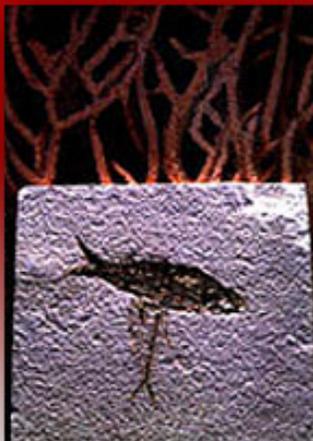


EL OCÉANO Y SUS RECURSOS. II. LAS CIENCIAS DEL MAR: OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA Y OCEANOGRAFÍA QUÍMICA

Autor: JUAN LUIS CIFUENTES LEMUS / MARÍA DEL PILAR TORRES GARCÍA / MARCELA FRÍAS M.

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PRÓLOGO](#)
- [NOTA](#)



© Fondo de Cultura Económica
Primera edición 1986
Primera reimpresión 1995
Segunda edición 1997
ISBN 968-16-5255-X
Impreso en México

- [CRÉDITOS](#)
- [I. OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA](#)
- [II. EL NACIMIENTO Y CRECIMIENTO DE LOS OCÉANOS](#)
- [III. ACCIÓN GEOLÓGICA EN EL MAR PARA LA FORMACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE COSTA](#)
- [IV. LA LÍNEA DE LA COSTA COMO ZONA DE INTERACCIÓN DEL AIRE, EL MAR Y LA TIERRA](#)
- [V. ORIGEN Y DESARROLLO DE LAS PLATAFORMAS CONTINENTALES Y DE LOS FONDOS OCEÁNICOS](#)
- [VI. LOS SEDIMENTOS OCEÁNICOS COMO IMAGEN DEL PASADO](#)
- [VII. LAS ERAS GEOLÓGICAS Y SUS HABITANTES](#)
- [VIII. LOS MINERALES Y LOS ENERGÉTICOS EN EL OCÉANO](#)
- [IX. METODOLOGÍA Y EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE LA OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA](#)
- [X. OCEANOGRAFÍA QUÍMICA](#)
- [XI. LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DEL MAR](#)
- [XII. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL AGUA DE MAR: SALINIDAD, CLORINIDAD Y pH](#)
- [XIII. LOS CICLOS QUÍMICOS EN EL OCÉANO](#)

- [XIV. LA UTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS QUÍMICOS DEL AGUA DE MAR](#)
 - [XV. METODOLOGÍA Y EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE LA OCEANOGRAFÍA QUÍMICA](#)
 - [APÉNDICE](#)
 - [GLOSARIO](#)
 - [BIBLIOGRAFÍA](#)
 - [COLOFÓN](#)
 - [CONTRAPORTADA](#)
-



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías



la

ciencia/12

para todos

Primera edición (La Ciencia desde México),1986

Primera reimpresión,1995

Segunda edición (La Ciencia para Todos),1997

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1986 FONDO DE CULTURA ECONOMICA, S. A. DE C. V.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONOMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5255-X

Impreso en México

Indice



PRÓLOGO

Fecunda idea es la publicación de *El océano y sus recursos* primero de su índole en México ya que la extensión y variedad de sus costas, bañadas por los dos mayores océanos del planeta, le ofrecen valiosos tesoros, cuyo aprovechamiento total no podrá lograrse sin contarse con un cúmulo de conocimientos científicos sobre el tema.

México, como se ha dicho ha vivido "de espaldas al mar", dando mínima atención al debido aprovechamiento de sus recursos marinos. Y, desde luego, prácticamente ninguna a la investigación científica de sus variados recursos.

Hace seis lustros apenas que se dieron, en 1923 y 1929, los primeros y más modestos pasos al respecto, promovidos por el más brillante biólogo que ha producido México, Alfonso L. Herrera, en la benemérita Dirección de Estudios Biológicos, que había fundado en 1915 y a cuyo frente se encontraba. En tal trabajo participó quien esto escribe, y que posteriormente inició, en 1934, la primera cátedra de hidrobiología y pesca en la Escuela Nacional de Agricultura.

Para entonces ya existían algunos centros de investigación, que paulatinamente fueron creciendo en número. Y también planteles profesionales en que se formaban los nuevos investigadores. Los más activos eran la Facultad de Ciencias (UNAM) y la Escuela Nacional de Ciencia Biológica (IPN).

En la Facultad de Ciencias, desde 1962, el maestro Juan Luis Cifuentes tenía a su cargo —y la tiene aún— una cátedra de zoología de invertebrados, que con sus sólidos conocimientos y dinamismo no tardó en convertirse en polo de atracción para los alumnos que anhelaban formarse bajo las enseñanzas del brillante catedrático, quien en el periodo 1973-1977 fue designado director de la Facultad de Ciencias. Esta institución recibió, bajo su dirección, un notable impulso en sus diversas ramas, en un tiempo que puede ser considerado como la Edad de Oro del Departamento de Biología.

Paralelamente a estos desarrollos, se había ido acumulando una abundante y sólida bibliografía especializada, de gran valor de consulta, para guiar las investigaciones marinas, pero faltaba una obra, escrita por mexicanos, que pudiera servir al lector deseoso de tener una visión panorámica de la materia. *El océano y sus recursos* viene hoy a llenar ese vacío. En esta serie de doce volúmenes, cuidadosamente equilibrados, se enfocan todos los ángulos de las investigaciones oceánicas, con especial referencia a los aspectos biológicos y muy particularmente a la pesca, que cada día va tomando mayor importancia en la economía mexicana.

La solidez y autoridad de la obra la avala el nombre de sus autores: el maestro por antonomasia, Juan Luis Cifuentes, y dos de sus más brillantes discípulas y colaboras: la maