatos (izquierda) y los nitratos (derecha) en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. **Fuente:** Modificado de Kennish (2001).



4.5.2. Nitratos

El gas nitrógeno (N_2) es esencialmente diferente al nitrato (NO_3^-), nutriente del agua de mar, ya que el primero puede ser fijado por pocas especies de fitoplancton como las cianobacterias (algas verde-azules), las cuales lo convierten en compuestos de nitrógeno orgánico requerido para el crecimiento.

Estas constituyen la segunda de las llamadas “sales nutritivas”. Son fundamentales para la existencia del fitoplancton y consecuentemente del resto de seres vivos. Puede afirmarse que su distribución general en el seno de las aguas es muy similar a la de los fosfatos; ambas sales están destinadas a una misma finalidad y tanto los elementos consumidores como las fuentes de producción son las mismas para ambos.

La concentración total promedio de nitrógeno en el océano es de 11,5 ppm, de la cual 11 ppm es en forma de N_2 . El resto (fracción muy pequeña) es en forma de nitratos producidos por la descomposición de materia orgánica terrestre llevada al océano por los ríos.

Las concentraciones de nitratos en el océano Atlántico son menores que en el caso de fosfatos, estando la capa de máxima concentración a profundidades comprendidas entre los 500 y 1 500 m (Figura 4.3, derecha). Estos nutrientes están sometidos a fluctuaciones en su concentración muy diversas; la determinación de una de ellas no puede hacerse a partir de cualquier otra, y debe ser específica para estos compuestos.

Es posible determinar los nitratos en función de la concentración de fosfatos, cuando se quiere obtener una aproximación relativa, de no gran precisión. El paralelismo existente entre las concentraciones de ambas sales en el agua de mar, nos demuestra que la concentración es lineal y que coincide muy exactamente a la del 15:1 átomos de nitrógeno: fósforo (razón molar).

4.5.3. Oligoelementos

En el agua de mar, existen una serie de elementos presentes en cantidades reducidas llamadas oligoelementos, que contienen particular importancia en la vida marina. Algunos de ellos como el cobre y el hierro son indispensables para animales y plantas; el

primero es imprescindible por formar parte de la hemocianina de la sangre, como en los moluscos y el segundo, por formar parte de la hemoglobina de otros. Parece ser que buena cantidad de hierro contenido en el agua de mar no se encuentra en forma de verdadera solución, por lo que es separable del agua por procedimientos físicos, como los ultrafiltros.

El hierro disuelto en forma de sales férricas o ferrosas se encuentra en concentraciones de 2 mg/L. El 16% de este total se encuentra en forma de componentes del plancton, donde las algas diatomeas son capaces de incorporar hierro coloidal disperso en el agua de mar.

El cobre se encuentra en el agua de mar en una concentración de 1 a 10 mg/L y también actúa como catalizador, indispensable para el desarrollo de las larvas de las ostras. El arsénico, otro ejemplo de los oligoelementos, es importante para la vida de las plantas, encontrándose en el agua en cantidades que oscilan entre 9 y 22 mg/L.

4.5.4. Carbonatos y bicarbonatos

La proporción de CO_2 como gas disuelto en el agua de mar es menor al 2% del total de CO_2 en solución. El resto se presenta en forma de iones bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}).

En el agua de mar de 35,0633 de salinidad, existen 0,0625 gramos de carbonato de calcio y 0,0026 gramos de bicarbonato de hierro por litro de agua. Estas son cantidades medias, puesto que existe una independencia entre las sales y el CO_2 .

Las funciones de este gas, como las del oxígeno, son debidas a la actividad vital del mar y principalmente a la de los vegetales. Cualquier factor que intervenga en la cantidad de CO_2 presente, lo hará por consecuencia, en la concentración de bicarbonatos. Por tanto, estas sales dependen de la temperatura, de la salinidad, de la actividad biológica y de los procesos de mezcla debidos a los movimientos del mar.

El producto de solubilidad de los carbonatos (o la solubilidad del carbonato de calcio, como la de cualquier otro electrolito) aumenta en el agua de mar cuando lo hace la clorinidad, y por tanto la salinidad, y decrece cuando aumenta la temperatura.



Las aguas superficiales con temperatura y salinidades altas son, por lo tanto, propicias al descenso de la cantidad de CO_2 disuelto y subsiguiente a la precipitación de los carbonatos.

El efecto de los cambios de salinidad sobre la solubilidad de carbonato de calcio (Ca_3CO) es débil, por ello, en áreas de temperaturas altas donde se produce una fotosíntesis activa con gran consumo de CO_2 , la precipitación de Ca_3CO es particularmente más intensa.

En cambio en aguas más profundas, donde las temperaturas y salinidades son más bajas, las variaciones en el contenido de CO_2 total son más amplias. Las aguas profundas del océano Atlántico están prácticamente saturadas de carbonatos. Cuando las capas de agua están superpuestas a fondos arcillosos, se llega a una saturación; en cambio, las capas que yacen sobre fondos calcáreos, se llega a una sobresaturación. Como una consecuencia de ello, los fondos de la naturaleza calcárea pueden proceder no solamente a los deterioros de organismos que tenían esqueletos calcáreos y se depositaron en el fondo del mar al morir, sino que parte del carbonato cálcico de aquellos sedimentos puede proceder de precipitación química.

4.6. EL pH DEL AGUA DE MAR

El conocimiento del pH en el agua de mar tiene importancia en biología marina, ya que muchos fenómenos biológicos pueden estar regulados por esta variable, por ello es de interés su determinación y valoración. En relación con el cambio climático global, existen evidencias que muestran que la acidificación del océano es causada por el aumento en la emisión de CO_2 atmosférico.

El agua de mar en equilibrio con el CO_2 atmosférico es ligeramente alcalina, con un pH alrededor de 8,1- 8,3. El pH puede aumentar ligeramente por la rápida abstracción de CO_2 desde la capa superficial durante la fotosíntesis, pero normalmente no excede valores de 8,4, excepto en algunas costas y estuarios.

Se ha visto que debajo de la zona fótica, el CO_2 absorbido en la fotosíntesis es excedido por el CO_2 liberado en la respiración. A medida que las concentraciones de CO_2 aumentan, disminuye el pH hasta valores típicos de 7,7 - 7,8, alcanzando valores de 7,5

en regiones con salinidad reducida o en condiciones anóxicas (anaeróbicas).

El procedimiento usual para determinar el pH del agua de mar es el potenciómetro, que registra la actividad entre los iones hidrógeno, mediante el uso de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia, o un electrodo combinado. La fuerza electromotriz (FEM) producida por el sistema electroquímico varía linealmente con el pH.

El pH es el logaritmo negativo de la concentración de hidrogeniones, por tanto: ($\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+]$), a un pH de 7 corresponde una concentración de hidrogeniones de 10^{-7} y este es el pH para el agua pura; a un valor mayor, se considera básico y a uno menor, ácido. El pH del agua de mar está sobre $\text{pH} = 7,4 - 8,4$, lo que hace que se considere ligeramente básico. Los valores más altos se encuentran frecuentemente en la superficie, oscilando entre 8,1 y 8,3; en aguas donde hay una activa función fotosintética (con el siguiente decrecimiento del CO_2), el pH puede subir un poco más.

Por debajo de la zona fótica, donde el O_2 ha sido consumido y las cantidades de CO_2 alcanzan su máximo valor (a unos 800 m de profundidad), se alcanzan los mínimos valores de pH de 7,5, sólo superados cuando se presenta una ausencia total de O_2 (zona anóxica) y cuando en determinados tipos de agua y fondos hay una producción de ácido sulfhídrico, llegando entonces a valores de pH de 7,0. Es decir, parece existir una relación entre la cantidad de O_2 y el pH.

Dependiendo fundamentalmente el pH del CO_2 contenido en el agua de mar, y siendo este a su vez función dependiente de la temperatura, de la salinidad y de su propia presión, se comprende que aquellos tres factores influyen en los valores de pH del agua de mar.

4.7. CONSTITUYENTES DE LOS FONDOS MARINOS: SEDIMENTOS

Sobre las rocas constitutivas del fondo del mar se ejerce constantemente una acción erosiva y por otra parte, un fenómeno permanente de sedimentación, y así, las rocas del sustrato que afloran en el fondo de los mares, están recubiertas de una capa más o menos gruesa de diversos tipos de sedimentos.



Los productos de alteración de las rocas del fondo, pueden acumularse *in situ* o ser transportados por las corrientes. Puede tratarse de tres tipos de sedimentos: de origen terrígeno costeros, que transportados por las corrientes, se depositan alejándose de las costas en orden inverso a la de su estado de fragmentación y peso. Los sedimentos pueden tener también origen cósmico extra-terráqueo; pueden proceder de la precipitación química, llevada a cabo en el mismo seno del agua, y finalmente pueden proceder de la acumulación de los restos de los animales y vegetales marinos.

4.7.1. Partículas sedimentarias

Se han estudiado varias propiedades del sedimento. El tamaño de las partículas, su origen o su color, así como la textura pueden proporcionar información para completar la obtenida por otras técnicas. Los datos sobre el tamaño y origen de las partículas de sedimento pueden ser utilizados para averiguar sus fuentes y los medios de transporte. Además, se pueden estudiar ciertas interacciones con el agua de mar que modifican las propiedades del sedimento tales como el color o la composición mineral.

El tamaño de las partículas o granos de sedimentos se determinan con facilidad; se hace pasar el sedimento suelto por tamices cuyas aberturas disminuyen progresivamente de tamaño. Pasando la cantidad retenida en cada tamiz, se determina la distribución del tamaño de los granos. Otra técnica corriente es la determinación de la abundancia de partículas que quedan en suspensión en el agua en tiempos diversos después de agitar la mezcla sedimento - agua. Con esta técnica se determina la cantidad relativa de arena (granos cuyo diámetro es superior a 64 micras) y barro (granos cuyo diámetro no llega a las 62 micras) presente en una muestra de sedimento (micras = milésimas de milímetro). En general, las arenas son sedimentadas en la plataforma continental y suelen encontrarse a lo largo de la costa, formando las playas.

Sedimentos de origen litoral

Se encuentran en la región nerítica o costera, dentro de la zona intermareal. El origen de los sedimentos litorales es debido, principalmente, a la erosión causada por la energía del mar. Se originan así las gravas, las arenas, los cascajos, entre otros.

Sedimentos de origen terrígeno

Pueden producirse por la desintegración de los materiales de la corteza terrestre o de su alteración química. Entre los correspondientes al primer tipo, se encuentran las partículas de cuarzo, mica, feldespatos, piroxenos y otros minerales pesados. Entre los segundos, debido al cambio en la composición química, se encuentran los hidróxidos de hierro y aluminio, la sílice coloidal, etcétera.

Sedimentos de origen volcánico

Pueden tener dos procedencias, los de las erupciones volcánicas terrestres y los volcanes submarinos. En el primer caso, antes de llegar los sedimentos al mar, pueden experimentar una alteración por transformaciones químicas y transporte. Cuando los materiales proceden de erupciones submarinas pueden constituir mantos de basalto, debidamente recubiertos por una fina capa de otros sedimentos.

Sedimentos de origen orgánico

Producidos por la acumulación de restos de animales y vegetales consistentes de restos de esqueletos de fitoplancton y zooplancton marino. Entre los depósitos biotrácticos (o biogénicos) los más importantes son los producidos por la acumulación de conchas de bivalvos; generalmente estos organismos viven en aguas someras y agitadas. No obstante, sus restos pueden depositarse en zonas más profundas que aquellas donde habitan, así como también por encima del nivel del agua, a consecuencia de la acción del oleaje.

Debido a que el ciclo de vida de estos organismos planctónicos es relativamente corto (1 o 2 semanas), se reproducen de manera lenta, pero continua y sus restos “llueven” por la columna de agua finalmente depositándose y formando capas sucesivas de sedimento.

Sedimentos calcáreos

Se deben principalmente a dos tipos de organismos; los cocolitofóridos, vegetales planctónicos que suelen depositarse en los mares abiertos, y a los restos de algas calcáreas sésiles que se depositan principalmente en las regiones litorales, donde normalmente se encuentran estas algas, y que tienen particular importancia en la formación de los arrecifes



coralinos. Los restos calcáreos de origen animal son más abundantes que los de origen vegetal.

Sedimentos de precipitación

Cuando el producto de solubilidad de un compuesto ha sido sobrepasado, se produce su precipitación incorporándose a los sedimentos marinos.

Sedimentos de transformación química

Se originan por la acción recíproca entre el agua y los materiales con ella en contacto y procedentes de arrastres terrígenos volcánicos originados en otra parte.

Sedimentos cósmicos o extraterrestres

Son el polvo meteorítico o cósmico que constantemente está cayendo sobre la superficie de los mares.

Sedimentos Pelágicos

Sedimentos inorgánicos (con menos del 30% de materiales de tipo orgánico)

Sedimentos orgánicos (con más del 30% de restos orgánicos) son:

- » Fangos calcáreos
- » Fangos silíceos

La presencia de un tipo particular de plancton depende de un número de factores locales como la química del agua, la concentración de nutrientes, y la extensión de la productividad primaria sobre la superficie del mar. Debido a este hecho, es posible usar microfósiles en sedimentos marinos profundos para determinar la profundidad del agua y la productividad superficial durante el pasado geológico.

4.8. FOTOSÍNTESIS

El fitoplancton debe su notable poder de síntesis, que se denomina fotosíntesis, a la eficiente utilización de la luz, como fuentes de energía y a la presencia de un pigmento verde en las hojas: la clorofila.

La clorofila capta la energía solar, energía que es utilizada para transformar el agua y el gas carbónico en glúcidos (almidón, azúcar y celulosa), según las reacciones de fotosíntesis y respiración animal.

Se puede simplificar las reacciones esencialmente reversibles que se dan durante la formación de la materia orgánica en la fotosíntesis, y su destrucción subsiguiente por respiración bacteriana (oxidación), de la siguiente manera:

Si se representa la materia orgánica como CH_2O (carbono fijado) y NH_3 (nitrógeno fijado), entonces:

Para carbono:



Para nitrógeno:



Estas reacciones se mueven hacia la derecha durante la fotosíntesis y hacia la izquierda durante la respiración. La primera reacción dice que por cada mol de carbono fijado por la fotosíntesis se libera un mol de oxígeno molecular (O_2); la segunda reacción muestra que por cada mol de nitrógeno fijado se liberan dos moles de oxígeno.

El ciclo de la vida en el mar, al igual que en la tierra, recibe la energía de la luz solar visible que actúa sobre las algas verdes. De cada millón de fotones de luz solar que alcanza la superficie terrestre, sólo unos noventa resultan implicados en la producción neta de alimentos básicos. Tal vez 50 de ellos contribuyen al crecimiento de las plantas de tierra firme y 40 al de las plantas verdes unicelulares marinas, el fitoplancton. Esta diminuta fracción de la energía radiante solar es la que proporciona a los organismos vivos, no sólo un sustento, sino también una atmósfera respirable.

4.9. RESPIRACIÓN DE LOS ORGANISMOS VIVOS

La respiración es eminentemente celular, aunque a pesar de ello se hable de “respiración” cuando se trata del intercambio de gases



(oxígeno y anhídrido carbónico del aire) entre el medio ambiente y la sangre de los animales. Este último mecanismo que se efectúa en el interior o por medio de los aparatos respiratorios, comprende dos fases diferentes: la del intercambio de gases entre el medio ambiente y la sangre y el subsiguiente intercambio de dichos gases entre la sangre y las células del organismo.

Con el fin de obtener energía de sus alimentos, los animales “queman” los hidratos de carbono, consumiendo oxígeno y liberando anhídrido carbónico y agua. Este proceso puede considerarse como inverso a la fotosíntesis. Por eso, en el fondo del océano, la abundancia de oxígeno y de bicarbonato (o carbonato) están en relación inversa. A medida que se consumen uno es liberado el otro.

En los organismos marinos existen dos tipos de respiración. La que adoptan los seres que, a través de las branquias respiran O_2 del que se encuentra disuelto en el agua, y el que utilizan otros que, aunque viven en el agua, respiran oxígeno atmosférico, a través de pulmones. El intercambio de gases entre la sangre y la célula, se realiza mediante el fenómeno de difusión y se cumple en función de las tensiones atmosféricas de los gases licuados en la sangre y en las células, que cambian de signo constantemente.

Las corrientes marinas son las encargadas de distribuir el oxígeno disuelto. En la superficie sus altas concentraciones están en equilibrio con la atmósfera, mientras que en las capas profundas la cantidad de oxígeno depende de la temperatura que estas aguas tienen cuando se hunden.

Debido a que los gases son más solubles en agua fría que en agua cálida, las masas de agua profundas formadas en la superficie en latitudes altas son mucho más ricas en oxígeno disuelto. A medida que las masas de agua se hunden y se mueven lejos de su región de origen, el oxígeno es usado progresivamente por los organismos marinos (incluyendo las bacterias) en la respiración. Esta característica permite calcular de manera aproximada la edad de las masas de agua, a partir del momento de su formación en la superficie del mar y es un método ampliamente utilizado para seguirlas (trazadores).

Las masas de agua más antiguas son, sin embargo, oxigenadas (pocas veces sus concentraciones son menores a 3 ml/L) por lo que tanto

en la columna de agua como en el suelo marino existirán numerosos organismos marinos capaces de aprovechar las concentraciones de oxígeno disponibles.

El oxígeno en el océano puede variar de cero a $8,5 \text{ cm}^3/\text{L}$. Por debajo de los 2 000 m, la concentración de oxígeno apenas varía, manteniéndose entre $3,4$ y $6,6 \text{ cm}^3/\text{L}$ en el Atlántico y algo menos en el Pacífico (Figura 4.4). Los animales marinos y las bacterias que consumen y descomponen materia orgánica requieren de oxígeno disuelto para respirar. El exceso de utilización de oxígeno hace que en algunas profundidades esté casi agotado.

En general, este agotamiento del oxígeno ocurre a profundidades alrededor de los 1 000 m, sin embargo, en algunas cuencas donde la actividad biológica es muy intensa, esta Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) se ubica a menores profundidades; entre 100 - 300 m, como en algunas áreas de la costa chilena, las cuales son altamente productivas debido a las sugerencias costeras que se mantienen activas durante todo el año (curva amarilla en la Figura 4.4).

Es de esperarse que en aguas de la plataforma continental (ubicadas sobre los 200 m de profundidad) las condiciones sean de buena oxigenación debido a que esta capa está constantemente mezclada con agua oxigenada de la superficie en contacto con la atmósfera, sin embargo, en estas regiones altamente productivas, donde la cantidad de materia orgánica que está siendo depositada es mucho mayor que el abastecimiento de oxígeno, puede ocurrir un agotamiento total del oxígeno.

Estas condiciones extremas se conocen como anóxicas. En algunas regiones del mar Negro, en los fiordos de Noruega y en los lagos costeros de Escocia, se dan condiciones de limitación de oxígeno en la parte más baja de la columna de agua, durante por lo menos una parte del año. También pueden ocurrir condiciones anóxicas en las costas, debido al incremento de fertilizantes y materia orgánica aportada por las actividades humanas (especialmente la agricultura).

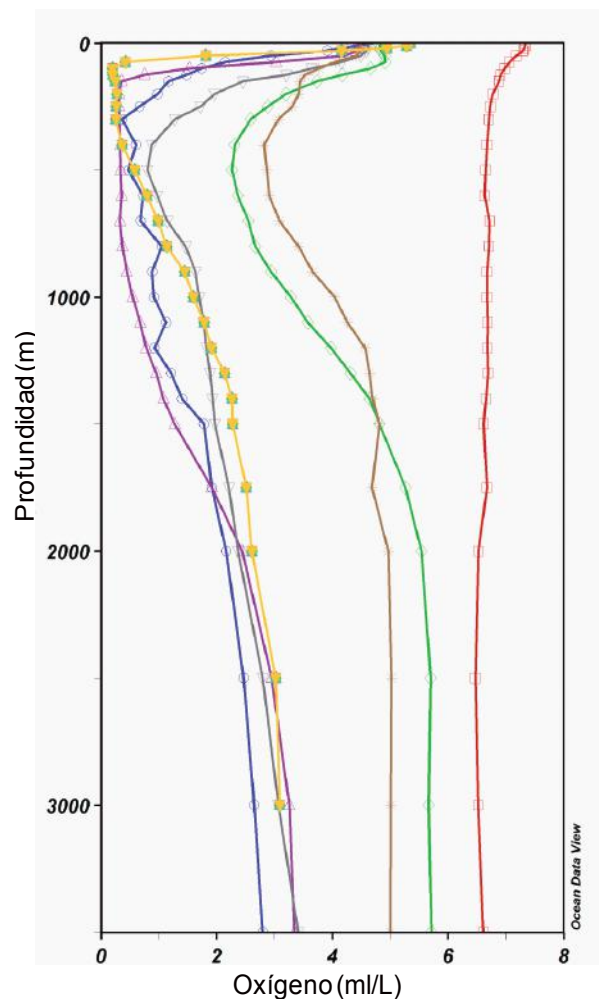


Figura 4.4. Perfiles de oxígeno disuelto en el océano Atlántico Norte (roja), Atlántico tropical (verde), mar Caribe (café), Pacífico ecuatorial (gris), cuenca Pacífica colombiana (azul), océano Índico (morado) y costa de Chile (amarillo).

Fuente: Climatología Mundial Anual del Océano (*World Ocean Atlas 2009*) en formato para *Ocean Data View*TM.

4.10. PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y NIVELES TRÓFICOS

El agua de mar es fértil y favorece el desarrollo en la actividad fotosintética de una población vegetal, es decir, de una productividad de materia orgánica que constituye el primer eslabón de la cadena de la vida marina.

Productividad primaria o en bruto: es la cantidad de materia orgánica expresada en carbono, sintetizada en una unidad de tiempo, bien por unidad de volumen de agua o bien por unidad de superficie.

Productividad vegetal: es la cantidad de materia orgánica sintetizada por los organismos de fitoplancton para una superficie iluminada de 1 m² en una unidad de tiempo.

En el ecosistema marino encontramos otros niveles que forman una estructura bien establecida que llamamos niveles tróficos, los cuales se refieren a la nutrición de los organismos que los integran. El primer nivel trófico es el de los **productores**. Plantas que son organismos autótrofos (producen su propio alimento) provistos de clorofila, tales como las algas microscópicas que constituyen el fitoplancton y tienen en general alto índice de productividad primaria.

Para hallar la biomasa o producción neta, hay que restar la energía consumida por la respiración, pues mientras la planta sintetiza, hay un gasto de energía. La medida de la productividad, producción neta o biomasa aporta datos bastante precisos sobre las posibilidades pesqueras de las áreas que se desean explotar con fines económicos e industriales.

En el segundo nivel trófico, se encuentran los organismos **consumidores**, heterótrofos, entre los cuales podemos distinguir algunos subniveles. Los consumidores primarios son los fitófagos o herbívoros, tales como crustáceos, moluscos, insectos, peces, batracios y mamíferos. Los consumidores secundarios se alimentan a expensas de los consumidores primarios; así algunos peces se alimentan de zooplancton; muertos sus integrantes se nutren de fitoplancton. Los consumidores terciarios se alimentan de herbívoros o de otros carnívoros más pequeños. Los consumidores del cuarto nivel, entre los cuales se halla el hombre, que ocupa la cúspide de la pirámide alimenticia o cadena trófica.

Los **desintegradores** o reductores son organismos heterótrofos y están representados por las bacterias y los hongos que descomponen los cadáveres, sustancias y restos orgánicos producidos por los diversos organismos. Los saprofitos son del tipo de los heterótrofos que sólo se alimentan de moléculas orgánicas.

4.11. FACTORES FÍSICOS QUE INFLUYEN EN LA PRODUCTIVIDAD

Parte de la radiación emitida por el Sol sobre el mar es absorbida y transformada en calor, otra parte se dispersa debido al choque con las moléculas del agua, las partículas que se encuentran en suspensión y los microorganismos que contiene. La absorción de



diversas radiaciones del espectro solar es diferente para las distintas longitudes de onda. Así, la zona roja y naranja del espectro es rápidamente absorbida que la zona verde, azul, añil y violeta. Para las radiaciones infrarrojas (IR), el agua de mar es prácticamente opaca. Las radiaciones ultravioletas son también rápidamente absorbidas, aunque no dejan de alcanzar grandes profundidades.

Este fenómeno, aparentemente anómalo, parece estar relacionado con la presencia de compuestos nitrogenados como el amoníaco, las proteínas y los nitratos que reducen la permeabilidad del agua, en otras palabras, su transparencia para los rayos ultravioleta (UV).

Por otra parte, son las radiaciones azules las que con mayor profundidad penetran en el agua cuando está clara (sin partículas en suspensión). Cuando hay turbidez, el caso es diferente, ya que son las verdes y las amarillas las que más profundo llegan. Al desaparecer las radiaciones de la zona roja y naranja del espectro solar, se comprende con facilidad porque el agua del mar es azul, cuando se mira desde arriba.

Las partículas o microorganismos de color frecuentemente amarillo, al combinarse su coloración con el azul dominante en el agua de mar, son las que dan el color verde que con frecuencia se observa en las aguas marinas, principalmente en las costeras, donde tales partículas y microorganismos suelen ser más abundantes.

4.12. TEMPERATURA DEL AGUA DE MAR

El calor del agua de mar procede de variadas fuentes donde la principal es la radiación solar. Las fuentes de calor al océano son:

- La energía procedente directamente del Sol
- La energía solar reflejada por los gases atmosféricos
- La energía procedente de procesos químicos
- La energía procedente de la convección de la atmósfera
- La energía procedente del centro de la Tierra

El mar está perdiendo constantemente calor por irradiación directa a la atmósfera, irradiación por corrientes de convección; desde la superficie; por los procesos de evaporación; las corrientes oceánicas, entre otros.

La temperatura de los mares oscila entre 2 y 30°C, aunque pueden alcanzar también valores más extremos. La distribución de la temperatura del mar y las variaciones estacionales sirven para ayudar a los pescadores en su industria, indicándoles los lugares y épocas propicias para la pesca de una especie determinada. Por ejemplo, en los sitios donde ocurren sugerencias estacionales, las aguas superficiales se enfrían y son enriquecidas con nutrientes y minerales de aguas profundas, aumentando la productividad primaria y por ende, incrementando la productividad biológica pesquera.

4.12.1. Variación de la temperatura de los océanos

La temperatura varía en las capas superficiales del océano de acuerdo con diversos factores, el más importante de ellos es la absorción de la energía emitida por el Sol.

No es posible fijar una ley de las variaciones anuales térmicas del agua de mar, ya que dependen de las condiciones locales: intensidad de las corrientes, temperatura del aire, tipo de clima dominante, latitud del lugar, topografía submarina, entre otros. Sin embargo, se puede generalizar que las máximas temperaturas se encontrarán en la región ecuatorial, donde la incidencia del Sol es máxima y mínimas en las latitudes más altas (regiones polares), donde el Sol tiene menor incidencia sobre la superficie del mar.

Las variaciones diurnas de la temperatura de la superficie del mar (TSM) son pequeñas. En mar abierto oscilan entre 0,2 y 0,4°C. Sin embargo, cerca de algunas costas pueden llegar a ser de varios grados.

En escalas estacionales a interanuales (de meses a años) las variaciones de temperatura son muy marcadas, con cambios significativos de la TSM ($> \pm 5^\circ\text{C}$). Eventos anómalos como El Niño Oscilación Sur (ENOS) puede causar cambios en la temperatura del Pacífico ecuatorial en la capa superior (primeros cientos de metros de la columna de agua). El evento cálido El Niño está asociado con aumentos de TSM y aumento del nivel del mar en el Pacífico ecuatorial oriental. La Niña conlleva a la disminución anómala de la TSM y al descenso del nivel del mar en el Pacífico ecuatorial oriental.

Ambas anomalías están relacionadas con el transporte del volumen de agua cálida superficial (primeros 300 m de profundidad) desde el



Pacífico occidental hacia el Pacífico oriental, que van acompañados de ondas internas ecuatoriales llamadas de Kelvin y de redistribución de calor hacia latitudes más altas. En el oeste, un exceso de calor ocurre antes del inicio de eventos El Niño, intercambio zonal de calor ocurre durante la etapa madura del evento cálido y un déficit de este volumen de calor es precursor de la etapa final de El Niño y el inicio de La Niña en el Pacífico ecuatorial. Los detalles de estas anomalías interanuales de la temperatura han sido descritos en la segunda unidad

4.12.1.1. Variaciones de la temperatura con la profundidad

Las máximas temperaturas se encuentran en la superficie del mar y disminuyen hacia el fondo en forma relativamente rápida. En los primeros metros el agua suele estar bien mezclada por interacción con la atmósfera. Esta zona se conoce como capa de mezcla, a partir de esta capa superficial, las aguas se enfrían rápidamente, a razón de 0,5 - 1°C por metro. Este intenso gradiente es conocido como termoclina y se explica posteriormente. Cerca del fondo, se nota a menudo la presencia de una capa de agua profunda, fría y relativamente homogénea, donde las variaciones de temperatura son menores.

4.12.1.2. Termoclina

Es aquella zona de descenso brusco y amplio de la temperatura que se encuentra usualmente entre 50 a 150 m de profundidad en latitudes tropicales. Este intenso gradiente suele ser más marcado durante algunas épocas del año y menos estratificado en otras, en especial en latitudes medias. Durante el invierno, cuando las temperaturas superficiales son bajas y las condiciones climáticas son extremas, la capa de mezcla se puede extender hasta la termoclina permanente (200 - 300 m). En verano, a medida que aumenta la temperatura en superficie, y las condiciones son menos severas, se desarrolla una termoclina estacional por encima de la termoclina permanente.

En la figura 4.5 se puede observar que la termoclina estacional de invierno (curva blanca) es prácticamente inexistente, es decir, que se trata en realidad de un estrato isothermal. En la primavera y verano (curva roja), la temperatura aumenta por efecto de la insolación, apareciendo la termoclina estacional, donde el gradiente es mayor, debido a un calentamiento más rotundo de la superficie del mar.

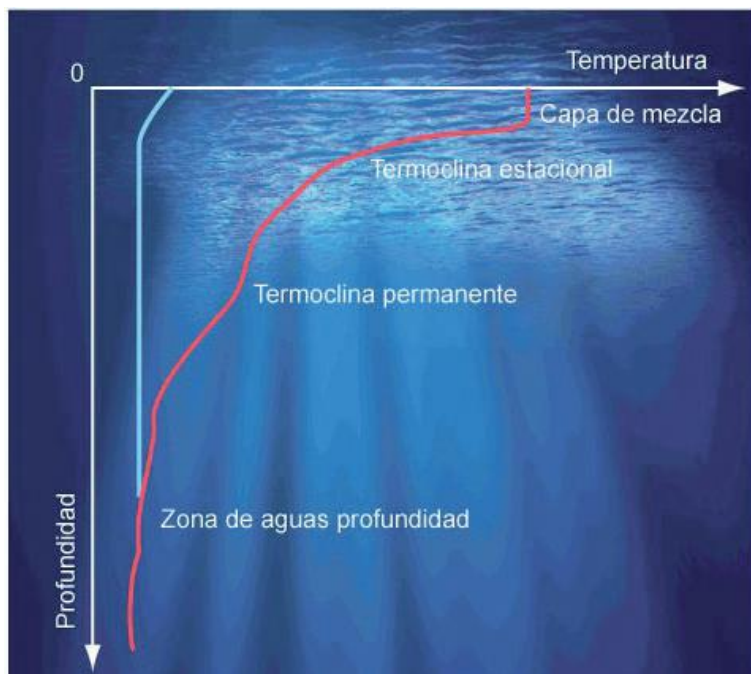


Figura 4.5. Representación esquemática de la variación vertical de temperatura del agua del mar, en relación con los cambios estacionales.

Fuente: Adaptada por el autor.

Las aguas superficiales, menos densas, se estratifican en general, pero basta una pequeña alteración, el viento por ejemplo, para que la estratificación se altere, y ampliéla profundidad alcanzada por la termoclina, aunque la temperatura de la propia superficie pueda descender.

La estratificación de las aguas se mantiene durante el verano y cesa a su término. Efectivamente, la acción de mezcla de capas de agua cesa cuando los gradientes de densidad y velocidad del agua llegan a un valor crítico. La termoclina deja entonces de formarse y la capa de agua superior altamente estratificada que se ha formado, constituye una autentica barrera térmica aislada, que dificulta cualquier cambio vertical, químico o biológico.

En el otoño, finalmente, las aguas superficiales se enfrían, aumenta la densidad y desaparece poco a poco la estratificación, atenuándose la amplitud de la termoclina superficial, hasta la situación de la termoclina de invierno. Lógicamente, cualquier alteración de la dinámica marina, que implica un incremento de la turbulencia, acelera la desaparición de la termoclina.



4.13. MODIFICACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS POR EL HOMBRE

4.13.1. Contaminación

Es la alteración de las propiedades físicas, químicas o biológicas del agua por la presencia de elementos o sustancias ajenas a esta. Los contaminantes provienen de diferentes fuentes, como son:

Industrias químicas, petroleras y terminales, pesquerías, curtimbres, maderas, pulpa-papel, sacrificio de ganado, alimentos y bebidas, metálica básica, jabones y detergentes, minerales no metálicos, todas estas derivadas del sector industrial. Se dan otro tipo de contaminantes a partir de efluentes municipales y de fuentes térmicas.

La principal fuente de la contaminación de los mares es el petróleo. El grado de deterioro producido en el mar por la contaminación del petróleo depende principalmente de la dirección hacia la cual lo conduzcan los vientos y las corrientes. El petróleo puede llegar a las playas arruinándolas; puede destruir los huevos de especies marinas que flotan cerca de la costa y terminar con diversas criaturas de las que se alimentan las aves y los peces, afectando todos los eslabones de la cadena trófica. Las fuentes más espectaculares de contaminación por petróleo son las colisiones y naufragios de buques-tanques y daños en plataformas petroleras (mayor detalle de este tema en la Unidad 6).

4.13.2. Cambio climático global

Entre 1800 y 1994, la humanidad liberó cerca de 340 a 420 Pg de carbono (C) a la atmósfera en la forma de dióxido de carbono - CO_2 (1 Pg C = 10^{15} g C) principalmente por la combustión de combustibles fósiles y por la deforestación. Cerca de 165 Pg de C de estas emisiones se quedan en la atmósfera, ocasionando aumentos en el CO_2 atmosférico de un nivel preindustrial de 280 ppm hasta alcanzar los 360 ppm en 1994 y 398,35 ppm en abril de 2013 (co2now.org) y en el futuro, la tendencia se mantendrá hacia el aumento continuo (Figura 4.6).

Al incrementar las concentraciones de gases de efecto invernadero como el CO_2 , metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos (CFC) se incrementa la temperatura en la Tierra.

Los gases mencionados atrapan la radiación infrarroja saliente e incrementan la temperatura aproximadamente en 1,5 y 4,5°C (el llamado efecto invernadero). Esta alteración obviamente podría alterar la precipitación global, la circulación termohalina y atmosférica.

La ciencia también sugiere que los árboles y otros tipos de vegetación podrían variar significativamente como resultado del cambio climático global.

En 1997, se adoptó internacionalmente el Protocolo de Kyoto, el cual estipuló que los países industrializados, responsables del calentamiento global, realicen acciones encaminadas a la reducción de emisiones de gases invernadero y la deforestación. El protocolo entró en vigencia el 16 de febrero de 2005, tiene hoy 182 países suscritos. Colombia ratificó el protocolo por medio de la Ley 629 del 2000.

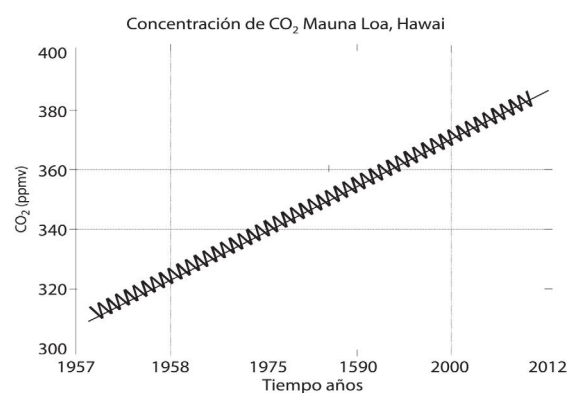


Figura 4.6. Tendencia al aumento de la concentración de CO₂ atmosférico medido en el Observatorio de Mauna Loa, Hawai.
Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Posibles impactos del cambio climático en Colombia

Colombia no es ajena al cambio climático, ya que los procesos globales tienen su manifestación regional. Colombia es causante de 0,3% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, debido principalmente a la deforestación, la cual es causada por:

- Ampliación de frontera agrícola y pecuaria
- Colonización/desplazamiento de poblaciones
- Minería
- Cultivos ilícitos
- Extracción de madera para venta o auto consumo
- Incendios forestales



La deforestación causa el 20% de las emisiones de gases invernadero en el mundo. La deforestación anual en Colombia ascendió a 101 300 ha por año (para el periodo 1994 a 2001).

Dadas las características físico-geográficas especiales del territorio colombiano, el cambio climático induce una expresión particular que puede diferir un tanto de las estimaciones globales de cambio.

De acuerdo con el primer comunicado Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Colombia es muy vulnerable a los efectos del cambio climático, señala Juan Daniel Pabón, quien se ha interesado por estos temas en el país.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se toma que los ecosistemas de la altiplanicie andina, especialmente los páramos, se verán gravemente afectados por el aumento de temperatura, en la que se han registrado unos incrementos netos de 0,2 a 0,3 °C por década, durante el periodo comprendido entre 1961 y 1990, y se cree que esta tendencia continuará.

Los cambios hidrológicos y de temperatura pueden dar lugar a la pérdida de biodiversidad y sus servicios relacionados, por ejemplo, el abastecimiento de agua, la regulación de cuencas y la energía hidroeléctrica.

La evidencia más contundente de la expresión del calentamiento global y del cambio climático en Colombia lo ha definido el IDEAM en la reducción del área de los glaciares de montaña. Entre 1940 y 1985 desaparecieron ocho glaciares y actualmente sólo existen cuatro nevados sobre estructuras volcánicas (Huila, Ruiz, Santa Isabel y Tolima) y dos sierras nevadas (Cocuy y Santa Marta). Se calcula que, en la actualidad la recesión en lenguas glaciares es del orden de 15 a 20 metros al año y que la pérdida de espesor varía entre 1-2 metros al año.

Además, la Universidad Nacional de Colombia analizó los posibles efectos de una duplicación de las emisiones de CO₂ entre los años 2050 y 2080 es decir, se prevé un ascenso del nivel del mar de 2 a 5 mm al año.

Según el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, José Benito Vives De Andréis, los registros del nivel del mar entre 1941 y 1994,

tomados en las estaciones mareográficas de Cartagena y Buenaventura, han permitido identificar una tendencia de aumento de hasta 10 cm en el Caribe y de 22 cm en el Pacífico en este periodo, si esta tendencia aumentará hacia el futuro, se presume que la inundación en las costas bajas en Colombia será extensiva y que este efecto se presentará paralelamente a la intensificación de la erosión de terrenos susceptibles. Por tanto, el área aproximada de inundación en el Caribe continental sería de 4 900 km² y en el Pacífico continental de 6 400 km².

Es probable que los aumentos del nivel del mar provoquen la intrusión salina en los sistemas de abastecimiento de agua dulce basados en acuíferos en las zonas insulares y costeras. Los sistemas de agua dulce y su diversidad biológica se verán gravemente afectados.

Además, el modelado predictivo de las islas pequeñas del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” (INVEMAR) ha identificado importantes pérdidas de tierras para las que no se está realizando ninguna acción. Por ejemplo, en la isla de San Andrés, los primeros comunicados nacionales estimaron una pérdida del 17% de la superficie, incluida la mayor parte de la zona costera para 2060 (50 cm de ascenso del nivel del mar). En ciudades costeras importantes como Cartagena se hacen cada vez más frecuentes imágenes como las mostradas a continuación, en las que el aumento del nivel del mar supera los 60 cm sobre el nivel del mar (Figura 4.7).



Figura 4.7. Inundaciones extremas en sectores turísticos de Cartagena. Izquierda: sector la Boquilla, Tomada del periódico El Universal de Cartagena noviembre de 2010. Derecha: Inundación por ascenso del nivel del mar, Castillo Grande - Cartagena, Noviembre de 2008

Fuente: Cortesía CN Julian A. Reyna M.



La deforestación y la expansión urbana son dos agentes de importancia regional para el cambio climático en Colombia que deben ser afrontados por políticas y planes de regulación, pero ante todo con programas de investigación de la comunidad científica nacional.

4.13.3. Acidificación del océano

La Organización de Naciones Unidas para la Educación UNESCO, en su documento El Océano en un mundo con altos niveles de CO₂ el cual se toma como referencia, explicó que la acidificación es una consecuencia de la capacidad que tienen los océanos de absorber grandes cantidades de dióxido de carbono: aproximadamente un tercio de las que el hombre emite hacia la atmósfera por el uso de combustibles fósiles. Actualmente los océanos absorben cada año alrededor de unos 8 000 millones de toneladas de CO₂, evitando así que vayan a parar a la atmósfera.

Esto se entendía como una defensa del planeta, pero recientemente se ha descubierto que esta inclusión de CO₂ en el mar, tiene consecuencias muy graves para los organismos marinos, ya que debilita sus exoesqueletos al ser diluidos por los ácidos reactivos.

Las proyecciones al 2030 indican que las aguas marinas serán cada vez más corrosivas para organismos con caparazones (como algunos caracoles marinos y bivalvos que viven en las aguas superficiales). La debris (restos) que producen estos organismos constituye una fuente de alimento importante de especies de gran interés comercial como el salmón del Pacífico, lo que podría tener repercusiones económicas de gran magnitud.

Otro efecto negativo de la disminución del pH marino es la destrucción de los arrecifes de coral que además son la base de una industria turística que produce millones de dólares cada año.

A pesar que no se tienen evidencias del impacto de la acidificación de los océanos en todos los ecosistemas marinos, se pueden extrapolar algunas conclusiones de estos eventos ocurridos en el pasado (dados por eventos naturales), los cuales indican que la acidez puede provocar una exterminación masiva de algunos organismos marinos. Así mismo, se han estudiado ecosistemas en donde existen

emanaciones naturales de CO_2 en los fondos oceánicos (fumarolas) y se ha observado que su diversidad es muy limitada. Sin embargo, la comunidad científica está de acuerdo en que se necesitan más trabajos de investigación para llegar a comprender las posibles repercusiones de la acidificación actual.

4.13.4. Fertilización del océano

La UNESCO señala que hay preocupación entre los científicos por la cantidad de CO_2 en la atmósfera y la afectación que traería a la naturaleza, el pH de la capa superficial del océano disminuirá y el agua se acidificará. Esto alterará la composición química de esa capa, que alberga la mayoría de los organismos vivos marinos, por tanto, hay inquietud sobre cómo reaccionaría el ecosistema ante la invasión natural del CO_2 .

Algunos científicos han llegado a pensar que quizás fuese menos perjudicial extraer el CO_2 de la atmósfera e inyectarlo directamente en las capas profundas del océano, donde sólo vive una cantidad exigua de organismos marinos, no obstante, ello tuviese repercusiones para los organismos de las profundidades oceánicas dado que con el lento metabolismo que poseen, adaptarse al cambio les costaría mucho trabajo.

Para plasmar aquí información específica, veraz y actualizada sobre este tema en el que aún existe muy poco conocimiento en el mundo, se acudió a la fuente original, que son los informes de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI), responsable por el diseño de los experimentos de fertilización de los océanos. De esta manera lo documentado a continuación es extraído prácticamente de manera textual de dichos informes.

Algunos experimentos han demostrado que, hasta los 3 000 metros de profundidad, el CO_2 líquido tiene tendencia a subir a la superficie del mar por ser menos denso que el agua circundante. En cambio, a partir de los 3 000 metros se convierte en una sustancia sólida parecida al hielo, más densa que el agua que lo rodea. De ahí que uno de los métodos contemplados consista en inyectar CO_2 líquido en los fondos marinos, otro método consistiría en almacenarlo en el fondo de los pozos de petróleo ya explotados.



A éste respecto, cabe preguntarse ¿qué repercusión tendría en la atmósfera si, dentro de 100 o 200 años el CO_2 enterrado en las profundidades marinas empezará a escaparse lentamente hacia la superficie de los océanos en una primera etapa, y después hacia la atmósfera?, todas estas dudas formuladas por la Organización de Naciones Unidas para la Educación, y de ahí se deriva lo siguiente, dado su interés por CO_2 .

UNESCO sugiere que otra perspectiva es la fertilización de los océanos. En muchas zonas del mar, el crecimiento del fitoplancton se ve limitado por la escasez de un oligoelemento esencial: el hierro. Algunas empresas privadas tratan de acelerar el ritmo de crecimiento del fitoplancton para que sea 30 veces más rápido de lo normal y crear así los llamados “pozos de carbono oceánicos”, según un principio muy similar al aplicado en los bosques que se trata de convertir en “pozos de carbono terrestres”.

Esta idea no es nueva, en 1970, el oceanógrafo John Martin, antiguo director del Laboratorio Marino Landing Moss se hizo célebre con aquella frase de “denme una tonelada de hierro y provocaré el advenimiento de la próxima era glaciaria”. El descubrió que al adicionar polvo de hierro al agua de mar se engatillan afloramientos fitoplanctónicos del tamaño de ciudades pequeñas. Así, los billones de células producidas absorben suficientes cantidades del CO_2 que de otro modo calienta la atmósfera.

El hierro se halla presente en el polvo que circula en la atmósfera, sobre todo cuando las condiciones climáticas son secas y áridas. Por eso, no es sorprendente que algunos desiertos como el Sahara y el Sahel concentren la mayor cantidad de este polvo, que los vientos dominantes trasladan por encima del Atlántico hasta el Caribe y el nordeste de América Latina, aclara la UNESCO.

Los científicos en un inicio señalaron que con el enriquecimiento de la totalidad del océano Austral con hierro, sólo se conseguiría disminuir entre un 20% y un 30% el índice del CO_2 en la atmósfera a lo largo de un siglo, sin embargo, esto tendría consecuencias, ya que, conduciría a graves trastornos ecológicos considerables.

La UNESCO recuerda que los organismos muertos consumen oxígeno al descomponerse, por tanto, si se multiplica artificialmente

su descomposición, se corre el riesgo de disminuir el índice de oxígeno del océano, lo cual puede causar trastornos entre los seres vivos marinos.

Es pertinente aclarar que es nocivo para el medio ambiente el almacenamiento de carbón en el océano, no obstante, el comercio del carbono es un negocio rentable y a muchos negociantes potenciales lo único que les frenaría para almacenar carbono en el océano, en un futuro, es el costo elevado de la tecnología que esto implica, señala la organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura.

Existe un problema en la verificación de estas tecnologías, ya que las compañías encargadas de la fertilización con hierro ganarían dinero mediante la medición del carbono secuestrado por ellos, vendiéndoselo al mercado de carbono. Este plan requiere de mediciones confiables que aún son difíciles de alcanzar en el océano, hasta el momento, sólo 3 de 12 experimentos de fertilización con hierro han sido capaces de demostrar que secuestraron carbono.

A pesar de los tropiezos, muchas empresas privadas y científicos en todo el mundo apoyan la idea de otra ronda de experimentos mejor diseñados. Los proponentes de estas teorías aceptan que hay posibilidades de efectos negativos en el medio ambiente; sin embargo, ninguno de los 12 experimentos lo detectaron, posiblemente por la escala de estos.

El consenso es que no hay ninguna opción que no tenga impactos en el ecosistema. Todas las soluciones deben estar enfocadas a reducir las emisiones continuas de gases invernadero. Las actividades antropogénicas son las responsables de cambios del sistema climático, los cuales tendrán consecuencias irreversibles, sin embargo, dentro de las proyecciones futuras se ven posibilidades de volver a condiciones de relativa normalidad si se logra disminuir la cantidad anual de emisiones.



PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

1. Investigar las diferentes técnicas químicas analíticas oceanográficas para la determinación de nutrientes, ejemplo: Manual de Técnicas Analíticas, elaborado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) de la Dirección General Marítima. Así mismo, conocer los equipos, reactivos y elementos utilizados en la determinación de nutrientes.
2. Coordinar con las unidades oceanográficas de la Dirección General Marítima ARC Providencia y ARC Malpelo y los laboratorios en tierra; Centros de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) en el Caribe y CCCP en el Pacífico) o del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andréis” (INVEMAR) la realización de algunos ejercicios, con el propósito de que el alumno adquiriera habilidad en medición de la salinidad, transparencia y otras variables fisicoquímicas.
3. Obtener muestras de agua de mar de diferentes lugares, para determinar por métodos analíticos las concentraciones de los nutrientes y realizar comparaciones entre las muestras.
4. Se puede utilizar software libre, por ejemplo Ocean Data View (ODV), para graficar la distribución espacial de las propiedades y elementos del agua de mar. La información climatológica mensual y anual de estos parámetros está disponible en Internet. El Atlas Mundial del Océano (World Ocean Atlas, 2009) es una herramienta útil para conocer la variabilidad dentro del ciclo anual.
5. En salida de campo investigar la importancia de los carbonatos en la formación de arrecifes coralinos, algas calcáreas y otros organismos marinos de origen calcáreo.
6. Familiarizarse con los diversos tipos de sedimentos y técnicas de muestreo y análisis.

7. Investigar los diferentes métodos de medición de productividad primaria.
9. Revisar imágenes de satélite (raster) de color del océano (CZCS; Coastal Zone Color Scanner) y MODIS para determinar zonas productivas en el planeta y su variabilidad estacional.
10. Investigar sobre la medida del coeficiente de extinción de la luz en el océano, utilizando el disco Secchi y la escala Forel, y el fotómetro.

UNIDAD 5

RECURSOS NO VIVOS



INTRODUCCIÓN

El océano contiene todos los elementos químicos existentes en la Tierra, por lo tanto desde el agua, el océano es una fuente importante de recursos para la humanidad, pero ello no indica que su explotación debe ser desmedida y que dichos recursos sean inagotables, por el contrario, deben ser responsablemente empleados en beneficio de la humanidad, siendo siempre conscientes de que estos recursos son finitos y que su carencia podría afectar incluso hasta la misma extinción de las generaciones futuras.

Los recursos no vivos obtenidos de los océanos terminan siendo de gran importancia, como renglón económico y como reserva futura para la humanidad ya que con la tecnología actual existente, aún resultan difíciles y costosos de explotar en aguas profundas.

Los recursos de este tipo que han sufrido mayor explotación en el mar son el gas natural y los hidrocarburos en general. Sin embargo, hoy es una línea de exploración permanente en los Estados ribereños y en los países de mayor desarrollo en este campo que están pasando de su explotación en la plataforma continental a explotación en aguas muy profundas.

Lo más interesante de este capítulo, teniendo en cuenta las consideraciones conservacionistas, es la producción de energía limpia a partir de los océanos. En este momento, Colombia no resulta una gran potencia en la obtención de este tipo de energía debido a que la tecnología para su aprovechamiento apenas empieza a repuntar en el mundo y las exigencias naturales para poder aprovechar el recurso energético azul con la tecnología actual no son óptimas.

Objetivos

- Determinar los métodos que se emplean y las dificultades técnicas que se encuentran en la exploración y manejo de los recursos abióticos existentes en el medio oceánico.
- Adquirir nociones sobre la utilidad de los recursos abióticos marinos como instrumento para acelerar el desarrollo social y económico de los países menos adelantados, así como sobre los problemas y las limitaciones que podrían encontrarse al establecer la infraestructura necesaria para su utilización.
- Reconocer que la oceanografía está proporcionando nuevos conocimientos sobre lo que se encuentra en y bajo el mar. Las nuevas tecnologías hacen factible alcanzar y extraer o cosechar recursos que eran inaccesibles; desde hace pocos años el crecimiento de la población e industrialización de la sociedad está creando nuevas demandas para todo tipo de materias primas.
- Visualizar en el futuro el empleo de la energía limpia proveniente del océano (energía azul), con el fin de conservar los recursos naturales y brindar la sostenibilidad que el planeta necesita para la subsistencia de la población.

5.1. RECURSOS ABIÓTICOS MARINOS

Entre los recursos del océano está el agua, como una planta transformadora de la energía solar en proteínas, un almacén de materiales disueltos y agua dulce, una fuente de energía representada por las olas y las mareas, y un medio para nuevos tipos de transporte. También están el suelo marino con sus sedimentos y rocas, como lugar de localización de combustibles fósiles y depósitos minerales, y la costa, como un recurso único, pero muy vulnerable a la erosión y degradación rápida provocada por el hombre.

Es importante comprender que tanto la exploración de los recursos abióticos como el desarrollo de procesos y técnicas de extracción dependen de consideraciones económicas, sociales, legales y políticas; se trata de que casi sin excepción los recursos del fondo del océano se encuentran en áreas no sujetas al régimen de propiedad



privada; más del 85% del fondo oceánico y más allá de los límites actuales de las jurisdicciones nacionales y en las zonas sujetas a control nacional, los recursos se consideran propiedad común.

Aunque se han detectado la mayoría de los elementos químicos en el agua de mar, sólo se extraen en la actualidad en cantidades significativas sal común, magnesio y bromo.

En Colombia, a nivel comercial, la producción de sal marina se encuentra ubicada en Manaure y Galerazamba, ambas sobre la costa Caribe. Esta producción es concesionada a particulares pero controlada por el Estado. El magnesio, tercer elemento en abundancia en los océanos es uno de los minerales más valiosos que se extraen del agua de mar. El bromo, aunque su cantidad no es muy abundante en la composición del agua de mar, se extrae, ya que constituye una de las pocas fuentes existentes; se utiliza principalmente en compuestos antidetonantes para la gasolina.

La explotación de otros productos químicos del agua de mar genera muy altos costos de extracción.

Otro de los elementos que se puede explorar del agua de mar es el agua dulce. A medida que crecen las necesidades se van encontrando medios para hacer esta explotación más económica. Esta agua es usada para fines agrícolas, industriales y domésticos. En el país existen varias plantas desalinizadoras localizadas principalmente en la costa Caribe: en el complejo carbonífero de El Cerrejón en La Guajira y en San Andrés. Estas plantas tienen como función separar las sales del agua de mar (plantas desalinizadoras).

Tipos de recursos abióticos marinos

El hombre, a través de la historia, se ha dirigido a los océanos para satisfacer muchas de sus necesidades básicas, entre ellas la de conseguir los productos minerales. La primera industria minera que aparece en la historia de la humanidad y de la que se tiene noticia, se fija cuando el hombre aprende a obtener sal común por evaporación solar del agua del mar.

Los recursos minerales del fondo del océano, a diferencia de los de las aguas que los cubren, son esencialmente uniformes y se

encuentran localizados encima y dentro de los sedimentos y rocas del suelo oceánico. Estos recursos son:

- Fluidos y minerales solubles, tales como el petróleo, gas, azufre y potasio que pueden extraerse mediante perforaciones.
- Depósitos subsuperficiales consolidados, tales como carbón, hierro y otros metales que forman vetas y mantos, extraídos hasta ahora por túneles desde tierra firme.
- Depósitos superficiales no consolidados susceptibles de ser dragados, tales como metales pesados, diamantes y minerales antiguos (nódulos de manganeso y fosforita), originados a partir del agua de mar por precipitación lenta. De acuerdo con estudios efectuados en el océano Pacífico colombiano, se ha detectado la presencia de estos nódulos, pero hasta la fecha no ha sido posible su explotación y son considerados como reserva para un lejano futuro. De los elementos disueltos sólo se aprovecha hoy la sal común y el magnesio, bromo y potasio en pequeña escala.

5.2 AGUA - OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE

El componente mayoritario en el agua de mar es el agua pura, libre de sales disueltas. Los mares y océanos cubren una extensión aproximada de 360 700 000 km², con una profundidad media de 4 000 m, lo que representa, una reserva del orden de 1 500 millones de km³ de agua. Como existe un gran déficit de ésta en una gran parte de la superficie terrestre, la obtención de agua potable a partir del agua de mar ha sido uno de los objetivos permanentes del hombre a lo largo de los dos últimos siglos, aunque sólo hasta la segunda mitad del siglo XX, se ha conseguido poner a punto métodos de potabilización rentables a gran escala.

El método común para “desalar” o desalinizar el agua de mar, consiste en tener un recipiente lleno de agua salada, un horno y un serpentín que recoja y condense el vapor. Este proceso conocido desde hace cientos de años es la base donde se apoyan la mayoría de los métodos industriales.

Los distintos procedimientos seguidos para potabilizar el agua marina se basan en establecer una barrera impermeable a las sales o al agua, mientras el otro componente pasa a través de la membrana.



- **Fosforita ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OHFCL})_2$)**

Han sido descubiertas como depósitos sedimentarios compuestos principalmente de minerales fosfóricos. Los depósitos de fosforita se hallan asociados a las surgencias y a la alta productividad biológica.

La surgencia trae a la superficie del mar grandes cantidades de nutrientes y agua rica en fosfatos desde profundidades intermedias que contienen abundantes organismos. La fosforita es frecuente en todo el mundo, en las plataformas continentales, desde los 35 metros hasta las profundidades abisales.

- **Potasa (KOH)**

La potasa es el hidróxido de potasio, utilizado por los agricultores como abono de la tierra, también para la fabricación de jabones, blanqueo y limpieza de telas. El agua de mar contiene 700 g de KOH por m^3 de agua. Para extraerla, se aspira el agua de mar y se lleva a un estanque o cuba donde se mezcla con una solución de dipicrilaminato cálcico (dipicrilamina es un ácido débil); precipita en forma de cristallitos rojos, los cuales al ser tratados con un ácido fuerte se obtiene una sal de potasio.

- **Oro (Au)**

Un metro cúbico de agua de mar contiene 0,008 miligramos de oro. Se han ideado diversos métodos para su extracción, basados todos ellos en la electrólisis del agua de mar. El costo de extracción hace antieconómica dicha operación.

- **Carbón (C)**

Es extraído de profundidades de hasta 2 400 m bajo el nivel del mar. Con la tecnología actual, la minería submarina puede llevarse a cabo económicamente hasta una distancia de 24 km de la costa.

- **Azufre (S)**

Es uno de los elementos químico-industriales de mayor importancia. Se encuentra en la capa superior de los sedimentos continentales y en el fondo del mar. Este elemento se extrae de forma bastante

económica, fundiéndolo con agua a alta temperatura que se introduce por tuberías desde la superficie, haciéndolo ascender con aire comprimido.

- **Magnesio (Mg)**

El agua del mar contiene 1 300 g de Mg por m³. Este metal se presenta en el agua del mar en forma de cloruro y de sulfato. Ambas sales son muy solubles. Para extraerlo, se empieza por separarla de las sales de sodio, potasio y calcio. Como la simple emulsión es imposible porque estas sales cristalizan casi simultáneamente, es preciso recurrir a un método que obligue al Mg a precipitarse por sí sólo.

Este método consiste en hacer pasar el agua de mar por unos recipientes en los que se pone lechada de cal (cal y agua). La magnesia se precipita formando diminutas partículas que quedan en suspensión y tardan largo tiempo en depositarse. El magnesio constituye un metal blanco cuya propiedad más interesante es su poco peso; es utilizado en la construcción de aviones, en fotografía, en bombillos y otros usos.

- **Sedimentos**

Los sedimentos se emplean en beneficio ambiental para el relleno de playas con el fin de rehabilitarlas cuando han perdido su potencial turístico por fenómenos de erosión, de esa manera, mediante el dragado y vertimiento de arenas (trasvase) realizado técnicamente y bajo parámetros ambientales estrictos resulta en un beneficio económico para las empresas de ingeniería costera y para el sector turístico que recupera el uso de playas para disfrute de sol y playa.

- **Nódulos de manganeso (Mn)**

Los únicos minerales conocidos del suelo oceánico profundo de gran importancia económica son los nódulos de manganeso formados por la precipitación de óxidos de manganeso y otras sales minerales disueltas en el agua de mar. Usualmente estas sales se precipitan alrededor de un pequeño núcleo tal como un pedazo de piedra. Están muy extendidos en altas concentraciones en el fondo del océano, principalmente en el océano Pacífico. Comúnmente se encuentran

a profundidades superiores a los 3 750 m, pero se han detectado a profundidades de tan sólo 300 m. Estos nódulos se componen de aproximadamente el 24% de manganeso, 14% de hierro, el 1% de níquel, 0,5% de cobre y algo menos de 0,5% de cobalto (Figura 5.1).

5.3. GÉNESIS

El origen de los nódulos de manganeso ha sido epicentro de muchos debates científicos. Para algunos, son muchos los factores involucrados en la formación de los nódulos de manganeso; sin embargo, no todos los factores son importantes para cada uno de sus tipos. Entre los diferentes factores se tiene: el potencial de oxidación del fondo oceánico, el tipo de sedimento del fondo del mar, la tasa de sedimentación y la actividad biológica de las aguas superficiales.

El potencial de oxidación en el fondo oceánico debe ser de carácter positivo y suficiente para oxidar el manganeso bivalente (Mn^{+2}), el cual es soluble en agua; el manganeso bivalente pasa a manganeso tetravalente, que es insoluble. La presencia de suficiente materia orgánica puede causar reducción en el ambiente del piso oceánico y evitar la formación de manganeso como MnO_2 .

El tipo de sedimento del fondo del mar es también importante en la formación de nódulos de manganeso. La composición del nódulo puede variar dependiendo de que el sedimento sea lodo silíceo, arcilla pelágica u otro tipo. Los nódulos de altos tenores, localizados en el Pacífico ecuatorial Nororiental se formaron sobre silíceo con alto contenido en restos de radiolarios y diatomeas. Otros tipos de nódulos de tenores altos y bajos se encuentran sobre arcillas pelágicas y lodos ricos en hierro.

La tasa de sedimentación es un factor muy importante. Si es alta, los micronódulos son enterrados, no permitiéndose su presencia en la superficie, donde las condiciones son oxidantes. La escasa sedimentación es favorecida por rápidas corrientes de fondo que remueven las partículas lo suficientemente rápido para permitir la formación de nódulos sobre la superficie del sedimento.

Un cuarto factor principal es el nivel de actividad biológica en las aguas superficiales. Altos niveles de actividad han sido correlacionados con la



Figura 5.1. Nódulo de manganeso extraído del Pacífico colombiano.

Fuente: Cortesía Dirección General Marítima (DIMAR).

formación de nódulos de manganeso de tenor alto. Microorganismos tales como el fitoplancton y el zooplancton, remueven elementos trazas de cobre y de otros elementos del agua y los depositan en el fondo del mar. Es importante notar que las formaciones de nódulos en el océano Pacífico norte y sur, se correlacionan positivamente cerca de la zona de máxima productividad de las aguas oceánicas ecuatoriales.

En adición a los cuatro factores principales para la génesis de los nódulos de manganeso, las fuentes de los elementos para los nódulos es un hecho fortuito. Cuatro métodos principales predominan en el origen de los elementos y su obtención por parte de los nódulos de manganeso.

Hay fuentes hidrogenadas, hidrotermales, halmirolíticas y diagenéticas. Ninguna fuente de elementos es predominante en la formación de nódulos, ya que muchos de ellos derivan sus elementos de una variedad de estos procesos.

El proceso hidrogenado, es definido como aquel que deriva sus constituyentes por precipitación lenta de elementos del agua de mar (particularmente hierro y manganeso). Como es el caso en todas las formaciones de nódulos, el potencial de oxidación debe ser suficiente para convertir el manganeso bivalente en tetravalente.

El proceso hidrotermal es definido como aquel cuyos elementos son proporcionales al fondo del mar por la actividad hidrotermal en áreas de alto flujo de calor, asociadas con vulcanismo y separación del piso oceánico. El manganeso y el hierro son productos finales del proceso hidrotermal y son proporcionados al agua del mar. Se considera que no es la fuente predominante de elementos para nódulos de manganeso.

El proceso halmirolítico es caracterizado principalmente por que los elementos son proporcionados al fondo del mar. En este proceso, se incluye la actividad hidrotermal. La interacción del agua del mar sobre las lavas recién consolidadas, la alteración real de los basaltos a baja temperatura y la oclusión directa de los fragmentos volcánicos detríticos. La proporción de los elementos que son suministrados a los depósitos de nódulos a partir de estas diferentes fuentes volcánicas es muy difícil de determinar.



El proceso diagenético es definitivo como los metales suministrados al fondo del mar a partir de varias fuentes, que son removilizadas dentro de la columna de sedimento. La removilización del manganeso es un buen ejemplo; en efecto, si las condiciones en o bajo la interfaz agua-sedimento son reductoras, luego del enterramiento del sedimento, el manganeso tetravalente (Mn^{+4}) es reducido a manganeso soluble divalente (Mn^{+2}). Este manganeso divalente luego migra hacia arriba y llega a ser reoxidado a manganeso tetravalente, y se precipita como MnO_2 (dióxido de manganeso). El proceso cíclico conduce a un enriquecimiento de manganeso en los sedimentos superficiales. Este proceso probablemente ocurre en zonas someras cerca a los márgenes continentales, donde las condiciones reductoras pueden predominar.

La génesis y crecimiento de los nódulos es muy complejo y está influido por una variedad de condiciones y fuentes. Ninguna condición y fuente específica puede ser considerada como el único mecanismo para la formación de nódulos. Bajo distintas condiciones y diferentes combinaciones de factores se producirán nódulos de composición similar. La investigación acerca de los nódulos continúa en las universidades del mundo con el objeto de medir estas condiciones.

5.4. MINERALES DE ÓXIDO DE HIERRO

El óxido de hidróxido y las fases hidratadas relevantes en la mineralogía de los nódulos de manganeso se presentan en la tabla 5.1. Como se especificó anteriormente, la información hasta la fecha se fundamenta en estudios muy limitados, y la identificación de estos minerales de hierro es difícil a causa de granulación extremadamente fina. Por analogía de los óxidos de hierro consta de oxígenos estrechamente empaquetados que contienen iones Fe^{2+} y Fe^{3+} en varios intersticios octaédricos, formando diferentes grupos (FeO_6) compartidos en los extremos. Ciertos oxihidróxidos de hierro (III) son iso-estructurales con los óxidos de manganeso (IV), con octaedros (FeO_6) y (MnO_6), en diferentes posiciones.

Tabla 5.1. Minerales de óxidos de hierro en los nódulos de manganeso del océano Pacífico. Fuente: Adaptada por el autor

MINERAL	FÓRMULA APROXIMADA
Goetita (OC-FeOOH)	FeOOH
Akagaenita (-FeOOH)	(OH, Cl, H ₂ O)1/2 Fe ₈ (OOH) ₁₆
Lepidocrocita (γ -FeOOH)	FeOOH
Oxi-hidróxido	FeO (3 x) ₂ (OH)
Polímero (sintético)	Fe ₃ HO ₈ 4H ₂ O
Ferihidrita	5Fe ₂ O ₃ 9H ₂ O
Ferroxihita (-FeOOH)	FeOOH
Hematita (-Fe₂O₃)	Fe ₂ O ₃
Magemita (-Fe₂O₃)	Fe ₂ O ₃
Magnetita (espinel)	Fe ₃ O ₄

5.5. HIDROCARBUROS

El petróleo, a diferencia de casi todos los minerales extraídos del mar, es de origen orgánico. Su formación abarca un complicado proceso que comienza con la acumulación de residuos orgánicos de plantas y animales que se depositan juntos con otros sedimentos: arena, limos y arcillas producto de erosión continental. A medida que aumenta la profundidad del enterramiento, una porción de la materia orgánica se transforma por procesos químicos en hidrocarburos, incluidos el petróleo crudo y el gas.

Mediante el uso de técnicas geofísicas y de perforación que permiten el estudio y la exploración de los estratos sedimentarios a grandes profundidades, debajo de las plataformas continentales, se han descubierto, en muchas zonas, las condiciones favorables para la acumulación del petróleo crudo y del gas.

Aunque el primer descubrimiento de petróleo bajo el mar data de hace un siglo aproximadamente, en aguas poco profundas y frente a la costa de California, no fue sino hasta 1946 que comenzó la exploración intensiva de las zonas costeras; desde esa época, más de 16 000 pozos han sido perforados en plataformas continentales, a profundidades cada vez mayores y a distancias cada vez más alejadas de la costa; hoy el petróleo crudo se extrae a profundidades mayores de 200 m y hasta 100 km de la costa.

El petróleo y el gas representan el 90% del valor total de todos los minerales obtenidos de los océanos; aproximadamente el 26% de las reservas mundiales conocidas de petróleo se encuentran sumergidas bajo los océanos. Ya se dispone de la tecnología necesaria para investigar no sólo las partes exteriores de los márgenes continentales y los mares semicerrados, sino también las cuencas oceánicas profundas. Por lo general, se utilizan plataformas flotantes y barcos para perforar pozos exploratorios.

5.5.1. Técnicas de explotación

Tanto para la explotación como para la búsqueda se utilizan los sondeos, cuya perforación en el mar requiere unas técnicas y equipos especializados; se han construido diversos tipos de plataformas o bases de apoyo de las torres de sondeo, que se utilizan en función de varios factores: profundidad, objeto del sondeo, estado del mar, calado, entre otros. Las operaciones de exploración geológica y geofísica se diferencian de los procesos realizados en tierra firme.

Para la exploración minera submarina se instalan distintos tipos de plataformas de sondeo y perforación, según sea la calidad de los fondos y su profundidad. En la figura 5.2, se muestran los distintos tipos de plataformas.

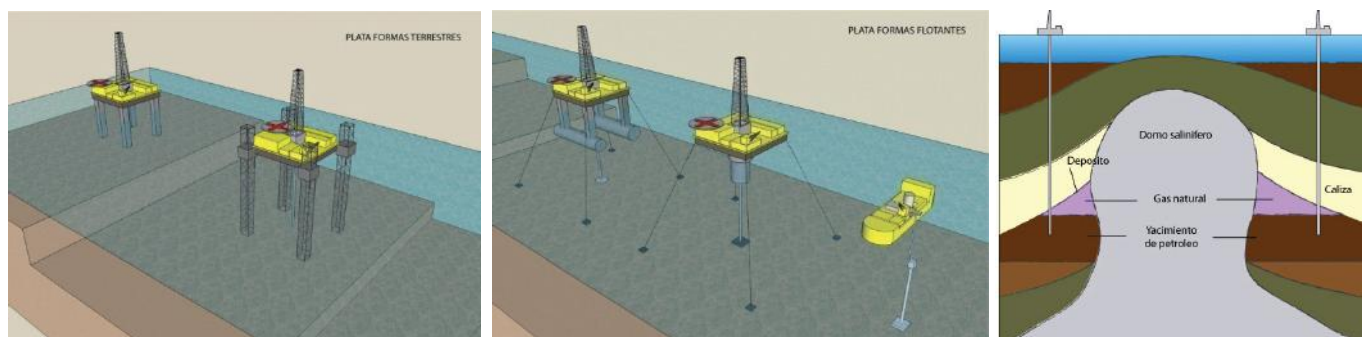


Figura 5.2. Tipos de plataformas para la explotación del petróleo ubicado en el subsuelo marino. De izquierda a derecha: Plataforma fija con los pies anclados al suelo marino; Plataforma auto-elevadora; y plataforma sumergible.

Fuente: Adaptada por el autor.

5.6. ENERGÍA RENOVABLE EN LOS OCÉANOS

En la actualidad, la Tierra enfrenta graves asuntos medio-ambientales a medida que el consumo humano se incrementa. Esto causa efectos negativos en los recursos naturales, y por ende, afecta la sostenibilidad de los ecosistemas. En la misma medida que se realizan esfuerzos para

mitigar el impacto del cambio climático, se deben analizar también temas relacionados con el abastecimiento mundial de las fuentes de energía convencionales.

Las fuentes de energía actuales deben ser reemplazadas por energías renovables y limpias, las cuales tendrán un papel determinante en la reducción del calentamiento global. En el sentido estricto, es renovable cualquier proceso que no altere el equilibrio térmico del planeta, que no genere residuos irrecuperables y que la velocidad de su consumo no sea superior a la velocidad de regeneración de la fuente energética y de la materia prima utilizada.

En gran medida, el desarrollo de la humanidad ha estado determinado por las distintas formas de energía disponibles en cada momento y lugar. Desde sus inicios, los principales recursos estaban basados en la utilización de energías renovables en forma de biomasa, viento, agua y luz solar, utilizados principalmente como fuentes de combustible. A partir del siglo XXI, los recursos renovables han logrado superar en algunas regiones las producciones energéticas de los combustibles fósiles, en parte, gracias a los avances tecnológicos de la energía hidráulica y eólica.

En la Tierra, la principal fuente de energía es la nuclear (la contenida en los núcleos de la materia que la conforma), seguida por la electromagnética (que llega desde el Sol) y finalmente la gravitacional (debida a la interacción Tierra-Luna-Sol).

Como consecuencia del movimiento de la Tierra alrededor del Sol, del Sistema Solar alrededor del centro de la galaxia y de esta por el firmamento, la Tierra también posee una enorme energía cinética, ya que se desplaza por el espacio a una velocidad superior a los 100 km/s.

De todas estas capacidades energéticas de la Tierra, sólo unas pocas están disponibles para su utilización con las tecnologías actuales. La energía solar, la energía nuclear de algunos elementos radioactivos presentes en la Tierra (como el uranio) y la energía gravitatoria que produce las mareas, son ejemplos de esto.

La energía solar da lugar a una serie de fenómenos en la atmósfera, el agua y la litósfera que finalmente conforman diversos tipos de energías que los humanos pueden utilizar. La fotosíntesis favorece



la producción de energía por biomasa; la luz directa permite la producción de energía solar fotovoltaica y térmica; el calor sobre cuerpos de agua puede producir energía hidráulica y energía de gradientes de temperatura en el mar; el calentamiento del aire permite la producción de energía del viento (eólica) que a su vez da lugar a la energía del oleaje.

El océano contiene grandes cantidades de energía limpia y renovable que no ha sido aprovechada y que tendrá un papel fundamental en el futuro de la energía eléctrica. De hecho, las fuentes de energía marina podrían volverse las principales fuentes de abastecimiento en las comunidades costeras de todo el mundo.

La historia de la humanidad ha sido energizada primero con madera para calefacción, luego con agua y viento para el bombeo de agua y para moler granos, luego, por más de dos siglos, se empezó a usar el carbón para calefacción y para hacer funcionar máquinas de producción industrial y para la movilización de personas y carga.

Durante el último siglo, la humanidad ha mejorado sus habilidades tecnológicas y ha empezado a utilizar formas más eficientes de combustibles como el petróleo y el gas natural que son más fáciles de almacenar y manejar, y que dejan menores residuos después de su combustión. Este proceso permitió la revolución industrial y un mejoramiento de la calidad de vida de las personas. Sin embargo, el costo ecológico de esta evolución ha sido negativo para el sistema climático global.

La consecuencia del aumento de combustibles fósiles en el planeta es la producción de grandes cantidades de gases invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), metano y óxido nitroso que son liberados a la atmósfera causando un aumento de la temperatura media global. Entre mayor sea la concentración de estos gases mayor será la temperatura de la atmósfera.

Por esta razón, se ha aceptado de manera generalizada que debemos retrasar y estabilizar el crecimiento del CO_2 y de otros gases invernadero, y se ha acordado que la mejor manera para alcanzar esta meta es avanzando en las tecnologías necesarias para explotar energías renovables, incluyendo las derivadas del océano.

La demanda actual de energía primaria mundial es de aproximadamente 12 000 MTOE (millones de toneladas equivalentes de petróleo) y cerca de un 85% de esta cantidad es alcanzada con el carbón, el petróleo o el gas natural. La energía primaria es la que contiene, de forma natural, el combustible antes de ser sujeto a procesos de conversión. El 15% restante de la demanda de energía mundial es alcanzada por energía nuclear y recursos renovables, dominados principalmente por biomasa y energía hidráulica.

La extrapolación de los escenarios actuales hacia el futuro pronostican un crecimiento de la demanda energética de cerca de 1,6% por año, y aumenta la demanda de combustibles fósiles con poco aumento de energías renovables. Si esto continúa, la demanda energética será de más del doble de la actual para el 2050, y consecuentemente, las emisiones de carbono continuarán agravando el problema del clima global, pudiendo aumentarse la temperatura de todo el planeta en más de 4°C.

Durante los próximos 40 años, se tendrán que realizar grandes esfuerzos para transformar el sistema entero de energía, con el fin de reducir las emisiones de carbono a valores cercanos a los preindustriales. De lo contrario, nos arriesgamos a quedarnos sin abastecimiento de combustibles y a causar modificaciones del sistema climático que irreversiblemente afectarán a las civilizaciones del futuro. Para alcanzar este gran desafío debemos identificar, evolucionar y utilizar las mejores tecnologías de generación de energía limpia lo más rápido posible.

Las fuentes de energía marina incluyen las olas, las corrientes de marea, las corrientes oceánicas, los gradientes de temperatura y salinidad y los vientos sobre la superficie del mar. De manera global, el potencial de energía de estos recursos marinos es vasta debido a que muchas de las regiones más pobladas de mundo, que tienen las mayores demandas energéticas, están ubicadas adyacentes al océano y a otros cuerpos de agua relativamente grandes. Sin embargo, su potencial en cada región del planeta muchas veces no ha sido estimado o no se cuenta con las tecnologías adecuadas para explotarla a bajo costo.

Aunque no se espera que la industria energética marina se desarrolle y madure antes del 2025, se deben realizar esfuerzos nacionales e internacionales que fomenten el desarrollo tecnológico de explotación, recuperación y almacenamiento de esta fuente de energía renovable,

especialmente en regiones costeras, donde estos recursos podrían abastecer los requerimientos energéticos locales siendo esta industria la mejor opción a largo plazo.

5.6.1. Conversión de energía del oleaje – Energía undimotriz

Las olas son ondas superficiales generadas por la acción del viento sobre la superficie de los océanos. El viento global, como se indicó en la Unidad 2, es causado por diferencias de presión, causadas por diferencias de temperatura en distintas zonas del planeta como resultado de la radiación solar, por consiguiente, la energía de las olas procede del Sol, en este caso, de forma terciaria.

La energía que contienen las olas depende de la velocidad del viento y de la distancia que las olas viajan con él. A mayor velocidad del viento y mayor extensión del área de influencia del viento sobre el mar (*fetch*), mayor será la energía que el agua absorbe.

Las aguas con mayor energía se encuentran en los grandes océanos, donde el viento sopla de manera continua por miles de kilómetros. Estas olas suelen ser más intensas al norte y sur del ecuador, entre las latitudes 30 y 60°, donde los vientos son bastante fuertes (Figura 5.3).

Figura 5.3. Mapa mundial del promedio de energía potencial de las olas marinas expresada en kW/m (por metro de frente de ola).

Fuente: Wave Energy paper. IMechE, 1991 and European Directory of Renewable Energy (Suppliers and Services) 1991. Trident Energy Limited, 2005.



Una vez que las olas se han formado, continúan viajando con pequeñas pérdidas de energía hasta que alcanzan la costa. Cuando se encuentran en zonas de baja profundidad su tamaño se incrementa. Todos los océanos contienen olas, sin embargo, no todas las olas son económicamente viables de explotar mediante la extracción de su energía.

A partir de la crisis del petróleo de los sesenta, se empezaron a diseñar un gran número de dispositivos para utilizar la energía de las olas. Se han diseñado aparatos para ser ubicados en la costa y en plataformas ubicadas mar afuera. En general, los convertidores consisten en dos componentes principales, el elemento interfaz que es accionado directamente por las olas y el sistema de transmisión de potencia.

Los elementos interfaz son normalmente de dos tipos principales; los flotadores que se ondulan o balancean en respuesta a la acción del oleaje y cámaras de aire, dentro de las cuales la presión varía como contacto directo con la superficie del agua o por contacto indirecto a través de una membrana.

Los sistemas de transmisión de potencia pueden clasificarse en tres tipos; los que utilizan alta presión hidráulica, generalmente aceite; los que emplean baja presión hidráulica, normalmente agua de mar, y los que usan turbinas de aire. La mayoría de estos sistemas suelen diseñarse para generar electricidad, aunque existen algunas propuestas para usar la energía mecánica para desalinizar el agua de mar.

La energía de las olas oceánicas es enorme, incluso, la fracción de la energía potencialmente explotable es muy grande, comparada con el consumo actual de electricidad del mundo. El aprovechamiento de la energía de las olas se encuentra limitado a las zonas costeras o a sitios cercanos, por lo que su explotación está restringida.

Diversos estudios realizados han estimado que el potencial mundial de energía del oleaje es de aproximadamente 2 TW [1 teravatio = 10^{12} vatio; 1 Watt (vatio) es una unidad de medida de la tasa de conversión de energía] y la energía anual generable de 17 500 TWh/año. El límite explotable de este recurso probablemente se encuentre en el rango del 10 al 25%. Por tanto, la energía de las olas puede contribuir significativamente a la demanda de energía mundial de manera satisfactoria.



El potencial (P) en kW por metro de ancho de la ola, contenida en una ola oceánica idealizada (onda sinodal de amplitud constante y periodo y longitud de onda bien definida) puede expresarse según la siguiente ecuación:

$$P = g^2 \rho H^2 T / 32\pi \text{ [en kW/m]}$$

Según esta ecuación, el potencial en una ola es proporcional al cuadrado de la amplitud (H) y al periodo del movimiento (T). Las olas con periodos largos (7 a 10 segundos) y grandes amplitudes (del orden de 2 m) tienen un flujo de energía que normalmente excede de los 40-50 kW por metro de ancho. La potencia total en cada metro de frente de ola de mar irregular es la suma de las potencias de todos sus componentes. Sin embargo, es imposible medir todas las alturas y periodos de ondas independientes, por lo que se estima la potencia total promedio.

Por lo tanto, en un mar irregular típico, la potencia media total, en kW/m, está dada por:

$$P_s = 0,49 H_s^2 T_e$$

H_s representa la altura significativa del oleaje (altura promedio de la tercera parte de las olas más altas de un registro), y el periodo energético o periodo de nivel cero (T_e) es el tiempo que transcurre entre los valores sucesivos del paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria, situada a la mitad de distancia entre una cresta y un valle.

Se debe tener presente que el 95% de la energía de las olas se encuentra entre la superficie y una profundidad de un cuarto de la longitud de onda.

Los lugares que permiten obtener más eficientemente energía de las olas son los acantilados, porque generalmente las olas en estos lugares viajan en aguas más profundas cerca de la costa que en los sectores de playa, evitando así la disipación de energía en su interacción con el fondo.

La distancia recorrida por las olas interactuando con el fondo y la rugosidad del mismo son factores que reducen drásticamente su

potencia, por ejemplo olas con una densidad de potencia de 50 kW/m, en aguas profundas, pueden reducir su densidad a 20 kW/m o menos, cuando se acercan a las costas con aguas poco profundas.

En la actualidad, se cuenta con una capacidad instalada de 4 MW (1 megavatio = 10^6 vatios) en todo el mundo, principalmente de plantas prototipo. La primera planta generadora de electricidad de las olas se construyó en la costa de la isla de Islay, en Escocia en el 2000, por la empresa WaveGen.

La segunda planta se localiza en la Isla Pico en Azores, Portugal. En el 2003, *Wave Dragon* fue la primera planta ubicada mar afuera e interconectada al sistema eléctrico de una bahía protegida en Dinamarca. En 2004, *Pelamis* la primera planta de gran escala fue instalada en el Centro de Energía Marina Europeo (EMEC) en Inglaterra. Gracias al éxito de ésta, se inició la construcción de la primera planta comercial de energía del oleaje la cual inició operaciones en las aguas marítimas de Portugal en el 2008, generando en su primera etapa 2.25 MW (Figura 5.4).



Figura 5.4. Sistema Pelamis de generación de energía undimotriz.

Fuente: Energía Undimotriz. Amilcar Vercelli. Octubre 12, 2012

Algunos proyectos adicionales están en proceso de desarrollo y planeación en Inglaterra, Irlanda, España, Portugal, China, Japón, Australia, Canadá y los Estados Unidos. Si los esquemas de demostración prueban ser exitosos, entonces es posible esperar para los próximos 5 a 10 años plantas de mediana capacidad que generen hasta 50 - 100 MW.

En Colombia se han realizado algunos proyectos de investigación sobre energía undomotriz, sin embargo hasta la fecha de publicación,



no se ha definido el lugar con potencial apropiado para la generación eficiente de energía eléctrica a partir de las olas, aunque las condiciones de exposición directa al viento en lugares como el norte de la Guajira, podrían hacer suponer que este sea un espacio marino, viable para el desarrollo de un proyecto de este tipo.

5.6.2. Conversión de energía de las mareas – Energía mareomotriz

La atracción gravitacional entre la Tierra-Luna-Sol sobre las masas oceánicas genera el ascenso y descenso del nivel de mar. El comportamiento de las mareas y las variaciones de un lugar a otro dependen de la posición relativa de la Tierra, el Sol y la Luna, que cambia todos los días, de la proporción mar-tierra y de su distribución geográfica, de la topografía local, de la profundidad de las cuencas oceánicas, de los fenómenos meteorológicos adversos y de otros factores.

Existen dos métodos para extraer la energía de las mareas. El primero consiste en la utilización de la energía potencial del agua que se almacena en un estuario durante las mareas más altas. Similar a las centrales hidroeléctricas, el agua se hace pasar a través de turbinas que generan electricidad.

El segundo método consiste en el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes marinas, de la misma manera que las turbinas eólicas extraen la energía del viento.

La energía mareomotriz y la hidráulica tienen un origen diferente, ya que la primera se produce por la atracción gravitacional del Sol y la Luna, mientras que la segunda se origina del ciclo hidrológico. Sin embargo, las tecnologías de aprovechamiento son similares.

Debido a que el aprovechamiento de la energía mediante represas origina impactos considerables en el ecosistema, se han enfocado las investigaciones en métodos de explotación de la energía cinética de las corrientes marinas originadas por las mareas. Para esto se están diseñando turbinas submarinas que funcionan de la misma manera que las turbinas eólicas.

La amplitud de las mareas varía de un lugar a otro. En algunos mares interiores es nula, como en el mar Negro; es escasa, como en el mar

Mediterráneo y mar Caribe (20 - 40 cm); débil en algunas regiones del océano Pacífico y puede llegar a ser notable en determinadas zonas del océano Atlántico, con descensos del nivel del mar del orden de decenas de metros.

Las mareas más altas se ubican en bahías tales como las bahías de Fundy y Frobisher en Canadá (19 m), en el estuario del río Severn (13,6 m), en el Reino Unido, en las bahías de Mont Saint-Michel (12,7 m), en el estuario de Rance (13,5 m) en Francia, entre otros.

La potencia de las mareas se estima en el orden de 3 TW, para regiones donde la amplitud de la marea sea mayor a 5 metros y donde se pueda implementar la recogida y el almacenamiento del agua, como es el caso de algunas pocas bahías en el mundo. Además, la potencia disponible en las costas se reduce a valores de 1 TW, lo que hace aún más difícil reunir las condiciones necesarias para aprovechar esta energía.

La potencia mareomotriz económicamente viable, teniendo en cuenta que el rendimiento de estas centrales no superará el 25%, se sitúan alrededor de los 15 GW. El WEC (*World Energy Council*) ha estimado en 22 000 TWh la energía total anual de las mareas. De esta energía, se considera que sólo una porción (200 TWh) podría ser explotada.

Esta energía puede ser explotada donde las corrientes sean de entre 1 y 3 m/s durante todo el año. Esto suele ocurrir donde la topografía costera acelera el flujo de agua de mar de un lugar a otro, como entre islas y continentes, en las entradas de lagos y fiordos y alrededor de penínsulas.

Estudios más recientes indican que las corrientes marinas causadas por las mareas tienen potencial para suministrar una fracción significativa de las necesidades futuras de electricidad de la Unión Europea. Se han identificado cerca de 106 localidades europeas con fuertes corrientes marinas y se ha estimado que estos lugares pueden suministrar cerca de 50 TWh por año a la red eléctrica europea.

La energía potencial de un estuario es proporcional al cuadrado del rango de las mareas. El número total de ciclos de mareas por año es 705,5, por lo que se puede calcular la cantidad de energía natural disipada por año como:

$$E_{\text{nat/año}} = 705,5 \rho g V H_{\text{rms}} / 3\,600 \approx 2\,000 V H_{\text{rms}}$$



Donde V es el volumen del almacenamiento del estuario en m^3 , ρ es la densidad aproximada del agua ($1\,000\text{ kg/m}^3$), y g es la aceleración de la gravedad ($9,81\text{ m/s}^2$).

La energía cinética de las corrientes de marea puede extraerse mediante turbinas. El potencial utilizable de una turbina de mareas se estima como :

$$P = \frac{1}{2} (\rho A v^3)$$

Donde A es el área barrida por el rotor de la turbina y v es la velocidad de la corriente de agua. Debido a que el agua es 800 veces más densa que el aire, no se requieren las altas velocidades del viento para obtener una relativamente alta densidad de energía. En el caso de una corriente marina de 2 m/s , podría obtenerse una densidad de $4\,000\text{ W/m}^2$. Se precisaría un viento de aproximadamente 19 m/s de velocidad para obtener la misma energía.

La primera planta de explotación a gran escala de la energía de las mareas (mareomotriz) se situó en el río La Rance en el noroeste de Francia, donde la marea oscila entre 3 y $13,5\text{ m}$. La presa construida almacena 184 millones de m^3 de agua y sus esclusas se han equipado con turbinas conectadas directamente a un generador eléctrico con una potencia nominal de 10 MW , proporcionando a la planta un potencial total nominal de 240 MW .

Se estima que Rusia tiene una notable capacidad de producir energía mareomotriz, particularmente en el mar Blanco de la costa Ártica y en el mar de Okhotsk. En 1968 , se puso en funcionamiento la primera planta prototipo de pequeña potencia (8 MW) en la bahía de Kislaya (antigua Unión Soviética).

Desde 1919 , los Estados Unidos y Canadá han querido extraer esta energía, pero no es hasta 1984 , cuando se construye la central mareomotriz de Anápolis, en la provincia de Nueva Escocia (costa atlántica de Canadá).

Desde 1984 , en China, existen varias plantas mareomotrices. La capacidad instalada de las cinco turbinas principales aún en funcionamiento es de $3\,200\text{ kW}$, produciendo 6 GWh de energía por año.

En Inglaterra, se han instalado algunas plantas experimentales como la del proyecto *SeaFlow* que consistió en una turbina sumergida. Luego se instaló el sistema *SeaGen* en el norte de Irlanda, el cual generó cerca de 1,2 MW a la red de energía comercial que abastece cerca de 1 000 hogares.

En el East River de la ciudad de New York, se instaló una planta interconectada a la red eléctrica. En 2007, las turbinas del sistema de demostración generaron 10 MW de potencia y suministraron energía a 8 000 casas.

La planta de Shihwa está ubicada en Corea, cerca de Seúl, entró en funcionamiento en agosto de 2011 y clama ser la más grande del mundo con una capacidad generadora de 254 MW, reduciendo el consumo de crudo del país en 860 000 barriles al año y las emisiones a la atmósfera de CO₂ en 320 000 toneladas.

Otras regiones costeras están evaluando si cuentan con los factores adecuados para la explotación de esta fuente de energía limpia y renovable que podría complementar la demanda actual de electricidad en algunas localidades del planeta.

En la actualidad, muchos países del norte de Europa están estudiando nuevas tecnologías para extraer esta energía renovable, que no causaría impactos negativos en el sistema climático, ya que no genera combustión de combustibles fósiles y por lo tanto, es una solución ecológica al calentamiento global. En los países costeros, cuyo rango de marea es macromareal (mayor a 4 m), es posible la extracción de energía marina para producir electricidad. Su densidad energética es significativa en algunas regiones del planeta (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Recursos energéticos oceánicos estimados. Fuente: IEA-OES 2006, *Policy Report*.

Recurso	Energía estimada global (TWh/año)
Corrientes de marea	800+
Olas	80 000
Marea	300+
Gradientes térmicos	10 000



En Colombia, la altura máxima del régimen medio de la marea en el Caribe alcanza los 0,5 m (en Cartagena), en tanto que en el Pacífico se cuenta con una altura de 4,5 m en Buenaventura y de 3,8 m en Tumaco. Este rango de mareas descalifica al Caribe para el uso de las corrientes de marea como fuente de energía. En Bahía Málaga, con un rango de marea de 2 m en cuadratura se podría formar una corriente de 1,95 m/s que generaría aproximadamente de 70 a 100 MW de electricidad.

5.6.3. Conversión de energía de las corrientes

El concepto de recolectar la energía cinética del océano es esencialmente la misma de las corrientes de marea. Los convertidores de energía de las corrientes marinas usan el mismo principio de las de corriente de marea. Para convertir la energía de las corrientes oceánicas o las corrientes de marea en electricidad, se ponen convertidores de corriente en el flujo de agua donde se almacena la energía cinética del agua en movimiento. Contrario a los generadores hidroeléctricos tradicionales, estos aparatos no requieren represas.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la densidad energética. Mientras que los sistemas de viento y radiación solar son recomendables para ubicaciones remotas, la energía del océano es ideal para desarrollos grandes.

Antecedentes:

En la actualidad, las plantas piloto están en una etapa inicial de desarrollo. La mayoría de equipos usan conceptos de turbinas con eje vertical u horizontal. Sin embargo, aún no se tienen operativas plantas comerciales. Las turbinas axiales tienen el eje de rotación paralelo al flujo de agua y por tanto horizontal, en relación con el fondo marino. Las turbinas que cruzan el flujo tienen el eje de rotación perpendicular al flujo del agua y pueden estar a un ángulo desde horizontal a vertical con respecto al fondo. Los equipos sin turbinas incluyen osciladores multihojas, vortex que inducen movimiento y equipos hidro-venturi. Adicionalmente existen variedad de métodos para ubicar equipos en corrientes como son anclajes de fondo, plataformas flotantes o semiflotantes, etcétera.

En 1977, *Aerovironment Inc.* condujo estudios para determinar los efectos ambientales de un arreglo de turbinas que producían 10 000 MW en la

Corriente del Golfo y en áreas circundantes. Este programa, conocido como Programa Coriolis, demostró que estas instalaciones no producían reducciones en la velocidad de esta corriente, sin encontrarse efectos secundarios significativos. En 2005, la Universidad Atlántico en Florida (FAU) con su Centro de Tecnología Energética Oceánica (COET - OTEC) iniciaron investigaciones relacionadas con el uso de corrientes marinas para producir energía.

Potencial energético de las corrientes oceánicas:

Pocos estudios han determinado los recursos globales de las corrientes marinas, aunque se estima que exceden 4 500 GW, con densidad energética de más de 5 KW/m². El potencial para turbinas de corrientes marinas en Europa se estima que excede los 12 000 MW de capacidad instalada. Lugares con corrientes muy intensas son encontrados en las Islas del Canal (Channel Islands) y en Francia, en el Estrecho de Messina entre Italia y Sicilia y en varios canales entre las islas de Grecia en el Mar Egeo. Otras grandes corrientes marinas pueden encontrarse en regiones como el Sureste de Asia, en ambas costas de Canadá y en muchos otros lugares del planeta.

La energía extraíble de la corriente de los estrechos de Florida es de 1 kW/m² de área de flujo. Se estima que si sólo se capturase 1/10 000 de la energía disponible de la Corriente del Golfo (que tiene 21 000 veces más energía que las cataratas del Niágara), sería suficiente para proveer de energía al 35% de la población de Florida.

Costo:

Este tipo de energía es uno de los más promisorios de energías renovables. Su viabilidad económica aún no ha sido probada, pero se anticipa que su costo de producción disminuirá a medida que las tecnologías de las turbinas mejoren.

Tecnología:

El sistema de Energía Azul (*Blue Energy Power System*) funciona con una serie de molinos submarinos que son capaces de soportar fuerzas como las de los huracanes. El tremendo volumen y densidad de las corrientes oceánicas permite que esta tecnología cubra las demandas energéticas satisfactoriamente. Investigaciones preliminares muestran



que el potencial global es de más de 450 000 MW, con un mercado de más de 550 billones de dólares.

Esta energía puede ser generada mediante turbinas sumergidas, estas tienen rotores y un generador, y se encuentran ancladas en el lugar de las principales corrientes oceánicas. Las turbinas de agua trabajan con el mismo principio de las turbinas de aire, y usan la energía cinética del fluido en movimiento transfiriendo en energía eléctrica y rotacional útil. Las corrientes marinas son más lentas que las del aire, sin embargo, debido a la mayor densidad del agua de mar las turbinas de agua son más pequeñas que sus contrapartidas del viento para la misma capacidad.

Ubicación ideal:

Áreas que experimenten corrientes marinas muy rápidas se encuentran en estrechos muy angostos, entre las islas, a la entrada de bahías y lagunas costeras y grandes puertos. Generalmente el recurso es mayor donde la profundidad del agua es relativamente somera y donde existe un buen rango mareal. En particular, los flujos de corrientes marinas grandes existen donde ocurra una diferencia significativa en la fase entre las mareas que fluyen en ambos lados de islas grandes.

Existen muchos lugares del mundo con corrientes con velocidades de 4 nudos o más (>2 m/s). Algunos países identificados por sus altas corrientes oceánicas son Inglaterra, Irlanda, Italia, Las Filipinas, Japón y en algunas costas de Estados Unidos.

5.6.4. Conversión de energía de los gradientes de temperatura y salinidad

- **Conversión de Energía Termal del Océano (OTEC):**

En las regiones tropicales, donde la termoclina es muy intensa y no muy profunda, puede existir un gradiente de temperatura de más de 20°C entre las aguas superficiales y las aguas profundas. En estas regiones es posible extraer energía eléctrica.

La energía almacenada en el océano puede ser convertida en electricidad mediante un proceso denominado Conversión de Energía Termal del Océano (OTEC, por sus siglas en inglés) o *energía maremotérmica*, que utiliza el gradiente natural de temperatura

del océano (termoclina) para hacer funcionar una turbina que está conectada a un generador que produce electricidad. Además de electricidad, existen otros productos secundarios del proceso OTEC como son agua dulce (desalinizada), agua fría y rica en nutrientes que puede usarse en acuicultura y agricultura.

OTEC es un método potencial de fuente de energía renovable que no produce emisiones de gases invernadero. Las ventajas principales de OTEC son: no requiere el uso de combustibles fósiles, tiene un impacto ambiental bajo, puede proveer de agua potable para la agricultura y uso doméstico, puede proveer refrigeración y enfriamiento y puede proveer a la comunidad de energía confiable.

Las desventajas incluyen el alto costo de capital, probabilidad de encontrar un ambiente hostil durante la construcción y falta de conocimiento de las tecnologías OTEC a nivel industrial. Para llevar aguas frías del fondo a la superficie, las plantas OTEC requieren una tubería costosa y larga, la cual es sumergida más de 1 km.

OTEC tiene ventajas sobre otros esquemas de energía oceánica. Los equipos más grandes energizados por las olas sólo producen unos cuantos kW. Las olas y las corrientes tienen muy bajo potencial energético, es decir, no son lo consistentemente vigorosas como para proveer de energía suficiente para hacer funcionar los generadores.

Las mareas tienen un mayor potencial energético, pero la tecnología necesaria para almacenarla es muy costosa y se limita a sólo algunos puntos costeros donde los rangos de marea sean mayores a 5 m regularmente. Las plantas OTEC no se ven afectadas por la variabilidad de las mareas y olas. La energía solar almacenada por el océano está siempre disponible.

Este proceso emplea las diferencias naturales de temperatura entre la capa superficial y el océano profundo. Para que sea efectivo, estas diferencias deben ser mayores a 20°C. Estos gradientes sólo existen en áreas específicas de la región costera tropical entre los trópicos de Capricornio y de Cáncer.

El gradiente de temperatura de 20°C le da a OTEC una conversión de energía típica de 3 a 4%. Entre mayor sea este gradiente mayor será la eficiencia del sistema de conversión de energía. En comparación, las plantas de petróleo y carbón, cuyas diferencias térmicas son de 500°F,



sus eficiencias alcanzan 30 a 35%. Sin embargo, los combustibles fósiles se están extinguiendo y en el futuro, serán necesarios otros métodos de generación de energía alternativa y renovable, como la energía producida por las plantas OTEC.

Desde que Jacques D'Arsonval planteó su idea de utilizar la energía termal del océano en 1881, los sistemas OTEC han variado en su producción eléctrica, con rangos de 22 kW de energía gruesa en una planta piloto en 1930 hasta el récord de 255 kW de energía gruesa (103 kW de energía neta) en una planta en Kona-Hawai, que además producía 23 litros de agua desalinizada por minuto. Neta se refiere a la electricidad producida por la planta después de sustraer la energía requerida para hacer funcionar el sistema.

Se estima que en un año, la energía solar absorbida por el océano sea de al menos 4 000 veces la energía que actualmente consume la humanidad. Se necesitaría sólo un 1% de la energía renovable que podría producir OTEC, con un rendimiento del 3% para satisfacer todas las necesidades energéticas actuales.

Para que estas plantas OTEC sean adecuadas, se requieren fuentes termales y una distancia corta de la costa. Los parámetros a identificar son: gradientes de temperatura entre 0 y 1 000 m y la distancia desde esta fuente a la costa. Muchos países en vía de desarrollo podrían tener acceso a la energía de OTEC, ya que cuentan con este gradiente de temperatura de 20°C, dentro de una distancia de la costa menor a 25 km en los primeros 1 000 m debajo de la superficie del mar.

Colombia cuenta con dos cuencas oceánicas que cumplen con el requisito para producir energía maremotérmica. Es por esto que el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) de la Armada Nacional de Colombia, en conjunto con universidades nacionales e internacionales, están evaluando los lugares donde sería factible colocar una planta OTEC en el futuro, debido a su potencial energético. Las islas del Caribe han sido identificadas como sitios adecuados para generar electricidad y agua desalinizada, por lo que este método podría ser especialmente útil en el Archipiélago de San Andrés y Providencia y otras regiones insulares y costeras del país (Figura 5.5).

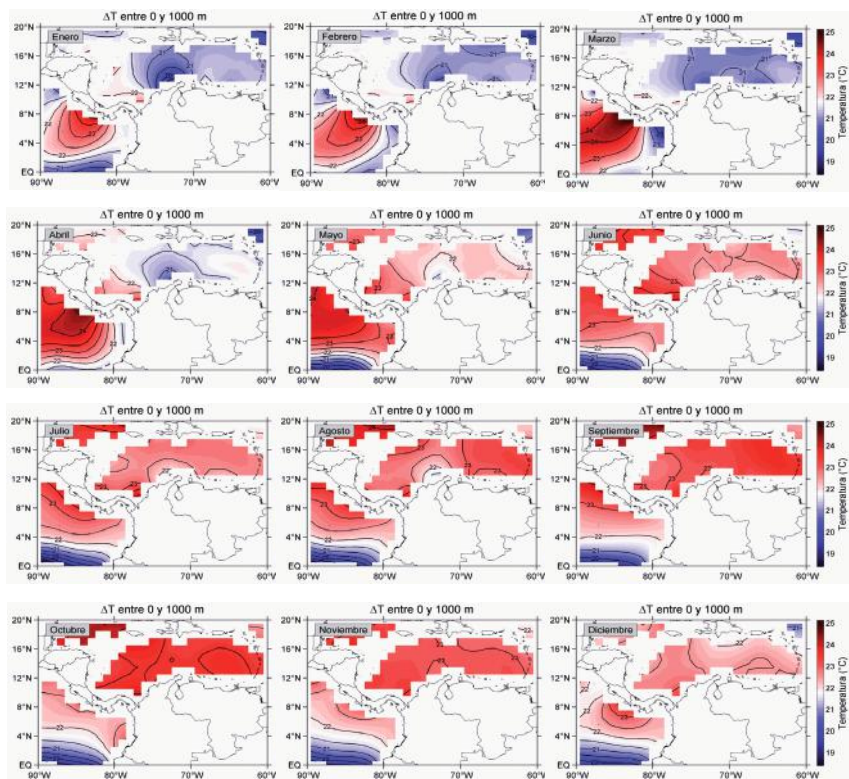


Figura 5.5. Gradiente de temperatura (°C) entre la superficie del mar y los 1 000 metros de profundidad en las cuencas marítimas colombianas y en aguas Centroamericanas. **Fuente:** Campos climatológicos mensuales de temperatura del *World Ocean Atlas* (WOA, 2009).

- **Energía osmótica:**

Esta fuente de energía renovable poco explorada se basa en el efecto de la ósmosis natural y de la tendencia natural a igualarlo todo. La energía osmótica ocurre cuando dos soluciones con distinta salinidad (ejemplo agua de mar y agua de río) se encuentran y tienden a mezclarse para igualar la salinidad.

En el caso de los gradientes de salinidad, la diferencia en salinidad entre agua de mar y agua dulce crea una diferencia de presión osmótica que puede ser explotada para extraer energía, basándose en tecnologías de evaporación para separar el agua dulce y la sal.

En la boca de los ríos, donde el agua dulce se mezcla con agua de mar, la energía asociada con el gradiente de salinidad puede ser aprovechada usando procesos de ósmosis de presión retardada (PRO), electrodíálisis inversa (RED) y con tecnologías de conversión. Este recurso renovable tiene la mayor concentración energética (densidad energética) de todos los recursos marinos.



La energía a partir de los gradientes de salinidad es otra forma de energía solar que está continuamente siendo renovada, ya que el Sol causa la evaporación, que consecuentemente causa la precipitación. Los gradientes salinos indican las diferencias en el contenido de sal entre el mar y el agua dulce, especialmente cuando el río desemboca en el mar.

Una fuente que no ha sido aprovechada de energía existe cuando el flujo del río llega al océano como resultado de grandes diferencias en la presión osmótica entre ambas fuentes de agua. La presión osmótica determina la tasa en la cual el fluido puede pasar por una membrana. Si una mezcla de agua de mar y agua dulce es puesta en una membrana, los fluidos de distintas concentraciones de sal se mueven por la membrana a distintas tasas y por lo tanto, esto actúa como una batería con potencial eléctrico que aparece cerca de la interfaz.

Algunos estudios han demostrado que la energía liberada por el contacto de agua dulce y salada es igual a la de un río cayendo como cascada a 240 m de altura. Ya que se requiere energía para separar la sal del agua (desalinización), la mezcla de sal y agua podría liberar energía. Si los métodos utilizados para desalinizar el agua operan en reverso, se podría producir energía. La ventaja de esta fuente de energía es que se puede recuperar desde la costa. Ubicaciones ideales para energía de los gradientes salinos existen en la desembocadura de los principales ríos, donde las planicies deltáicas no sean muy extensas.

Entropía de la mezcla:

Por termodinámica y las fórmulas de Gibbs de energía libre de mezcla, ΔG incluyendo el potencial químico μ , se sabe que una solución representa un potencial químico más bajo que el del solvente puro. La naturaleza intenta igualar los potenciales químicos de dos soluciones distintas en contacto, para crear una máxima entropía. Así, la fuerza dominante para el transporte de un componente, por ejemplo, a través de una membrana entre dos soluciones, es un gradiente en ΔG .

Para obtener energía del agua de mar, dos soluciones de concentraciones diferentes deben estar disponibles. Este par de salinidades puede estar formado por agua de mar, lagos salinos, o

salmueras dejadas por la manufactura de sal, acoplados con fuentes de agua de muy bajas concentraciones de sal, como son los ríos.

La energía que puede extraerse de las dos soluciones es directamente proporcional a la temperatura absoluta, T (°K), y al logaritmo de la razón de sus concentraciones (tasa actividad). Al mezclar 1 m^3 de agua dulce por segundo con un exceso de agua de mar, considerada como una solución de sal con una concentración de sal $0,5$ molar, la máxima energía de disolución recuperable es $\Delta G = -2,35 \text{ MJ/s} = -2,35 \text{ MW}$.

La ventaja de este tipo de planta es que no se necesitan diferencias de altura para hacer que funcionen satisfactoriamente, por ejemplo, cuando un río desemboca en el mar. Sin embargo, los sedimentos en suspensión y la mala calidad del agua de los ríos reduce la efectividad de las membranas y por tanto, se debe pensar en instalar plantas de tratamiento que prevengan la acumulación de solutos y contaminantes en el lado de la membrana en contacto con el agua dulce.

Potencial de energía salina:

La energía salina es una de las energías renovables que no ha sido explotada comercialmente. Su potencial energético es grande, correspondiente a $2,6 \text{ MW m}^3/\text{s}$ de agua dulce, cuando se mezcla con agua salada. El potencial explotable a nivel mundial se estima de $2\,000 \text{ TWh/año}$, que es equivalente al consumo de electricidad de China en el 2002.

Comparado con otras fuentes de energía marina, los recursos de gradiente de salinidad están en el mismo orden que la energía del oleaje o gradientes termales y son 100 veces más altos que los de energía por las mareas. El potencial de energía a partir de los gradientes salinos (de entre $1,4$ y $2,6 \text{ TW}$) se estimó en los setenta, basándose en la salinidad promedio del océano y en las descargas globales anuales de los ríos. Un ejemplo es el río Rin, cuya descarga promedio es de $2\,200 \text{ m}^3/\text{s}$. Asumiendo un potencial energético de $1,5 \text{ MJ/m}^3$ de agua de río, esto significaría un potencial eléctrico que favorecería más de 6 millones de hogares ($>80\%$ de todos los hogares).

Para la ubicación geográfica de las plantas generadoras de energía, a partir de los gradientes de salinidad, se debe considerar:



- Disponibilidad constante de agua dulce y agua de mar.
- Deltas y estuarios con grandes descargas de agua dulce al mar.
- Los cálculos de los modelos estadísticos deben verificar que el flujo intenso (m^3/s) esté disponible durante todo el año.
- Acceso relativamente fácil que no requiera trabajos de infraestructura complicados.
- Las descargas más accesibles no son las de ríos abiertos. Las regiones bajas con un exceso de agua dulce usualmente bombean agua al mar para prevenir las inundaciones.
- La temperatura y salinidad de cada localidad debe ser tomada en cuenta para la identificación de gradientes salinos que puedan ser fuentes significativas de energía.
- La energía disipada en la desembocadura y la máxima cantidad de energía que puede recuperarse según la tecnología deben calcularse mediante modelos.
- La cantidad de energía que puede producirse de un río que desemboca en el mar depende de varios factores incluyendo: la temperatura y salinidad del río y el mar, la calidad y cantidad del agua del río, tasas de volumen río-agua de mar, composición de la sal marina, pendiente del gradiente salino, infraestructura y demandas de energía locales y los impactos ambientales.

El costo potencial de la energía a partir de esta fuente es más alto que el de otras energías de agua tradicionales, pero es comparable con otras formas de energía renovable que están en producción actualmente en plantas a escala completa.

Aunque no se tienen datos precisos de la capacidad energética de este tipo de energía, se ha calculado que con las tecnologías de membranas actuales las plantas de energía osmótica serían unas 36 veces más costosas que las plantas convencionales.

Se estima que esta fuente renovable de energía podría cubrir el 80% de las demandas mundiales de electricidad, lo que significaría una reducción de 40% de emisiones de gases de efecto invernadero globales.

En el 2009, la compañía *Statkraft* de Noruega inició en Tofte al suroeste de Oslo, el proceso de construcción de la primera planta en utilizar los gradientes de salinidad para producir 12 TWh de energía por año

(equivalente al 10% del consumo total de electricidad en Noruega). Se espera que se tenga una planta comercial de gran escala para el 2015.

5.6.5. Conversión de energía del viento sobre la Superficie del mar

Desde la instalación del primer parque eólico en el mar (*offshore*) en el mar Báltico, en Dinamarca en 1991, y luego del montaje de los primeros parques eólicos en la costa del Mar del Norte a comienzos del año 2000, ha sido notable el número de proyectos que se han propuesto realizar en diversas partes del mundo, como Estados Unidos, China, Alemania, Japón, Bélgica, España, Noruega y Francia, entre otros (Figura 5.7).

Los principales argumentos dados para la puesta en marcha de este tipo de plantas generadoras es que no existirían limitaciones de suelos (áreas de terreno) adecuados para explotar este recurso; que la intensidad del viento es mayor en mar abierto que en la tierra y a menor altura, lo que favorecería la construcción de estructuras (torres) más bajas, reduciéndose el costo de instalación de estas, y que se reduciría el impacto visual y acústico que dichas instalaciones presentan en este medio comparado con el terrestre. Sin embargo, en algunas regiones no han tenido gran aceptación, ya que se considera que dichas plantas podrían poner en riesgo la flota pesquera artesanal.



Figura 5.6. Parque eólico marino en Dinamarca

Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros, ACIEM. 2013



Algunas instalaciones se han llevado a cabo en aguas poco profundas o protegidas, mientras que otras se encuentran a distancias de hasta 25 km de la costa y a profundidades de hasta 45 m (Tabla 5.3). Dinamarca es el pionero de este tipo de explotación de energía y líder en cuanto potencia instalada *offshore*. Actualmente cubren el 50% del consumo eléctrico familiar con la energía generada en estos parques y tienen planeada la instalación de más parques que generarán más de 4 000 MW de potencia para el 2027.

Tabla 5.3. Potencias de parques eólicos *offshore* instalados en el mundo. Fuente: Carta-González *et al.*, (2009)

País	Año	MW/generador	No. aerogeneradores	MW totales
Dinamarca	1991	0,45	11	4,95
Holanda	1994	0,5	4	2
Dinamarca	1995	0,5	10	5
Holanda	1996	0,6	28	16,8
Suecia	1998	0,55	5	2,75
R. Unido	2000	2,0	2	4
Dinamarca	2000	2,0	20	40
Suecia	2000	1,5	7	10,5
Suecia	2001	2,0	5	10
Dinamarca	2002	2,0	80	160
Dinamarca	2003	2,3	10	23
R. Unido	2003	2,0	30	60
Dinamarca	2003	2,3	72	165,6
Irlanda	2003	3,6	7	25,2
Japón	2004	0,6	2	1,2
R. Unido	2004	2,0	30	60
R. Unido	2005	3,0	30	90
Holanda	2006	3,0	36	108
R. Unido	2006	3,0	30	90
R. Unido	2007	3,6	25	90
R. Unido	2007	5,0	2	10
Suecia	2007	2,3	48	110
Holanda	2008	2,0	60	120

El recurso eólico alrededor de las costas europeas (considerando distancias de 30 km de la tierra, y 40 m de profundidad y vientos de 10 m/s) se ha estimado en 3 028 TWh/año. Por lo tanto, la Comisión Europea está considerando la creación de un enorme parque eólico que integraría los parques actuales y otros nuevos, concentrándolos todos mediante una gran red eléctrica. Esta medida podría cubrir el 20% de la demanda de energía en Europa.

5.6.6. Islas de energía

Los océanos almacenan abundante energía en forma de viento, olas y solar. Todas estas fuentes energéticas podrían unirse en unos complejos llamados Islas de Energía: una especie de plataforma petrolífera de la que en lugar de extraer el “oro negro” se podrían extraer fuentes de energía renovables. Este es el concepto ideado por el ingeniero Dominic Michaelis. La idea surgió cuando Michaelis se dio cuenta de que el desarrollo de la conversión de energía termal (OTEC), iba demasiado lento.

La Isla de Energía que Michaelis está diseñando tendría una planta de OTEC en el centro, pero estaría rodeada por una plataforma de unos 600 m de largo, en la que también habría turbinas eólicas y colectores solares. Así mismo, se instalarían turbinas acuáticas para captar la energía del agua que se movería alrededor de esa gran estructura.

Según Michaelis, una de estas estructuras con forma hexagonal podría generar 250 MW, lo suficiente para abastecer a una pequeña ciudad. Pero si varias islas se unieran formando un pequeño archipiélago, se podría crear un pequeño puerto para que atracaran barcos o un hotel “verde” para los turistas.

La energía limpia generada por la isla se conduciría hasta la costa a través de cables acuáticos. Podría incluso usarse para hacer hidrógeno a partir de agua. Este hidrógeno podría ser transportado para producir electricidad a partir de pilas de combustible.

La Isla de Energía también se usaría como planta desalinizadora, aprovechando el ciclo de evaporación-condensación. Michaelis calcula que, por cada MW de energía producida, una planta OTEC proporcionaría más de un millón de litros de agua fresca. En la actualidad, Michaelis está buscando financiación para su proyecto. Una de las islas necesitaría una inversión de 600 millones de dólares.



PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

Señalar en un mapa, los lugares más probables para aprovechar los diferentes tipos de energías azules o, en otras palabras, renovables, provenientes del océano, que pudieran ser investigadas con el propósito de transformarla en energía eléctrica y explicar la razón de cada una de sus propuestas.

Marcar en un mapa del país los lugares donde se encuentran actualmente plataformas de exploración y explotación de recursos marinos no renovables *offshore* y explicar las ventajas y desventajas de la explotación de cada recurso que haya definido.

Diseñar y producir un video promocional de un minuto de duración, con cualquier medio electrónico, para promover la investigación científica marina y apoyar el empleo de energías azules que ayuden a prevenir y mitigar el daño ambiental y a conservar los recursos naturales.

UNIDAD 6

LA CONTAMINACIÓN DEL MAR



INTRODUCCIÓN

La contaminación del mar constituye un problema de gran magnitud. Interesa a la salud, a los recursos alimenticios y a los posibles empleos marítimos en todas partes del mundo. Se trata de un problema global entrelazado con muchas de las grandes cuestiones económicas, políticas y legales que enfrenta hoy la comunidad.

Dado que aún no ha recibido una amplia atención a nivel internacional, la contaminación marina es uno de los problemas más complejos y menos entendidos de este siglo. Los vacíos e incertidumbres del conocimiento científico en este campo, la variedad en la composición química y comportamiento que presentan los contaminantes, los múltiples caminos por los cuales llegan al medio marino y la acción de ciertos intereses económicos y políticos, complican y obstaculizan la formación de una voluntad internacional, resuelta a considerar este problema como un problema típico del derecho marítimo; la contaminación marina ha sido invariablemente subordinada a otras cuestiones oceánicas y al gran número de propuestas que se formulan para gobernar el mar.

La solución al problema de la contaminación marina es urgente y deseable; se relaciona su control con el tipo de sustancia contaminante; el principal criterio que guía el análisis es la capacidad de regular y reducir la contaminación marina, pero también se toman en cuenta otros factores importantes, como el posible grado de compromiso internacional, la continuidad y la viabilidad práctica.

Las funciones del océano, como las del universo son sinérgicas. El comportamiento del todo no puede predecirse mediante el análisis de las partes. Lógicamente, si lo que se desea es que las políticas a largo plazo produzcan los resultados previstos para gobernar las funciones del océano es preciso también cernirse a los principios de la sinecología.

En consecuencia, la investigación orientada a proporcionar mejores bases para las políticas internacionales que influyen sobre la calidad del ambiente debe comprender dos clases de estudios: los de carácter técnico y económico y los de orden institucional. Los primeros incluyen el acopio y el análisis de datos físicos, biológicos y financieros y tienen por objeto proporcionar el conocimiento indispensable para definir, en la medida de lo posible las condiciones actuales y las tendencias futuras en todo lo que concierne a los ambientes físicos. Por su parte, el análisis institucional se centra en la elaboración de leyes, políticas y disposiciones administrativas encaminadas a facilitar la creación de subsistemas óptimos.

La gran masa de agua que compone el ecosistema garantiza su estabilidad, gracias a su capacidad de diluir material extraño hasta reducirlo a concentraciones insignificantes. La superficie total de los mares en el mundo es de unos 361,25 millones de km² correspondiéndole a Colombia 928 660 km² aproximadamente. La profundidad media de los océanos (Atlántico, Pacífico e Índico) es de unos 4 100 m con un volumen de 335 millones de km³.

La experiencia ha demostrado que las magnitudes de los trastornos ecológicos no son proporcionales a las masas o a las concentraciones de las sustancias contaminantes, sino que dependen más bien del grado en que los mecanismos homeostáticos resultan alterados.

Como se mencionó, la contaminación de las aguas lesiona la salud y el bienestar público, crea inconvenientes a la ciudadanía, es nociva a la vida acuática, es perjudicial a la agricultura, la industria, a la recreación y otros usos. De esto se deduce la necesidad de contar con otros recursos humanos capacitados que puedan adelantar estudios minuciosos tendientes a identificar las diferentes fuentes de contaminación de origen agrícola, industrial, doméstico, térmico, minero y determinar sus respectivas concentraciones. En el desarrollo de los contenidos, se verán las diversas fuentes de contaminación y



los tipos de contaminantes que se descargan en las aguas costeras colombianas.

Objetivos

- Se podrán reconocer las principales fuentes de aguas residuales y hacer un inventario de estas.
- Se habrán obtenido conocimientos acerca del impacto y efecto que producen las aguas residuales en los recursos naturales marinos.
- Se estará en capacidad de proponer posibles soluciones al problema de la contaminación marina.

6.1. FUENTES DE CONTAMINACIÓN

6.1.1. Aguas residuales

Los residuos domésticos son aguas cloacales, restos de la elaboración de alimentos, detergentes y desagües de zonas agrícolas y productos degradados, que no han sido tratados; estos presentan cinco características principales de contaminación:

- Alto contenido bacteriano y posiblemente concentraciones de virus que contaminan moluscos y mariscos y limitan el empleo de las zonas turísticas.
- Constituyentes orgánicos disueltos y en suspensión que al descomponerse imponen una fuerte demanda biológica del oxígeno.
- Altas concentraciones de nutrientes como compuestos de fósforo y nitrógeno que enriquecen las aguas receptoras y aceleran la eutrofización.
- Constituyentes orgánicos e inorgánicos en flotación, que deterioran gravemente las bellezas naturales y alteran los procesos de producción primaria y autopurificación.

- Lodos de fondo donde se concentran vestigios de metales pesados contaminantes. En su mayor parte, esta contaminación proviene de la descarga intencional de materiales o residuos en ríos o zonas costera. Sus efectos dependen de la población y de su distribución más que de cualquier otra forma de contaminación.

De acuerdo con un estudio publicado por las Naciones Unidas en 1966, los residuos domésticos constituyen el problema de contaminación marina más importante. Las prácticas agrícolas que emplean fertilizantes y residuos de animales domésticos son una de las principales causas del fenómeno; se conocen cálculos de países industrializados donde el volumen de residuos animales es diez veces mayor que el de residuos humanos.

Dos de los efectos más importantes de los residuos domésticos son la fertilización excesiva y el envenenamiento. La primera se torna evidente cuando las poblaciones marinas de vida vegetal aumentan rápidamente, causando afloramientos. Se han registrado casos donde este tipo de florecimientos (*blooms*) del fitoplancton exterminan peces y otros organismos a lo largo de las costas. Si bien se tiene entendido que tales florecimientos llamados “*marea roja*” se operan naturalmente, su frecuencia aumenta junto con la eliminación en el mar de residuos de origen humano.

De los principales nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) que el hombre introduce en el medio marino, el fósforo es el que puede causar los problemas más graves de contaminación; los fosfatos entran en los océanos por los ríos y por vía cloacal, a donde llegan, en gran proporción, como formadores de los polifosfatos incluidos en los detergentes.

La segunda fuente son los fertilizantes agrícolas que llegan a través de desagües. Al mar llegan nitratos originados en el uso de combustibles fósiles y la subsiguiente precipitación en el mar, así como nitratos de fertilizantes usados en la tierra y arrastrados por desagües hasta el medio marino. Los afluentes cloacales contienen nitrito de amoníaco, sustancia que las bacterias oxidan y convierten en nitrato.



Los nitratos y fosfatos son nutrientes esenciales para la producción del medio marino, pero la súper-abundancia de tales iones puede provocar la eutrofización de los lagos y extensiones de agua, fenómeno seguido por desoxigenación de los lagos, causado por el fósforo proveniente de los residuos domésticos, la erosión del suelo y el estiércol agrícola, que constituyen un serio problema en casi todos los países, y sirve como modelo de lo que puede suceder en estuarios y costas oceánicas.

Aunque persistentes, ni el nitrato ni el fósforo tienen efectos tóxicos en los animales marinos; actúan sobre todo en las zonas costeras por eliminación del oxígeno, proceso que puede tener efectos de largo alcance. De los peces comercialmente importantes, el 90% viven y se crían en estuarios o pasan por ellos. Es probable que en el futuro más del 20% de las proteínas para el mundo, de origen animal provengan del mar; en consecuencia, la salud de los estuarios es vital para la humanidad.

No hay información fidedigna sobre qué cantidad de fósforo de las minas llega finalmente al medio marino. La formulación de estos datos es más difícil. Pero se sabe que las zonas gravemente afectadas por el cieno cloacal están desprovistas de la flora y fauna normales en las aguas profundas. Se sabe que algunas operaciones de dragado, si bien no son directamente tóxicas para la vida marina, incorporan material fino revuelto que afecta la migración de los peces y con frecuencia los ahuyenta.

En la tabla 6.1 se presentan algunos datos publicados sobre las descargas de los ríos a las cuencas marinas colombianas.

Este tipo de descargas se acumulan en los límites del sistema oceánico, el fondo del mar, la superficie del agua, las zonas de convergencia, las playas, etcétera. Su distribución es muy irregular debido a la gran variedad de productos existentes. Por lo tanto, el destino final de este tipo de desperdicios requiere de un análisis minucioso.

Tabla 6.1 Cargas totales que aportan los ríos al Caribe y Pacífico colombiano. Fuente: INVEMAR, 2001.

CARIBE		
Caudal	10 664	m ³ /s
Demanda bioquímica de oxígeno - DBO5	2 968	Ton/día
Sólidos suspendidos totales - SST	308 027	Ton/día
Nitrógeno total - NTT	760	Ton/día
Fosfatos - PO ₄	155,6	Ton/día
Organoclorados totales - OCT	10,6	kg/día
Hidrocarburos disueltos y dispersos - HDD	9 125,2	kg/día
Cadmio - Cd	1,6	g/día
Plomo - Pb	24,9	g/día
Cromo - Cr	0,51	g/día
Coliformes fecales x 1015 - CFS x 1015	4 116	NMP/día
Coliformes totales x 1015 - CTT x 1015	9 355	NMP/día
PACÍFICO		
Caudal	5 047	m ³ /s
Demanda bioquímica de oxígeno - DBO5	438,9	Ton/día
Sólidos suspendidos totales - SST	25 801	Ton/día
Nitrógeno total - NTT	285,5	Ton/día
Fosfatos - PO ₄	12,72	Ton/día
Organoclorados totales - OCT	1,07	kg/día
Hidrocarburos disueltos y dispersos - HDD	2 103,2	kg/día
Cadmio - Cd	0,42	g/día
Plomo - Pb	7,36	g/día
Cromo - Cr	0,28	g/día
Coliformes fecales x 1015 - CFS x 1015	2 988	NMP/día
Coliformes totales x 1015 - CTT x 1015	10 652	NMP/día

6.1.2. Emisarios submarinos

Un emisario submarino tiene por objeto realizar una descarga de aguas residuales, vertidos urbanos o industriales, a cierta distancia de la costa donde la hidrodinámica favorece la dilución y dispersión del efluente, garantizando una dilución efectiva al momento de mezclar las aguas residuales y el agua de mar, tratando en forma natural las descargas biodegradables, mitigando cualquier tipo de afectación sobre el aspecto natural y sea inofensivo para los ecosistemas marinos, el litoral y la salud de los seres humanos.



Este sistema es una buena solución a las descargas de residuos líquidos, siempre y cuando el vertimiento cumpla con la normatividad legal vigente para su disposición. Cabe señalar que los emisarios no son aconsejables al tratarse de contaminantes tóxicos altamente persistentes (en general no biodegradables), lo cual provocaría un daño mayor al medio acuático en su dispersión.

La instalación de un emisario submarino deberá asegurar la adecuada dilución, por lo que al inyectar el flujo en la profundidad marina se obtiene la **dilución primaria**, la cual va ascendiendo a causa de las diferencias de densidad. Con el propósito de lograr una buena dilución primaria, se tienen en cuenta factores como:

- La profundidad de la inyección, considerando aumentar el tiempo de contacto entre el efluente y el agua de mar, cuanto más profunda mejor dilución.
- La forma de la boca de salida del emisario, con una morfología circular, se caracteriza por buena difusión y mínima acumulación de sedimentos.
- La orientación del chorro incidente, de forma horizontal, para conseguir un mayor recorrido del efluente.
- Las corrientes submarinas en la zona de inyección, que influyen positivamente en la trayectoria del efluente, las permanentes o semipermanentes, aseguran una mejor dilución.

La **dilución secundaria** o dilución por arrastre, es producida por las corrientes generadas por el viento en las capas superficiales del agua. Por ende, se consideran los factores relacionados directamente a las propiedades de la corriente como la dirección e intensidad del viento, la morfología de la costa y del fondo marino, las mareas y el oleaje.

6.1.3. Efectos de la contaminación del agua sobre la salud del hombre

Que el ciudadano no especializado en materia de contaminación conozca los problemas relacionados con la degradación del medio ambiente tiene un sentido más amplio que la simple divulgación de conocimientos, porque las sensaciones, penurias y enfermedades del

ser humano son un sensible y eficaz detector de los riesgos inherentes a la contaminación del medio.

Por otra parte, mientras los individuos se desenvuelven en distintos ambientes durante su jornada, a la hora de realizar los estudios sobre los efectos de la contaminación, es fundamental efectuar la suma de los factores nocivos. Sin embargo, esta no es una operación de simple adición y precisamente del hombre, en tanto, se mueve en todos estos ambientes, incorpora e integra esos distintos factores nocivos. Por lo tanto, es determinante la participación del ciudadano en la evaluación del grado de contaminación del medio.

Se debe tener en cuenta que lo no perjudicial en un día o en una semana lo puede llegar a ser en uno o diez años. Por esta razón, el hombre está expuesto a determinados riesgos durante períodos prolongados. La contaminación ambiental, además de afectar la salud humana, origina pérdidas económicas, molestias de todo tipo y una alteración de la naturaleza, circunstancias que afectan a la mayoría de la población y le exigen que esté correctamente informada para poder discriminar las distintas alternativas de desarrollo.

En cuanto a la forma de enfrentar éste problema, las opciones giran en torno a la actuación sobre las fuentes contaminantes (industrias contaminadoras, los hornos, las naves). Los efectos que estas últimas generan son irreversibles y autoevolutivos, es decir, siguen evolucionando con el tiempo.

No cabe duda de que la preservación del medio, evitando su contaminación, es una función humana. Por lo tanto, debe ser desarrollada con el aporte inexcusable de toda la sociedad.

A escala universal, la contaminación por aguas residuales es la causa de un sinnúmero de enfermedades que afectan la salud humana, ya que incrementa el número de organismos patógenos, favorece la eutrofización y por consiguiente, sobreviene algún grado de deterioro en el equilibrio ecológico del ecosistema marino. Por lo anterior, es necesario que se lleven a cabo tratamientos de purificación de los fluentes antes de verter estas aguas al mar.

Los microorganismos patógenos se encuentran en las aguas negras, las mismas aguas domésticas, las cuales pueden contener agentes



contaminantes como heces, papel, residuos tanto de detergentes como de alimentos, procedentes de escuelas, hogares, residencias, clínicas, centros de salud.

6.2. DESECHOS INDUSTRIALES: CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL

Es conveniente hablar de contaminación producida por residuos industriales y revisar las definiciones de lo que se entiende por esta clase de contaminación.

6.2.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se produce por la liberación de fases residuales o de olores procedentes de procesos químicos o biológicos que contengan sustancias que puedan considerarse dañinas para el hombre, bien porque se reduzca el oxígeno disponible para el mantenimiento de la vida o porque no sean deseables desde el punto de vista estético.

6.2.2. Contaminación del agua

La contaminación del agua es consecuencia de arrojar en sus fuentes, o en la red de suministro público, sustancias que sean nocivas por su toxicidad, porque reducen el nivel de oxígeno contenido en esta o porque estéticamente resultan desagradables.

6.2.3. Contaminación del suelo

La contaminación del suelo se debe a una utilización errada del mismo, de tal forma que lo deje en malas condiciones para atender sus propias necesidades, como son construir sobre el suelo, cultivar y obtener otros productos que necesita en su vida.

El problema de la contaminación industrial tiene que estar enmarcado necesariamente dentro del problema global de la contaminación y deben ser considerados tanto los aspectos políticos, sociales, económicos y públicos como los técnicos y científicos.

Miles de millones de galones de agua se utilizan en las plantas industriales y las plantas de energía eléctrica. La mayor parte de estas aguas tendrán que ser tratadas previamente hasta obtener la calidad que se requiere para las distintas aplicaciones que se vayan a dar al recurso agua.

Tales tratamientos pueden ser muy simples o relativamente complejos, pero generalmente tienen una justificación técnica, económica y social; sin embargo, no todas las aguas vertidas a los ríos o al mar tienen la calidad que requieren estos cuerpos de agua.

La contaminación de tipo industrial se manifiesta claramente cuando aparecen manchas de aceite, espuma, residuos flotantes o cuando existe una turbiedad acentuada. Por otra parte, la contaminación se manifiesta en una disminución o alteración de la vida acuática, en la variación del sabor de la corriente receptora o por la presencia de altas concentraciones de sustancias químicas de toxicidad relativa.

Naturalmente se pone mayor atención cuando se deteriora considerablemente la calidad de las corrientes, se altera el medio de vida para los peces o cuando se disminuye la posibilidad de usos recreativos, entre otros. Debido a que los efectos de la contaminación deben considerarse a largo plazo, el problema no debe ser enfrentado solamente por la industria; en su totalidad, la sociedad debe participar como un todo y asumir la parte de responsabilidad que le corresponde.

La capacidad contaminadora del líquido que sale de una instalación industrial o de una central eléctrica está en función de la naturaleza de dicho efluente y del uso que se pretenda hacer del cuerpo de agua.

Este último se debe tener en cuenta cuando se pretenden establecer los patrones de control de la contaminación del agua. Existen cinco grandes categorías cuando se habla de uso del agua que son:

- » Suministro público de agua
- » Agua que se destina a usos recreativos y estéticos
- » Agua para la conservación de la pesca y la vida silvestre en general
- » Agua que se utiliza en las faenas agrícolas
- » Agua destinada a usos industriales



La concentración que se considera como contaminante varía según los diversos componentes, desde niveles relativamente altos hasta cualquier cantidad que puede ser detectada. Los procesos industriales generan contaminantes físicos, químicos y radiactivos.

Contaminantes físicos

• Color

Muchas veces, el color del agua se debe a la presencia de algas o bacterias en descomposición.

También la coloración se puede deber a la influencia de industrias tales como las de celulosa y papel, de textiles, petroquímicas y químicas.

Los patrones de color de agua para usos recreativos exigen que la superficie de las aguas deba estar limpia de residuos que produzcan colores molestos o afectaciones bacterianas o químicas que puedan afectar la salud humana.

Se incluyen las aguas de contacto directo y las de contacto indirecto (paseos en lancha y pesca); para cada uso de agua existe un patrón de color; así para aguas de suministro público es permisible hasta un valor de 75 unidades de color; un patrón por debajo de 10 unidades de color es lo que se recomienda como criterio deseable.

Las aguas que sirven de hábitat a los peces y al resto de vida acuática tienen que ajustarse a ciertos patrones de color. Esto es así porque el 10% de la luz que choca contra la superficie del agua debe llegar hasta el fondo de cualquier zona fotosintética en la que se deseen mantener concentraciones adecuadas de oxígeno en disolución. El color que excede a las 50 unidades puede limitar la fotosíntesis y al reducir los niveles de oxígeno en disolución puede alterar el equilibrio entre las diversas formas de vida acuática.

• Temperatura

En relación con el problema de la contaminación térmica, asociada con grandes cantidades de agua residual de refrigeración provenientes de las industrias, la respuesta más efectiva consiste en el empleo de torres de refrigeración y en la recirculación del agua de refrigeración a través del sistema.

Para aguas de uso recreativo, se recomienda que la temperatura esté por debajo de los 30°C, excepto cuando se deba a fenómenos naturales; hay que evitar cualquier cambio de temperatura del agua que afecte adversamente a la vida acuática, o al sabor, o al olor o a las reacciones químicas del agua.

La conservación de los organismos marinos y de los que habitan en los estuarios requiere que no se produzcan elevaciones de temperatura por encima de 2°C) como consecuencia de la adición de calor de origen artificial a las aguas costeras y a las de los estuarios.

• **Olor y sabor**

La presencia en el agua de gases en disolución (anhídrido sulfúrico) y de compuestos orgánicos volátiles generan mal olor en el agua. Cuando el valor umbral del olor sobrepasa las tres unidades, según criterio en las pruebas de calibración mediante alcohol (N-butil) ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{-OH}$), se presenta esta sensación desagradable, fuerte y penetrante.

El sabor puede ser un indicador directo de la presencia de sales inorgánicas de cobre, hierro, manganeso, zinc, sodio y potasio en disolución, así mismo otros compuestos orgánicos e inorgánicos pueden dar al agua sabores característicos y contaminantes. Los hidrocarburos, los compuestos fenólicos ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), el pentaclorofenato sódico ($\text{C}_6\text{Cl}_5\text{NaO}$), los residuos de alquitrán, los residuos de las alcantarillas, el papel y los procesos de transformación del petróleo, entre otros, puede contribuir a la aparición de sabores desagradables en el agua o en los peces y demás organismos acuáticos.

El clorofenol, produce un sabor desagradable en el pescado en concentraciones de sólo 0,0001 mg/L. Las concentraciones de cobre de 0,19 mg/L dan al agua un color verde y a las ostras un mal sabor característico. Los procesos empleados en la eliminación del sabor y del olor desagradable son los de coagulación, absorción carbónica, ventilación y oxidación con cloro u otros agentes oxidantes.

En el diagrama de la figura 6.1, se presenta la dirección del flujo en una planta de tratamiento de residuos donde se combinan la coagulación química y el tratamiento biológico aeróbico.

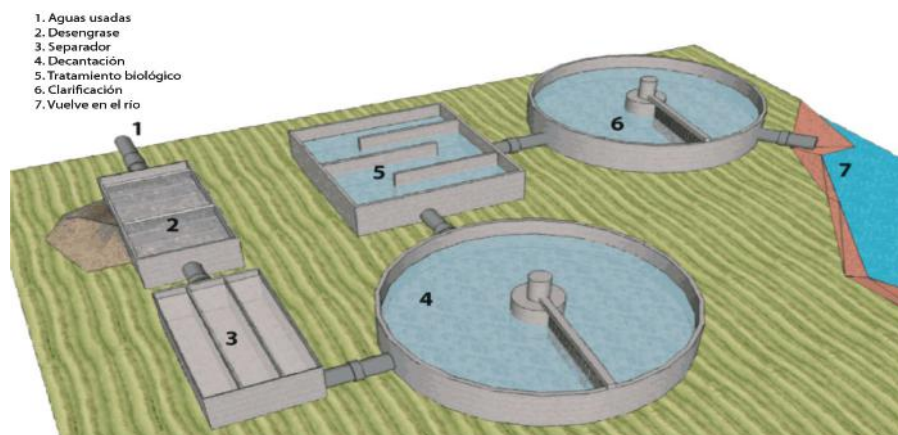


Figura 6.1. Diagrama de la dirección del flujo en una planta de tratamiento de residuos líquidos en la que se combinan la coagulación química y el tratamiento biológico aeróbico.

Fuente: Adaptada por el autor.

• **Turbidez**

Las sustancias orgánicas en suspensión al igual que el barro y algunos microorganismos, causan turbiedad en el agua, para mitigar ello se realizan procesos como la filtración, la coagulación, la sedimentación y la floculación. Cuando se trata de aguas destinadas a la conservación de la vida acuática, la turbidez debida a la descarga de residuos no debe sobrepasar los patrones establecidos.

Factores químicos

A continuación, se dan algunos datos sobre factores medibles que permiten evaluar la contaminación química de origen industrial.

• **pH**

Para poder controlar el pH de líquidos residuales de origen industrial, se deben introducir cambios en las concentraciones de iones hidrógeno, incrementando o disminuyendo su alcalinidad. En referencia con aguas de recreo de contacto directo, se recomienda que el pH esté entre 6,8 y 8,3. En aguas donde se quiere conservar la vida acuática, no es permisible introducir en ellas sustancias que alteren el pH; en ningún momento el pH puede ser inferior a 6,7 o mayor a 8,5.

• **Alcalinidad**

Cualquiera de las técnicas normales para conseguir la neutralización puede ser utilizada si se quiere mantener la alcalinidad dentro de los límites deseados. Los iones de hidróxido, carbonato, bicarbonato

fijan la alcalinidad. Con el fin de mantener el equilibrio químico que permita la conservación de la vida acuática, se recomienda no añadir al agua materias altamente disociadas en cantidades que produzcan un cambio en el pH. No se deben añadir ácidos en cantidad tal que haga descender la alcalinidad total expresada como CaCO_3 a menos de 20 mg/L.

- **Cantidad de sólidos disueltos**

La eliminación de la cantidad total de sólidos en disolución contenidos en las aguas residuales exige unos procedimientos difíciles y en muchos casos, onerosos. Cuando la cantidad total de sólidos en disolución coincide con la presencia de metales pesados o cuando el agua es dura (la dureza de las aguas en general está determinada por el contenido de calcio y magnesia, eventualmente, de aluminio y hierro), la reducción se puede conseguir mediante reacciones de precipitación.

Existen límites máximos de tolerancia, más allá de los cuales los efectos por presencia alta de sólidos disueltos son de tipo osmótico y causan deshidratación en las células de los tejidos.

La cantidad total de sólidos disueltos (CTSD) no debe sobrepasar en más de 1/3 la concentración normal existente en la fuente de donde proviene el agua. Esta última se basa en que los recursos alimenticios de la vida acuática, como por ejemplo, las diatomeas, pueden ser más sensitivas a las sustancias en disolución que los organismos que las consumen. En cuanto a las aguas marinas, se recomienda que los líquidos residuales industriales, no alteren la salinidad de las capas de agua, en más o menos 10% de su variación natural.

El Dragado

El dragado busca mezclar los sedimentos con agua para formar un líquido denso que será posteriormente transportado más fácilmente, por medio de tuberías y depositado en un área preestablecida.

Como un proceso artificial de erosión, transporte y disposición de los sedimentos, el dragado tiene un potencial de producir impactos negativos directa o indirectamente al ambiente de las áreas dragadas y las zonas de descarga del material dragado, generados por la



suspensión de sedimentos contaminados, alterando las condiciones físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas.

Los principales efectos negativos en el agua, generados por las operaciones de dragado son la turbidez, disminución del oxígeno disuelto (OD), la suspensión de sedimentos contaminados, cobertura y/o remoción de los organismos vivos presentes en la zona de dragado.

Uno de los problemas más serios en este tipo de contaminación se debe a que la contaminación antigua de metales pesados como el mercurio en bahías y puertos, puede ser cubierta por sedimentos y quedar inactivo su peligro contaminante original, durante años, hasta que se realicen dragados y con la remoción y suspensión de sedimentos se descubren dichos metales, exponiéndolos nuevamente a la interacción con organismos marinos que pueden ser consumidos por el hombre y presentar consecuencias en generaciones futuras de afectación al sistema nervioso o a las cadenas genéticas, lo cual trae como consecuencia nacimientos con amputaciones por defectos de este tipo.

Sin embargo también cabe señalar el impacto negativo producido por la descarga del material dragado, lo cual puede realizarse en agua o en tierra. La descarga en agua, con mayores restricciones de tipo ambiental, se realiza en áreas confinadas para evitar que sea transportado por efecto del oleaje o las corrientes, generando como consecuencia impactos negativos del mismo tipo de las operaciones de dragado, como se describió anteriormente.

Las plumas de turbidez generadas por sedimentos pesados, intermedios y finos se esparcen con las corrientes y pueden llegar a afectar lugares remotos, si no se ha tenido en cuenta el sitio de fondeo de sedimentos y los efectos que pueden traer sobre el ecosistema debido a la dinámica marina.

La descarga en tierra, deberá realizarse en áreas confinadas al tratarse de dragado que requiere un tratamiento posterior o, en favor de evitar daños ambientales en zonas cercanas. Los impactos negativos en este medio serán el ahogamiento y/o cobertura de la flora y los organismos vivos de la zona, contaminación de suelos por percolación de contaminantes, contaminación de los cursos de aguas superficiales y subterráneas.

- **Amoníaco (NH_3)**

El amoníaco proviene de muchos procesos industriales; se produce en grandes cantidades en la destilación del carbón para obtener gas, coque y otros compuestos utilizados en la fabricación de sustancias químicas que intervienen en los procesos típicos de las industrias textiles y químicas. Los productos residuales consisten principalmente en amoníaco no combinado, en cianuro, en sales de tiocianato y en una variedad de compuestos aromáticos.

El amoníaco se usa en: industria de abonos, petróleo y carbureros, tratamiento de metales, síntesis orgánica, industria del frío, industria textil, insecticidas, tabaco, levaduras, pasta de papel, etcétera. En la práctica, en lo que se refiere a la separación del amoníaco de los líquidos residuales, se adiciona CaCO_3 para descomponer las sales amoniacaes liberando a continuación el NH_3 . Es posible reducir en forma eficaz el amoníaco, mediante tratamiento biológico.

La vida acuática expuesta a niveles de 1 mg/L de NH_3 puede extinguirse por asfixia debido a la escasa capacidad de oxígeno en la sangre para combinarse con este elemento. Para la conservación de la vida acuática, la contaminación causada por el amoníaco debe ser estimada en relación con el organismo más sensitivo que habita en las aguas receptoras y que tiene importancia económica y ecológica.

Así mismo, es necesario determinar las fases de la vida donde ese organismo es más vulnerable al amoníaco y entonces utilizar un factor aplicación de 1/20 en las pruebas con el organismo referencia para determinar la concentración que no es dañina.

La razón de la concentración de un contaminante dada en condiciones determinadas y para un límite de tolerancia media de 96 (LTM) que no se considera dañina se llama factor de aplicación de dicho contaminante. El LTM es una concentración del contaminante que resulta mortal para el 50% de los organismos expuestos a ella durante un período de 96 horas.

- **Arsénico (As)**

El uso y fabricación de herbicidas y pesticidas puede generar contaminación por arsénico. Puede ser también un subproducto de



las operaciones mineras; cuando el arsénico se encuentra presente como un contaminante junto con metales pesados, la precipitación de estos últimos permitirá reducir al arsénico inicial aproximadamente en un 90% (al precipitarse el arsénico forma un compuesto con los iones de los metales pesados).

El arsénico actúa obstaculizando la reproducción celular; los tejidos de muchos organismos acumulan arsénico, por lo tanto, sus efectos dañinos pueden demorarse cuando la concentración de arsénico en el agua es baja, pero a pesar de ello es mortal.

- **Bario (Ba)**

Un precipitado de sulfato de bario puede disminuir la concentración de los iones de sulfato de un organismo y generar un efecto fisiológico dañino.

- **Boro (B)**

Desde el punto de vista industrial, su contaminación se da por el empleo de compuestos sintéticos basados en boro. Este es tóxico para muchos organismos, incluso en concentración de 1 mg/L, mientras que otros organismos toleran niveles por encima de los 15 mg/L. La concentración de ácido bórico por encima de 2 500 mg/L es tolerada por muchos organismos, aunque se ha observado que se producen algunas deficiencias en su crecimiento.

- **Cadmio (Cd)**

Es utilizado para producir aleaciones de aluminio, plata y plomo, de la misma manera, en acabados de metales, fotografía, cerámica la fabricación de pigmentos para pintura, esmaltes y materia plástica, puede ser un subproducto en el funcionamiento de reactores nucleares y se emplean sales de cadmio como insecticidas y como agentes antiparasitarios.

El Cd se separa de las aguas residuales por precipitación del metal en forma de hidróxido. Su influencia decisiva en la vida acuática la acusan los moluscos, en los que no se desarrolla la concha de bivalvos. La toxicidad de cadmio en el hombre está relacionada con graves enfermedades cardiovasculares.

La epidemia de una intoxicación con Cd en el Japón, a consecuencia del consumo de arroz contaminado con desechos de un horno de zinc, atrajo la atención sobre el comportamiento de este elemento en el medio ambiente.

Como resultado de las actividades del hombre, el cadmio penetra en el medio marino tanto a través de la atmósfera como del agua. El contenido de Cd en el agua de mar oscila entre 0,05 mg/L y 0,2 mg/L. La cantidad total de cadmio introducida en los océanos por los ríos durante el ciclo sedimentario principal se ha estimado en $0,5 \times 10^9$ g/año, cantidad menor que la movilizada por el hombre en la atmósfera y en las aguas terrestres.

- **Cloruro (Cl)**

Los residuos de cloruro y de sulfato se relacionan con los sólidos en disolución, el control de los residuos de cloruro se consigue en gran medida en la misma forma que el de la cantidad total de sólidos en disolución. Las concentraciones altas de cloruro pueden derivar de las operaciones que se llevan a cabo en los campos de petróleo o pueden aparecer contenidas en los líquidos residuales industriales de la producción de papel, de la galvanización o de la depuración del agua. Este ión no es tóxico, a no ser que aparezca en concentraciones extremas.

- **Cromo (Cr)**

Los componentes del cromo pueden aparecer en los residuos industriales procedentes de las torres de refrigeración, así como en los residuos de una gran variedad de procesos industriales, tales como los de curtiembres, galvanoplastia, etcétera. En la práctica, la precipitación del cromo se consigue añadiéndole sales solubles de bario. La toxicidad del cromo varía con el pH, la temperatura y el organismo expuesto a su acción.

- **Cobre (Cu)**

El control de los residuos de cobre, de hierro, de plomo, de manganeso y de zinc se lleva a cabo precipitando dichos metales en forma de hidróxido; normalmente el exceso de cobre resulta altamente tóxico para las algas, las plantas marinas y los invertebrados; con



concentraciones de cobre tan bajas como 0,5 mg/L se produce la muerte del 35% de las plantas que hasta entonces vivían en aguas no contaminadas. Las concentraciones de Cu por encima de 0,1 mg/L resultan ser tóxicas para otros. Animales como la langosta presentan alta sensibilidad al cobre.

- **Plomo (Pb)**

Puede aparecer como un contaminante de las aguas subterráneas, ya sea porque éstas lo llevan incorporado desde la propia fuente de donde emanan o porque sea el resultado de que esas aguas subterráneas se hayan mezclado con líquidos residuales de la industria o de la minería. El plomo y sus compuestos minerales intervienen en numerosas operaciones industriales entre otras, las siguientes:

- Metalurgia y fundición de plomo y sus aleaciones
- Aplicación de pinturas, barnices, tintas, etcétera
- Vidriado y decoración de productos cerámicos
- Fabricación y aplicación de esmaltes plumbíferos
- Fabricación de ciertas materias plásticas

El problema principal de la contaminación por plomo se debe al carácter venenoso acumulativo del metal. Existen diferencias considerables en los grados de toxicidad del plomo que dependen de la forma como se presenta este elemento.

- **Fósforo (P)**

Las concentraciones altas de P no natural pueden derivarse de los procesos de transformación industrial de animales y plantas, de producción de fertilizantes o de obtención de otras sustancias químicas. En los procesos de tratamiento, la coagulación puede verse afectada cuando los fosfatos superan los 100 mg/L.

Otra consecuencia de las concentraciones elevadas de fósforo es que pueden ocasionar la disminución de oxígeno contenido en un cuerpo de agua; ello se debe a que se necesitan 160 mg de O₂ para oxidar completamente un mg de fósforo contenido en una fuente orgánica.

- **Zinc (Zn)**

Los líquidos residuales que contienen Zn pueden ser el resultado de operaciones de elaboración primaria de metales y de sustancias químicas, entre otras. Existe relación entre la concentración de Zn, el oxígeno en disolución, la temperatura, el pH y las concentraciones de calcio y manganeso.

Para cualquier organismo sensible dado, una concentración de 1/100 de LTM (límite de tolerancia media) de 96 horas se considera como un nivel en el que no existe peligro. Normalmente se encuentra zinc en las aguas marinas en una concentración de 0,01 mg/L. La vida marina puede contener zinc en concentraciones hasta de 1,5 mg/L.

- **Nitratos (NO_3) y Nitritos (NO_2)**

Las concentraciones permisibles están cerca de 10 mg/L como el nitrógeno. En cuanto al nitrito, reacciona con el oxígeno de la sangre, portador de pigmentos y de hemoglobina, produciendo un compuesto que dificulta la conducción del oxígeno y puede producir efectos fisiológicos muy graves.

- **Sulfato (SO_4) y Sulfito (SO_3)**

Los sulfuros (S^{-2}), y los productos que resultan por su oxidación, los sulfatos (SO_4) y sulfitos (SO_3), se encuentran en el agua como resultado de procesos naturales y como subproductos de las refinerías de petróleo, de las fábricas de celulosa y de papel, de las industrias textiles, de las químicas y de las operaciones de transformación de gas.

Las concentraciones comprendidas entre menos de 1 y 25 mg/L de sulfuros pueden ser mortales en el plazo de uno a tres días para una gran variedad de peces.

Sustancias químicas orgánicas

- **Cianuro (CN^-)**

Los cianuros que se presentan en forma de ácido cianhídrico y sus sales son sustancias industriales importantes. Son tóxicos en extremo, en especial cuando el pH es bajo.



Se cree que el cianuro actúa impidiendo las reacciones de oxidación del fósforo, que son quienes permiten la respiración celular de muchos peces y animales inferiores. Parecen ser capaces de convertir el cianuro, en ión de tiocianato, que no impide la actividad respiratoria de las enzimas. Los compuestos cianúricos que se forman por la reacción del cianuro con metales pesados pueden ser incluso sustancias más tóxicas. Por estas razones, el control del cianuro contenido en las aguas residuales industriales es decisivo.

La separación del cianuro de las aguas industriales se realiza con frecuencia mediante la aplicación gradual de cianuro y cloro, que progresivamente oxidan los cianuros, convirtiéndolos en cianatos y a continuación en dióxido de carbono y en nitrógeno.

Si lo que se pretende es conservar la vida acuática, la cantidad de cianuro será calculada mediante un análisis biológico del agua, prestando atención al oxígeno en disolución, a la temperatura y al pH más frecuente.

- **Aceites y grasas**

La contaminación por aceites y grasas puede ser ocasionada por el agua contenida en sentinas o en las cámaras de lastre, los residuos procedentes de las refinerías y de la lubricación de la maquinaria de las plantas industriales, los procesos de transformación del sebo, las plantas de laminado, entre otros.

Según Valls y Sanz, no debe haber ni aceites ni grasa en los líquidos residuales industriales, aunque se permiten en cantidades mínimas, pero es preferible su total ausencia. Incluso cantidades mínimas comunican al agua un olor y sabor desagradable y dejan marcas en las instalaciones de tratamiento del agua, en las piscinas, en los depósitos de agua, en los embalses, etcétera.

En Colombia, en la bahía de Santa Marta y Taganga, el 23 de abril de 2008, se presentó un accidente en el que se derramaron 90 toneladas de aceite de palma al mar. Al no existir experiencia previa registrada en el país sobre este tipo de derrames y muy poca información científica disponible, sobre estos, inicialmente se consideró que por tratarse de un producto natural, el medio ambiente reaccionaría favorablemente y las consecuencias ambientales no iban a ser muy graves, sin embargo,

mientras el aceite estaba en la superficie, disminuyó el intercambio de oxígeno del océano con la atmósfera y a medida que se emulsionó, penetró al fondo marino, causando daños en corales y otros fondos al cubrirlos con una capa sedimentaria que no se disolvía fácilmente y que por lo tanto, asfixió los organismos bentónicos de la zona (Figura 6.2).



Figura 6.2. Derrame de aceite de palma en la Bahía de Taganga - Playa Grande, Santa Marta, Colombia. Abril de 2008.
Fuente: Cortesía INVEMAR.

Los aceites recubren los filamentos de las branquias de los peces, produciéndoles asfixia aún en bajas concentraciones. Algunos aceites crudos contienen una preparación que es soluble en el agua y que resulta altamente tóxica para los peces. El aceite y las grasas pueden recubrir también a las algas y causar su muerte, y lo mismo puede



hacer con el plancton y los organismos que viven en los fondos marinos. Las películas de aceite pueden dificultar la aireación y la fotosíntesis y destruir la vida de los insectos acuáticos. Cangrejos de 38 gramos mueren en un lapso de 18 a 60 horas, cuando se producen concentraciones de aceite de 5 a 50 mg/L; algo parecido ocurre en otros pequeños organismos marinos.

El aceite afecta a las aves marinas y otras especies de vida acuática; reduce el desove y la incubación de estos e incluso destruye los compuestos normales que facilitan la impermeabilidad al agua de las plumas y la piel.

Los efectos de la contaminación del aceite se deben en gran medida a los naufragios de los buques petroleros, ejemplo: el hundimiento del buque tanquero Torrey Canyon (1969) en el Canal de la Mancha; la exploración de los pozos exploratorios Ixtoci (1979) en la bahía Campeche, el hundimiento del tanquero Saint Peter en la costa sur del Pacífico colombiano. En la figura 6.3 se presenta uno de los sistemas empleados para la eliminación de aceites.

• **Demanda Biológica de Oxígeno**

La demanda biológica de oxígeno (DBO) del agua es la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para estabilizar la sustancia degradada en el agua, es decir, es una cantidad de oxígeno relacionada con la proporción de residuos presentes. La existencia de esa cantidad adecuada de oxígeno en disolución es una de los requisitos principales para el mantenimiento de la vida acuática.

También es un elemento a tener en cuenta en la corrosividad y la actividad fotosintética que se produce en el agua.

Los problemas serios pueden surgir cuando las aguas residuales industriales con una demanda biológica de oxígeno (DBO) alta entran en la planta municipal de residuos. La obstrucción debida a la corrosión de los sistemas de alcantarillado y sobrecarga hidráulica del equipo y las cámaras para el tratamiento de las aguas negras constituyen algunos de los problemas. Los residuos industriales pueden reducir la eficacia de los tanques de sedimentación y separación de los sólidos y pueden plantear también problemas de suciedad, debido al aceite y a las grasas que contienen.

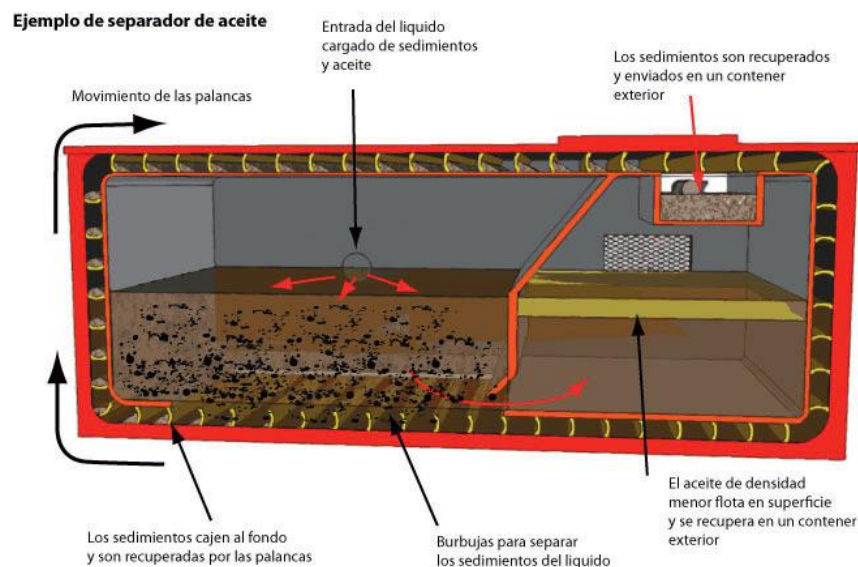


Figura 6.3. Ejemplo de tratamiento para recuperación del aceite.
Fuente: Adaptada por el autor.

Además de estas dificultades que tienen origen mecánico, ciertos residuos industriales tóxicos destruyen a los organismos microbiológicos que son los necesarios para la degradación de los desechos. La DBO, medida de los desechos domésticos, oscila entre 100 y 300 mg/L. Las corrientes receptoras de los residuos industriales no deben tener un DBO superior a los 100 mg/L.

En la tabla 6.2 se incluyen los valores de DBO de los residuos industriales típicos con unidades de producción para cada industria, escogidas arbitrariamente.

Tabla 6.2. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de residuos industriales típicos. Fuente: Adaptada por el autor.

Industria	Unidades producidas	DBO mg/L por unidad producida
Envasado de alimentos	Un cerdo	1 048
Leche	1 libra de leche cruda	570
Agua utilizada en el proceso de obtención del azúcar de remolacha	Tonelada bruta de remolacha	1 230
Cervecería	Bbl de cerveza	1 000
Fábricas de papel	Tonelada de papel	300
Fábricas de pulpa (sulfito)	Tonelada de pulpa	443
Curtido (vegetales)	100 libras de cuero	1 200
Lavandería	100 libras de vestidos	320
Refinerías de petróleo	Bbl de crudo	20



La demanda química de oxígeno (DQO) es una parte de la DBO y puede ser determinada independientemente en un experimento para el que únicamente se requiere una muestra de agua y la intervención de un agente oxidante, el bicromato potásico. La determinación de DBO es ya un índice importante de la contaminación industrial provocada al arrojar la materia orgánica, principal componente de los residuos industriales.

Los factores principales que determinan que una corriente residual tenga una DBO elevada son:

1. La materia orgánica carbónica, normalmente degradada por la acción de los microorganismos aerobios, es el componente más importante de las aguas residuales, si no el único, que necesita oxígeno.
2. Nitrógeno oxidable en forma orgánica o inorgánica.
3. Ciertos compuestos químicos reductores, tales como los ferrosos, los sulfitos y los sulfatos.

La actividad industrial, en especial la industria productora de pulpa de papel, productora de alimentos, la industria química de colorantes y pinturas, la industria de curtiembres (temas tratados en esta lección) originan, como se ha visto, gran diversidad de productos de desecho que se descargan, en aguas corrientes que van al mar o, directamente a él.

Algunas de las consecuencias y efectos biológicos de los contaminantes residuales son evidentes en la vida marina, mientras que de otras no se tienen datos claros respecto a cómo actúan en cantidad, ni cuáles son sus efectos en el medio abiótico; en general, los sistemas de contaminación son evidentes incluso para el observador más casual.

Una masa de agua se califica como contaminada cuando la concentración de oxígeno disuelto (OD) desciende por debajo del nivel necesario para mantener una biota normal; la desoxigenación de las aguas se debe a la presencia de los residuos que enumeramos anteriormente; estos son degradados por la acción de bacterias en presencia de O_2 , el cual se agota rápidamente durante estos procesos produciendo olores desagradables. Por lo tanto, es importante calcular y controlar la cantidad de sustancias residuales en una masa determinada. La cantidad de O_2 disuelto deseable está entre 4 y 6 ml/L.

Una DBO de 1 ppm es característica del agua casi pura. Para el caso de las costas colombianas, en la tabla 6.3 se cuantifica el número de fuentes domésticas de contaminación y su respectiva DBO.

Tabla 6.3. Cargas aportadas por los vertimientos domésticos de asentamientos humanos costeros a las cuencas marítimas colombianas durante el 2001. Fuente: Invemar, 2001. Fuente población: Proyecciones DANE 2001; fuente caudales: Metroagua, Triple A, Acuacar, Cardique, Damarena, CRA. Fuente: INVEMAR. Proyecto MMA-FONAM- BID 2001.

CARIBE		
Población (habitantes)	3'073 483	
Caudal (m³/día)	472 653	
Demanda biológica de oxígeno (Ton/día)	151,23	
Sólidos en suspensión (Ton/día)	91,62	
Aceites y grasas (Ton/día)	59,15	
Nitrógeno total (Ton/día)	31,1	
Fosfatos (Ton/día)	5,62	
Detergentes (Ton/día)	1,08	
Coliformes fecales (NMP/día)	7,26 E+19	
PACÍFICO		
Población (Habitantes)	374 631	
Caudal (m³/día)	87 211	
Demanda biológica de oxígeno (Ton/día)	16,52	
Sólidos en suspensión (Ton/día)	10,7	
Aceites y grasas (Ton/día)	7,43	
Nitrógeno total (Ton/día)	2,97	
Fosfatos (Ton/día)	0,59	
Detergentes (Ton/día)	0,21	
Coliformes fecales (NMP/día)	6,35+18	
CARIBE INSULAR		
	ISLA DE SAN ANDRÉS	ISLA DE PROVIDENCIA
Población (habitantes)	62 446	3 500
Caudal (m³/día)	14 466	735
DBO (ton/día)	3,23	0,08
SST (ton/día)	1,91	0,07
Aceites y grasas (ton/día)	1,45	0,04
NiT (ton/día)	0,58	0,02
Fosfatos (ton/día)	0,12	0,003
Coliformes fecales (NMP/día)	1,49E+18	9,2E+14
Detergentes (ton/día)	0,03	0,0002



6.3. CONTAMINACIÓN POR PLAGUICIDAS

Los plaguicidas constituyen una clase importante de contaminantes marinos, pues incluyen una amplia diversidad de sustancias y distintas composiciones químicas que afectan a organismos de diferentes órdenes; como por ejemplo, los compuestos orgánicos clorados, dicloro fenil tricloroetano (DDT), los compuestos bifenil policlorados (BPC), sustancias orgánicas fosfatadas, compuesto de carbonato y otros que llegan al mar a través de los sistemas fluviales cuando se producen inundaciones. Tal como sucede con la mayor parte de los contaminantes de tierra, grandes cantidades de ellos van al mar.

La mayoría de los plaguicidas químicos son sintéticos y son sustancias químicas persistentes.

Los DDT, BPC, dieldrin, endrin, aldrin, endosulfan, son los de empleo más corriente como insecticidas en la agricultura y en la lucha contra las plagas. El medio más común de aplicación suele ser la fumigación aérea a gran escala, llegando al mar por lo menos el 50% de la sustancia, por acción de las corrientes de aire.

Una vez en el mar, tales plaguicidas pueden concentrarse en los organismos marinos o formar manchas superficiales. Los hidrocarburos clorados no se metabolizan fácilmente, sino que se acumulan y se disuelven en los tejidos grasos; en el hombre, esta acumulación puede originar trastornos hepáticos y nerviosos; los plaguicidas tienen fuerte tendencia a la acumulación en cualquier material aceitoso, incluyendo los aceites de pescado, por su característica hidrofílico-lipofílico, encontrándose concentrados en muchos organismos marinos de alto contenido de lípidos.

Se ha establecido que por sí solas, las ostras incrementan 70 000 veces en un mes la concentración de DDT. Los científicos concuerdan en que estas sustancias orgánicas cloradas desorganizan la transmisión de impulsos al sistema nervioso central. Se han detectado efectos sub laterales en la deposición del calcio en los huevos de aves. Determinadas concentraciones resultan tóxicas a muchos organismos marinos; concentraciones en aguas de mar de sólo 0,003 ppm han resultado mortales para el camarón.

Entre los plaguicidas se considera que los principales contaminantes marinos son los siguientes:

1. Orgánico-clorados

En ciertas aguas de estuarios, se ha comprobado que causan mortandad de peces y mariscos; un estudio demostró que un pantano tratado con 90 g de DDT en menos de una hectárea, ocasionó la muerte de 98% de los organismos en un lapso de tres semanas.

2. Compuestos bifenilpoliclorados

En general, su toxicidad es baja, pero existen ciertas pruebas de que poseen alta toxicidad crónica. Tal como el DDT, intervienen en el adelgazamiento de las cáscaras de los huevos de las aves marinas. En el hombre, la exposición continua a estos compuestos tiene efectos letales.

3. Sustancias orgánicas fosfatadas

Poseen la capacidad de inhibir la colinesteraza, enzima esencial para el funcionamiento normal del sistema nervioso. Los músculos del pez presentan un nivel de colinesteraza superior al de la mayor parte de otras especies. Las soluciones orgánicas fosfatadas son relativamente solubles en agua y se hidrolizan lentamente; se las encuentra en estuario donde se ha medido su toxicidad aguda en los organismos. El peligro que ofrecen reside en la destrucción a gran escala de organismos recién nacidos en el ecosistema estuarino.

4. Compuestos de carbonato

Se hallan sobre todo en el sedimento de los estuarios después de su empleo local en tierra, como carbaril que reemplaza en muchas ocasiones al DDT. Los carbonatos también inhiben la colinesterasa y otras actividades enzimáticas. El carbaril es moderadamente tóxico para los crustáceos.

El criterio permisivo respecto de la cantidad de pesticidas y herbicidas que puede contener el agua de suministro público, así como el criterio de deseabilidad, varían según los componentes específicos de cada pesticida y de cada herbicida. Ambos son recogidos en la Tabla 6.4.



Tabla 6.4. Criterios corrientes sobre algunos pesticidas y herbicidas contenidos en el agua de suministro público. Fuente: Adaptada por el autor.

Compuesto	Criterio sobre cantidad permisible en mg/l	Criterio sobre cantidad deseable
1,2,3,4,10,10-hexacloro-1,4,4a,5,8,8a-hexahidro-1,4,5,8-dimetanonaplateno (aldril)	0,017	Ausente
1,2,4,5,6,7,8,8-octocloro-3 ^a ,4,7,7a-tetrahidro-4,7-metanoindano (clordano)	0,003	Ausente
1,1,1-tricloro-2,2-bis (paraclorofenil) etano (DDT)	0,042	Ausente
1,2,3,4,10,10-hexacloro-6,7-epoxi-1,4,4 ^a ,5,6,7,8,8a endoexo-octahidro-1,4,5,8-dimetanonaptaleno (dieldrin)	0,017	Ausente
Lo mismo que la anterior excepto endo -endo (endrin)	0,01	Ausente
1,2,3,4,5,6-hexadichlorohexano (lindano)	0,056	Ausente
1(o 3a),4,5,6,7,8,8-heptacloro-3a,4,7,7a, tetrahidro-4,7-metanoindano (heptacloro)	0,018	Ausente
1,1,1-tricloro-2,2-bis(parametoxifenil) etano (metoxicloro)	0,035	Ausente
Fosfatos orgánicos más carbonatados 2,4 D más 2,4,5-TD (herbicidas)	0,1	Ausente

6.4. METALES PESADOS: PLOMO Y MERCURIO

Los metales pesados son aquellos que tienen un número atómico mayor a 5 y pertenecen a los elementos del grupo de transición; entre ellos tenemos el mercurio, el plomo, el cobre, zinc, níquel.

Las sales de metales pesados son solubles en agua; esas soluciones son estables y tienden a persistir por largo tiempo; muchas son altamente tóxicas por los organismos que las acumulan y concentran. La presencia de pequeñas cantidades de cualquier metal puede afectar a diversos tipos de vida, por ejemplo: la almeja, la ostra y el mejillón acumulan y concentran gran cantidad de elementos como Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, entre otros.

Entre las fuentes primarias de contaminación al medio marino por metales pesados figura su empleo en cultivos como plaguicidas, germicidas o fungicidas y en fábricas de elaboración de metales, las industrias de electricidad y de productos químicos y farmacéuticos.

- **Mercurio (Hg)**

Entre los metales pesados tóxicos, es el contaminante ambiental quien presenta mayores riesgos, pues sus efectos deletéreos son permanentes. Los principales compuestos de Hg empleados en la industria son los siguientes: óxidos, bromuros, cloruros, yoduros, nitratos y oxicianuros.

Se sabe que absorbido y acumulado a través de la red de alimentos, este puede envenenar a peces y aves además de otros organismos, y afecta también al hombre.

Varios estudios han revelado que el mercurio posee sobre la vida marina, y sobre quienes la consumen o se alimentan de ella, efectos tóxicos teratogénicos y genéticos. Funestas consecuencias han sido evidenciadas de los efectos del mercurio cuando contamina las aguas. El mercurio inorgánico (sal mercurial), utilizado en una fábrica de acetaldehído situada en la bahía de Minimata en Japón, vertido en las aguas de la bahía, se transformó en metilmercurio y penetró en el medio. Los peces y mariscos de la bahía contaminaron y los habitantes de la zona que ingirieron estos alimentos sufrieron una fuerte intoxicación mercurial, con efectos muy graves. El contaminante mercurial había recorrido toda la cadena alimenticia: fitoplancton, zooplancton y finalmente se encontró en moluscos, crustáceos, y peces que fueron consumidos por el hombre.

El mercurio provenía de la sal mercurial residual de plantas industriales que emplean cloruro de mercurio como catalizador en la producción de cloruro de vinilo y acetaldehído.

En la bahía de Cartagena, se produjo entre 1976 - 1977 una situación alarmante por contaminación con mercurio.

La producción anual de Hg, en su mayor parte, es consumida por la industria, pero se registra una pérdida significativa contaminante. Esta se abre camino hacia el medio marino por ríos y la atmósfera.



Entre otros usos del mercurio, se cuenta la fabricación de baterías y pinturas de alta eficiencia para proteger cascos de barcos. Otra fuente importante consiste en la combustión de petróleos y carbones que lo contienen en bajas concentraciones, las cuales llegan al mar por la atmósfera precipitadas por la lluvia. También se han empleado diversos compuestos mercuriales orgánicos en agricultura y horticultura, para combatir enfermedades causadas por hongos y en la industria papelera.

El máximo nivel tolerable de mercurio en la comida humana, incluso el pescado, se ha establecido en 0,5 ppm.

En el medio ambiente, la química del mercurio puede entenderse fácilmente en la función de sus propiedades físicas y químicas. El Hg elemental y muchos de sus compuestos, como los sulfuros y los óxidos, son sumamente insolubles. El mercurio puede ser metilado por muchos microorganismos; estas formas orgánicas son mucho más tóxicas para el hombre que los compuestos inorgánicos del mercurio. Por el contrario, el plomo y el cadmio son metilados.

Posiblemente el Hg se encuentra en el agua de mar en forma de complejos clorados, tales como HgCl_4 ó HgCl_2 con tipos de residencias muy largos. La determinación de Hg se debe llevar a cabo en los sedimentos, agua y organismo que se encuentran cerca de los puntos de descarga.

• **Plomo (Pb)**

La incorporación del plomo al medio marino como consecuencia de la actividad humana ha superado ya la causada por procesos naturales. Más del 10% del total se emplea en compuestos de plomo que se agregan a la nafta y otros combustibles para motores, donde obra como antidetonante.

No se sabe con exactitud cómo llega la contaminación industrial por plomo hasta los océanos por vía fluvial. La extracción de cieno en las plantas de tratamiento de residuos cloacales elimina gran parte del plomo industrial en los residuos, pero la salida de las aguas lluvia de las zonas pavimentadas, los edificios y el follaje de los árboles en las ciudades costeras no sigue dicho proceso y aporta cantidades importantes. Las concentraciones de contaminantes industriales en los

ríos son hoy tan excesivas, que el intercambio entre formas particulares y disueltas es una fuente importante de grandes cantidades de plomo disuelto, aun cuando la principal parte es absorbida bajo forma de sólidos.

Más de un tercera parte de la producción de plomo es utilizada en las baterías para automóviles y puede ser reincorporada sin mayor pérdida al ciclo industrial.

El plomo se concentra en las capas superficiales de los sedimentos próximos a la costa en cantidades mayores que en las capas siguientes y persiste allí durante más tiempo. Al parecer no hay datos sobre casos concretos de envenenamiento humano por ingestión de productos marinos; sin embargo, el rápido aumento de los niveles de plomo en el medio marino es preocupante. El plomo es altamente tóxico; se acumula en los organismos marinos y puede obrar como inhibidor de enzimas y/o deteriorar el metabolismo celular. Una exposición larga puede inhibir la transferencia de oxígeno y dióxido de carbono.

6.5. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS

De todos los contaminantes marinos, el petróleo y los hidrocarburos son los que han recibido mayor atención internacional en la política y en lo científico. Se considera que de todas las sustancias extrañas que entran en las aguas costeras, el petróleo es la más destructiva para la vida acuática. Además de todas las sustancias que contaminan en forma persistente el medio marino, el petróleo es la que más abunda.

Los hidrocarburos penetran en el medio marino por filtraciones submarinas naturales, actividades costeras industriales y de transporte, perforaciones frente a las costas, barcos petroleros naufragados y emisiones desde navíos que bombean su carga al exterior y lastran sus tanques con agua de mar. Del petróleo crudo se deriva la mayor parte de la contaminación por hidrocarburos, debido a la actividad humana, aunque también se han derramado otros combustibles pesados, como el llamado *fuel oil*, en grandes cantidades.

Cálculos recientes establecen que por año entran en el océano aproximadamente dos millones de toneladas de petróleo por efecto de la navegación, las perforaciones y los accidentes. Estas descargas de petróleo no se distribuyen de manera uniforme en el agua del mar.



Los efectos inmediatos y a corto plazo de esta contaminación son obvios y bien conocidos. Las playas utilizadas para recreación y contaminadas por petróleo quedan inutilizadas y sufren a menudo una rápida erosión; hay pruebas del daño causado a las aves marinas y algunos mamíferos marinos. Se calcula que cerca de 7 000 aves que fueron recogidas con vida de las manchas flotantes de petróleo ocasionadas por el desastre del Torrey Canyon (1967) sobrevivieron menos de 100.

La demanda biológica de oxígeno del petróleo es bastante alta. Por esta causa, las aguas que se contaminan por el petróleo sufren la disminución de oxígeno disuelto esencial para la vida marina. En su mayor parte, los petróleos son disociados por acción bacteriana, pero el régimen de destrucción varía de acuerdo con la cantidad índole de los microorganismos, con la disponibilidad de oxígeno y con la temperatura y forma de dispersión en el océano. Por debajo de 10°C, por ejemplo, la oxidación bacteriana es muy lenta; el petróleo derramado en las regiones árticas puede perdurar hasta 50 años.

En regiones donde la contaminación constituye un serio problema, están desapareciendo grandes poblaciones de invertebrados, como el calamar, y millones de peces y mamíferos marinos. En la tabla 6.5 se presentan datos sobre derrames de hidrocarburos ocurridos entre 1979 y 2009 en todo el mundo.

Tabla 6.5. Causa de los derrames de hidrocarburos en los últimos 30 años (1979-2009). Fuente: *International Tanker Owners Pollution Federation* (ITOPF)

Causas	Menores de 7tn.	Entre 7 y 700tn.	Más de 700tn.	Total
Operacionales				
Carga y descarga	3 155	383	36	3 574
En tareas de abastecimiento	560	32	0	593
Otras operaciones	1 221	62	5	1 305
Accidentes				
Fuego o explosión	87	33	32	152
Otras operaciones	1 221	62	5	1 305
Fallos en el equipamiento	206	39	4	249
Fallos en el casco	205	39	4	249
Hundimiento	236	265	161	662
Colisiones	176	334	129	640
Otras/Desconocidas	1 983	44	22	2 049
Totales	7 829	1 249	444	9 522

6.5.1. Propagación de los hidrocarburos en el agua

Cuando se vierte un hidrocarburo muy refinado en una superficie limpia, su velocidad de propagación dependerá de la temperatura del aire, del agua, de los vientos y las corrientes marinas, así como el tipo de hidrocarburo. El espesor de las manchas ocasionadas está entre 0,5 y 0,3 micras. Contribuyen a su propagación las tensiones activas. Si la superficie del agua está contaminada, el espesor puede llegar a una micra.

En el agua de mar limpia, el hidrocarburo puede extenderse rápidamente formando una mancha circular; cuando se derraman grandes cantidades de hidrocarburos se forma una emulsión de agua en petróleo más viscosa, si hay oleajes fuertes. Al aumentar la viscosidad disminuye la velocidad de propagación y las manchas forman islas. En una mancha de hidrocarburos, la evaporación conlleva a la desaparición de hasta el 50% de los crudos derramados que pueden volatilizarse fácilmente.

Procedimientos para recoger el petróleo

La mejor manera de controlar un derrame es recogerlo directamente. La mayor parte de los equipos existentes para tales fines sólo se pueden usar en aguas tranquilas y resguardadas. Se requiere de buques grandes, estables, bien equipados y de tripulación adiestrada. Cuando no se pueden retirar los hidrocarburos mediante equipos de recogida mecánica, hay que optar por una de las soluciones siguientes:

1. No tomar disposición alguna para que los hidrocarburos se evaporen, se dispersen o se diluyan.
2. Combatir los hidrocarburos con dispersantes químicos para contrarrestar por lo menos algunos efectos contaminantes. Para evitar la dispersión, con frecuencia se utilizan barreras (obstáculos flotantes), se succiona la mancha o se agregan algunos materiales absorbentes, por ejemplo: icopor.
3. Disponer de una playa de sacrificio para conducir hacia éste lugar los contaminantes y recogerlos con el menor riesgo.

6.5.2. Desastre del Deepwater Horizon en el Golfo de México

Según artículos vía web y de prensa como *'The New York Times'* se toma que Deepwater Horizon era una plataforma petrolífera semi sumergible de posicionamiento dinámico de aguas ultra profundas construida en el 2001. El propósito de la torre era perforar pozos petrolíferos en el subsuelo marino, trasladándose de un lugar a otro, conforme se requiriera. Una vez que se terminaba de perforar, la extracción era realizada por otro equipo.

La torre tenía 121 m de largo y 78 m de ancho. Podía operar en aguas de hasta 2 400 m de profundidad, y tenía una profundidad máxima de perforación de 9 100 m. Deepwater Horizon era propiedad de Trans ocean y había sido arrendada a British Petroleum (BP) hasta septiembre de 2013. En septiembre de 2009, perforó el pozo petrolero más profundo de la historia.

La torre estaba en el Golfo de México en la fase final de la perforación de un pozo, la cual se refuerza con hormigón. Este es un proceso delicado, ya que existe la posibilidad de que los fluidos del pozo sean liberados descontroladamente.

El 20 de abril de 2010, una explosión tuvo lugar en la torre, provocando un incendio. Varios barcos de apoyo lanzaron agua a la torre en un infructuoso intento de extinguir las llamas (Figura 6.4).



Figura 6.4. Incendio a bordo de la plataforma Deepwater Horizon, Golfo de México, Abril de 2010.

Fuente: Agencia EFE 2010

Según la Cámara de diputados de México, el Deepwater Horizon se hundió el 22 de abril de 2010, a una profundidad aproximada de 1 500 m. Sus restos se encontraron en el lecho marino desplazados aproximadamente 400 m al noroeste del lugar donde se ubicaba el pozo.

El incontrolado derrame de petróleo, mezclado con una pequeña parte de metano, provocado por la dificultad de sellar varias fugas en las tuberías del fondo marino amenazó el hábitat de cientos de especies marinas y de aves.

La información oficial que se puede obtener sobre este accidente aun no son públicas en su amplia mayoría, por lo tanto debieron ser extractadas de diversos informes de prensa y otras fuentes no oficiales.

Las cifras del derrame son dispares y dependen de las fuentes; estarían entre las 680 y las 11 600 toneladas diarias (1 barril de crudo estadounidense tiene 158 987 litros y su peso está entre los 119 y 151 kg). Desde el inicio del derrame hasta el 15 de junio de 2010 (casi 2 meses después), las cifras del derrame acumuladas alcanzarían las 228 000 toneladas. Según datos de los Estados Unidos, el pozo de BP vertió 780 millones de litros, con un margen de error del 20%, es decir, unos 8,9 millones de litros al día.

Debido a la posición de la plataforma en el Golfo de México, el daño pudo extenderse por una zona extremadamente amplia. Las primeras afectaciones ocasionadas por el derrame se localizaron en las marismas de la desembocadura y el delta del Mississippi, con la aparición de tortugas, delfines y varias especies de aves marinas muertas. Los perjuicios al negocio de la pesca y el camarón en el área de Luisiana se estiman en cifras millonarias. Los frágiles ecosistemas de pantanos, con una variada población animal y vegetal se vieron perjudicados, especies como el manatí, fueron las más afectadas. Los daños previstos al sector turístico de playas de Florida y Cuba, son también considerables.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) determinó que los químicos diluyentes usados por BP (2,5 millones de litros del dispersante Corexit que fueron vertidos durante el primer mes) no son seguros para la fauna marina, ya que pueden bio acumularse en los tejidos de los organismos.



El petróleo vertido al Golfo de México afectó a más de 944 km de litoral. Los estados más afectados fueron Luisiana (540 km de litoral), Mississippi (180 km), Florida (114 km) y Alabama (110 km). El impacto ecológico y socioeconómico de esta catástrofe medioambiental aún no ha sido del todo cuantificado, pero se dice que este es uno de los peores eventos de contaminación ocurrido en la historia de la exploración de hidrocarburos en mar abierto.

Es posible que por muchos años o incluso décadas no se conozca la extensión de los daños a los ecosistemas marinos y costeros causados por el Deepwater Horizon.

6.6. OTROS TIPOS DE CONTAMINACIÓN MARINA

6.6.1. Contaminación por energía térmica

La contaminación térmica, causada por el aumento de la temperatura de las aguas en los ambientes costeros, se asocia principalmente a la actividad de centrales termoeléctricas. Por lo general este tipo de procesos, indiferente al tipo de combustible que utilice (petróleo, gas, carbón), se rigen bajo el mismo esquema: un sistema de agua cerrado, convierte el estado líquido a vapor, y es esa energía de expansión la que se aprovecha para mover una turbina y a su vez generar electricidad.

Con el fin de reiniciar la actividad, el vapor de agua debe ser condensado. Para ello las usinas termoeléctricas tienen condensadores, las cuales se enfrían utilizando generalmente agua de un río, o del mar, por lo que se localizan próximas a un cauce de agua dulce o en regiones costeras. Es decir, agua de un ambiente natural, es pasada a través de los condensadores y vertida posteriormente en su ambiente natural, dicha agua regresa varios grados por encima de la temperatura original al medio. Dicha diferencia de temperatura constituye una contaminación térmica.

El calentamiento de las aguas costeras puede tener efectos muy pronunciados sobre la biota marina, y por ejemplo, en ambientes tropicales y subtropicales, muchos organismos ya se encuentran cercanos a su límite de tolerancia térmica, y el recalentamiento de su hábitat los perjudicaría irreversiblemente. Es el caso de la fanerógama

marina *Thalassia testudinum*, cuya tasa de crecimiento disminuye rápidamente con temperaturas mayores a 32°C, y a los 35°C ya no se reproduce.

Además de los efectos provocados por el aumento de la temperatura de las aguas costeras, las centrales termoeléctricas implican otras consecuencias. En el agua succionada para pasar a través de los condensadores, habitan una cantidad de organismos del fito y del zooplancton, como huevos y larvas de moluscos, crustáceos y peces. Estos son arrasados por la presión a la que el agua circula por los tubos de intercambio calórico, por las diferencias de temperatura, y por las sustancias químicas y biocidas (generalmente sulfato ferroso e hipoclorito de sodio), empleadas para prevenir la corrosión en los condensadores y la incrustación de organismos de resistencia extrema, en el sistema de enfriamiento. Aparte del efecto sobre las poblaciones de importancia ecológica y económica, un resultado es la superabundancia y acumulación, en aguas costeras, de detritos orgánicos provenientes de ese exterminio, lo que puede llegar a cambiar la composición faunística del lugar.

6.6.2. Aguas de lastre

El lastre se emplea para garantizar la estabilidad de los buques. Inicialmente se empleaban rocas o metales para lastrar las naves pero actualmente se utiliza el agua de mar. De esta manera cuando el buque navega sin carga, se lastra con agua de mar y para recibir la carga, lógicamente debe deslastrase, transportando no solo el agua marina entre uno y otro lugar del mundo, sino llevando también organismos que no se encuentran adaptados a los nuevos ambientes o para los que los nuevos ambientes no están preparados para recibir.

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas señala que las estimaciones indican que el agua y los sedimentos de lastre son probablemente el vector más importante de movimientos transoceánicos e interoceánicos de organismos marinos y costeros de aguas poco profundas, de manera que cada año se calcula que en todo el mundo se transfieren de 3 a 5 billones de toneladas de agua de lastre, y que 7 000 especies de bacterias, virus, plantas y animales son trasladadas en el agua de lastre de los buques alrededor del mundo.



En muchos casos, algunas de las especies introducidas en nuevos ambientes se convierten en exóticas invasoras, puesto que son introducidas a un nuevo hábitat, en el cual se establecen e inducen cambios y amenazan a la biodiversidad biológica nativa del lugar ocupado. Además persisten, proliferan y se extienden más allá de determinados límites.

Dentro de los efectos de estas especies invasoras, se ha identificado la amenaza a la vida de las personas (por agentes patógenos, como el *Vibrio cholerae*), la pérdida de flora y fauna nativa por la competencia de alimento y ocupación del lugar (el alga *Caulerpa taxifolia* en el mar Mediterráneo ha ocupado más de 3 000 hectáreas incluyendo las costa de Francia y generando la substitución de especies de algas nativas, limitando el hábitat de las larvas de peces e invertebrados) y por los daños económicos causados a infraestructuras portuarias, canales de navegación, redes eléctricas, entre otros.

Entre los polizones más problemáticos que pueden introducirse con las aguas de lastre figuran los dinoflagelados planctónicos que pueden vivir tanto en aguas dulces como saladas. En algunos casos, estos organismos producen potentes toxinas que afectan la salud humana. Son también los responsables de las mareas rojas. Estas toxinas de los dinoflagelados se acumulan en peces y moluscos, con el consabido efecto sobre toda la cadena trófica.

Por otro lado, el instituto de ingeniería naval señala que una plaga de dinoflagelados puede provocar una disminución del oxígeno en el agua. Las más peligrosas son las causadas por los géneros *Gymnodinium* y *Alexandrium*, que han afectado a las costas de Noruega y el Reino Unido. En Colombia este fenómeno es también reconocido y se han presentado diversas afectaciones a la salud humana por cólera que han sido identificados como especies invasoras en algunos casos específicos por los centros de investigaciones nacionales.

Otro dinoflagelado a tener en cuenta es *Pfiesteria piscicida*, especie descubierta en 1988 por científicos de Carolina del Norte, Estados Unidos. Existen veinticuatro formas distintas de este microorganismo, algunas de las cuales producen una serie de toxinas inocuas para el ser humano, pero asociadas a lesiones y a mortandades de una gran cantidad de peces tras haber sido introducida en las aguas de lastre.

Existen muchas especies invasoras que causan un grave problema medioambiental, económico y social, especialmente en los puertos y la región costera; causan enormes daños a la pesca y gigantescas pérdidas económicas.

Las iniciativas

De acuerdo con información obtenida del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, en Colombia, el Programa Mundial de Especies Invasoras por Aguas de Lastre (GLOBALLAST), liderado por la Organización Marítima Internacional (OMI), junto con el Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF, por su sigla en inglés) y el programa de desarrollo de la Naciones Unidas (UNDP), los Estados miembros de la OMI y la industria naviera desarrollaron el proyecto global denominado “Remoción de Barreras para la efectiva implementación del control y medidas de gestión del agua de lastre en países en desarrollo”, el cual se enfocó en ayudar a los países en desarrollo a implementar las medidas de carácter urgente voluntario, previstas en la resolución A868(20), con el fin de reducir la transferencia de especies invasoras que tiene como vector el agua de lastre.

Como resultado de las experiencias aprendidas con el proyecto inicial, la OMI promovió, el 13 de Febrero de 2004, el Convenio Internacional para el Control y Gestión del Agua de Lastre y Sedimentos de los Buques que exige a los Estados Contratantes implementar un Plan de Gestión de Agua de Lastre y Sedimentos aprobado por la Administración Marítima de los Gobiernos, según el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas.

En concreto, la resolución A868 (20), aprobada el 27 de noviembre de 1997 y la convención de Londres del 2004 tienen como objetivo lograr que toda la flota mundial esterilice las aguas de lastre en el plazo de unos pocos años. Además, pide a los gobiernos que impulsen medidas urgentes para aplicar tales directrices y difundirlas en el sector naviero.

Actualmente y a partir de las experiencias aprendidas en la fase inicial, se está desarrollando el nuevo programa conocido como “Asociación Glo Ballast” (Globallast Partnership), con miras a la ejecución a escala global del proyecto “Construyendo Asociaciones para Asistir a los



Países en Vía de Desarrollo a Reducir la Transferencia de Organismos Acuáticos Dañinos en Aguas de Lastre de los Buques” (Building Partnerships to Assist Developing Countries to Reduce the Transfer of Harmful Aquatic Organisms in Ships’ Ballast Water), el cual tiene como principal objetivo ayudar a los países y/o regiones particularmente vulnerables a expedir reformas legales y políticas para alcanzar los objetivos de la Convención. Específicamente, su actividad se resume en el fortalecimiento institucional de dichos países, en la construcción de capacidades y cooperación técnica de programas para proteger a los Estados vulnerables y con creciente riesgo de la bio-invasión acuática.

En septiembre de 2008, se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Instrucción y Capacitación Marítima, CIMAR, en la ciudad de Valparaíso, Chile, la Primera Reunión del Grupo Regional de Tarea para la Implementación del Proyecto Globallast en el Pacífico Sudeste y Argentina, en el marco del Proyecto Globallast Partnerships.

La Reunión contó con la participación de diez delegados nominados por los Puntos Focales del Proyecto Globallast, a través de los Puntos Focales Nacionales del Plan de Acción del Pacífico Sudeste de Chile, Colombia, Ecuador, Panamá y Perú, dos delegados del Punto Focal del Proyecto Globallast de Argentina, un representante de la Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile (CONAMA).

Según la Comisión Permanente del Pacífico Sur los delegados en la reunión de Valparaíso mostraron los avances que en materia de manejo de aguas de lastre de los buques se están llevando a cabo en sus países. El Grupo Regional tiene a su cargo, entre otras responsabilidades, elaborar una Estrategia Regional y su respectivo Plan de Acción para implementar los requerimientos de la Convención sobre Aguas de Lastre de la OMI a nivel regional e impulsar mecanismos para su sostenibilidad.

El Grupo Regional también acordó los principios sobre los cuales se construirá la Estrategia Regional e identificaron diez elementos clave que serán desarrollados en los próximos años:

- Evaluación de los potenciales efectos de las aguas de lastre y sedimentos de los buques en la región.

- Revisión de la normativa relativa al control y gestión de las aguas de lastre y sedimento de los buques.
- Diseñar un sistema armonizado para el manejo de las aguas de lastre, un grupo de políticas y sus dispositivos operacionales respectivos para la región, basado en los requerimientos de la OMI y de otros organismos relevantes (por ejemplo reporte sobre aguas de lastre, excepciones de riesgo para barcos, escenarios de emergencia, medidas adicionales, áreas para intercambio de aguas de lastre, investigación y desarrollo conjunto), en los que se detalla las responsabilidades de todos los actores.
- Desarrollar un plan de comunicación, extensión y concientización pública.
- Fortalecer los mecanismos de intercambio regional de información sobre el estado del ambiente marino y sobre las medidas de prevención y control tomadas por los países de la región, y un sistema de base de datos y de metadatos (información acerca de los datos).
- Establecer un sistema de monitoreo regional uniforme en los puertos para asegurar la compatibilidad de la información a nivel regional.
- Implementar un sistema regional para la capacitación y formación del personal involucrado en análisis de riesgo, legislación, control de aguas de lastre, monitoreo marino en puertos y manejo de las aguas de lastre abordó.
- Diseñar un conjunto de procedimientos armonizados incorporados en un sistema de fiscalización, que podría ser fácilmente adoptado por todos los países de la región.
- Aplicar un mecanismo de revisión/evaluación para asegurar la operación eficiente y efectiva de la estrategia.
- Fortalecer la investigación científica y tecnológica relacionada con el manejo del agua de lastre y sedimentos de los buques.

Para hacer frente a esta problemática en Colombia, la autoridad marítima nacional, como Estado Rector del Puerto, a través de las capitanías de puertos, es la entidad encargada de hacer cumplir la normatividad nacional e internacional tendiente a la preservación del medio marino conforme a las regulaciones de la Organización Marítima Internacional en el programa Globallast.

Es por esto que DIMAR, mediante sus centros de investigaciones oceanográficas en el Pacífico y Caribe (CCCP y CIOH), se encuentran desarrollando proyectos de investigación para el levantamiento de la línea base (incluyendo el componente microbiológico) y representando este tema gran relevancia en el ámbito nacional e internacional.

6.6.3. Islas de basura en el Pacífico

En el Giro subtropical del Pacífico Norte, formado por las corrientes del Norte del Pacífico, la corriente de California, la corriente Norecuatorial y la Kuroshio (ver corrientes en la figura 2.13), se formó una enorme “isla de basura gigante”, cuya extensión no se conoce del todo, aunque se dice que tiene dimensiones semejantes a las de la Península ibérica (Figura 6.5).

El oceanógrafo norteamericano Charles Moore, notó su existencia mientras realizaba una competición de veleros en 1997. No está bien definido aún pero se estima que la isla de basura tiene un área aproximada de 500 millas náuticas, desde la costa oeste de Estados Unidos hasta Japón.

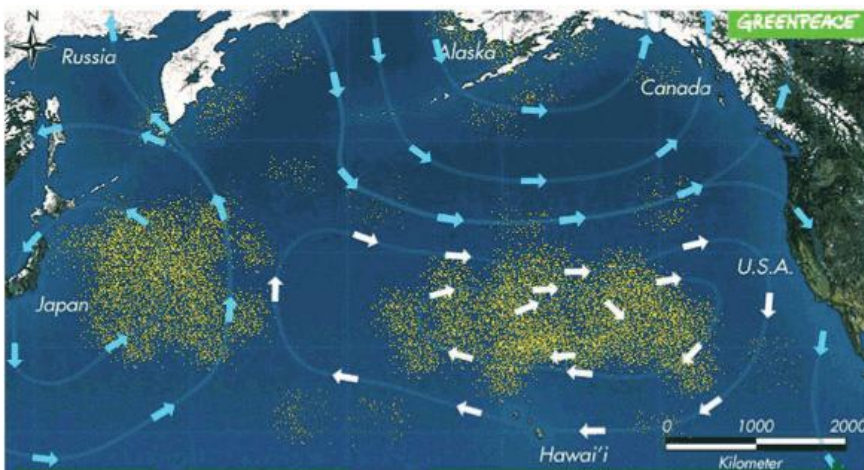


Figura 6.5. Octavo continente compuesto de basuras, flotando a la deriva en el Pacífico Norte.

Fuente: Greenpeace.

De los aproximadamente cien millones de toneladas que, según Green Peace, componen la isla flotante, un quinto de los objetos viene de plataformas de petróleo y embarcaciones que pasan por la zona, lo demás se asume que proviene de los continentes.

El problema principal es que la “isla” está en aguas internacionales. Nadie pasa por allí, no es parte de las principales rutas comerciales y ningún país se responsabiliza de este daño al ecosistema marino, por lo que estas islas continúan creciendo.

Además, cada año se producen cerca de 260 millones de toneladas de plástico, del cual sólo un 10% se recicla adecuadamente. Se ha estimado que cerca de 85 millones de botellas plásticas son usadas cada 3 minutos en nuestro planeta. En la mayoría de los casos, estas botellas no son desechadas ni recicladas, sino que van a parar a los océanos.

En la actualidad, se buscan soluciones al problema de las basuras flotantes en el mar. La mayoría de grupos ecologistas y científicos de todo el mundo creen improbable la remoción total de esta vasta región y piensan que la única solución es manejar los desechos en las costas, antes de que estos entren al mar.

Sin embargo, algunos grupos ecologistas, como los científicos del Proyecto Kaisei, creen que es factible recoger estos desechos, ya que flotan dentro de los primeros 3 m de la columna de agua. Ahora bien, cabe resaltar que en la actualidad, se encuentran desarrollando tecnologías que permitan la recolección de esta basura.

El problema relacionado con la basura marina no sólo atañe a los mares y costas, o a los ecosistemas y especies que viven en estos ambientes; la basura marina también genera impactos sobre los asentamientos humanos, ubicados en el litoral. Son una amenaza para la salud pública, pues deterioran el paisaje, disminuyen las actividades de recreación y turismo y afectan la navegación.

Según el CCCP, las poblaciones costeras del Pacífico colombiano presentan, entre sus múltiples problemáticas, un deterioro progresivo de los ambientes naturales. Estos asentamientos evidencian un crecimiento urbano carente de planeación, déficit en cuanto a servicios básicos como el suministro de agua potable, un sistema

adecuado de alcantarillado y de recolección de basuras, siendo estos últimos los principales factores que generan un deterioro gradual sobre los ambientes marinos y costeros, ya que las aguas servidas ingresan en proporciones significativas al mar sin tratamiento alguno, y los residuos sólidos resultan, por lo general, difícilmente degradables en el medio y por tanto, son altamente persistentes.

En investigaciones del Centro de Investigaciones Oceanográficas del Pacífico, se encontró que la bahía de Tumaco recibe cerca de 10 000 Ton/año de residuos, provenientes de las viviendas ubicadas en zonas intermareales (palafitos). El 60% de la basura producida a diario no es recolectada y queda dispuesta a cielo abierto, de las cuales, aproximadamente el 52% va al mar. Esta práctica hace que sea común que playas y zonas de bajamar se observen cubiertas de basuras (Figura 6.6).



Figura 6.6. Zona de bajamar en Tumaco, Nariño, altamente contaminada por residuos sólidos.

Fuente: Cortesía CN Julián A. Reyna M.

Según lo anterior, la Comisión Colombiana del Océano, consciente de las dificultades presentadas en cuanto a la recolección de residuos y en la disposición final de los mismos en las poblaciones del Pacífico colombiano, desarrolló en el 2008 el proyecto *Efectos Adversos Generados por la Basura Marina y Conformación del Grupo de Trabajo para reducir su ingreso al Medio Marino*, realizando diversas actividades tendientes a la recolección de residuos sólidos en playas para la recuperación de estos ambientes, así como campañas de sensibilización dirigidas a la población.

Gracias a estas actividades, se han presentado avances sustanciales en el manejo de las basuras; el nuevo relleno sanitario y la planta de reciclaje de plástico son una muestra de ello. Sin embargo, se deben realizar mayores esfuerzos para disminuir las problemáticas relacionadas con la basura marina.

6.7. CAMPAÑA DIVULGATIVA LOCAL SOBRE PROBLEMAS CAUSADOS POR LA CONTAMINACIÓN

A continuación, se sugiere lo que sería el plan de desarrollo de una campaña relacionada con la contaminación, teniendo en cuenta un esquema básico: objetivos de la campaña (principal y específicos), estrategias, acciones, servicios de apoyo y evaluación.

El tiempo de duración de la campaña será establecido por el interesado, de acuerdo con el diseño de la campaña. Se sugiere llegar a la población infantil, juvenil y adulta de la comunidad local.

Para lograr el objetivo principal se tendrán en cuenta unos objetivos específicos que permiten determinar las acciones a seguir para la realización de la campaña.

Objetivos Específicos de la Campaña

1. Identificar las fuentes de contaminación en la región, las clases de contaminación, los efectos negativos en la comunidad y los procesos y tratamientos utilizados en su control.
2. Determinar las acciones concretas para la prevención de la contaminación.
3. Identificar las instalaciones y servicios que éstas prestan a la comunidad para el control de la contaminación, que podrían a su vez apoyar la campaña.



Para lograr estos objetivos se sugieren como estrategias metodológicas las siguientes:

- Diseñar, aplicar y analizar una encuesta que permita obtener la información requerida en el objetivo específico.
- Buscar los mecanismos para llegar a la comunidad (medios de comunicación) y los grupos de base en la comunidad (grupos ecológicos, acción comunal, grupos juveniles, docentes) para integrarlos a la campaña y llegar a través de estos a la gran mayoría de la población (objetivo específico 3).
- Consultar e integrar a la campaña aquellas entidades (SENA, Armada Nacional, Ministerio de Medio Ambiente) que apoyarían la campaña, por tener directa relación con el problema de la contaminación, ya que aportarán e informarán a la comunidad sobre cuáles han sido las acciones, instrumentos y tecnologías concretas en el control de la contaminación.
- Integrar a líderes de la comunidad y al grupo de médicos de la localidad para asegurar multiplicadores que apoyen objetivos y acciones de la campaña.
- El alumno deberá conocer el manejo de material que se va a utilizar en la campaña (slogans, conferencias, encuestas, entrevistas, etc.) para motivar la comunidad, programar la utilización de los medios de difusión, localizar los sectores más afectados e integrarlos a la campaña.
- Planear la simulación de acciones a seguir, en un eventual accidente que genere contaminación.
- Recoger y presentar a las instituciones correspondientes las soluciones que surjan de la comunidad, relacionadas con el control de la contaminación.

Al término de la campaña, el estudiante evaluará los resultados, a través de la participación y cooperación obtenida de la comunidad, y por medio de las acciones y línea de trabajo propuestas por la comunidad.

PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

1. Adelantar un inventario local de los tipos de contaminación que se presentan, fuentes y tratamientos aplicados a la cuantificación y control de residuos industriales, así como de las normas vigentes que se apliquen para el control de la contaminación en su ciudad o departamento.
2. Describir el efecto que tienen tres distintos tipos de contaminantes en los organismos marinos, sus ecosistemas y en el sistema climático global.
3. Investigar los derrames de hidrocarburos ocurridos por buques en aguas oceánicas. Dar información de pérdidas económicas, sociales y biológicas de cada uno y las medidas tomadas por los distintos gobiernos para mitigar los daños causados. Si hay reportes de monitoreos posteriores al derrame, incluirlos en el trabajo.
4. Investigar qué especies invasoras han ocasionado efectos negativos en los ecosistemas marinos de Colombia, e indicar cuál fue el origen de estos y cómo llegaron a aguas colombianas.
5. Proponer una actividad que permita concientizar sobre las acciones que cada persona puede realizar para reducir la contaminación marina en su localidad. Dar soluciones reales y aplicables a la problemática actual.

UNIDAD 7

EVOLUCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN OCEANOGRÁFICA



INTRODUCCIÓN

En el complicado sistema multi-escala de la geofísica que le interesa al oceanógrafo, es claro que se necesitan grandes cantidades de mediciones y experimentos que conduzcan a entender la dinámica marina. De hecho, la única manera de resolver los misterios que ocultan los océanos es mediante las observaciones de los procesos de los fluidos, tanto del océano como de la atmósfera y de la costa (tratando los sedimentos costeros también como fluidos viscosos).

En escalas pequeñas (del orden de decenas de metros o menos, un ejemplo es el descubrimiento de abruptas discontinuidades en densidad, temperatura y salinidad que fueron evidenciadas gracias a los perfiladores más modernos. Las observaciones aportaron una nueva visión de los procesos de mezcla en el océano.

En escalas más grandes, un buen ejemplo es la explicación de la circulación general de la atmósfera en términos de inestabilidades baroclínicas (gradientes de presión; densidad de aire). Estos estudios se basan fundamentalmente en la práctica de los pronósticos del clima mediante las observaciones de las principales variables meteorológicas.

Generalmente las observaciones permitieron a los científicos dar explicación a los fenómenos climáticos adversos identificados; sin embargo, en otras ocasiones, las teorías precedieron a las observaciones directas. Este es el caso de la teoría de circulación abisal de Stommel-Arons (1961) que predecía un flujo (contracorriente) hacia el sur por debajo de la Corriente del Golfo. Sólo hasta que se tuvieron mediciones del océano profundo, se pudo corroborar esta teoría.

La oceanografía, quizás más que cualquier otra disciplina científica, depende de un grupo de instrumentos resistentes y extremadamente precisos que permitan realizar las observaciones en un ambiente hostil y ajeno a los humanos. Estos instrumentos pueden incluir dragas, botellas de agua, dispositivos de medición de temperatura, dispositivos acústicos de medición y monitoreo, rastreadores químicos, y toda una serie de otros instrumentos diseñados para observar diversos fenómenos naturales o causados por el hombre, o para capturar muestras de criaturas en las profundidades.

Los instrumentos oceanográficos tienen que sobrevivir y funcionar correctamente en condiciones extremas. Las presiones pueden superar cientos de atmósferas (un aumento de una atmósfera por cada diez metros de profundidad en el mar); las temperaturas pueden cambiar más de 30°C entre la superficie y el fondo, y causan la expansión y contracción de las diversas piezas metálicas de funcionamiento; en ocasiones, los propios instrumentos son objeto de ataque por parte de organismos; los cabos y anclajes utilizados para monitoreo de la columna de agua tienden a desgastarse o romperse ante climas extremos, o son comúnmente bandalizados para robar sus partes por simple curiosidad y muchos otros problemas adicionales ponen a prueba a los oceanógrafos que intentan desplegar instrumentos en el océano. Sin embargo, estos científicos llevan más de 150 años perseverando para desentrañar los misterios de las profundidades.

Si las observaciones guían la ciencia, los nuevos instrumentos son los medios para que esto ocurra. Así, los avances tecnológicos de las últimas décadas revolucionaron la forma de ver, medir y entender el océano, y permitieron descifrar interrogantes cuyas respuestas son cruciales para entender el complejo sistema climático global.

Cuando se diseñan instrumentos oceanográficos, uno de los principios generales importantes es que sean fuertes, simples y confiables. El mejor ejemplo de esto es el uso permanente de las botellas Nansen Niskin o del disco Secchi.

La revolución de la instrumentación oceanográfica se da en los cincuenta y sesenta, cuando instituciones científicas de todo el mundo iniciaron intensas investigaciones a bordo de buques oceanográficos. Las mediciones de las propiedades del agua de mar se hicieron sistemáticas en 1961, cuando Neil Brown, del *Woods Hole Oceanographic*



Institute (WHOI) desarrolló el primer equipo que media la salinidad; se trató del STD (Salinidad/Temperatura/Profundidad), posteriormente llamado CTD (perfilador Conductividad/Temperatura/Profundidad)

La innovación permitió a los oceanógrafos hacer grandes saltos en el desarrollo de los equipos de medición y consecuentemente en la descripción de los océanos. Algunos saltos fueron incrementales, como cuando se pasó de una botella Nansen a una botella Niskin y otros fueron drásticos, como cuando se pasó de medir con botellas, a medir perfiles de CTD.

Sin embargo, los pasos más gigantes dados por el hombre en oceanografía se dieron gracias al avance de la tecnología satelital. En los últimos 30 años, se pasó de tomar datos en un número fijo de estaciones oceanográficas (observaciones *in situ*) a medir las variaciones del mar en todo el planeta de manera diaria y continua en el tiempo (observaciones remotas).

A pesar de que la definición de “Oceanografía Operacional” es muy controvertida y aún se encuentra oficialmente en discusión en la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, comúnmente se entiende como la actividad de realizar mediciones rutinarias sistemáticas y a largo plazo de los mares, océanos y la atmósfera, así como el análisis, interpretación y rápida disseminación de la información. Los principales productos derivados de la oceanografía operacional son:

- Pronóstico del clima local actual (*nowcast*) que describe el estado presente del mar incluyendo sus recursos vivos.
- Pronóstico del clima de las condiciones futuras del mar (*forecast*) lo más lejanas posibles en el tiempo.
- Pronóstico de estados pasados del sistema climático (*hindcast*) que evidencian tendencias o cambios.

En gran parte, la oceanografía operacional depende de la capacidad de transmisión de los datos observados a los centros de asimilación de información, donde se tienen súper computadoras que son usadas para procesarlos y forzar los modelos numéricos. Las salidas de estos modelos son usados para generar nuevos datos y productos requeridos por científicos e ingenieros, en muchas actividades de importancia como la industria naval, el transporte marítimo, las pesquerías, la exploración/explotación de recursos y la acuicultura, entre otras.

Algunos ejemplos de estos productos son los avisos por inundaciones costeras, por la presencia de algún afloramiento algal nocivo para la salud, cartas electrónicas de navegación, rutas óptimas para los buques, productividad primaria anual o estacional en un lugar dado, corrientes oceánicas y tendencias de cambio climático global. Por esta razón, los usuarios finales van desde un pescador artesanal, pasando por una flota naviera comercial, en apoyo de las agencias del gobierno y las operaciones navales.

A continuación se realiza la descripción de otros instrumentos oceanográficos que han venido revolucionando la toma de datos en la investigación científica marina.

Objetivos

En esta unidad se pretende:

- Familiarizarse con las mediciones oceanográficas requeridas para estudiar la dinámica marina.
- Conocer otros instrumentos de medición usados por los oceanógrafos.
- Adquirir nociones del uso de equipos y de algunos estándares básicos exigidos cumplir para la obtención de datos oceanográficos.

7.1. MEDICIÓN DE CORRIENTES MARINAS

Además de la temperatura y la salinidad del mar, una de las variables más importantes a estudiar en la oceanografía es la variación de las corrientes marinas. Estas se pueden medir de dos maneras: la correntimetría euleriana (o de un punto fijo), que considera su medición en función de volúmenes por los cuales entra y sale el fluido; y la correntimetría lagrangiana (derivadores), que siguen la trayectoria de las corrientes de agua en el tiempo.

Un correntómetro registra la velocidad y dirección de la corriente, Con la incorporación de un compás giroscópico determina la orientación del instrumento con respecto al norte magnético.

7.1.1. Mediciones eulerianas

Las mediciones eulerianas se realizan en un punto fijo y con el paso del tiempo se determinan los cambios de la variable que se está investigando.

7.1.1.1. Correntómetros mecánicos

Miden la velocidad de la corriente con un dispositivo tipo hélice, un rotor Savonius o un rotor de rueda de paletas. La dirección la determinan con una paleta más grande (Figura 7.1). En el caso de las hélices los instrumentos deben estar orientados en la dirección de donde viene la corriente. Los rotores Savonius no tienen que estar orientados en la dirección incidente de la corriente, su paleta puede rotar independientemente y ser bastante pequeña.

La mayoría de correntómetros mecánicos miden la velocidad contando las revoluciones de la hélice o rotor por unidad de tiempo y determinan la orientación de la paleta a intervalos fijos. Este método de medición es adecuado en zonas donde la corriente cambia lentamente en el tiempo. No se recomienda su uso en aguas someras con intensa acción del oleaje.



Figura 7.1. Instalación de un correntómetro mecánico.

Fuente: Cortesía oceanógrafo Raúl Montoya Sánchez

7.1.1.2. Correntómetros electromagnéticos

Los correntómetros electromagnéticos hacen uso de la buena conducción eléctrica del agua de mar entre dos electrodos la corriente eléctrica inducida es proporcional a la rapidez de la corriente oceánica. Cuentan con una bobina que produce el campo magnético.

7.1.1.3. Correntómetros acústicos

El perfilador acústico de corrientes es el método de medición más usado actualmente por oceanógrafos para determinar la velocidad del agua moviéndose a través de la columna de agua. Existen varios equipos de este tipo, que se adaptan según las necesidades de investigación, como son: la profundidad de muestreo, la presencia de oleaje y otras.

a) ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

Es un correntómetro acústico que se ubica fijo (anclado) al fondo marino y que puede medir la velocidad de la corriente no sólo en el fondo, sino también a intervalos regulares hasta la superficie del mar (realiza mediciones del perfil de velocidad con respecto a la profundidad).

Este instrumento también puede ser montado horizontalmente en estructuras portuarias y bases de puentes en ríos y canales para medir el perfil de corrientes desde una costa a la otra. También se puede instalar en la parte inferior de los buques para medir de manera continua la corriente a medida que éste se desplaza. En áreas profundas, estos equipos pueden ser bajados mediante un cable desde la superficie del mar y se le adicionan boyas o flotadores para mantenerlos verticales (Figura 7.2).

El ADCP mide las corrientes de agua usando el principio de las ondas de sonido llamado *Efecto Doppler*. El ADCP funciona transmitiendo al agua pulsos de sonido a una frecuencia constante. A medida que las ondas de sonido viajan chocan con partículas suspendidas en el agua en movimiento y son reflejadas de regreso al instrumento.

Debido al efecto *Doppler*, las ondas de sonido rebotadas desde la partícula que se mueve alejándose del perfilador tienen una frecuencia ligeramente más baja cuando regresan. Las partículas que se mueven



hacia el instrumento envían ondas de frecuencia más altas. La diferencia en frecuencia entre las ondas que el perfilador envía y recibe se denomina desfase *Doppler*. El instrumento usa ese desfase para calcular qué tan rápido se mueve la partícula y el agua circundante.

Son ventajas del uso del ADCP:

- En el pasado, las mediciones de perfiles de corrientes requerían el uso de largos arreglos con muchos correntómetros mecánicos. En la actualidad, se requiere un sólo ADCP.
- Mide corrientes de pequeña escala.
- Antes, los correntómetros medían el movimiento relativo de las partículas de agua, el ADCP mide la velocidad absoluta de dichas partículas agua.
- Puede medir una columna de agua de hasta 1 000 m de profundidad.

Dentro de las desventajas del uso del ADCP se encuentran:

- Los pulsos acústicos de alta frecuencia producen datos más precisos, pero las bajas frecuencias viajan más lejos. Por eso los científicos deben decidir si quieren cubrir mayores distancias o tener mediciones más precisas.
- Los ADCP programados para realizar frecuentemente pulsos tienden a gastar más rápido sus baterías.
- Si las aguas son claras, como en las regiones tropicales, los pulsos acústicos puede que no choquen con suficientes partículas con las cuales e pueden obtener datos confiables.
- Las burbujas en aguas muy turbulentas o los cardúmenes de peces y otras especies marinas pueden causar que el instrumento calcule erróneamente la corriente.
- Se debe tener mucho cuidado para prevenir que los sensores se llenen de organismos y algas que afecten la calidad de las mediciones.



b) RCM (*Recording Current Meter*)

El recording current meter, registrador de corrientes (RCM), es un aparato que mide las corrientes hasta 2 000 m de profundidad y tiene una capacidad de hasta dos años de autonomía por misión oceanográfica. Toma información de corrientes (velocidad, dirección) y se le pueden adicionar sensores de presión, oxígeno y temperatura (Figura 7.3).

El equipo puede ser montado en el fondo del mar con la ayuda de un marco especial para que no se mueva, o puede ser colocado bajo flotadores en un anclaje fijo.

Al igual que el ADCP, las corrientes marinas son medidas mediante la técnica de señales acústicas. Algunas ventajas comparadas con otras técnicas de medición son: no es sensible a organismos marinos que se adhieran al equipo, no requiere calibración para obtener datos precisos y confiables, y cuenta con un inclinómetro y realiza las correcciones correspondientes.



Figura 7.2. Correntómetro Acústico ADCP. Izquierda: ADCP de la compañía *Teledyne RD Instruments*. Derecha: Instalación de un correntómetro acústico ADCP en un anclaje a bordo de un buque oceanográfico. Se usan boyas o flotadores para mantener el equipo en el fondo lo más vertical posible y así obtener mejores registros de corrientes. **Fuente:** Cortesía oceanógrafo Raúl Montoya Sánchez.



Figura 7.3. (Izquierda) Correntómetro acústico RCM-11 de la empresa *Aanderaa Instruments*. (Derecha) Sensores de presión, temperatura y oxígeno adicionales para mejorar la interpretación de los datos medidos.

Fuente: Cortesía oceanógrafo Raúl Montoya Sánchez.

7.1.2. Mediciones lagrangianas

Las mediciones lagrangianas se realizan con variación en el tiempo y en la posición para encontrar la modificación de la variable investigada con respecto a las dos primeras. Ejemplo de boya de deriva (Figura 7.4).

Estos derivadores son contruidos de distintas geometrías, para trabajar a distintas profundidades, describiendo su trayectoria mediante sistemas de posicionamiento global (GPS). Este tipo de correntometría permite definir de buena manera la trayectoria descrita por las partículas de agua dentro del área de estudio.

Estos derivadores pueden estar equipados con instrumentos oceanográficos y meteorológicos y con sistemas de transmisión de datos en tiempo real hacia los centros nacionales e internacionales de recepción, procesamiento y archivo de la información recolectada.



Figura 7.4. Boya de deriva usada para la medición de corrientes por el método lagrangiano.

Fuente: Cortesía Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.

Gracias a los equipos de medición descritos y a los continuos avances tecnológicos, hoy por hoy se cuenta con un amplio conocimiento de las corrientes oceánicas de todo el mundo, desde la superficie hasta el fondo, y se ha alcanzado un mejor entendimiento de la compleja dinámica océano-atmosférica global.

7.2. VEHÍCULOS SUBMARINOS

El océano es la última frontera. El hombre ha viajado al espacio, ha pisado la Luna, pero aún no ha podido alcanzar las grandes profundidades submarinas. La vasta mayoría del océano sigue inexplorada y desconocida debido a nuestras limitaciones físicas a soportar grandes presiones. Los avances en vehículos submarinos y las tecnologías como los sumergibles operados sin personal a bordo, han permitido a los investigadores explorar las profundidades del océano y han favorecido descubrimientos impactantes.

Un ejemplo de esto ocurrió en los setenta, cuando se encontraron comunidades biológicas en las trincheras hidrotermales ubicadas a lo largo de las cordilleras submarinas. Este hito permitió entender que la vida es posible incluso en las condiciones más extremas.

Aún existen muchos secretos esperando por ser descubiertos. Las nuevas exploraciones e investigaciones podrían llevar a un mejor entendimiento del mundo que nos rodea y los impactos que el hombre ocasiona a este. Sin duda, los instrumentos y equipos de medición que pueden alcanzar grandes profundidades y los robots no tripulados son y seguirán siendo las herramientas más atractivas para biólogos, arqueólogos, ingenieros y oceanógrafos de todo el mundo, a pesar de su alto costo.

Los vehículos subacuáticos, también denominados sumergibles de exploración, pueden ser de dos tipos: los operados por una tripulación y los operados remotamente sin tripulación. Cuando se diseñan para las actividades navales y de guerra, se conocen como submarinos, los cuales cuentan con armamento militar además de los sensores acústicos.

Los sumergibles de exploración científica pueden ser tripulados o no tripulados. Los tripulados son generalmente pequeños submarinos

que pueden llevar hasta tres personas a la vez. Los sumergibles no tripulados pueden ser operados remotamente o pueden ser diseñados para trabajar de manera autónoma. Todos estos sumergibles tienen el objeto de medir parámetros oceanográficos, tomar imágenes de video o fotografías de alta calidad, realizar experimentos y recolectar muestras.

7.2.1. Sumergibles tripulados

También conocidos como batiscafos, son pequeños submarinos tripulados con propulsión autónoma que permiten alcanzar grandes profundidades en el mar, con fines militares o científicos. Estos sumergibles cuentan con cámaras e instrumentos que registran y miden objetos del fondo marino y motores alimentados por una batería eléctrica.

El físico suizo Auguste Piccard diseña y opera el primer vehículo submarino tripulado a finales de los años cuarenta. La primera inmersión no operada manualmente se realizó en el archipiélago de Cabo Verde a bordo del FNRS-2 que descendió 1 080 m de profundidad. A bordo de *Trieste* Piccard y su tripulación llegaron hasta los 3 150 m en 1 953. Dos años después alcanzaron los 5 486 m y al año siguiente los 10 916 m en Guam, permaneciendo media hora en el fondo del océano (Figura 7.5). En los años sesenta se construyeron nuevos submarinos como el *Arquímedes*, que en 1 962 descendió 9 500 m, en la fosa de las islas Kuriles.

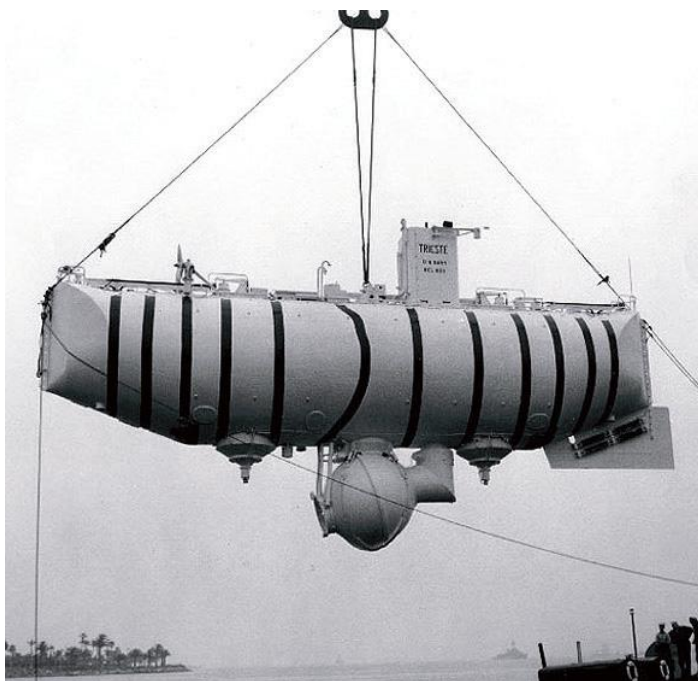


Figura 7.5. *Bathyscaphe Trieste*.
Fuente: Cortesía U.S. NHHC Photograph.

El sumergible *Alvin*, construido a principios de 1960 por la *U.S.Navy*, es una cápsula submarina de casi 8 m de largo, con capacidad para tres personas (dos científicos y el piloto) que puede sumergirse hasta por 4 500 m (Figura 7.6). Está equipado con luces submarinas, cámaras, un sistema de televisión y un colector (brazo) mecánico.

En 1975, científicos franceses y norteamericanos usaron el *Alvin* para observar la dorsal meso-oceánica del Atlántico. Esta expedición fue la responsable del descubrimiento de vida marina en condiciones extremas. Desde sus inicios, *Alvin* ha transportado más de 9 200 pasajeros y ha realizado más de 4 600 descensos, gracias a las numerosas reconstrucciones realizadas durante los 50 años que lleva en operaciones. Desde el *Alvin*, otros sumergibles tripulados han explorado exitosamente el fondo submarino.



Figura 7.6. Batiscafo *Alvin* en inicio de inmersión.

Fuente: *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*



7.2.2. Sumergibles no tripulados

Son usados para la exploración submarina y tienen la capacidad de descender a profundidades mayores a 6 000 m. Uno de los sumergibles más famosos son el Argo, usado en 1985 para localizar los restos del Titanic, y el pequeño Jason, usado posteriormente para explorarlo con más detalle. Este tipo de sumergibles no tripulados puede ser de dos tipos: los vehículos submarinos operados remotamente (ROV, por sus siglas en inglés) y los vehículos submarinos autónomos (AUV, por sus siglas en inglés).

7.2.2.1. Vehículos Submarinos Operados Remotamente (ROV)

Los ROV son sumergibles no tripulados, de alta maniobrabilidad, que pueden realizar descensos muy profundos. Estos robots son controlados por un operador que se encuentra a bordo de un buque o plataforma. Usualmente estos vehículos están conectados mediante un extenso cable llamado también llamado “cordón umbilical” que es un conjunto de cables que llevan energía eléctrica, video y datos entre el operador y el vehículo.

Estos vehículos se diseñaron en 1950 por la Armada de los Estados Unidos (U.S. Navy), pero fue hasta 1970 que se usaron ampliamente. Los primeros ROV se usaron para localizar restos de submarinos, pero actualmente tienen objetivos comerciales y científicos. Son comunes en la industria de extracción de hidrocarburos en altamar.

De manera general, los ROV cuentan con una cámara de video y luces. Se pueden adicionar también equipos que mejoran sus capacidades como son el sonar, magnetómetro, cámaras fijas, un brazo manipulador, un colector de muestras de agua y sensores que miden la turbidez, penetración de luz y la temperatura.

La industria de los ROV se desarrolló de manera acelerada. En la actualidad realizan numerosas actividades en muchos campos de acción. Estas van desde una simple inspección de estructuras subterráneas, tuberías y plataformas conectadas a tuberías; se usan extensivamente tanto al inicio de una construcción submarina como en las reparaciones posteriores; han sido usados para localizar naufragios famosos como el *RMS Titanic*, el *Bismarck*, *USS Yorktown*, y el *SS Central*

América; y para la recolección de muestras de sedimento a grandes profundidades.

Jason, diseñado por el Laboratorio de Sumergibles del Instituto Oceanográfico Woods Hole (WHOI), ha hecho contribuciones importantes en la investigación de aguas profundas. El *Tiburón* del Monterey Bay Aquarium (MBARI) tuvo un costo de 6 millones de dólares y se usa principalmente en investigaciones de procesos hidrotermales en la costa oeste de Estados Unidos. El ROV *Hercules* es uno de los primeros ROV científicos que incorporó completamente el sistema de propulsión hidráulico, y es adecuado para realizar expediciones de naufragios antiguos y modernos (Figura 7.7).



Figura 7.7. Lanzamiento del vehículo ROV Hércules durante las inmersiones de prueba fuera de Hawai

Fuente: Programa Explorador Océanos de la NOAA, INDEX-SATAL

7.2.2.2. Vehículos Autónomos Submarinos (AUV)

Los AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) son los sumergibles no tripulados más novedosos, que operan de manera independiente, mediante instrucciones preprogramadas. Esto permite a los AUV realizar operaciones simples y rutinarias sin la necesidad de operaciones o interacción humana.

Estos instrumentos pueden ser usados en estudios oceanográficos, estudios de biología marina, estudios de calidad del agua en reservorios y represas y en el monitoreo ambiental de aguas costeras y estuarinas, entre otras aplicaciones. Algunos de los robots autónomos más utilizados son el AUV Sentry y los *gliders*.

a) AUV Sentry

Este vehículo totalmente autónomo es capaz de explorar el océano hasta profundidades de 4 500 m. Su forma hidrodinámica y su mejorada velocidad y maniobrabilidad lo convierten en uno de los AUV más adecuado para realizar investigaciones submarinas. Sentry produce mapas batimétricos y magnéticos del fondo marino y puede realizar fotografías digitales en una gran variedad de terrenos. Este equipo cuenta con sistemas de navegación acústica y Doppler, y un sistema de comunicación acústica, además de equipos de medición tales como un sensor de potencial redox, un espectrómetro de masa *in situ*, sensores de presión, sensores geofísicos (sonar y magnetómetros), sensores oceanográficos (CTD, sensores de turbidez) y cámaras fotográficas (Figura 7.8).

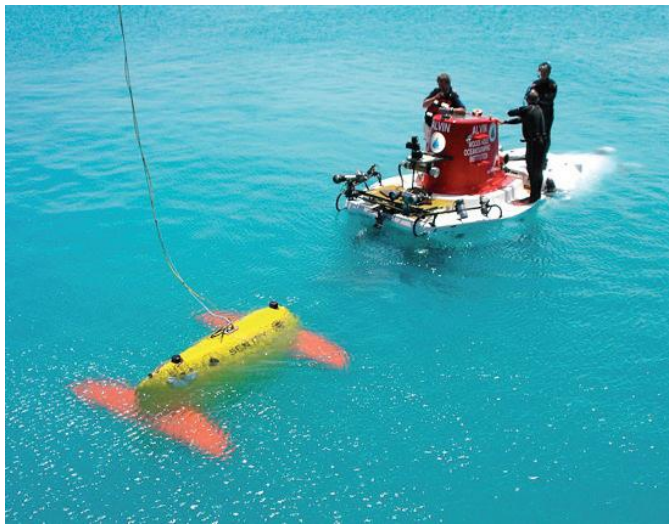


Figura 7.8. El vehículo submarino AUV Sentry se encuentra con el sumergible Alvin durante una expedición de prueba a las afueras de Bermuda en abril 2006. Sentry es un vehículo robótico usado en la exploración el océano profundo. Puede ser usado para complementar el trabajo del Alvin en barrios largos del fondo marino.

Fuente: Cortesía Chris German, Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI).

b) Gliders

En las últimas décadas, los *gliders* han sido desarrollados como los nuevos AUV de medición oceanográfica. Estos equipos permiten complementar los muestreos tradicionales ya que proveen de datos continuos en el tiempo y el espacio, lo que no es posible con las estaciones oceanográficas típicas, las cuales están separadas unas de otras horizontalmente por decenas a cientos de kilómetros.

La ventaja sobre los derivadores es que no son arrastrados por las corrientes marinas, sino que navegan de manera autónoma dentro del área de estudio de interés científico para el cual fueron programados.

Los *gliders* se basan en los pequeños cambios de su flotabilidad y en un sistema de aletas para convertir el movimiento vertical en desplazamiento horizontal, y por lo tanto, se impulsan a sí mismos con muy poco gasto de energía. Este tipo de autopropulsión ha permitido ampliar la duración de las misiones de muestreo de horas a semanas e incluso meses, pudiendo desplazarse miles de kilómetros.

Los *gliders* hacen mediciones de temperatura, conductividad (para calcular salinidad), corrientes, fluorescencia (clorofila), presión y la profundidad del fondo. Estos equipos navegan con la ayuda de geoposicionadores fijos (GPS), sensores de deriva y brújulas magnéticas. La flotabilidad del instrumento es ajustada mediante un pistón que inunda o evacúa la vejiga externa (como el caso del *seaglider*). Los datos son transmitidos a los centros de datos mediante el uso de satélites.

Existen distintos tipos de *gliders* según la presión que resisten. Algunos modelos están diseñados para aguas someras (menores a 200 m) como el *Slocum* (Figura 7.9); otros operan hasta 1 000 m (*Seaglider*) y 1 500 m (el *Spray*), y recientemente se han diseñado *gliders* para aguas profundas que pueden operar hasta 6 000 m de profundidad (*Deepglider*).



Figura 7.9. AUV tipo Slocum. Laboratorio de Observación Oceánico Costera de la Universidad de Rutgers de los Estados Unidos de América.
Fuente: Antarctic Research.

Algunos Instrumentos para medir

Los CTD pueden registrar datos de manera continua, ya que, el CTD puede estar conectado mediante un cable a un computador a bordo. El CTD cuenta con un cilindro metálico que soporta altas presiones. En esta carcaza aloja los componentes electrónicos y los sensores.

Los CTD modernos cuentan con otros sensores que miden la fluorimetría, pH, oxígeno disuelto y PAR (sensor de luz visible) y pueden incluir equipos como OPC (contador de partículas ópticas), transmisómetro (turbidez del agua), etcétera. (Figura 7.10).



Figura 7.10 Izquierda. Perfilador de conductividad, temperatura y profundidad - CTD, Sea Bird 25. **Fuente:** Cortesía Capitán de Corbeta Leonardo Marriaga Rocha, CIOH. Derecha. CTD (sensor blanco) con botellas Niskin (PVC gris) instaladas en una roseta muestreadora. **Fuente:** Cortesía Ph.D Andrea Devis Morales.

Actualmente la penetración de la luz en el océano se mide a través de fotómetros, generalmente anexos a los CTD. El disco Secchi (Figura 7.11) se emplea como instrumento para medir la transparencia del agua del mar y consiste en un disco blanco de 30 cm de diámetro, ideado por el italiano Angelo. Secchi, el cual se sumerge mediante un lastre marcado cada metro y se observa desde la superficie a través de una máscara apropiada para ver bajo el agua, luego se anota la profundidad a la que desaparece de la vista y se compara además el color en la gama Forel.

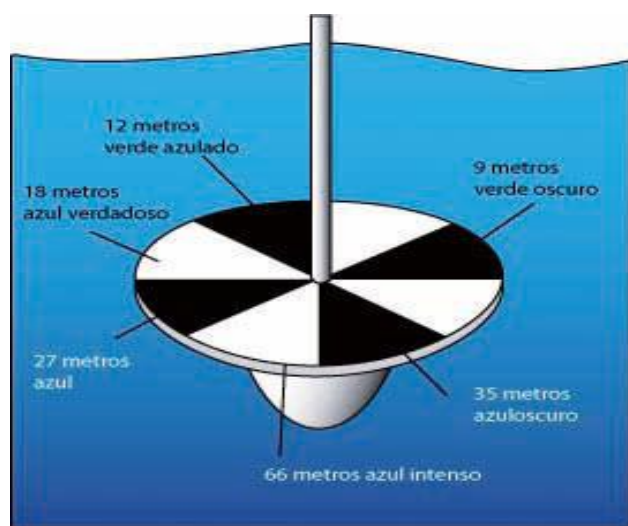


Figura 7.11. Equipos para medir la transparencia del agua de mar: Disco Secchi.
Fuente: Adaptada por el autor.

7.3. MEDICIONES DEL FONDO MARINO

Existe una gran variedad de instrumentos de medición oceanográfica que cumplen múltiples propósitos científicos. Los estudios batimétricos requieren de ecosondas y sonares para realizar mediciones hidroacústicas de alta resolución para producir batimetrías del fondo marino. La morfología o relieve del suelo marino se determina midiendo el tiempo que le toma a una onda acústica en ir y volver desde el buque hacia el fondo. Con el tiempo de propagación y conociendo la velocidad del sonido en el agua, se determina la profundidad a la cual se encuentra el fondo marino. Cuando consideramos una onda de ecosonda, el tiempo se divide por dos (viaje de ida y viaje de vuelta).

Los barridos del suelo con equipos monohaz sólo emiten un haz acústico y se obtiene la profundidad en un punto, de este modo, a medida que el barco avanza, se obtiene un perfil del fondo marino.



En el caso de la batimetría multihaz, se utilizan varios haces de sonido que forman una franja transversal a la navegación del barco y generan una imagen del fondo marino en el área bajo el barco. A medida que este se desplaza, se va completando el mapa batimétrico.

El registro batimétrico debe ser corregido regularmente utilizando sensores de temperatura. Los XBT (eXpendable Bathy Thermograph) permiten obtener un perfil de temperatura del océano (hasta los 1 000 m). Los perfiles de temperatura versus profundidad, registrados por los XBT, permiten calibrar la velocidad del sonido en el agua y a su vez, corregir el registro batimétrico determinado por el ecosonda.

7.3.1. Ecosonda monohaz

La sonda monohaz es una ecosonda hidrográfica. Su función es determinar la profundidad del mar y conocer las características del fondo marino, a partir de la porción de energía acústica reflejada por el fondo. Son comúnmente utilizadas en la navegación de embarcaciones mayores y en expediciones hidrográficas (Figura 7.12).

Generalmente disponen de una función de almacenamiento que reduce la necesidad de imprimir ecogramas. La señal del transductor no procesada es grabada en el disco duro interno; durante la repetición, esta señal es introducida en el software de procesado como si llegara directamente del transceptor (*transceiver*).

La ecosonda hidrográfica consta de uno o más transductores, un *transceiver* para fines generales (GPT) y una estación hidrográfica operadora (HOS). Cuando se requiere una mayor protección ambiental, la unidad GPT puede ser instalada en una cabina de acero especial.

Los principios físicos de operaciones no han cambiado mucho desde los primeros ecosondas, ya que siguen describiendo parámetros como frecuencia, tasa y longitud del pulso, ángulo del pulso y energía disponible. La mayoría de los desarrollos tecnológicos han sido en el trabajo de integración, en los tamaños de los equipos que ahora son más pequeños, los programas para la interpretación de los datos son más visuales y las comunicaciones con los sistemas externos se han facilitado gracias a conexiones inalámbricas, cables Ethernet y USB.



Figura 7.12. Graficador ecosonda monohaz de dos canales.

Fuente: Cortesía Atlas Hydrographic GmbH.

7.3.2. Ecosondas multihaz

El empleo de las ecosondas multihaz para levantamientos batimétricos se ha convertido en la tecnología más usada en la actualidad. Dicho sistema, que permite cumplir las normas estándar de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), proporciona un conocimiento preciso y completo de la profundidad y morfología de los fondos marinos (Figura 7.13a).

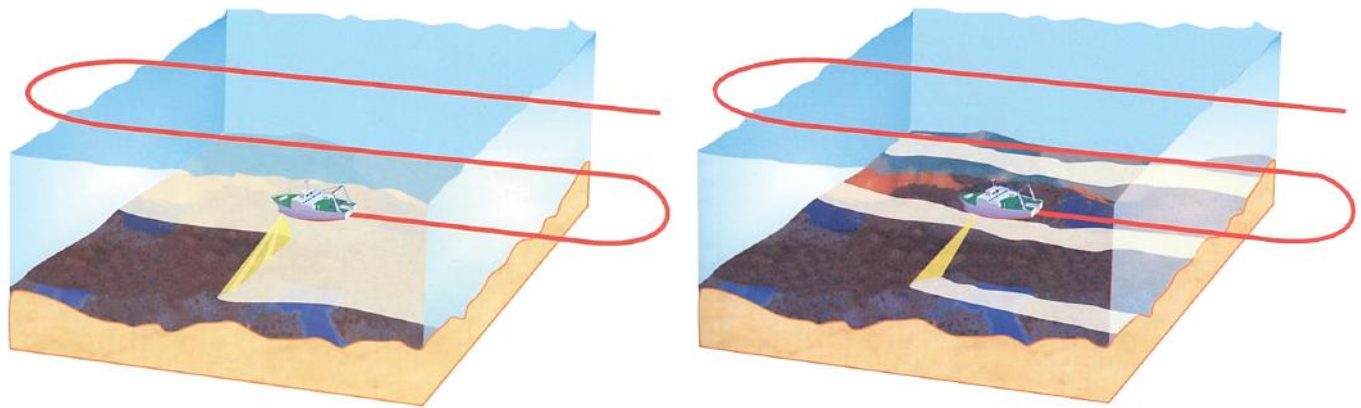
Su alta resolución (500 puntos por m^2) y los dispositivos de correcciones de movimiento (cabeceo, balanceo, y guiñada), en tiempo real hacen que la toma de datos sea altamente confiable. Su empleo permite una amplia cobertura del fondo marino tanto en las zonas someras o en la plataforma continental, e incluso en cuencas con profundidad hasta 5 000 m. Es una herramienta ideal y ventajosa para la exploración de fondos marinos, reconocimientos arqueológicos, etcétera.

El costo de una ecosonda multihaz es muy alto, sin embargo, tienen ventajas sobre las monohaz como se detalla a continuación:

Tiempo: El tiempo empleado en realizar una batimetría se puede reducir varias decenas de veces utilizando una ecosonda multihaz.

Cobertura: La ecosonda mono-haz sólo cubre un dato por pulso transmitido, y la ecosonda multihaz puede llegar a cubrir hasta 250 datos o puntos por pulso transmitido.

Precisión: Teniendo en cuenta que una ecosonda multihaz viene acompañada de una serie de periféricos y que los usuarios de ecosondas mono haz no suelen tener en cuenta conceptos tales como cabeceo/balanceo, se puede concluir que las correcciones aplicadas a la multihaz reducen los errores que en la monohaz ni siquiera se consideran.



7.3.3. Sonar de barrido lateral

El Sonar de Barrido Lateral o *Side Scan Sonar* (SSS) es un dispositivo electrónico que emplea un elemento sumergido (pescado o torpedo), remolcado por una embarcación hidrográfica. Emite una señal de sonar hacia el fondo y recibe el eco, que es enviado hacia una computadora traduciendo la señal en una imagen digitalizada en la pantalla, la cual es grabada continuamente. Al mismo tiempo se tiene la posición del torpedo por señal satelital GPS, que ubica exactamente la imagen observada en el fondo (Figura 7.14).

Este sonar exige una gran experiencia del analista para interpretar las imágenes vistas en la pantalla, que cambian por la acción del movimiento del torpedo, estas son: las variaciones superficiales del fondo, generadas por las “sombras acústicas” que emite el mismo. Este equipo se diferencia de la ecosonda multihaz porque genera imágenes muy claras de lo que se encuentra en el fondo oceánico al igual que una ecografía, pero no mide las profundidades, aunque permite realizar un cálculo aproximado de la profundidad bajo el pescado.

Figura 7.13a. (Izquierda) Tipo de batimetrías realizadas con ecosondas multihaz.

Fuente: DIMAR-CIOH

Figura 7.13b. (Derecha) Tipo de batimetrías realizadas con ecosondas monohaz.

Fuente: DIMAR-CIOH

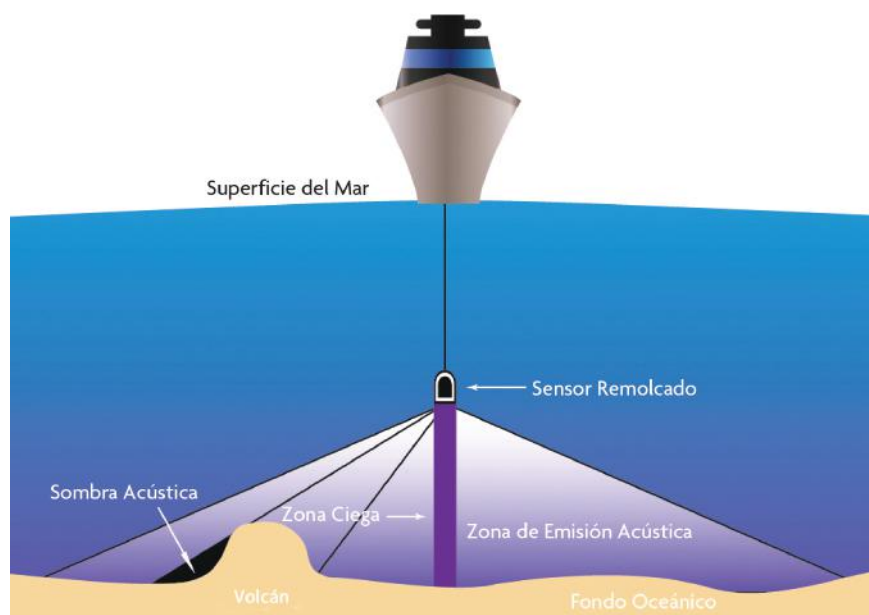


Figura 7.14. Sonar de barrido lateral empleado para graficar el fondo marino.

Fuente: Center for Coastal & Ocean Mapping Joint Hydrographic Center.

7.3.4. Perfilador del subsuelo marino

El Perfilador del Subsuelo Marino o *Sub Bottom Profiler* (SBP) es un instrumento acústico utilizado para trabajos geofísicos marinos y para la búsqueda de objetos bajo el sedimento marino. Está compuesto de un transductor que se instala en el casco de la embarcación. Emite una señal de baja frecuencia que penetra el sedimento, logrando identificar y medir el espesor de las capas sedimentarias existentes bajo el fondo o subsuelo marino (Figura 7.15). Entre tanto, los aparatos de toma de muestras de sedimentos marinos solamente recuperan material de la superficie de la capa sedimentaria y penetran ligeramente perforando esta superficie (Figura 7.16).

Dependiendo de la naturaleza de la información, la señal se integra con información de posicionamiento dada por GPS, con lo cual se da posición a dichas imágenes acústicas obtenidas, consiguiéndose transeptos (ocorridas) de imágenes geo referenciadas del subsuelo marino.

Dado que las imágenes son acústicas, la claridad del agua no influye en la calidad de las imágenes. La información es almacenada directamente en una computadora, sin embargo, en el levantamiento, el operador “ve” el subsuelo marino, por lo que puede detectar objetos de interés y marcarlos para análisis posteriores.

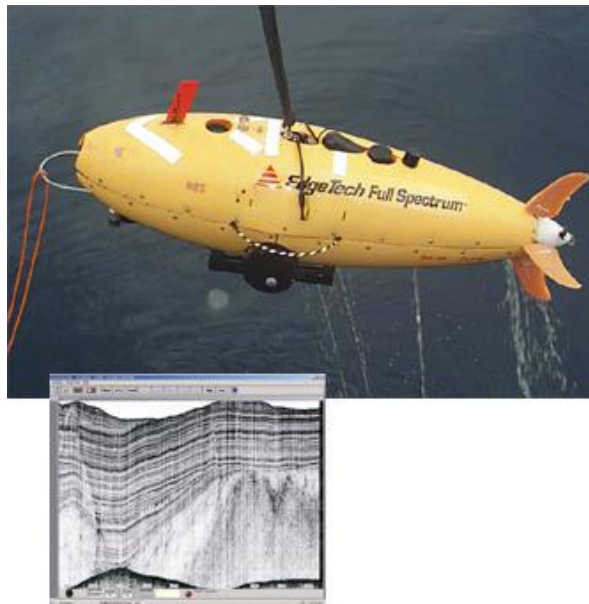


Figura 7.15. Perfilador del subfondo marino 2 200 M Asmin Adisentosa.
Fuente: Asmin Adisentosa.

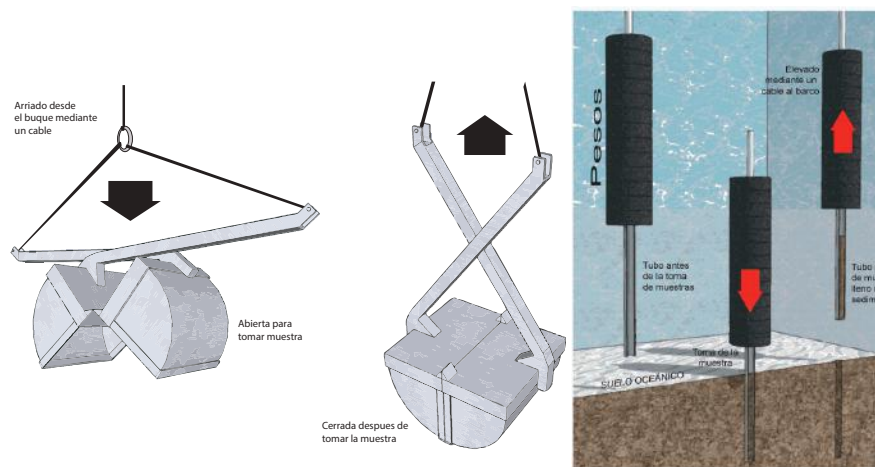


Figura 7.16. Izquierda: Draga de Van Veen para toma de muestras de sedimentos del fondo oceánico poco profundo. Derecha: Aparato que opera con gravedad utilizado para obtener cilindros de sedimento del fondo oceánico (*gravity core*).
Fuente: Adaptada por el autor.

7.3.5. Magnetómetro

Este equipo sirve para detectar las variaciones del campo magnético terrestre, ya sea en mar, o en tierra. En la práctica, su eficacia va ligada a la presencia de materiales ferrosos. También es remolcado por una embarcación y está conectado a una computadora, la cual guarda la información adquirida.

Es ideal para trabajos de geofísica marina, arqueología, detección de objetos, entre otras funciones. También se utiliza en la cartografía de sedimentos ferruginosos en océanos, lagos, ríos y estuarios (Figura 7.17).

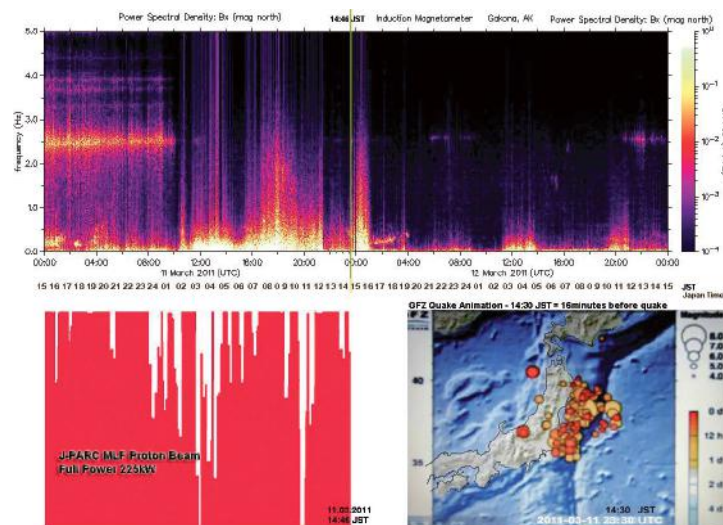


Figura 7.17. Visualización resultados magnetometría.

Fuente: Modificada de K. Fajans (Físico Nuclear).

7.4. SISTEMAS DE MONITOREO SATELITAL O AEROTRANSPORTADOS

7.4.1. Sistema Lidar

LIDAR (acrónimo del inglés *Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) es una tecnología que determina la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie. Ha sido usado en aplicaciones geológicas, sismológicas y en estudios de la física de la atmósfera.

Este sistema cuenta con un escáner láser aerotransportado (ALS) que combinan dos movimientos, uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner. También incluye un sistema de geo-posicionamiento satelital (GPS) diferencial y un sensor inercial de navegación que generan las coordenadas de decenas de miles de puntos por segundo.

Los LIDAR pueden realizar distintos tipos de escaneados como se observa en la Figura 7.18. Los hay de líneas, zig zag, elípticos y de fibra óptica.

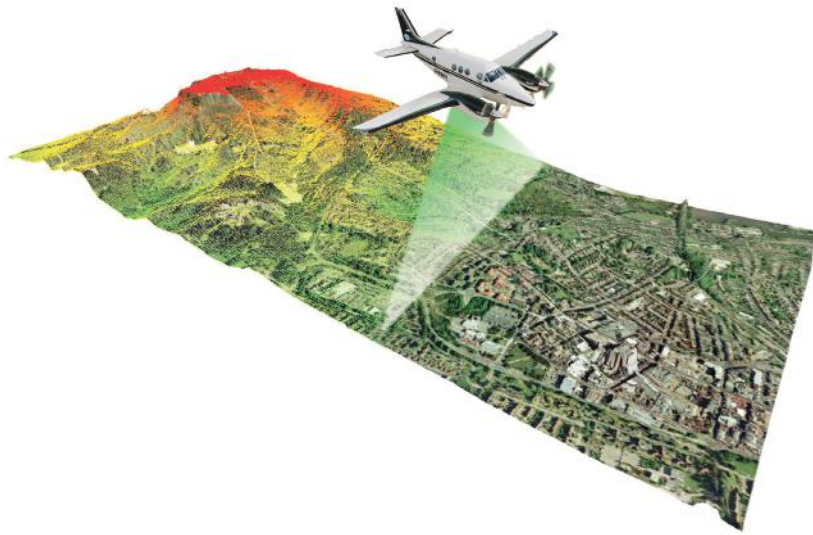


Figura 7.18. Sistema Lidar básico.
Fuente: *Light Detection and Ranging (LIDAR)*

7.4.2. Sistema Argos

Argos es un sistema de monitoreo ambiental y seguimiento satelital global. Permite localizar cualquier equipo u objeto que tenga un sistema de transmisión compatible con este sistema. Ofrece además la posibilidad de coleccionar datos medidos con sensores específicos.

Este sistema resultó de la cooperación Franco-Americana involucrando a la Agencia Espacial Francesa (CNES), la Administración Nacional de Atmósfera y el Océano (NOAA), con el apoyo de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), y el operador del sistema, CLS (*Collecté Localisation Satellites*). En 2006, Eumetsat (*European Meteorological Organization*) se unió al comité de operaciones.

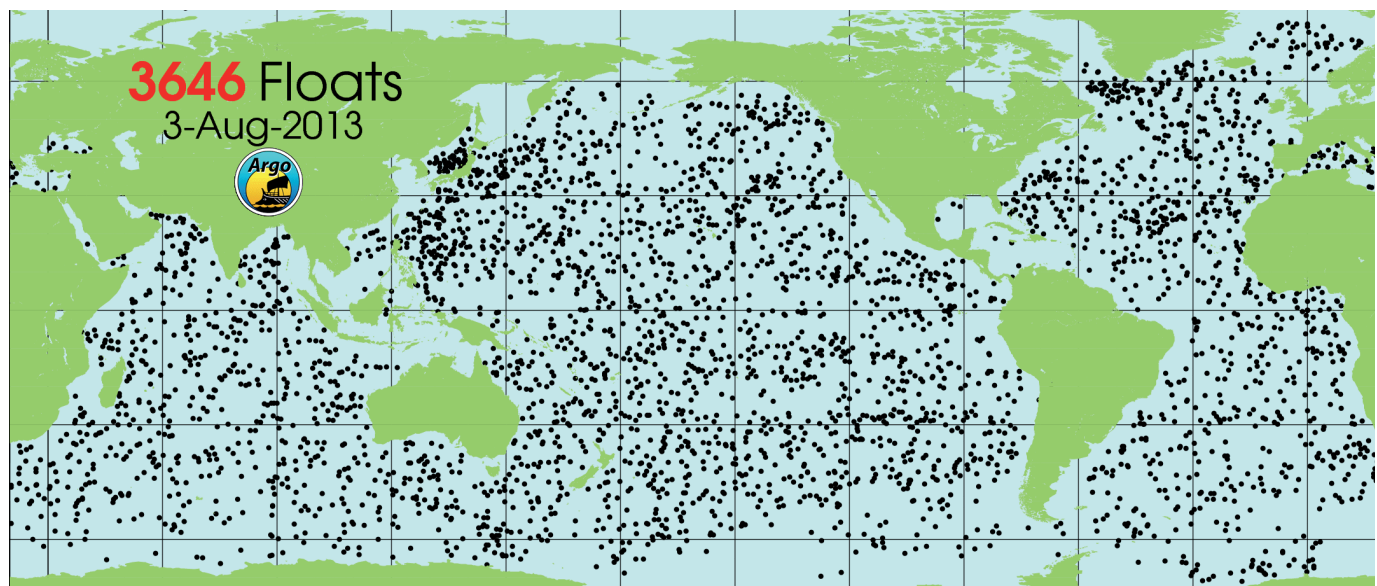
Los programas internacionales de oceanografía usan el sistema Argos para transmitir datos vía satélite desde las boyas oceánicas a las estaciones en tierra, la cual es compartida por los profesionales de todo el mundo. Algunos de los programas más importantes son:

- **Argo: Programa de Observación Global de los Océanos.** El programa Argo se basa en un arreglo de más de 3 000 flotadores (boyas) de deriva que realizan perfiles de temperatura y salinidad desde la superficie hasta 2 000 m de profundidad en el océano (Figura 7.19). Esto permite, por primera vez tener un monitoreo continuo y en tiempo real de las variables oceánicas de interés, con todos los datos disponibles sólo unas horas después de haber

sido recolectados. Esta información se distribuye de manera gratuita a la comunidad científica mundial.



Figura 7.19. Arriba. Boya APEX que mide temperatura, salinidad y corrientes usadas en el proyecto Argo de monitoreo global de los océanos. Fotografía tomada en el edificio UNESCO (Paris, 2013). **Fuente:** Cortesía CN Julián A. Reyna M. Abajo. Ubicación de boyas existentes a agosto 2013. **Fuente:** International Argo Project Office.





- **Programa global de derivadores.** El objetivo de este programa es la producción de mapas estacionales de la circulación superficial del océano. Los datos recolectados vía Argos dan información clave para el estudio de la temperatura superficial del mar, nivel del mar, velocidad de las corrientes superficiales. También, es útil para la verificación de modelos climáticos globales y para la construcción de modelos.
- **Red de boyas TRITON.** El sistema de boyas ancladas llamada TRITON (*TriangleTrans-Ocean Buoy Network*) está diseñada para medir parámetros meteorológicos de la superficie del mar y parámetros oceanográficos de la capa superior del océano. Las boyas son instaladas por muchos países que tienen un acuerdo internacional (JAMSTEC) y son instaladas en y alrededor del océano Pacífico. El objetivo principal de este sistema es el estudio del contenido de calor ecuatorial y su relación con el cambio climático global.
- **Red de boyas TAO.** Este proyecto oceanográfico mide parámetros oceanográficos y meteorológicos en la región del Pacífico ecuatorial tropical. El sistema (arreglo) de boyas mide continuamente y envía los datos a los laboratorios en tierra en tiempo real, vía Argos. Este sistema de observación es el componente principal del Sistema de Observación de El Niño-La Niña/Oscilación Sur (ENOS) el cual es financiado por Estados Unidos y Japón, con contribuciones de Francia.

Otras redes de monitoreo también usan el sistema Argos; ejemplos de ellas son el seguimiento de mamíferos, tortugas marinas y otros animales que han sido marcados para protección de las especies en riesgo de extinción, para el manejo de las pesquerías y las flotas pesqueras, entre muchas otras aplicaciones.

7.4.3. Oceanografía satelital

En 1964 la NASA por primera vez en la historia examinó la posibilidad de usar la tecnología satelital para realizar observaciones del océano. En 1969 se inició el programa espacial llamado *Earth and Ocean Physics Application Program* con el fin de establecer la posibilidad de realizar misiones espaciales enfocadas al estudio del clima global. La primera misión enfocada en la geodesia buscaba determinar el geoide de la Tierra con un error no mayor a 10 cm en la elevación de la superficie

con respecto a este. La resolución especificada por estos estudios sólo se logró después de un periodo de varios años, luego del incremento gradual a través de cinco satélites altimétricos; *Skylab*, *GEOS-3*, *Seasat*, *Geosat* y *Topex/Poseidon*.

Los primeros dos satélites de observación del océano de primera generación; el *Skylab* en 1973 y *GEO-3* en 1975, contaban con un laboratorio espacial que transportaba astronautas y sensores como radares altímetros, radiómetros, dispersómetros de microondas, radiómetro de microondas larga, escáner visible-IR y cámaras para captar fotografías.

A partir de los satélites meteorológicos aplicados a la oceanografía se obtuvieron datos de temperatura de la superficie del mar (TSM) usando sensores en el infrarrojo lejano. La resolución espacial de 5 km producía imágenes borrosas de TSM, pero el potencial era claramente visible.

La combinación de datos preliminares y el conocimiento científico permitió la explotación de dichos datos y dio como resultado el desarrollo de sensores diseñados específicamente para observar el océano. Datos generados por altímetros y radiómetros de microonda dieron credibilidad a la creación de satélites dedicados a las microondas. Las mediciones de color desde aviones indicaron la eficacia de tales sensores para medir las concentraciones de clorofila en la superficie del mar. Luego se realizaron pruebas con sensores IR (infrarrojo) para producir mediciones de TSM.

En 1978, Estados Unidos lanzó en un intervalo de 4 meses una triada de satélites que cambiaron la forma de ver al océano. En junio fue lanzado el *Seasat*. Luego de la falla de este se lanzaron en octubre el *TIROS-N* y el *Nimbus-7*. Colectivamente transportaban sensores que abarcaban todo tipo de observaciones del océano. Esta segunda generación de satélites fue exitosa y produjo datos que validaron a los satélites como herramientas útiles en la oceanografía.

Gracias a los éxitos de estos satélites, se inició una revolución mundial con miras al desarrollo tecnológico de éstos. Una tercera generación de satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA); el *ERS 1* y *2* realizaban una misión análoga a la del *Seasat*, con un desempeño mejorado. Luego, la Marina de Estados Unidos lanzó el *Geosat* el cual complementó la misión altimétrica del *Seasat*. Otros países fueron

participes de esta evolución satelital. El soviético Almaz-1; y más recientemente (10 de agosto de 1992) el satélite franco-americano TOPEX/Poseidon (Figura 7.20), excedió todos los requerimientos específicos para ser usados en estudios científicos del océano.

En la actualidad, ha sido ampliamente demostrada la validez de las observaciones satelitales y los datos son usados a diario por científicos e ingenieros de todo el mundo, quienes no requieren un entrenamiento especial para acceder a los datos y analizarlos. En el futuro, los datos satelitales, junto con datos tomados en terreno serán fundamentales para realizar investigaciones científicas y todo tipo de operaciones marinas.

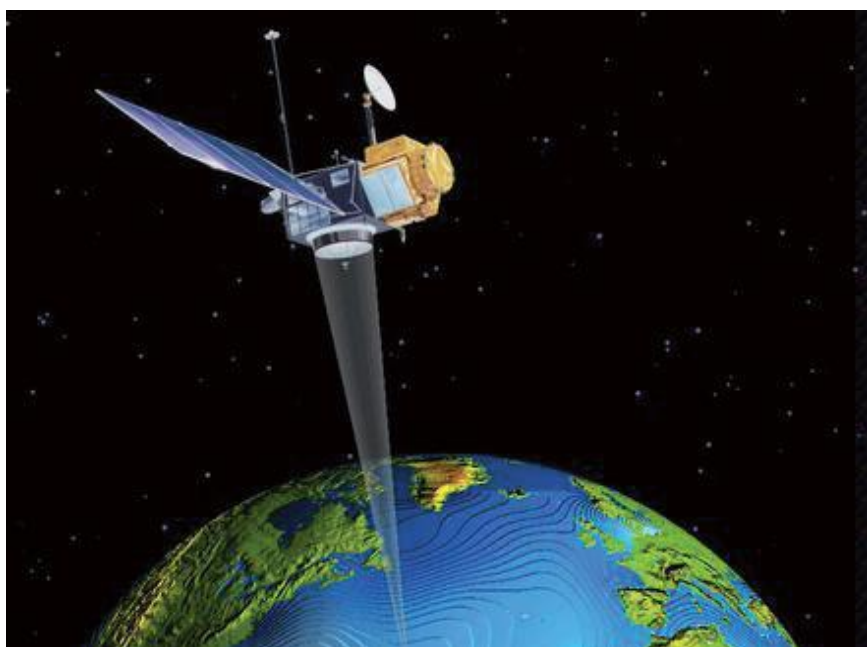


Figura 7.20. Satélite Topex/Poseidon traspasando el Pacífico Norte, en dirección sureste, a una altura de 1 300 km. Siendo un proyecto conjunto de la NASA, Centre National d'Études Spatiales (CNES) y la Agencia Espacial Europea (ESA).
Fuente: NASA

COMENTARIOS FINALES

Paralelo a los avances en investigación científica y en las tecnologías necesarias para su desarrollo, los científicos enfrentan nuevos desafíos y riesgos ambientales especialmente en el medioambiente marino como consecuencia de nuestras interferencias en los procesos naturales que controlan la ecología y dinámica de nuestro sistema climático.

Hoy en día el público está más consciente de los problemas climáticos y sus consecuencias socio-económicas globales, por lo que ahora la sociedad está demandando a los gobiernos que creen nuevas políticas

y soluciones proactivas que permitan un uso adecuado de los recursos naturales.

En los próximos 10 a 15 años las ciencias del océano se enfocarán en temas relacionados con el cambio climático y el funcionamiento de los ecosistemas marinos. Para determinar cómo los cambios en el clima afectarán todos los niveles de organización biológica se requerirán de observaciones, experimentos y modelos numéricos predictivos basados en datos confiables.

Para lograr innovaciones científicas que permitan tener un mejor entendimiento de las ciencias marinas y su interconexión con los demás elementos del sistema climático, será necesario continuar revolucionando las tecnologías y los equipos de instrumentación oceanográficos.

Avances en la capacidad de los sensores que incluyan nanotecnologías, genoma y robótica serán determinantes en el futuro para adquirir una mejor perspectiva del ambiente oceánico en sus distintas escalas espacio-temporales.

El desarrollo de nuevas herramientas para la observación de los océanos tales como sensores, satélites y vehículos autónomos facilitarán nuevos experimentos y permitirán el estudio de procesos que van desde episodios aislados hasta ciclos globales.

El mejoramiento de los sensores *in situ* existentes y el desarrollo de nuevos sensores biogeoquímicos requerirán de la participación integral de científicos e ingenieros de todo el mundo. Todos estos esfuerzos abrirán nuevos horizontes y permitirán entender y respetar el complicado sistema climático global.



PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

El alumno empleará una base de datos oceanográficos georeferenciados proporcionada por el profesor para graficar en tres dimensiones la información que se le entregue y realizará una evaluación de la información que obtiene como respuesta y definirá de qué tipo de sensor proviene y cuál puede ser su empleo o qué puede deducir del uso de este sensor. Se recomienda el uso del software libre *Ocean Data View™* y la fuente de datos del Atlas Mundial del Océano (WOA 2009).

Estudiar los equipos e instrumentos de medición más utilizados en oceanografía biológica y en investigación pesquera. Realizar una presentación con las principales características de cada uno, sus especificaciones técnicas y el método adecuado de instalación y mantenimiento, así como ejemplos de las aplicaciones científicas que estos tienen.

UNIDAD 8

ORGANIZACIONES A CARGO DE LOS OCÉANOS



INTRODUCCIÓN

El presente capítulo busca entregar la información general y algunos conceptos básicos de la organización mundial y estatal para el manejo de los océanos.

El estudio político y jurídico de los mares para definir su ordenamiento y organización siempre debe estar fundamentado en dos pilares: las relaciones internacionales y la investigación científica marina. Si estos elementos están presentes durante el diseño y desarrollo de políticas y normas, se pueden establecer planes de manejo adecuados y justos en beneficio de la mayoría de los interesados en ellas.

Esto sucede igualmente por dos motivos: el primero es que el océano es la vía principal de comunicación ambiental y comercial del mundo y el segundo, sin el conocimiento metódico y real de la ciencia en sus investigaciones, donde el ser humano no podría intervenir, como en los procesos oceánicos, no es posible realizar análisis políticos y jurídicos aptos para su administración, ya que no serían entendidos acertadamente.

Objetivos:

- Facilitar la comprensión de las organizaciones que han sido diseñadas a nivel internacional y nacional para manejar los océanos.

- Propiciar y moderar discusiones en torno a metodologías o situaciones que se presenten para tratar temas de interés nacional o internacional frente a los océanos.
- Fortalecer la idea de que todos los nacionales pueden aportar propuestas en cualquier escala y en cualquier tema marítimo, ya que como ciudadanos de un Estado ribereño están obligados a conocer, discutir y exigir las mejores opciones para la administración de su mar y su costa, puesto que estas forman parte de su territorio nacional y como tal, su deterioro o mala administración afectarán negativamente su futuro y el de su descendencia.

8.1. ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL (OMI)

La Organización Marítima Internacional (OMI) fue creada en 1974 y es el organismo especializado de las Naciones Unidas que se ocupa exclusivamente de asuntos marítimos; su interés se centra principalmente en los buques utilizados en servicios internacionales. 86 estados son miembros de la OMI, entre los que figuran naciones que cuentan con buques, países que utilizan servicios de transporte marítimo y países en desarrollo. Colombia aprobó el Convenio constituido de la OMI mediante la Ley 67/74.

La OMI tiene por objeto facilitar la cooperación entre gobiernos en relación con las cuestiones técnicas entrelazadas con el transporte marítimo y especialmente con la seguridad de la vida humana en el mar. Está encargada de velar por la aplicación de las normas de máximo rigor en cuanto a seguridad en el mar y eficiencia en la navegación. Esto supone la facilidad de un amplio intercambio de información entre las distintas naciones sobre cuestiones técnicas marítimas y la formación de acuerdos internacionales.

La OMI hace un foro donde los miembros pueden intercambiar información sobre problemas relacionados con asuntos marítimos de orden jurídico o técnico y tratar de resolverlos. Formula recomendaciones acerca de cuestiones marítimas sometidas a su consideración por estado miembros del conjunto de organizaciones de las Naciones Unidas. A la OMI, le incumbe convocar y preparar conferencias internacionales sobre temas que caen dentro de su esfera de acción, con el fin de concertar convenios o acuerdos internacionales.



Convenios e instrumentos de los que la OMI es responsable, relativos a la contaminación:

- **SOLAS 1970**

La seguridad marítima ha sido objeto de numerosos acuerdos intergubernamentales, de los cuales los más importantes son las Convenciones Internacionales para la seguridad de la vida humana en el mar. La convención hoy vigente fue adoptada en 1970 y se identifica con la sigla SOLAS 1970 (fue nominada de esta forma, en una conferencia internacional convocada por la OMI). Esta organización responde de la aplicación de la convención.

Este Convenio tiene por objeto acrecentar la seguridad de los buques, de los bienes transportados en aquellos y la vida humana a bordo. Es aplicable a los buques que tengan derecho a enarbolar el pabellón de los Estados, cuyos gobiernos sean gobiernos contratantes y que se dediquen a viajes internacionales.

- **MARPOL 73 / 78**

Mediante la Ley 12/81, Colombia aprueba la “Convención Internacional para la prevención de la contaminación por buques” firmada en 1973, en Londres y en 1978, el Protocolo se identifica con la sigla MARPOL 73/78. Este convenio tiene por objeto proteger el medio ambiente en general, y el marino en particular, de los derrames accidentales, negligentes o deliberados de hidrocarburos y otros elementos perjudiciales provenientes de los buques.

El primer instrumento multilateral, concertado con la primordial finalidad de preservar el medio ambiente marino, fue el Convenio Internacional para prevenir la contaminación de las aguas del mar por hidrocarburos de 1954 (OIL POIL/54). Sin embargo, debido a que sus reglas se limitaban a la contaminación por hidrocarburos, fue necesaria la elaboración del Convenio MARPOL, que tiene mayor alcance, pues incluye medidas no sólo para prevenir la contaminación por hidrocarburos, sino para otras sustancias perjudiciales.

8.2. COMISIÓN OCEANOGRÁFICA INTERGUBERNAMENTAL (COI)

Establecida en 1960, la COI de la UNESCO promueve la cooperación internacional y coordina programas relacionados con las investigaciones marinas, servicios y sistemas observacionales y el desarrollo de capacidades de mitigación de calamidades, con miras al mejoramiento del manejo de los recursos naturales oceánicos y costeros.

Mediante la aplicación de conocimiento, la COI busca mejorar las prácticas de manejo y los procesos de toma de decisiones de los países miembros; también apoyar el desarrollo sostenible y protege el ambiente marino. Además, la COI brinda colaboración a los miembros que requieran fortalecer su capacidad institucional en temas de investigación científica marina y de manejo del océano.

La COI hace presencia en Latinoamérica a través de IOCARIBE, que es la oficina regional para la zona del Gran Caribe y Regiones Adyacentes, la cual tiene como función ejecutar los mandatos de la COI a nivel de los países de la zona.

Desde 1969, Colombia es parte de la COI, donde es miembro activo y ha sido parte vital para la obtención de importantes logros, gracias a su participación en esta organización interdisciplinaria. En nuestro país, la Comisión Colombiana del Océano (CCO) es el punto focal técnico de este organismo internacional.

Secciones

La COI posee tres secciones, dentro de los cuales se enmarcan sus diferentes actividades, servicios, sistemas, proyectos y programas. Estas tres secciones son: Ciencias Oceánicas, Sistemas Operacionales de Observación y Servicios Oceánicos (Figura 8.1).

1. Ciencias oceánicas

Esta sección de la COI se implementa y desarrolla a través de diversos programas, enmarcados en tres categorías: ecosistemas oceánicos y protección ambiental marina; océanos y clima, y ciencia para el manejo integrado de áreas costeras.



I. Ecosistemas oceánicos y protección ambiental marina

Dentro de esta línea, se encuentran los siguientes temas:

a) Floraciones de algas nocivas

- Panel intergubernamental sobre floraciones de algas nocivas (IOC Intergovernmental Panel on Harmful Algal Blooms).
- Programa mixto SCOR/COI sobre ecología global y oceanografía de las floraciones de algas nocivas (IOC / SCOR Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms).
- Grupo de trabajo en dinámica de floraciones de algas nocivas (ICES/IOC Working Group on the Dynamics of Harmful Algal Blooms).

b) Indicadores de variabilidad ambiental y cambio ecosistémico

- Grupo de funcionamiento de trabajo sobre blanqueamiento de corales (IOC/World Bank Targeted Working Group on Coral Bleaching).
- Grupo de estudio sobre indicadores bénticos (IOC Study Group on Benthic Indicators).
- Grupo de Trabajo 119 sobre indicadores cuantitativos de ecosistemas para manejo pesquero (SCOR / IOC Working Group 119 on Quantitative Ecosystem Indicators for Fisheries Management).
- Grupo de estudio sobre el uso de índices ambientales en el manejo de poblaciones pesqueras pelágicas (IOC/GLOBEC/SPACC Study Group on Use of Environmental Indices in the Management of Pelagic Fish Populations).

c) Grandes ecosistemas marinos y cambio global en el océano

- Patrones globales de actividades humanas en el enriquecimiento de la tierra y del alimento de ecosistemas marinos costeros (Global Patterns of Human Activities on Land and Nutrient Enrichment of Coastal Marine Ecosystems).
- Programa de grandes ecosistemas marinos (NOAA/IUCN/ICES/IOC Large Marine Ecosystems Programme).

Red global de monitoreo para los arrecifes coralinos y nodo GCRMN para el sur de Asia (Global Coral Reef Monitoring Network y GCRMN South Asia Node)

- Procesos del acoplador de la biósfera-geósfera y protección ambiental de los mares profundos (Biosphere-Geosphere Coupling Processes and Environment Protection of the High Seas: Training Through Research).
- Estudio de análisis para los ecosistemas y la bioquímica oceánica (IGBP/SCOR Ocean Biogeochemistry and Ecosystems Analysis Study).

II. Océanos y clima

Este subprograma se desarrolla a través de:

- Programa de desarrollo del clima mundial (World Climate Research Programme).
- Panel climático y de observaciones oceánicas, (GCOS-GOOS-WCRP *Ocean Observations Panel for Climate*).
- Panel consultivo sobre el CO₂ oceánico (SCOR/IOC *Advisory Panel on Ocean CO₂*).
- Proyecto internacional coordinado para el carbono de los océanos (*International Ocean Carbon Coordination Project*).
- Grupo de coordinación internacional sobre el color de los océanos (*International Ocean-Colour Coordination Group*).

III. Ciencia para el manejo integrado de área costera

Este subprograma se desarrolla a través de:

- a) Foro global sobre los océanos, costas e islas / Cumbre Mundial en Desarrollo Sostenible (*Global Forum on Oceans, Coasts, and Islands / World Summit on Sustainable Development*).
- b) Ciencia para el Manejo Integrado de Áreas Costeras, MIZC (*Science for Integrated Coastal Area Management*).
- c) Indicadores de cambio ambiental y sostenibilidad (*Indicators of Environmental Change and Sustainability*).
- d) Metodologías y Publicaciones (*Methodologies and Publications*).
- e) Grupo de estudio sobre el impacto y manejo de las implicaciones de las descargas de submarinas de aguas subterráneas, dentro



de la zona costera (IOC/LOICZ/SCOR *Study Group on the Assessment and Management Implications of Submarine Groundwater Discharge into the Coastal Zone*).

2. Sistemas operacionales de observación

Esta sección de la COI busca dar respuesta a lo planteado en la Agenda 21, desarrollada en la reunión de las Naciones Unidas de 1992 en Río de Janeiro. En dicha agenda se estableció la necesidad de integrar un Sistema Global de observación e información para proveer de información de pronóstico oceánico y climático, para el manejo y mejor aprovechamiento de las zonas costeras (principalmente para naciones isleñas) y para la investigación del cambio ambiental global. La respuesta a este desafío ha sido el desarrollo del Programa Sistema Global de Observación de los Océanos, conocido por las siglas GOOS, el cual se encuentra en fase de desarrollo.

a) Sistema Global de Observación de los Océanos- GOOS

El Sistema Global de Observación del Océano (GOOS) es un sistema mundial unificado, que tienen por objeto integrar y distribuir sistemáticamente las observaciones oceánicas. Genera análisis, previsiones y otros productos útiles en la investigación oceanográfica.

La estructura de manejo del Programa GOOS se compone de un Comité Intergubernamental y un Comité de Dirección Científica, conocidos por sus siglas como I-GOOS y GSSC, respectivamente. El GOOS ha sido estructurado con la participación de las diferentes entidades que realizan actividades marítimas, con especial énfasis en el área de las investigaciones oceanográficas, logrando que sus iniciativas y esfuerzos estén orientados al logro de unos objetivos comunes que proceden de los mismos principios de acción del Programa. El establecimiento de este programa se ha planificado para capitalizar las capacidades y redes existentes, establecerse en regiones donde se pueden determinar y atender prioridades específicas, investigar tecnologías y metodologías para mejorar la eficacia y eficiencia de los sistemas de medición y vigilancia de los océanos y crear capacidad en los países en desarrollo para que estos reconozcan los beneficios posibles y contribuyan a su obtención.

Este programa es el más ambicioso proyecto de oceanografía operacional de la COI, y se apoya en diversos sistemas, organismos y cuerpos de trabajo de la COI y las Naciones Unidas, para su implementación y desarrollo, como es el caso de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Consejo Internacional de la Ciencia (ICSU), Comisión Técnica Mixta de Oceanografía y Meteorología Marina (JCOMM/COI-OMM), el Sistema Global de Observación del Nivel del Mar (GLOSS/COI), el Sistema Global de Observación Climática (GCOS). Los datos que genera GOOS pueden accederse a través del Sistema de Información Global de Observación (GOSIC).

Objetivos:

La COI ha planteado una serie de objetivos para GOOS, basados en el manejo y coordinación internacional, con el fin de obtener datos oceanográficos, los cuales puedan ser procesados para diferentes estudios (físicos, químicos, biológicos, meteorológicos etc., acerca de los océanos y mares), así como el de generar un análisis del desarrollo ambiental del océano y las posibles implicaciones que esto tenga frente al cambio climático mundial.

Los objetivos específicos son:

- Especificar los tipos de datos marinos necesarios para satisfacer, en una base continua, las necesidades de la comunidad mundial de usuarios del ambiente oceánico.
- Desarrollar y llevar a cabo una estrategia internacionalmente coordinada para la recolección, adquisición e intercambio de estos datos.
- Facilitar y desarrollar el uso y los productos de estos datos, y su aplicación en el uso y la protección del ambiente marino.
- Facilitar medios a las naciones menos desarrolladas para que puedan aumentar su capacidad para adquirir y usar datos marinos, según el diseño y filosofía del GOOS.
- Coordinar el funcionamiento continuado del propio GOOS, asegurando su integración con otros programas de observación y medioambientales ya en funcionamiento, dentro de estrategias globales más amplias.



3. Servicios oceánicos

Esta sección de la COI se compone de tres líneas de trabajo: el Programa de Intercambio Internacional de Datos Oceanográficos (IODE), el Programa del Sistema de Alerta por Tsunami (ITSU) y la Generación de Productos Cartográficos Oceánicos.

a) Intercambio Internacional de Datos Oceanográficos (IODE)

El programa IODE fue establecido en 1961, para la investigación marina, explotación y desarrollo de facilidades para el intercambio de datos e información oceanográfica entre estados participantes.

El sistema de IODE forma una red orientada por el servicio mundial que consiste en Agencias Nacionales, NODC (centros de datos oceanográficos nacionales), RNODC (Centros de Datos Oceanográficos Nacionales responsables) y WDC (Centros de Datos Mundiales de Oceanografía). Durante los últimos 40 años, los Estados miembros de la COI han establecido cerca de 60 centros de datos oceanográficos en diversos países.

Esta red ha podido recoger, controlar la calidad de millones de datos de observaciones del océano, y pone éstos a disposición de los Estados miembros. Los NODC tienen la responsabilidad de realizar el intercambio internacional de datos oceanográficos, debido a la facilidad centralizada que tienen de adquirir los procesos, controles de calidad, inventarios y archivos de las fuentes nacionales. Las DNA son designadas en países miembros de la COI, donde no se encuentran NODC, cumpliendo la responsabilidad del intercambio internacional de datos oceanográficos.

Estos centros y agencias deben formar parte fundamental del proceso de investigación científica a nivel nacional, regional y mundial, facilitando el acceso a bancos de datos históricos y operacionales del ambiente marino-costero. Los Centros Nacionales Responsables de Datos Oceanográficos (RNODC) han aceptado responsabilidades adicionales a los NODC, especiales en cuanto a la recopilación de datos o de regiones específicas.

En la actualidad, existen tres Centros Mundiales de datos Oceanográficos (WDC): Silver Spring (Estados Unidos), Obninsk

(Rusia), Tianjin (China), los cuales se dedican a recibir datos e inventarios de los NOCD, organizaciones científicas marinas y de científicos, para su posterior uso en los programas nacionales o en operaciones internacionales.

Objetivos:

Los principales objetivos del programa IODE son:

- Facilitar y promover el intercambio de datos oceanográficos e información.
- Desarrollar estándares, formatos y los métodos para el intercambio global de datos y de la información oceanográfica.
- Asistir a Estados miembros para adquirir la capacidad necesaria de manejar datos y la información oceanográficos y de hacer socios en la red de IODE.

Adicionalmente, el programa IODE también realiza acciones para:

- Asegurar a largo plazo el archivo, la gestión y los servicios de todos los datos e información marina y oceanográfica.
- Prestar apoyo a los programas marinos internacionales científicos y operacionales de la COI y sus organizaciones patrocinadoras, mediante asesoramiento y servicios de gestión de datos.

Como estrategia de implementación para la región latinoamericana, la COI ha diseñado ODINCARSA, que busca articular, mediante una red de trabajo, el intercambio de datos e información oceanográfica para Suramérica y el Caribe. A su vez, esta iniciativa busca articular diversas acciones, en los ámbitos científicos y de educación en los temas marinos, oceánicos y costeros, mediante la interacción de grupos de trabajo, de los distintos países que hacen parte de esta propuesta, que son: Argentina, Bahamas, Barbados, Belice, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Dominica, Ecuador, Jamaica, México, Panamá, Perú, Trinidad y Tobago.

En nuestro país, la entidad que es el punto focal técnico de este Programa, es el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, el cual tiene su sede en Tumaco.



b) Programa Internacional de Alerta por Tsunami (ITSU)

Este programa de la COI busca asistir y apoyar a los países costeros, que se encuentran en riesgo por la afectación de tsunami, para que desarrollen las actividades para la gestión del riesgo por tsunami, con miras a disminuir el grado de vulnerabilidad de las poblaciones más expuestas y limitar al mínimo posible la pérdida de vidas e infraestructura.

Las responsabilidades de este programa incluyen:

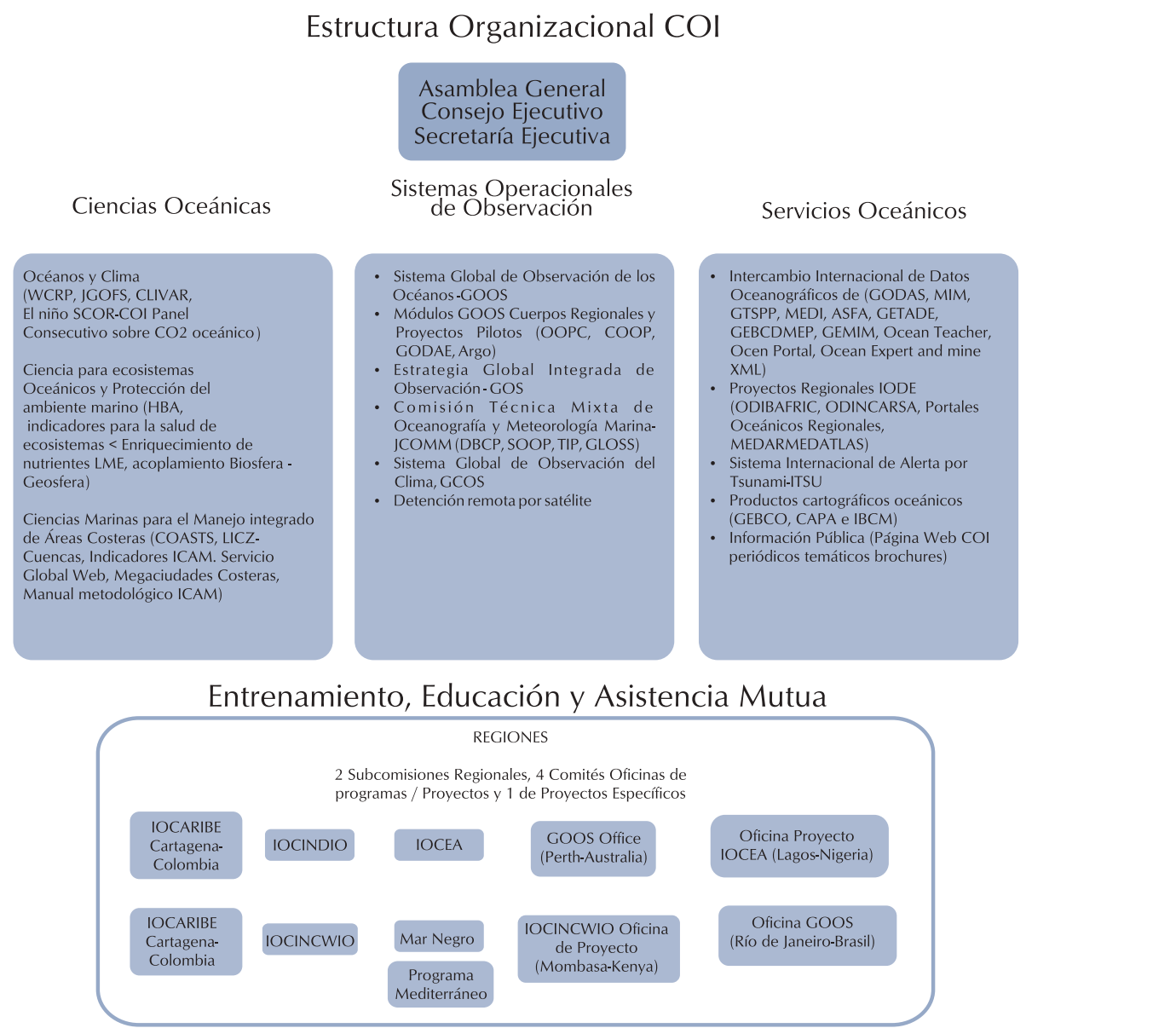
- Supervisión de las actividades de alarma por tsunami a nivel internacional en el Pacífico y otros océanos y recomendación de mejoras en comunicaciones, redes de datos, adquisición y proceso, métodos del pronóstico por tsunami, y difusión de la información.
- Traer la información de los estados miembros y no miembros, sobre sistemas de alerta por tsunami, sobre los asuntos de la COI y del ITIC, y sobre cómo hacerse participantes activos en el Grupo de Coordinación Internacional del ITSU-ICG/ITSU.
- Asistir a estados miembros en el establecimiento de sistemas de alertas nacionales y regionales, y la reducción del riesgo por tsunami con programas comprensivos para su mitigación; cámara de compensación para el desarrollo de los materiales educativos y de preparación, de la colección de datos de acontecimientos pasados, y de la investigación para fomentar el uso de la información, para prevenir y disminuir la pérdida de vidas.

A raíz del terrible tsunami de diciembre de 2004, el cual afectó las costas del sureste asiático, la COI ha emprendido el proyecto de desarrollar un sistema mundial de alerta por tsunami, a través de subsistemas regionales, como es el caso del Sistema de Alerta por Tsunami para el Océano Índico, el Sistema de Alerta por Tsunami y Otras Amenazas Costeras para la Región del Gran Caribe entre otros.

c) Productos cartográficos oceánicos

Las actividades de generación de cartografía oceánica de la COI datan desde 1969, después de la anexión por la Asamblea General de las Naciones Unidas del Programa de Largo Plazo y Ampliado del Océano.

En esta línea de trabajo, las actividades actuales son la publicación y actualización del Atlas GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) sobre los océanos mundiales, el Atlas Internacional Geológico-Geofísico para los Océanos Atlántico y Pacífico (GAPA) y otros proyectos cartográficos regionales como generación de la batimetría para el Océano Índico Occidental, el Océano Pacífico Occidental y el Océano Atlántico Centro Oriental.



ORGANIZACIONES EN COLOMBIA

Colombia es el único país de América del Sur; que cuenta con costas en el Mar Caribe y Océano Pacífico, su territorio marítimo alcanza los 928 660 km² (Pacífico 339 100 km² y Caribe 589 560 km²) incluyendo el mar territorial, la zona contigua y la zona económica exclusiva. El país tiene 11 fronteras marítimas, en el Océano Pacífico con; Panamá, Costa Rica, y Ecuador, en el mar Caribe con; Venezuela, Jamaica, Honduras, Haití, República Dominicana, Nicaragua, Panamá y Costa Rica. Los tratados, acuerdos y convenios que se han suscrito son:

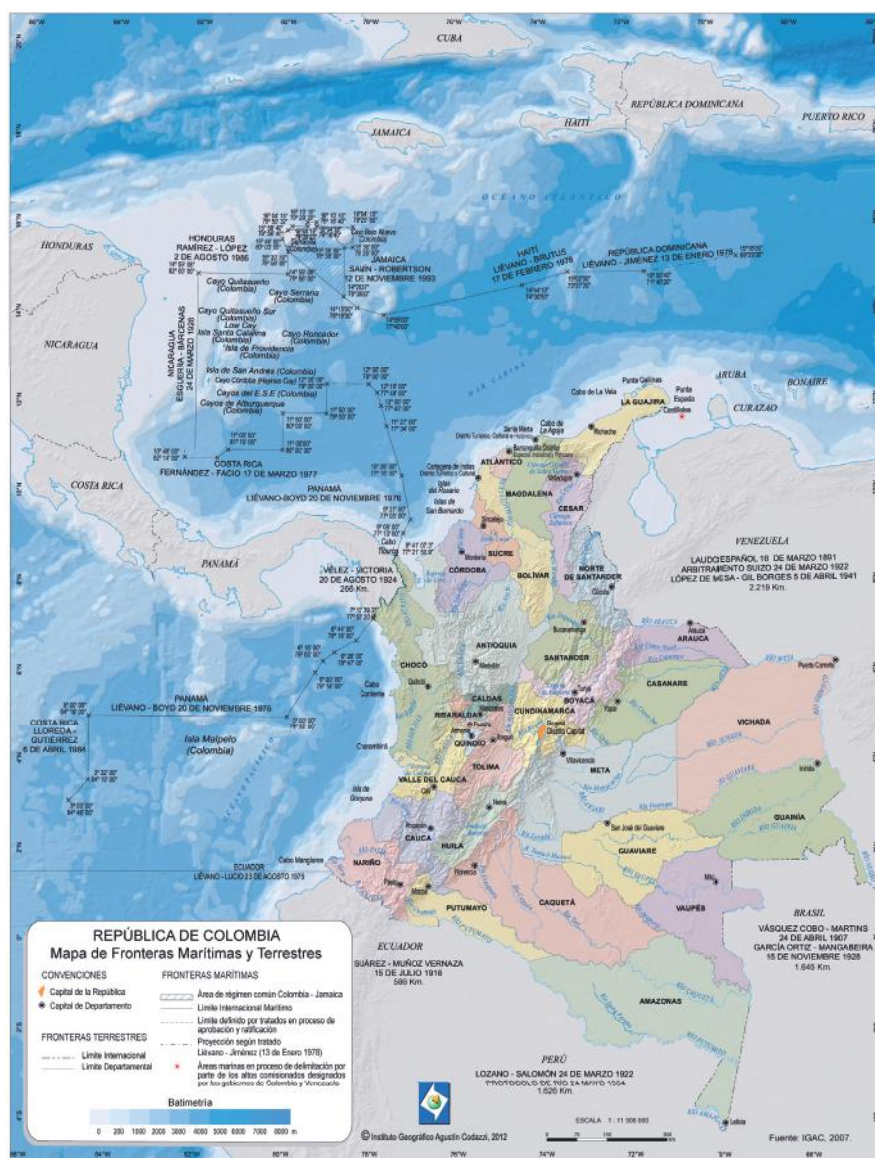


Figura 8.2. Mapa oficial del territorio colombiano y sus áreas marítimas.
Fuente: IGAC. 2012

- Ecuador 1975 Convenio Liévano-Lucio (Océano Pacífico)
- Panamá: 1976 Tratado Liévano-Boyd (Océano Pacífico y Mar Caribe)
- Costa Rica: 1984 Tratado Lloreda-Gutiérrez (Océano Pacífico)
- Nicaragua 1928 Tratado Esguerra-Bárcenas: (Mar Caribe)
- Costa Rica 1977 Tratado Fernández-Facio (Mar Caribe)
- República Dominicana 1978 Acuerdo Liévano-Jiménez (Mar Caribe)
- Haití 1978 Acuerdo Liévano-Brutus (Mar Caribe)
- Honduras 1986 Tratado Ramírez-López (Mar Caribe)
- Jamaica 1993 Tratado Sanín-Robertson (Mar Caribe)

8.3 DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA (DIMAR)

La Dirección General Marítima (DIMAR) es la autoridad marítima Colombiana que tiene a su cargo; la señalización marítima, el control del tráfico marítimo, la navegación marítima por naves y artefactos navales, la marina mercante y el transporte marítimo, así como sus comunicaciones, la utilización, protección y preservación de los litorales, la investigación científica marina en todas sus disciplinas.

La Dirección General Marítima (DIMAR) entre otras funciones; vigila los sistemas de exploración, explotación y prospección de los recursos naturales del medio marino, es de su potestad autorizar; la recuperación de antigüedades o tesoros náuticos, la búsqueda de salvamento marino, la colocación de cualquier tipo de estructuras, obras fijas o semifijas en el suelo o en el subsuelo marino. DIMAR se encarga del servicio de pronósticos de mar y tiempo, de permitir los rellenos dragados y obras de ingeniería oceánica y del desarrollo de la zona costera.

En 1971 se reestructuró con el decreto ley 2349 la Dirección de Marina Mercante Colombiana adscrita al Comando de la Armada Nacional y se creó la Dirección General Marítima y Portuaria, dicha dirección con el decreto ley 2324 de 1984 se reorganizó estableciendo que; las aguas interiores marítimas, incluyendo canales intercostales y de tráfico marítimo, todos los sistemas marinos y fluviomarinos, el mar territorial, la zona contigua, la zona económica exclusiva, el lecho y subsuelo marino, las aguas supradyacentes, los litorales con playas y terrenos de bajamar, islas, islotes y cayos, se encuentran dentro de su jurisdicción.



Organización DIMAR

Del despacho del Director General Marítimo dependen directamente las Capitanías de Puerto del país. DIMAR se divide en tres subdirecciones, la primera Subdirección de Marina Mercante, la segunda Subdirección de Desarrollo Marítimo, de la cual hacen parte los centros de investigaciones oceanográficas e hidrográficas del Caribe (CIOH) y del Pacífico (CCCP), así como, la señalización marítima del Caribe, Pacífico y del río Magdalena, la tercera es la Subdirección Administrativa y Financiera que tiene a su cargo los grupos de: Informática y comunicaciones, desarrollo humano e intendencias regionales (Figura 8.3).

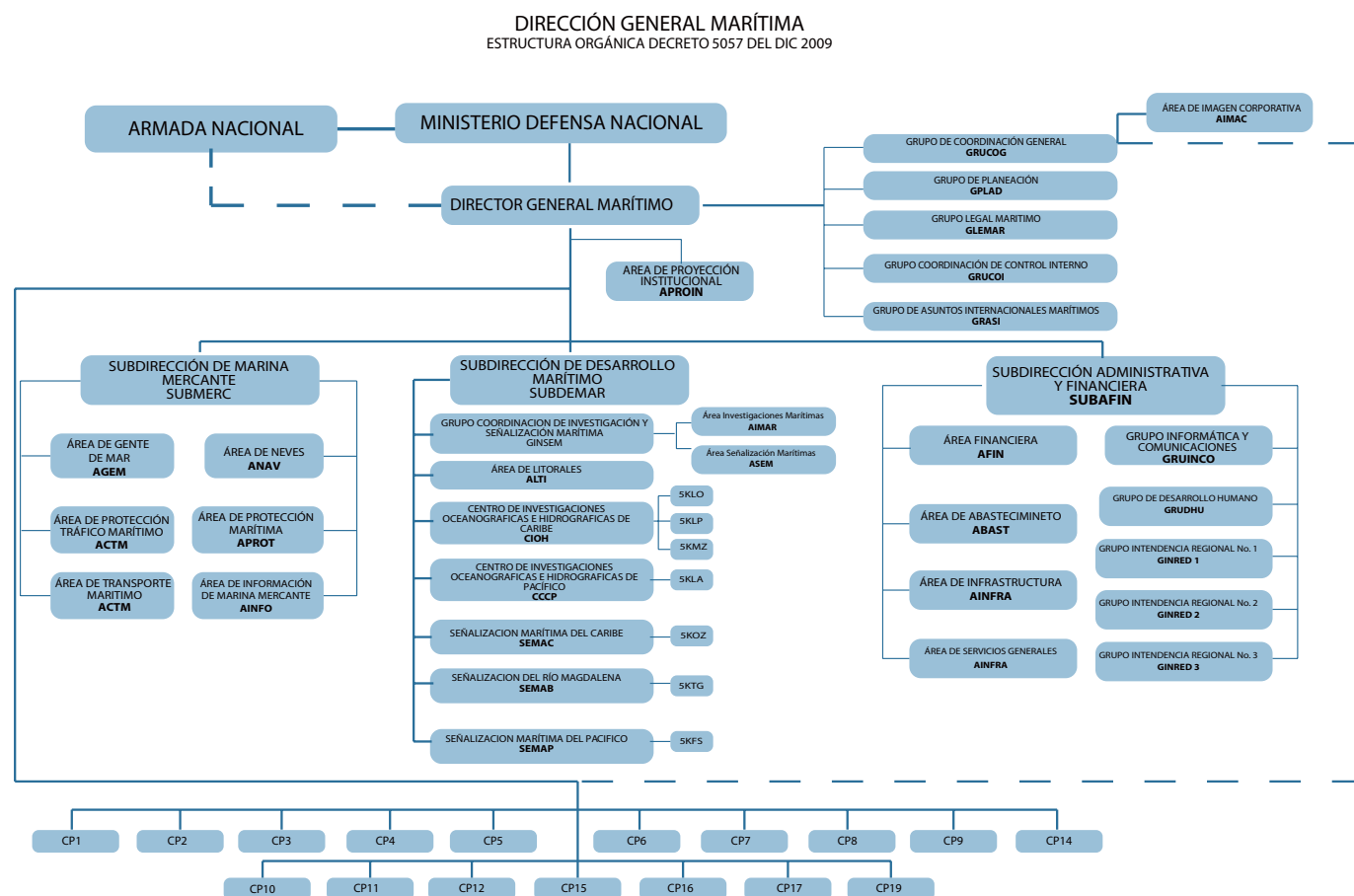


Figura 8.3. Organigrama Dirección General Marítima.

Fuente: DIMAR

8.4. COMISIÓN COLOMBIANA DEL OCÉANO (CCO)

Antecedentes

La Comisión Colombiana de Oceanografía fue creada por el Decreto 763 de 1969 y reestructurada mediante Decreto 415 de 1983, como una entidad con carácter permanente, como órgano dedicado a los temas de investigación relacionados con las zonas marítimas del país.

No obstante, la necesidad de una política pública para el tema oceánico y costero, donde se incluyeran orientaciones o contenidos, instrumentos o mecanismos, definiciones o modificaciones institucionales, y la previsión de sus resultados posibilitó que el Gobierno Nacional expidiera el decreto 347 de 2000, a través del cual se reestructura la Comisión Colombiana del Océano (CCO), como el ente encargado de “proponer al Gobierno Nacional, la Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros, para su administración y desarrollo sostenible”.

En el 2001, la Secretaría Ejecutiva de la CCO emprendió la tarea asignada, realizando varios intentos por conseguirlo, el primero de ellos fue el documento denominado “Bases para una Política del Océano”, el cual se convirtió posteriormente en el libro “Colombia y el Océano: Una Visión Prospectiva de Cara al Tercer Milenio”. A partir de este documento, se elaboró y fue presentado por la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano el “Proyecto de Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros”, que buscaba definir los intereses fundamentales nacionales en el océano y sus espacios insulares y costeros. Sin embargo, a pesar del arduo trabajo realizado en aquel entonces, el documento no llegó a convertirse en Política, pero sí en insumo de inmenso valor para posteriores iniciativas.

En el 2002, la Secretaría Ejecutiva de la CCO diseñó los “Lineamientos de la Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros”, LPNOEC, los cuales fueron aprobados por consenso de los miembros, estableciéndose así como punto de partida para el diseño y adopción de la Política Nacional de Océanos y Costas del país.

Más tarde, durante 2006 y 2007, tras más de 5 000 horas de trabajo asociado con los miembros, la Secretaría Ejecutiva de la CCO trabajó

en el diseño, socialización y armonización del documento final de Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros.

Continuando incansablemente con el proceso, y con la firme decisión de lograr consolidar una Política definitiva, acorde con las necesidades del país y que fuera aceptada ampliamente por los miembros y los diferentes sectores, se presentó para aprobación la nueva propuesta a la CCO en pleno, consiguiendo su aprobación como política de Estado y visión de largo plazo.

No siendo suficiente, la Secretaría Ejecutiva de la CCO emprendió una nueva campaña, esta vez ante organismos internacionales, como la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO, hasta alcanzar su reconocimiento y publicación en el libro “National Ocean Policy” de ese organismo, como una de las diez políticas públicas de océanos existentes en el mundo, trajo a Colombia el honor de tal reconocimiento.

El decreto 2214 de 2013, expedido el 8 de octubre modificó la composición de la Comisión Colombiana del Océano, siendo nuevos miembros el director(a) de la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia (APC Colombia) quien la presidirá y el director del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - José Benito Vives de Andrés (INVEMAR).

Organización de la CCO

La CCO es un órgano intersectorial de asesoría, consulta, planificación y coordinación del Gobierno Nacional, en materia de Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros y sus diferentes temas conexos, estratégicos, científicos, tecnológicos, económicos y ambientales relacionados con el desarrollo sostenible de los mares colombianos y sus recursos (Figura 8.4).

En este sentido, su misión consiste en asesorar al Gobierno Nacional en la planificación, desarrollo y coordinación de la Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros para garantizar la adecuada articulación en su administración y desarrollo sostenible, incluidos los planes de acción para implementarla, convocando a las diferentes entidades públicas y privadas con responsabilidades e intereses en el campo marino.

La Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros (PNOEC)

La PNOEC es una política de Estado, referida a los espacios oceánicos y costeros de Colombia, la cual responde a la necesidad de asumir el océano desde una visión integral. Articula iniciativas y nuevas realidades de importancia nacional, como políticas sectoriales, el Documento 2019 Visión Colombia II Centenario y el Plan Nacional de Desarrollo, dota al país de una herramienta a largo plazo, donde confluyen el desarrollo institucional, territorial, económico, ambiental y sociocultural del país, frente a los retos del futuro.

Está estructurada en tres partes, la primera, define los intereses marítimos del Estado, los principios orientadores y el objetivo de la Política; la segunda, contempla los Aspectos Transversales, los Asuntos Internacionales, los Asuntos Científicos, Tecnológicos y de Innovación, y los Aspectos Interinstitucionales; en la tercera, se

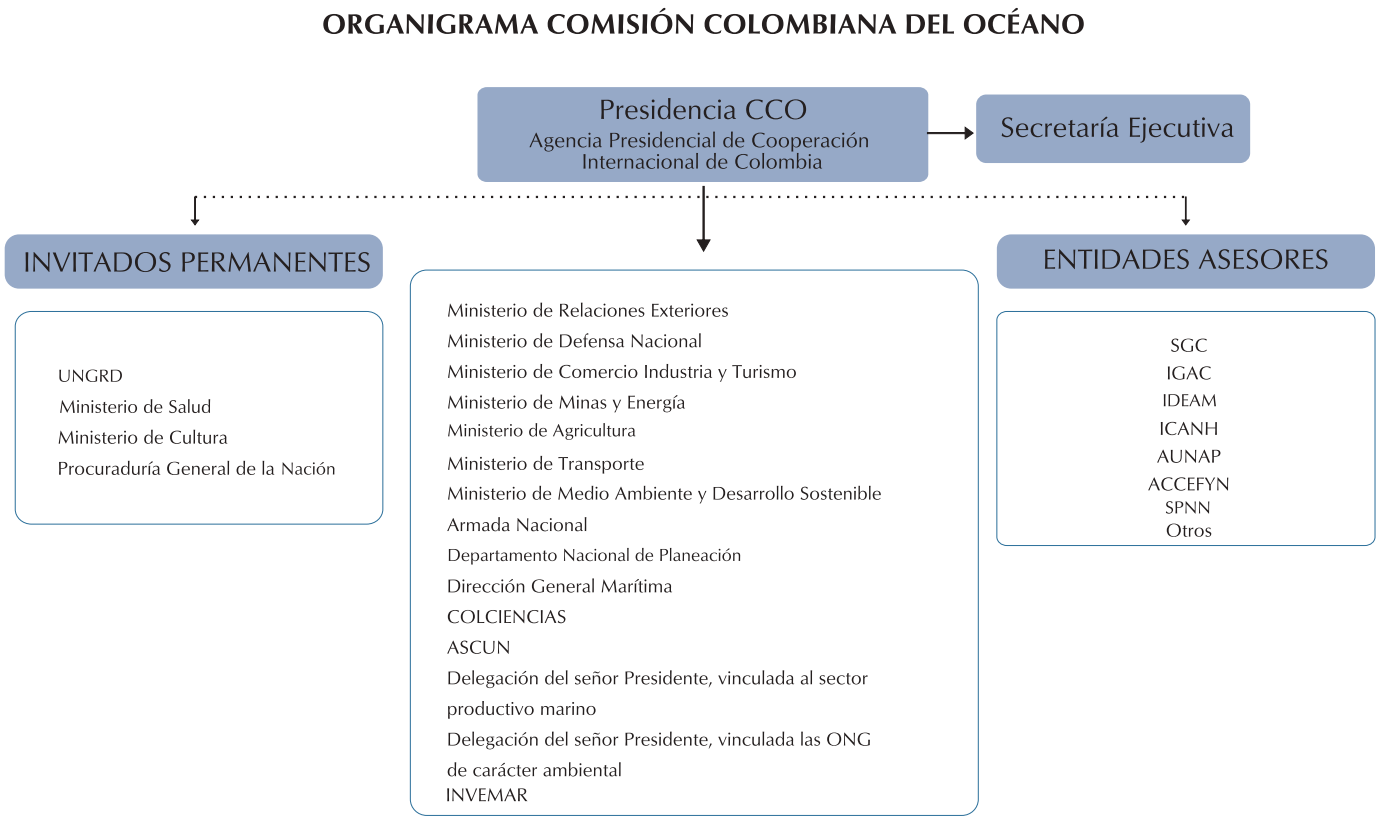


Figura 8.4. Organización de la Comisión Colombiana del Océano (CCO).
Fuente: Comisión Colombiana del Océano



proponen líneas de acción mediante las áreas temáticas de Desarrollo Institucional, Desarrollo Económico, Desarrollo Territorial, Desarrollo del Ambiente Oceánico y Costero, y Desarrollo Socio Cultural, temas que son desarrollados mediante el permanente trabajo de Comités Técnicos especializados, basados en trabajos mancomunados.

Los intereses marítimos están definidos así:

1. Salvaguardar la soberanía e integridad del territorio marítimo nacional.
2. Establecer un ordenamiento marino- costero.
3. Preservar el ambiente marino- costero y aprovechar de manera sostenible sus recursos naturales, promoviendo el desarrollo socioeconómico nacional.
4. Fomentar el reconocimiento de la cultura marítima nacional, promoviendo la educación en temas del mar.
5. Desarrollar investigación científica, tecnológica y de innovación en la región marina y costera del país.

Aspectos transversales

En el ítem transversal de Asuntos Internacionales, se busca promover el desarrollo marítimo y costero nacional en su más amplia concepción, desde los puntos de vista político, social, territorial, económico, cultural y ambiental, y fortalecer un trabajo multidisciplinario e interinstitucional, con el propósito de obtener resultados nacionales e internacionales, que faciliten e incentiven el desarrollo marítimo y costero del país.

Se establecen como objetivos estratégicos internacionales el apego a los principios y normas del derecho internacional ratificados por Colombia; la defensa de la soberanía nacional y el desarrollo integral de sus fronteras terrestres y marítimas; la defensa y promoción de los intereses marítimos nacionales en el escenario multilateral; la consolidación de las relaciones estratégicas internacionales; la negociación, la suscripción y el seguimiento de los Tratados Internacionales en materia marítima y costera; la cooperación internacional en el ámbito marítimo y costero; el apoyo a los ciudadanos en los ámbitos marítimos y costeros, en virtud del mandato constitucional de servicio a la comunidad como fin esencial del Estado y por último el fortalecimiento institucional del Ministerio de Relaciones Exteriores para los asuntos marítimos y costeros.

En el ítem transversal de Asuntos Científicos, Tecnológicos y de Innovación, se busca contribuir a la organización, desarrollo, fortalecimiento y consolidación de las ciencias y tecnologías del mar en Colombia, con el fin de que el país cuente con bases científicas y técnicas sólidas que permitan efectuar un manejo integral y adecuado de sus zonas y recursos costeros y marinos, de tal manera que se logre un balance entre su conservación y desarrollo productivo (aprovechamiento sostenible).

En el ítem transversal de Asuntos Interinstitucionales, se busca lograr que la gestión política valore la influencia del mar en el ciclo vital del Estado, a través de un actuar coordinado y un compromiso real de cada una de las instituciones y entidades involucradas para lograr un engranaje en cada una de las acciones emprendidas, y a su vez, reconocer que el tema marítimo recorre la estructura institucional del país, desde lo nacional a lo local (niveles territoriales y niveles nacionales desconcentrados). Todo lo mencionado, a través del fortalecimiento de la CCO.

Áreas temáticas

Las áreas temáticas son:

- Desarrollo Institucional: Poder Naval, Autoridad Marítima.
- Desarrollo Económico: Puertos e Infraestructura Portuaria; Transporte Marítimo, Marina Mercante e Industria Naval; Pesca y Acuicultura; Industria Turística; Minerales, Hidrocarburos y Fuentes de Energía No Convencionales, Alternas o Renovables.
- Desarrollo Territorial: Manejo Integrado de Zona Costera; Prevención y Atención de Desastres; Áreas Marinas y Costeras Protegidas.
- Desarrollo del Ambiente Oceánico y Costero: Conservación de Recursos y Ecosistemas Estratégicos; Biodiversidad Marina; Calidad Ambiental Marina y Cambio Climático.
- Desarrollo Sociocultural: Cultura Marítima, Educación Marítima; Patrimonio Cultural. (Figura. 8.5)

A través de su consolidación, estas áreas permitirán el fortalecimiento continuo del tema marítimo en Colombia.



En el Desarrollo Institucional, convergen dos componentes, el poder naval y el poder marítimo, como elementos vitales para el desarrollo del Estado, a través del ejercicio del control del mar en aguas jurisdiccionales colombianas y la proyección el poder naval nacional, con el propósito de mantener la soberanía nacional, la vigencia de las instituciones, el orden interno, la integridad territorial, el desarrollo del poder marítimo y la protección de los intereses de la nación.

En el Desarrollo Económico, se busca integrar los sectores que convergen el tema oceánico y costero, además de modernizar y optimizar la infraestructura pública, fomentando la inversión privada y la libre competencia, en procura de alcanzar un desarrollo equilibrado, sostenible y competitivo. Puertos en infraestructura portuaria, transporte marítimo, marina mercante e industria naval, pesca y acuicultura, industria turística, minerales, hidrocarburos y fuentes de energías no convencionales, alternas o renovables, son los tópicos que se tocan.

En el Desarrollo Territorial, el manejo de los espacios oceánicos y las zonas costeras de la nación cobra renovada preponderancia al constituirse en uno de los principales renglones de desarrollo, por lo que su implementación debe seguir un enfoque integral en consideración a los múltiples factores y elementos que lo componen. El manejo integrado de zona costera, la atención y la prevención de desastres y las áreas marinas y costeras protegidas son las temáticas que se abordan.

En el Desarrollo del Ambiente Oceánico y Costero, se busca continuar garantizando el derecho general a gozar de un medio ambiente sano, la protección del patrimonio natural y la soberanía de la Nación, enfocados en los espacios oceánicos y costeros. La biodiversidad marina, la calidad ambiental marina y el cambio climático son las temáticas específicas tratadas.

En el Desarrollo Sociocultural, se busca permitir a los colombianos conocer y entender el océano y los espacios costeros de manera positiva, para poder aprovechar sosteniblemente sus beneficios y lograr, de esta manera, mayor preocupación por su preservación y salvaguarda. Para ello se requiere contar con un mayor número de profesionales especializados en temas marítimos y costeros. Igualmente

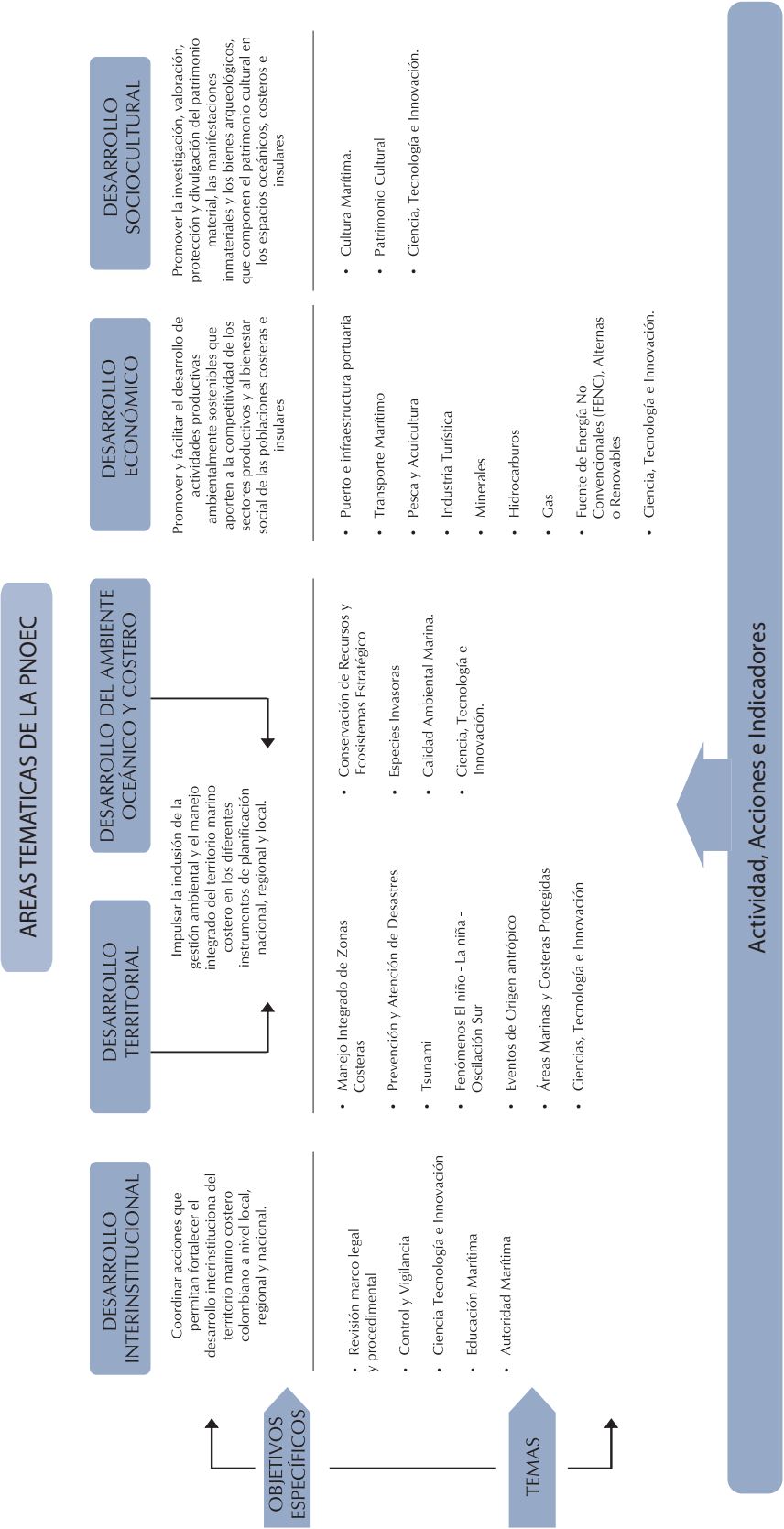


Figura 8.5 Áreas Temáticas de la PNOEC.
Fuente: CCO.



Figura 8.6. Procesos educativos sobre asuntos marinos a colegios y universidades por parte de la Comisión Colombiana del Océano

Fuente: Comisión Colombiana del Océano. CCO

se requiere identificar y preservar los recursos y las expresiones culturales ancestrales y contemporáneas de los espacios marinos y costeros. La cultura marítima, la educación marítima y el patrimonio cultural son los tres temas abordados (Figura 8.6).

8.5 DIRECCIÓN MARES, COSTAS Y RECURSOS ACUÁTICOS

La dirección de mares, costas y recursos acuáticos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se encarga de la conservación de los mares y costas del país y de ejecutar la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia PNAOCI.

La PNAOCI busca propender por el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras, que permita mediante su manejo integrado, contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población colombiana, al desarrollo armónico de las actividades productivas y a la conservación y preservación de los ecosistemas y recursos marinos y costeros.

Para lo anterior, la dirección de mares costas y recursos acuáticos trabaja por incluir los ecosistemas marinos y costeros dentro del ordenamiento territorial de la nación, reconociéndolos como parte integral y estratégica del territorio, para armonizar sus usos y las actividades que allí se realicen. De igual forma, se ocupa por

adoptar medidas de conservación, rehabilitación y/o restauración de los ecosistemas marinos y costeros y sus recursos, para preservar la diversidad biológica y garantizar la sostenibilidad de la oferta de bienes y prestación de servicios ambientales.

La dirección de mares, costas y recursos acuáticos construye lineamientos ambientales para el desarrollo de actividades productivas que se realizan en los espacios oceánicos y las zonas costeras y sus esfuerzos van dirigidos hacia un ambiente marino y costero sano para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población costera. Lo antepuesto de acuerdo con la política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia.

8.6 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS “JOSÉ BENITO VIVES DE ANDRÉIS” (INVEMAR)

El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andréis” -INVEMAR, según su página oficial es un instituto que realiza investigaciones científicas en zonas marinas y costeras del país. Emite conceptos técnicos sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos marinos, también presta asesoría, apoyo científico y técnico tanto al Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible como a las entidades territoriales y Corporaciones Autónomas Regionales.

La articulación del INVEMAR con otras entidades públicas y privadas, garantiza el conocimiento científico necesario para la formulación de políticas, la toma de decisiones y la elaboración de planes y proyectos que conducentes al manejo sostenible de los recursos, a la recuperación del medio ambiente marino y costero y al mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos.

Uno de sus principales objetivos es obtener, almacenar, analizar, estudiar, procesar, suministrar, coordinar y divulgar información básica sobre oceanografía, ecosistemas marinos, sus recursos y sus procesos para el conocimiento, manejo y aprovechamiento de los recursos marinos.



PRUEBAS DE CONOCIMIENTO

Organizar y preparar un debate sobre propuestas del mejor modelo a seguir para crear o mejorar la organización de a) un Estado ribereño, b) de un Estado sin costas, c) de un pequeño Estado Insular y d) de un gran Estado archipiélago, para la administración de sus océanos y costas. Dejará, un informe escrito de fin de curso para consulta y futuras propuestas.



BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE-AMAYA C.A Y TORRES-PARRA R.R. 2006. Potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos. Boletín científico CIOH No. 24. P 11 - 25.
- AUBERT, M. 1968. El cultivo del océano. Nueva Colección labor. Editorial Labor S.A. Barcelona. P. 202.
- BANCO DE OCCIDENTE 2000. Colombia Universo Submarino.
- BARRY, J.P., KIET L.C. Y CUONG V.V. 1961. Le végétation des plages vasos ablonneuses de la presqu'île do Cam-Ranh. Aun. Faculté des Sciences de Saigon No. 49. P. 129-140.
- BASÁÑEZ, J.F.N. Y MONSALVE, J.M.P. Gestión Integral del agua de los tanques de lastre. Una necesidad Medio Ambiental. Instituto Panamericano de Ingeniería Naval. IPIN. España. P. 9-10.
- BENEZECH, C. 1973. El agua base estructural de los seres vivos, Editorial Labor S.A. Barcelona. P. 18
- BRADFIELD, A.E. 1964. The oxygen content of interstitial water in *sandy shores*. J. Anim. Ecol. P. 37- 97.
- BRUCE, I.R. 1928. Physical factors in the sandy beach. Part 1. Tidal, climatic and edaphic: Journal of Marine Biology Association, NS. 15 (2). P. 535-552.

- BRUCE, I.R. 1928. Physical factors in the sandy beach. Part 11. Chemical changes-carbondioxide concentration and sulfides. *Journal of Marine Biology Association*, NS. 15(2). P. 553-565.
- BUREAU HIDROGRÁFICO INTERNACIONAL 2010. Manual de hidrografía. Publicación C-13, primera edición mayo de 2005 (corrección mayo de 2010). Mónaco.
- CAILLEYX, A. 1968. Anatomía de la Tierra. Biblioteca para el hombre actual. Edición Guadarrama, S.A. Madrid.
- CANTERA, J.R. 1991a. Etude structurale des mangroves et des peuplements littoraux des deux baies du pacifique colombien (Málaga et Buenaventura). Rapport avec les conditions du milieu et les perturbations anthropiques. Thèse d'Etat Sciences. Université d'Aix-Marseille II. Marseille France. P. 429.
- CANTERA, J. R., B. THOMASSIN Y ARNAUD, P. 1999. Faunal Zonation and Assemblages in the Pacific Colombian mangroves. *Hydrobiology* 413. P. 17-33.
- CANTERA, J.R., THOMASSIN, B. Y ARNAUD, P. 1984. Biogeographic and Ecological remarks on Molluscan Distribution in Mangrove Biotopes. 1. Gastropods. *The Journal of molluscan Studies*. Supplement 12a: P. 10-26.
- CANTERA, J.R. Y PRAHL, H. VON 1986. Bioerosión de formaciones terciarias en Bahía de Málaga, Colombia 1. Notas Sistemáticas sobre las especies que intervienen en los procesos erosivos. Resúmenes XI Congreso Nacional de Ciencias Biológicas ACCB. Cali. P. 63.
- CANTERA, J.R., PRAHL, H. VON, ESCOBAR, J.C. Y PEÑA, E. 1989. Sistemática de corales del género *Pocillopora* del Pacífico colombiano utilizando taxonomía numérica. *Rev. Biol. Trop.* 37. P. 23-28.
- CANTERA, J.R., CASTRILLON, V., CORTEZ-PINEDA, F., GIRALDO, A., GUZMÁN-ALVIS, A., MEJIA-LADINO, L.M., SAENZ-BETANCOURT, H., SOLANO, O.D. Y MONTOYA-CADAVID E. 2008. Estado de los fondos blandos. En: Colombia Informe Del Estado De Los Ambientes Marinos Y Costeros En Colombia. 2005. Serie De Publicaciones Periódicas, Invemar ed: Instituto De Investigaciones Marinas y Costeras Invemar P.147 – 196.
- CANTERA, J. Y CONTRERAS, R. 1993. Colombia Pacífico. Tomo I. Ecosistemas Costeros.



- CARLTON, J. 1977. A survey of selected coastal vegetal communities of Florida, Florida Marine research Publications. P. 23.
- CARSON, R. 1980. El mar nos rodea. Ediciones Grijalva, S.A. Barcelona. P. 278.
- CARTA-GONZÁLEZ, J.A., CALERO-PEREZ, R., COLMENAR-SANTOS, A. Y CASTRO-GIL, M. 2009. Centrales de energía renovables: generación eléctrica con energías renovables. Pearsons Educación, S.A., Madrid. P. 703.
- CASTELLANOS-GALINDO, G.A., CANTERA, J.R., ESPINOSA, S. Y MEJIA-LADIO, L.M. 2011. Use of local ecological knowledge, scientist's observations and grey literature to assess marine species at risk in a tropical eastern Pacific estuary. Aquatic Conservation: Marine and Fresh water. Ecosystems. (2011), 21. P. 37-48.
- CCPS-CCO 2008. Efectos adversos generados por la basura marina y conformación del grupo de trabajo para reducir su ingreso al medio marino de la Bahía de San Andrés de Tumaco. Informe Final. Comisión Colombiana del Océano. Bogotá. P. 3-47.
- CEBALLOS, C. 2008. Estado de las playas en Colombia. Autores. 2005. Título del capítulo. P. 149- 156. En: INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia. 2004. (Serie de Publicaciones periódicas, INVEMAR; No. 10) Santa Marta. P. 360.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS. 2004. Área de Hidrografía- Náutica. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Cartagena, Bolívar.
- CICEANA, A. C. N/A. Ciclo Hidrológico. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. México. P. 1.
- CIFUENTES, J., TORRES, P. Y FRIAS, M. 1997. El océano y sus recursos. III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería. Capítulo VI. Las masas de agua. Convergencia y divergencia.
- CIFUENTES, J., TORRES, P. Y FRIAS, M. 1997. El océano y sus recursos. VII. Flujos de energía en el mar: reproducción y migraciones. Capítulo XI. Las migraciones de los organismos marinos.

- CIFUENTES, J., TORRES, P. Y FRIAS, M. 1997. El océano y sus recursos. X. pesquerías. Capítulo VI. Peces. Pesquería de Atún.
- COMISIÓN COLOMBIANA DEL OCEANO 2010. Lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo integrado de zonas costeras. PNMIZC. Comité Técnico Nacional de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Comisión Colombiana del Océano. Bogotá. P. 136.
- CHAVEZ, G. 1978. Elementos de oceanografía. Compañía Editorial Continental, S.A. México. P. 256.
- COI 2004. Reporte Anual de la COI-2003, Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI), Annual Reports Series No. 10, UNESCO. P. 100.
- COHTIC-NOAA-SHOA 2002. Tsunami: Las Grandes Olas, Panfleto informativo. P. 9.
- COMISIÓN PERMANENTE DEL PACÍFICO SUR 2008. Primera Reunión del grupo regional de Tarea para la implementación del proyecto Globallast en el Pacífico Sudeste y Argentina. 3-24 septiembre, Valparaíso- Chile. Informe de reunión CPPS. Comisión permanente del Pacífico sur. P. 1-18.
- COMITÉ TÉCNICO NACIONAL DE ALERTA POR TSUNAMI 2011. Plan Nacional para la gestión del riesgo por Tsunami-PNGRT. Comisión Colombiana del Océano CCO. Bogotá.
- CRANE, J. 1975. Fiddler Crabs of the world: Ocypodidae genus Uca Princeton Unix- Press, New Jersey. P. 73.
- DERCOURT, J. Y PAQUET, J. 1978. Geología. Editorial Reverté, Barcelona. P. 423.
- DEVIS-MORALES, A., GARCÍA-HANSEN, I., MÁLIKOV, I. Y VILLEGAS BOLAÑOS, N.L. 2002. Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. Serie Publicaciones Especiales, Volumen 1. Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, Tumaco, Colombia. Imágenes de la Naturaleza Editores. P. 109.
- DEVIS-MORALES, A. 2003. Evolución del evento El Niño 2002-2003 y su efecto en la Cuenca del Pacífico Colombiano y la bahía de Tumaco. Boletín científico del CCCP No. 10. Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, Tumaco, Colombia.



DEVIS-MORALES, A.	2009. Ciclo anual de temperatura, salinidad y circulación en la Cuenca Pacífica. Colombiana con énfasis en su región costera. Universidad de Concepción. Tesis doctorado en Oceanografía. Chile.
DIMAR-CCCP Y UAESPNN-DTSO	2007. Santuario de Fauna y Flora Malpelo: descubrimiento en marcha. Dirección General Marítima-Centro Control Contaminación del Pacífico y Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales-Dirección Territorial Suroccidente. Ed. DIMAR, Serie Publicaciones Especiales CCCP Vol. 5, Bogotá.
DIMAR – CIOH	2011. Manual de Geodesia para Hidrografía. Dirección General Marítima, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Ed. DIMAR, Serie publicaciones especiales CIOH.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN	2008. Elementos básicos para el manejo integrado de las zonas costeras. Departamento de Planeación Nacional. Bogotá. P.11.
DEXTER, D.	1974. Sandy-beach fauna of the Pacific and Atlantic coasts of Costa Rica and Colombia Revista de Biología Tropical 22. P. 51-66.
DEXTER, D.	1979. Community structure and Seasonal variation in Intertidal Panamanian Sandy beaches. Estuarine and Coastal Marine Science 9. P. 543- 558.
DIAZ, J.M. (EDITOR)	2000. Áreas Coralinas de Colombia. INVEMAR, Publicación Especial No. 5, Santa Marta. P. 172.
DÍAZ, J.M., DÍAZ-PULIDO, G., GARZÓN-FERREIRA, J., GEISTER, J., SÁNCHEZ, J.A. Y ZEA, S.	1996. Atlas de los Arrecifes Coralinos del Caribe Colombiano, I: Complejos Arrecifales Oceánicos. INVEMAR, Publicación Especial No. 2, Santa Marta. P. 83.
DITTMAR, I. W.	1891. Report on Researches into the Composition of Ocean-Water, collected by H.M.S. Challenger, during the years. P. 1873-1876.
DIRECCIÓN GENERAL DEL TERRITORIO MARÍTIMO Y DE MARINA MERCANTE	2007. Guía Metodológica sobre procedimientos y consideraciones ambientales básicas para la descarga de aguas residuales mediante emisarios submarinos. Armada de Chile. Chile.

- E.P.A. AGENCIA PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS 1979. Methods for chemical analysis of water and wastes. Ed. Environmental Protection Agency Epa. Cincinnati, Ohio, USA.
- ESPINOSA, C. Geohidrología. II. Cuerpos de Agua. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.C.
- FARRERAS, S.F. Y DOMÍNGUEZ, R. 1996. Tsunami. Fascículo # 12, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, México, D.F. P. 24.
- FERNÁNDEZ DÍEZ, P. 2002. Energía de las Olas. Departamento de Ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria. España. P. 15.
- FRANKEL, M. 1982. Manual de anticontaminación. Fondo de cultura económica, México. P. 382.
- FLÓREZ, A. 1992. Los glaciares residuales de Colombia. Enfoque histórico y actual. Zenit, No. 3. P. 35-45.
- GALLACH, J. M. 1982. ALBATROS. Enciclopedia del mar. Compañía del mar. Compañía internacional editora S.A., Barcelona, 4 Volúmenes.
- GANDÍA CALABUIG, A. 2012. Japón. Fomento del Turismo y Cambio en la Imagen del destino. Análisis del antes y después de un desastre natural. Universidad Politécnica de Valencia Trabajo Final de Carrera. Escuela politécnica superior de Gandía. P. 24.
- GIRAFFE 2013. Estudios Batimétricos Mediante Ecosondas. Bogotá, Colombia. P. 1-11.
- GLYNN, P., PRAHL, H. VON Y GUHL, F. 1982. Coral reefs of Gorgona Island, with special references to corallivores and their influence on community structure and reef development. Aun. Ins. Inv. Mar. Punta Benin 12. P. 185-214.
- GOLDBERG, E. 1979. La salud de los océanos. UNESCO. P. 194.
- GRATTON. J. 2002. Introducción a la Mecánica de fluidos. Facultad de Ciencias. Universidad de Chile. Buenos Aires.
- GROSS, M. GRANT 1971. Oceanography. Editorial Labor, S.A. Barcelona. P. 171.
- GROSS, M. GRANT 1996. Oceanography a view of Earth. Prentice-Hall Inc.



HEEZEN, B.C. Y HOLLISTER, C.D. 1971. The face of the deep. Oxford university press, Londres. P. 659.

HYDROGRAPHY FOR THE SURVEYOR AND ENGINEER 1987. Lieutenant Commander. BSP, Professional Books, Oxford, London, Edinburgh. Boston Palo Alto Melbourne.

IDEAM 2002. Efectos naturales y socioeconómicos del Fenómeno El Niño en Colombia, Informe técnico, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. P. 58.

IGAC Decretos de adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia. (2113 de 1992 y 208 de 2004).

INDERENA 1982. Informe Técnico. Ministerio de Agricultura; Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente; INDERENA. Bogotá, Colombia.

INGEOMINAS 2003. Memoria explicativa del mapa de zonificación geotécnica por licuación del área urbana del municipio de Tumaco y sus zonas aledañas. P. 7.

INVEMAR 2001. Informe del estado de los ambientes marinos y costeros de Colombia, Contaminación marino-costera.

IRRIBARRA, P. 2012. Terremoto de Sumatra-Andamán (2004). Mekanamo.

JIN, F.F. 1997. An equatorial ocean rechargeparadigm for ENSO. Part I: conceptual model, J. Atmosph. Sci. P. 54, 811-829.

JT HOUGHTON, GJ JENKINS Y JJ EPHRAUMS (EDS.) Cambridge University Press. 1990Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific.

KIEHL, J.T. Y TRENBERTH, K.E. 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bull. Amer. Meteor. Soc. National Center for Atmospheric Research. Colorado. P. 78, 197-208.

KENNETT, J.P. 1982. Marine geology. Prentice hall, Londres. P. 813.

- KENCHINGTON, E. 2002. The Effects of Fishing on Species and Genetic Diversity, The Reykjavik Conference on Responsible Fisheries in the Marine Ecosystem, October 1-4, Reykjavik, Iceland .In: M. Sinclair and G. Valdimarson (eds.). Responsible fisheries in the marine ecosystem. CAB International.
- KENNISH, M. J. 2001. Practical handbook of Marine Science, Edited by 3rd ed. (Marine science series), ISBN 0-8493-2391-6, 2001 by CRC Press LLC, USA, P. 976.
- KEULEGAN, CH. 1948. An experimental study of submarine sand bars: Beach Erosion Bd. technical Report, No. 3. P. 1-40.
- KIEHL, J.T. Y TRENBERTH, K.E. 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bull. Amer. Meteor. Soc.P. 78, 197-208.
- LARSON, M. 1991. Equilibrium profile of a beach with varying grain size. Proc. Coastal Sediments'91, ASCE, P. 905-919.
- LANDAETA, J. 1995. Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga del material dragado. Instituto Nacional de Canalizaciones - Dirección de Proyectos e Investigación. Caracas, Venezuela.
- LEPPE, A. y GONZALES, D. El emisario submarino como sistema de tratamiento de aguas servidas. Essbio s.a. - Tucapel 717, Concepcion- Chile.
- LEWIS, J.R. 1964. The ecology of rocky shores. English Univ. Press, London: P. 323.
- LONGWELL, C.R. Y FLINT, R.F. 1981. Geología física. Editorial Limusa, México, P. 545.
- LOZANO-CABO, F. 1978. Oceanografía, biología marina y pesca. Editorial Paraninfo, Madrid, 3 volúmenes.
- MÁRQUEZ, G. 2002. Ecosistemas marinos. Caribe Colombia. Fondo FEN. Banco de la República.
- MENARD, H.W. Y SMITH, S.M. 1966. Hypsomery of Ocean Basin Provinces. Journal of Geophysical Research. P. 71: 4305-25.



- MOORE, J.R. 1971. Oceanografía. Scientific American, San Francisco, P. 417.
- MONGABAY 2010. Number of described marine species climbs from 230,000 to 250,000.
- MUSSET, A.E. Y KHAN, M.A. 2000. Looking to the Earth. Press Syndicate of University of Cambridge, Cambridge, U.K. P. 457.
- NARANJO, D. 1987. Aspectos ecológicos de la entomofauna de la zona litoral de Punta Arenas y Punta Soldado, bahía de Buenaventura. Tesis de grado, Universidad del Valle.
- NEWMAN, G. Y PIERSON, W. 1966. Principles of Physical Oceanography. Prentice May, Londres.
- ONU 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Organización de las Naciones Unidas. Nueva York. P. 26.
- ORTIZ, M. Y QUICENO, A. 2001. Evaluación del impacto de tsunamis en el litoral Pacífico colombiano. Parte 1 (región de Tumaco), Boletín Científico CCCP.
- PABÓN, J.D. 2003. El aumento del nivel del mar en las costas y áreas insulares de Colombia. En: El mundo marino de Colombia, investigación y desarrollo de territorios olvidados. Red de Estudios del Mundo Marino-REMAR, Universidad Nacional de Colombia, P. 75-82.
- PABÓN, J.D. 2006. Escenarios de cambio climático para Colombia. En: Memorias del IV Encuentro de la Red de Universidades del Pacífico Sur (RUPSUR), 8-10 Noviembre de 2006.
- PABÓN, J.D. 2008: Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe presentado en el marco del proyecto Integrated National Adaptation Pilot (INAP). Conservación Internacional - Departamento de Geografía (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá D.C.
- PARDO R. 1990. Equinodermos del Pacífico colombiano. Tesis de grado, Universidad del Valle.
- POVEDA, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. Revista. Academia Colombiana de Ciencias Exactas. 28 (107) P. 201-222.

- PÉREZ, J.M. Y PICARD, J. 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume 47 (Bull 31): P. 1-137.
- PARRILLA, G. 2001. Oceanografía Operacional: un nuevo reto. Física de la Tierra Instituto Español de Oceanografía. Madrid. P. 167-177.
- PRAHL, H. VON 1986. Corales y arrecifes coralinos pp. 6 1-87 In: H. von Prah1 y M. Alberico (eds.) Isla de Gorgona. Banco Popular, Universidad del Valle.
- PRAHL, H. VON 1988. Arrecifes del Caribe Colombiano. Villegas Editores. P. 206.
- PRAHL, H. VON 1989. Manglares de Colombia. Villegas Editores. P 203.
- PRAHL, H. VON, J.R. CANTERA Y R. CONTRERAS 1990. Manglares y Hombres del Pacífico colombiano. FEN, Colombia y Editorial Presencia P.193.
- PRAHL, H. VON Y ESTUPIÑAN, F. 1990. Estudio sobre las ecoformas coralinas del género Pocillopora en la Ensenada de Utria. Pacífico colombiano. Rey. Facultad de Ciencias. Universidad del Valle. P. 45-54.
- PRAHL, H. VON Y ERHARDT, H. 1985. Colombia: corales y arrecifes. FEN Colombia. Editorial Presencia Ltda, Bogotá. P. 295.
- PNGRT 1998. Plan Nacional de Gestión de Riesgo por Tsunami, Comité Técnico Nacional de Alerta por Tsunami.
- PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. 2013. Decreto 1120. Por el cual se reglamentan las Unidades Ambientales Costeras (UAC) y las comisiones conjuntas, se establecen las reglas de procedimiento y criterios para reglamentar la restricción de ciertas actividades en pastos marinos, y se dictan otras disposiciones. Título II. Capítulo I. Artículo 3. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- PRESTON, A. 1975. Submarines: The History and Evolution of Underwater Fighting Vessels. London, U.K. Octopus.
- REYNA, J. 1978 Simulación matemática de un tsunami de origen lejano en su aproximación a la costa Pacífica Colombiana.
- REYNA, J. 2008 Cuaderno de notas para la cátedra de oceanografía general para ingenieros ambientales.



- REYNOLDS, R.W., RAYNER, N.A., SMITH, T.M., STOKES, D.C. Y WANG, W. 2002. An Improved In situ and Satellite SST Analysis for Climate, J. Climate, American Meteorological Society, Vol. 15. P.1609-1625.
- RODRÍGUEZ, C. 1972. Las comunidades bentónicas en: Fundación La Salle Lid Ciencias Naturales (Ced) Ecología Marina. Monografía No. 14. Caracas. P. 711.
- ROMANOVSKY, V. 1967. La conquista de los fondos marinos. Edición Martín Roca, Barcelona. P. 223.
- SAIEG, H.R. 1977. Que es el medio ambiente y la contaminación, Editorial La Goya - Ciencia, Barcelona.
- SALVAT EDITORIALES S.A. 1973. Cordilleras, terremotos y volcanes. Barcelona. P. 143.
- SALAS, I. Y PÉREZ PARRADO, R. , 2005. Surgencias provocadas por los ciclones tropicales. Conceptos asociados a este fenómeno natural, INSMET (Instituto de Meteorología de la República de Cuba), Cuba.
- QUOY, J. Y GAIMARD, J.P. 1825. Description des Poissons. Chapter IX. In: Freycinet, L. de, Voyage autour du Monde exécuté sur les corvettes de L. M. "L'Uranie" et "La Physicienne," pendant les années 1817, 1818, 1819 et 1820. París. Voyage Uranie, Zool. P.192-401.
- SARACHIK, E.S. & M.A. CANE 2010. The El Niño-Southern Oscillation Phenomenon. Cambridge University Press, New York. P. 369.
- SCIENTIFIC AMERICAN 1972. La biosfera. Editora Alianza Editorial S.A., Madrid. P. 267.
- SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE. 2011. Los océanos. Capítulo 12. Medidas de propiedades dinámicas. Chile.
- SHEPARD, F. 1973. Submarine Geology (3a. ed.), Harperand Row. New York.
- SKINNER, B. Y TUREKIAN, H. 1976. El hombre y el océano. Fundamentos de la ciencia de la Tierra, edición Omega S.A., Barcelona. P. 136.

SHOA	2000. Cómo sobrevivir a un maremoto, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Panfleto informativo. P. 18.
STEPHENSON, T.A. Y STEPHENSON, A.	1954. Life between tide marks in North America. 3B Novo Scotia and Prince Edward island: The geographical features of the region. J. Ecol. 42: 46-70.
STOMMEL, H. Y ARONS, A.B.	1961. On the abyssal circulation of the world ocean- I. Stationary planetary flow patterns on a sphere. Deep-Sea Research, 6. P. 140-154.
SWEDMARK, B.	1964. The interstitial fauna of marine sand. Biological Reviews 39. P. 1-42.
UMLAND, J. Y BELLAMA, J.	2000. Química General. 3ª edición, International Thomson México P. 550.
THORSON, G.	1971. La vida en el mar. Biblioteca para el hombre actual, edición Guadarrama S.A., Madrid. P. 256.
TOMCZAK, M.	2000. Instrumentación Oceanográfica. Universidad de Flinders. Australia del Sur.
TUREKIAN, K	1974. Los océanos, fundamentos de las ciencias de la Tierra, Edición Omega S.A., Barcelona. P. 120.
THE NEW YORK TIMES	2010. Artículos: Oil Rig Sinks in the Gulf of Mexico, Workers Missing After Oil Rig Blas.
THOULET, J.	1904. L'Océan. Library Call Number GC11.T49.
THURMAN, V. HAROLD	1996. Essentials of Oceanography. Prentice-Hall Inc.
U.S.NAVY HYDROGRAPHIC OFFICE	1970. Instructional manual of obtaining oceanography data, publication HO 607 Washington D.E., USA.
UMPIÉRREZ, O.	2010. Análisis de impactos hidrológicos del “el niño” - compilación, estudios e investigación. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Gobierno de Chile. P.1-16. El Niño y La Niña en Colombia.



- UNESCO 2008. La acidificación del océano. Resumen del Segundo simposio sobre. El océano en un mundo con altos niveles de CO₂. Elaborado para gestores de políticas ambientales.
- UNESCO-IOC 2009. Glosario de Tsunami. IOC Documento Informativo No. 1221, París, UNESCO (de la versión en inglés 2006). P. 40.
- UNESCO 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine science. P. 44-53.
- UNESCO 2010. The international thermodynamic equation of seawater - 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. IOC, SCOR and IAPSO, Manuals and Guides No.56, UNESCO. P. 196.
- SANFELIU, T., VICENTE VALLS, M.A. Y GÁLVEZ SANZ, M^a. A 1979. Contaminación de Aguas Subterráneas. Revista del Colegio Universitario de Castellón de la Plana. MILLARS.Vol 6. España. P.170-202.
- VEGAS, M. 1971. Introducción a la Ecología del Bentos Marino. Monografía Nro. 9 OEA. P. 91.
- VERGARA, W. 2006. Colombia Integrated National Adaptation Project, World Bank. Bogotá. D.C. P. 7-10.
- VETTER, R. 1976. La última frontera. Editorial Ateneo, Buenos Aires. P. 302.
- VIDES, M. 2008. Adaptación costera al ascenso del nivel del mar, Insumos al documento Segunda Comunicación Nacional de Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis (INVEMAR). Santa Marta. P. 5-74.
- VILLALBA, A. Y MONCLUS, A. 1974. Contaminación ambiental, causas y valoración. Editorial Jims, Barcelona.
- VILLODAS, R. 2008. La Hidrología, El Ciclo Hidrológico. Hidrología I, Guía de Estudio. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza-Argentina. P. 1-10.
- WATERMAN, E. 2008. (Senior Advisor and Member of the Parliament of the Province South-Holland). 'Building with Nature': principles and examples. Netherlands. Holanda.

- WICK Y SCHMITT, W.R. 1977. Prospects for Renewable Energy from the Sea, Marine Technology Society Journal, vol. 11. P. 16-21.
- WYLLIE, P. J. 1971. The Dynamic Earth. John Wiley & Sons. New York, USA. P. 416.
- ZAPATA, F.A. Y VARGAS-ÁNGEL B. 2003. Corals and coral reefs of the Pacific coast of Colombia. En: J. Cortes (Ed.). Coral reefs of Latin America. Elsevier Science, Amsterdam. P. 419-447.



PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS

Anadarko Petroleum Corporation (www.anadarko.com). Fecha última consulta: agosto 2013.

Antarctic Research (www.antarctica.blogs.wm.edu). Fecha última consulta: noviembre 2011.

Asmin Adisentosa (www.adisentosa.com). Fecha última consulta: agosto 2013.

Asociación Colombiana de Ingenieros (www.aciem.org). Fecha última consulta: septiembre 2013.

Atlas Hydrographic GmbH (www.atlashydro.atlas-elektronik.com). Fecha última consulta: septiembre del 2013.

Atlas Mundial del Océano (go.hrw.com/atlas). Fecha última consulta: agosto 2013.

Biblioteca Digital del Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa ILCE (www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx). Fecha última consulta: agosto 2013.

Cámara de diputados México. (www3.diputados.gob.mx). Fecha última consulta: agosto 2013.

Canarias 7 (www.canarias7.es). Fecha última consulta: septiembre 2008.

CCCP Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (www.cccp.org.co) Fecha última consulta: junio 2013.

Center for Coastal and Ocean Mapping Joint Hydrographic Center (ccom.unh.edu). Fecha última consulta: agosto 2013.

CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (www.cioh.org.co). Fecha última consulta: junio 2013.

Collecte Localisation Satellites- CLS (www.cls.fr). Fecha última consulta: agosto 2013.

Comisión Permanente del Pacífico Sur (www.cpps-int.org). Fecha última consulta: junio 2013.

Comisión Colombiana del Océano (CCO) (www.cco.gov.co). Fecha última consulta: octubre 2013.

Cooperative Institute for Ocean Exploration, Research and Technology (www.cioert.org). Fecha última consulta: junio 2013.

Digital Globe (www.digitalglobe.com). Fecha última consulta: junio 2013.

Dirección General Marítima DIMAR (www.dimar.mil.co). Fecha última consulta: agosto 2013.

Dirección Nacional de Protección Civil de Venezuela (www.pcivil.gob.ve). Fecha última consulta: junio 2013.

Earth Observatory Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE). (www.earthobservatory.nasa.gov) Fecha última consulta: agosto 2013.

Ecología verde. Ecología marina. (www.ecologiaverde.com). Fecha última consulta: agosto 2013.

Ecologismo (www.ecologismo.com). Fecha última consulta: agosto de 2013.

EFE Agencia de noticias (www.efe.com). Fecha última consulta: septiembre de 2010.

El portal del Mar (www.itsasnet.com). Fecha última de consulta: agosto 2013

El Universal diario (www.eluniversal.com.co). Fecha última consulta: noviembre 2010.

Embajada de Estados Unidos – IIP Digital (lipdigital.usembassy.gov). Fecha última consulta: agosto 2013.

Energía del Oleaje. Edu Ambiental (www.comunidad.eduambiental.org). Fecha última consulta: agosto 2013.

Energías como bienes comunes – Undimotriz. Almicar Vercelli (www.energias.bienescomunes.org). Fecha última consulta: octubre 2012.

Energy Islands (www.energyisland.com). Fecha última consulta: junio 2013.

General Acoustics (www.generalacoustics.com). Fecha última consulta: junio 2013.

Geofísica Submarina. (www.hyo.com.pe). Fecha última consulta: agosto 2013.

Green Peace (www.greenpeace.org). Fecha última consulta: agosto 2013.

IEAS-OES Ocean Energy Systems (www.ocean-energy-systems.org). Fecha última consulta: octubre 2006.

IHO International Hydrographic Organization (www.iho.int). Fecha última consulta: junio 2013.

IMO International Maritime Organization (www.imo.org). Fecha última consulta: junio 2013.

IFREMER- Instituto Francés de Investigación para la Explotación de los Mares (www.ifremer.fr). Fecha última consulta: junio 2013.

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (www.ideam.gov.co). Fecha última consulta: junio 2013.

IDEMAR. Sociedad educacional de desarrollo marítimo LTDA. (www.desarrollomaritimo.cl). Fecha última consulta: agosto 2013.

Informe Contaminación por Plástico de los Océanos del Mundo Greenpeace. (www.greenpeace.org). Fecha última consulta: agosto 2013.

INOCAR Instituto Oceanográfico de la Armada de Ecuador (www.inocar.mil.ec). Fecha última consulta: junio 2013.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (www.igac.gov.co). Fecha última consulta: agosto 2013.

Instituto Geográfico Nacional. Madrid - España. (www.ign.es) Fecha última consulta: agosto 2013.

Instituto de Ciencias del Mar de la Universidad de Cataluña (www.icm.csic.es). Fecha última consulta: junio 2013.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (www.mapserver.inegi.gob.mx). Fecha última consulta: agosto 2013.

International Argo Project Office (www.argo.ucsd.edu). Fecha última consulta: junio 2013.

International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) (www.itopf.com). Fecha última consulta: agosto 2013.

International Tsunami Information Center (www.itic.ioc-unesco.org). Fecha última de consulta: agosto 2013.

INVEMAR Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis (www.invemar.org.co). Fecha última consulta: agosto 2013.

IOC Intergovernmental Oceanographic Commission (www.ioc-unesco.org). Fecha última consulta: junio 2013.

ITIC-Centro Internacional de Información de Tsunami (www.itic.ioc-unesco.org). Fecha última consulta: junio 2013.



Laboratorio de Geología y Oceanografía, Universidad de Bordeaux (www.u-bordeaux1.fr). Fecha última consulta: junio 2013.

Lidar Light Detection and Raging (www.lidar.com). Fecha última consulta: septiembre de 2013

Laboratorio Tsunami – Instituto de matemáticas geofísicas y computacionales de Novosibirsk, Rusia. (www.tsun.sccc.ru). Fecha última consulta: julio 2013.

Lo que el mundo necesita ver sobre CO₂ (co2now.org). Fecha última consulta: agosto 2013.

Mathematica's ElementData, función de Wolfram Research, Inc (www.periodictable.com). Fecha última consulta:

Metodología y Equipo para el Estudio de la Oceanografía Geológica (www.minera-net.com.ar). Fecha última consulta: agosto de 2013.

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Política Nacional Ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios costeros y zonas costeras e insulares. (www.minambiente.gov.co). Fecha última consulta: agosto de 2013.

National Oceanography Centre – University of Southampton (www.noc.soton.ac.uk). Fecha última de consulta: agosto de 2013.

Natural Resources Canadá (www.rncan.gc.ca). Fecha última consulta: agosto de 2013.

NASA National Aeronautical and Space Administration (www.nasa.gov). Fecha última consulta: junio 2013.

NOAA Administración Nacional del Océano y la Atmósfera, EE.UU. (www.noaa.gov). Fecha última consulta: junio 2013.

NOAA's Office of Ocean Exploration & Research (www.explore.noaa.gov). Fecha última consulta: junio 2013.

Nova Scotia Power (www.nspower.ca). Fecha última consulta: agosto de 2013.

Oasis Marino (www.oceanoasis.org). Fecha última consulta: junio 2013.

Ocean Data View (www.odv.awi.de). Fecha última consulta: junio 2013.

Ocean Teacher (www.classroom.oceanteacher.org). Fecha última consulta: junio 2013.

Pere Rubio – Photography (www.pererubio.com). Fecha última de consulta: agosto de 2013.

Portafolio Diario (www.portafolio.co). Fecha última consulta: junio 2013.

Presidencia de la República Decretos 2324 de 1984, 347 de 2000 y 2214 de 2013 (www.presidencia.gov.co) Fecha última consulta: octubre 2013

Revista de biología marina y oceanografía. Valparaíso, Chile. 2008. (www.scielo.cl) Fecha última consulta: agosto 2010.

School of Ocean and Earth Science, University of Southampton (www.noc.soton.ac). Fecha última consulta: junio 2013.

Sistema Argos (www.argos-system.org). Fecha última consulta: junio 2013.

Sistema de medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina SMPOMM. (www.dimar.mil.co) Fecha última de consulta septiembre 2013

Siosearch. Batimetría (www.siosearch.org). Fecha última consulta: agosto 2013.

Terremoto de Sumatra (www.mekanamo.com). Fecha última consulta: agosto 2013.

Trident Energy Limited (www.tridentenergy.co.uk). Fecha última consulta: agosto 2013.

Unidad de Tecnología Marina. consejo superior de investigaciones científicas. (www.utm.csic.es) Fecha última de consulta: agosto 2013.

Universidad de Concepción, Chile (www.udec.cl) Fecha última consulta: junio 2013.

Universidad de Rutgers. Universidad del Estado de New Jersey (www.rutgers.edu). Fecha última consulta: agosto 2013.

Universidad Pontificia Católica de Chile (www.uc.cl).
Fecha última consulta: junio 2013.

United States. Naval Oceanographic Office (www.oceanography.navy.mil). Fecha última consulta: agosto 2013.

USGS United States Geodetic Service (www.usgs.gov) Fecha última consulta: junio 2013.

Vision Learning (www.visionlearning.com) Fecha última consulta: junio 2013.

Waste Magazine - Naturaleza Ciencia Medio Ambiente (www.waste.ideal.es) Fecha última consulta: agosto 2013.

WMO World Meteorological Organization. (www.wmo.int). Fecha última consulta: junio 2013.

WOA World Ocean Atlas - (www.nodc.noaa.gov).
Fecha última consulta: agosto 2013.

Woods Hole Oceanographic Institution- WHOI (www.whoi.edu). Fecha última consulta: junio 2013.

Word Press (www.wordpress.com). Fecha última consulta: mayo 2013.



SIGLAS Y ABREVIATURAS

ACCEFYN	Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler (perfilador de corrientes)
ARGO	Proyecto Global de Boyas - GODAE
ASCUN	Asociación Colombiana de Universidades
AUNAP	Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca
AUV	Vehículo autónomo submarino
CFC	Clorofluorocarbono
CAT	Centro de Alerta de Tsunami
CCO	Comisión Colombiana del Océano
CCCP	Centro Hidrográfico y Oceanográfico del Pacífico
CIOH	Centro Hidrográfico y Oceanográfico del Caribe
CLIVAR	Programa de Variabilidad Climática y Predictibilidad
CLS	Collecte Localisation Satellites (Centro francés de recolección y localización de datos medioambientales por satélite)
CNES	Centro Nacional de Estudios Espaciales (Francés)
COET	Centro de Tecnología Energética Oceánica
COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental
COLCIENCIAS	Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación
CONVEMAR	Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar
CPPS	Comisión Permanente del Pacífico Sur
CTD	Conductivity, Temperature, Depth (perfilador de temperatura, salinidad y profundidad)
DIMAR	Dirección General Marítima
EMEC	Centro Europeo de Energía Marina
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
ESA	Agencia Espacial Europea
GEBCO	Carta Batimétrica General de los Océanos
GEF	Fondo Mundial del Medio Ambiente
GLOSS	Sistema Global de Observación del Nivel del Mar

GODAE	Experimento Global de Asimilación de Datos Oceánicos
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
ICANH	Instituto Colombiano de Antropología e Historia
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IFREMER	Instituto Francés para la Exploración de los mares
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IOCARIBE	Subcomisión de la COI para el Caribe y Regiones Adyacentes
IOS	Índice de Oscilación Sur
ITIC	Centro Internacional de Información de Tsunami
JAMSTEC	Agencia Japonesa para Estudios Científicos Marinos - Terrestres y Tecnología
JCOMM	Comisión Técnica Mixta de Oceanografía y Meteorología Marina (OMM - COI)
LIDAR	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
NASA	Administración Espacial y Aeronáutica de Estados Unidos
NOAA	Administración Atmosférica y Oceanográfica de Estados Unidos
ODV	Ocean Data View (software)
OHI	Organización Hidrográfica Internacional
OMI	Organización Marítima Internacional
OTEC	Conversión de Energía Termal del Océano
OSSO	Observatorio Sismológico del Suroccidente; actualmente Corporación OSSO
PNGRT	Plan Nacional para la Gestión del Riesgo por Tsunami
PNOEC	Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PTWS	Sistema de Alerta por Tsunami del Pacífico
ROV	Vehículo Submarino Operado Remotamente
SGC	Sistema Geológico Colombiano
SCOR	Comité Científico de Investigación Científica Marina
SOFAR	Sound Fixing and Ranking
SPNN	Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia
TAO	Tropical Atmosphere Ocean Program
TOGA	Tropical Ocean Global Atmosphere Program
TSM	Temperatura Superficial del Mar
TRITON	Triangle Trans-Ocean Buoy Network
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, Ciencia y Educación
UNGRD	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
UNDP	Programa de Desarrollo de la Naciones Unidas
USGS	United States Geological Survey
WCRP	Programa Mundial de Investigación del Clima
WEC	World Energy Council
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institute
WOA	World Ocean Atlas
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical



GLOSARIO

Aeróbico:	Organismo que requiere oxígeno para su funcionamiento. Anaeróbico no requiere oxígeno.
Afloramiento:	Movimiento de aguas ricas en nutrientes desde una profundidad específica hasta la superficie favoreciendo el crecimiento de poblaciones de fitoplancton.
Alisios:	Vientos predominantes que soplan desde el este hacia el oeste, desde las altas presiones atmosféricas de las regiones subtropicales hacia las bajas presiones de la región ecuatorial de ambos hemisferios. Son vientos de bajo nivel caracterizados por su dirección constante. En el Hemisferio Norte, se conocen como alisios del noreste y en el Hemisferio Sur, se denominan alisios del sureste (de donde provienen).
Antropogénico:	Efecto o proceso causado por actividades humanas.
Bentónicos:	Organismos que viven en el fondo, referente al suelo marino.
Biodegradable:	Capaz de descomponerse por acción de agentes biológicos, especialmente las bacterias.
Biósfera:	La parte de la Tierra y su atmósfera donde pueden subsistir organismos vivos.
Boya:	Objeto flotador anclado al fondo del mar o a otro objeto usado en la navegación. Si no están fijos a una estructura, se les conocen como boyas de deriva, y son usadas para medir corrientes marinas por el método lagrangiano.
Coriolis:	(Efecto). Deflexión aparente de los fluidos (agua o aire) relativo a la tierra sólida, causada como resultado de la rotación de la Tierra.
Declaratoria de efecto ambiental:	Es un estudio encaminado a describir, identificar, aclarar y prevenir el deterioro ambiental como consecuencia de una obra o actividad, a fin de corregir o minimizar las alteraciones nocivas e indeseables que sean previsibles.
Demanda bioquímica de O₂:	Cantidad de oxígeno devuelto necesario para atender las necesidades metabólicas de los organismos anaerobios de las aguas ricas en materia orgánica, tal como las aguas negras. Abreviadamente DBO. También se conoce como demanda biológica de oxígeno.

Detrito:	Material particulado que ingresa al sistema acuático o marino. Si se deriva de la descomposición de la materia orgánica, se conoce como detrito orgánico.
DDT:	Nombre común de un insecticida; punto de fusión 105,5°C, insoluble en agua, muy soluble en etanol y acetona, incoloro e inodoro, particularmente útil contra las plagas del campo. También denominado dicloro-difenil-triclorooctano.
Disco de Secchi:	Disco blanco-negro utilizado para medir la transparencia o calidad del agua de mar. Bajando el disco en el agua, horizontalmente se observa la máxima profundidad a la cual puede detectarse visualmente.
Ecosistema:	Comunidad de organismos que comparten el mismo ambiente físico, que funcionan como un sistema de interacciones y relaciones interdependientes e incluyen procesos como el flujo de energía a través de todos los niveles tróficos y los ciclos de los elementos y compuestos químicos a través de los componentes vivos e inertes del sistema.
Efecto invernadero:	Proceso mediante el cual se atrapa el calor en la atmósfera; la radiación solar de onda corta entrante penetra la atmósfera, pero la radiación de onda larga saliente es absorbida por gases invernadero y es radiada de nuevo a la Tierra, causando el aumento de la temperatura atmosférica global.
Eólico(a):	Del viento. (Ejemplo: energía eólica).
ENOS:	El Niño-La Niña Oscilación Sur. Variabilidad interanual del sistema climático propia del Pacífico ecuatorial y con repercusiones globales. El Niño (La Niña) está asociado (a) al calentamiento (enfriamiento) de las aguas ecuatoriales del Pacífico oriental.
Entropía:	Grado de desorden que tiene un sistema. En termodinámica, es la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.
Eutrofización:	Con referencia a extensiones de agua, es el proceso de hacerlas mejor alimentadas, bien sea naturalmente mediante procesos de maduración, o artificialmente mediante procesos de fertilización.
Euleriana:	Medición de las corrientes oceánicas en un punto fijo.
Escorrentía:	Parte del agua de precipitación que discurre por la superficie de la Tierra hacia corrientes u otros cuerpos de agua superficiales.
Estratificación:	Organización vertical de las masas de agua según su densidad. Una estratificación estable ocurre en el océano, cuando la densidad aumenta continuamente con la profundidad.
Glaciación:	Periodo de larga duración, donde baja la temperatura global del clima de la Tierra, dando como resultado una expansión del hielo continental de los casquetes polares y los glaciares. Las glaciaciones se subdividen en periodos glaciales. Se conoce también como Edad de hielo. Un periodo interglaciar es el transcurrido entre dos glaciaciones.
Hábitat:	En ecología, es el ambiente que ocupa una población biológica. Es el espacio que reúne las condiciones adecuadas para que la especie pueda residir y reproducirse, perpetuando su presencia. Un hábitat queda así descrito por los rasgos que lo definen ecológicamente, distinguiéndolo de otros hábitats, donde las mismas especies no podrían encontrar acomodo.



Hidrocarburo:	Uno de los más grandes grupos de compuestos químicos constituidos tan sólo por C e H; la mayor fuente de hidrocarburos es el crudo de petróleo.
Hidrocarburos Halogenados:	Cualquiera de los compuestos que integran un grupo de derivados halogenados; compuestos orgánicos que contienen H y C; el grupo comprende compuestos monohalogenados (haluros de alquilo o arilo) y polihalogenados que este compuesto o diferentes átomos de halógenos.
Hidrografía:	Rama de la geografía física que se ocupa de la descripción y estudio sistemático de los diferentes cuerpos de agua planetarios, en especial, de las aguas continentales.
Hundimiento:	En oceanografía, se refiere al movimiento vertical descendente de un fluido, debido a diferencias de densidad o cuando dos masas de agua convergen debido al transporte de Ekman, que causa el hundimiento de las aguas superficiales y el ensanchamiento de la capa de mezcla superficial (término del inglés <i>downwelling</i>).
Isótopos radioactivos:	Elementos que tienen isótopos naturales, pero inestables, como el Uranio, cuyos isótopos están constantemente en decaimiento, lo que los hace radiactivos. Los isótopos inestables son útiles para estimar la edad de muestras naturales, como rocas y materia orgánica. Esto es posible, siempre y cuando, se conozca el ritmo promedio de desintegración de determinado isótopo, en relación con los que ya han decaído. Gracias a este método de datación, se puede calcular la edad de la Tierra.
Isostasia:	Condición de equilibrio que presenta la superficie terrestre, debido a la diferencia de densidad de sus partes. Se resuelve en movimientos verticales (epirogénicos) y está fundamentada en el principio de Arquímedes. Fue enunciada como principio a finales del siglo XIX.
In situ:	Locución latina que se refiere a la toma de muestras “en el sitio”.
Lagrangiana	Medición de las corrientes oceánicas siguiendo el fluido.
Latitud:	Distancia angular (medida en grados) entre el ecuador (0°) y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano desde ese mismo punto angular. Latitudes positivas (0° a 90°), se refieren al Hemisferio Norte y las negativas (0° a -90°) al Hemisferio Sur.
Límites de tolerancia:	Valores extremos (superiores e inferiores) permitidos por la tolerancia.
Litósfera:	Capa superficial de la Tierra sólida, caracterizada por su rigidez. Está formada por la corteza terrestre y por la zona contigua, la más externa, del manto residual, y “flota” sobre la astenósfera, una capa blanda que forma parte del manto superior. Es la zona donde se produce, en interacción con la astenósfera, la tectónica de placas. La litósfera está fragmentada en una serie de placas tectónicas o litosféricas, en cuyos bordes se concentran los fenómenos geológicos endógenos, como el magmatismo (incluido el vulcanismo), la sismicidad o la orogénesis.

Longitud:	<p>Distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° (es decir el meridiano base), tomando como centro angular el centro de la Tierra; habitualmente el meridiano de Greenwich (Inglaterra). La longitud geográfica se mide en grados (°), minutos (') y segundos ("). Existen varias maneras de medirla y expresarla:</p> <ul style="list-style-type: none"> - entre 0° y 360°, aumentando hacia el Este del meridiano 0°; - entre 0° y 180° positivos (Hemisferio Oriental) y negativos (Hemisferio Occidental).
Metal pesado:	Un metal cuyo peso específico es aproximadamente de cinco o más alto. En esta categoría, se encuentran: Zinc, Cadmio, Plomo, Mercurio.
Oceanografía:	Rama de las Ciencias de la Tierra que estudia los procesos biológicos, físicos, geológicos y químicos que se dan en los mares y en los océanos. La oceanografía biológica o biología marina estudia todos los organismos marinos y su relación con el medio ambiente; la oceanografía física estudia los procesos dinámicos que ocurren en el mar, tales como la mezcla (difusión molecular y turbulenta de las propiedades del agua de mar), las corrientes, las mareas y el oleaje; la oceanografía geológica estudia los procesos geológicos que afectan a los océanos y la oceanografía química estudia la composición química del agua de mar.
Oscilaciones Madden-Julian:	(MJO). Oscilaciones intraestacionales que se observan en los patrones de precipitación tropical y que tienen un ciclo que varía alrededor de 30-60 días.
Osmorregulación:	Actividad de algunos organismos capaces de regular la concentración de iones disueltos en su cuerpo, con respecto a los cambios externos del ambiente.
Ondas sísmicas:	Tipo de onda elástica consistente en la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños movimientos en un medio. Pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales, los cuales pueden causar daños en zonas donde hay asentamientos urbanos.
Patógeno:	Agente productor de enfermedades: generalmente se refiere a organismos vivos.
Pelágico:	Organismos que viven en la columna de agua. Referente al ambiente marino ubicado en aguas abiertas, afuera del talud de la plataforma.
Richter:	Escala sismológica empleada para medir la fuerza de los terremotos.
Subducción:	Proceso de hundimiento de una placa litosférica bajo otra en un límite convergente, según la teoría de tectónica de placas. Generalmente es la litósfera oceánica, de mayor peso específico, la que subduce bajo la litósfera continental, menos densa.
Surgencia:	Flujo ascensional de aguas profundas hacia la superficie del mar. Generalmente es causado por vientos muy intensos que fluyen a lo largo de la costa y ocasionan (por transporte de Ekman) que el agua superficial se aleje de la costa. También ocurre por divergencia de aguas superficiales. Este flujo divergente es reemplazado por aguas profundas ubicadas por debajo de la termoclina. Cuando las aguas de surgencia favorecen la producción biológica, se denomina afloramiento (término del inglés <i>upwelling</i>).



Tectónica:	Especialidad de la geología que estudia las estructuras geológicas producidas por deformación de la corteza terrestre, las que las rocas adquieren después de haberse formado, así como los procesos que las originan.
Tectónica de placas:	Teoría geológica presentada por Alfred Wegener. Explica la forma como está estructurada la litósfera (la porción externa más fría y rígida de la Tierra). La teoría da una explicación a las placas tectónicas que forman la superficie de la Tierra y a los desplazamientos que se observan entre ellas en su deslizamiento sobre el manto terrestre fluido, sus direcciones e interacciones. También explica la formación de las cadenas montañosas (orogénesis). Así mismo, da una explicación satisfactoria de por qué los terremotos y los volcanes se concentran en regiones concretas del planeta (como el cinturón de fuego del Pacífico) o de por qué las grandes fosas submarinas están junto a islas y continentes y no en el centro del océano.
Teleconexiones:	Relaciones o enlaces existentes entre las anomalías climáticas de dos zonas o localidades distantes entre sí. Las largas distancias existentes entre estos lugares y las diferencias en los tiempos de ocurrencia de estas anomalías hacen que generalmente sea muy difícil de concebir el hecho de que una pueda influir en el comportamiento de la otra, pero estas interrelaciones existen y han sido comprobadas en numerosos estudios.
Transporte de Ekman:	Proceso mediante el cual el esfuerzo del viento superficial dirige la capa superficial del océano y ocasiona el transporte (desviación) de agua a la derecha/izquierda en el Hemisferio Norte/Sur, respecto a la dirección del viento en la superficie, debido al efecto de Coriolis.
Zona Fótica:	En los ecosistemas marinos y lacustres es aquella zona donde penetra la luz del Sol. Su profundidad es variable en función de la turbidez. Se llama profundidad eufótica o nivel eufótico a la profundidad en la que la intensidad de la luz queda reducida a un 1% de la que ha penetrado la superficie, el límite por debajo del cual no puede ocurrir la fotosíntesis.

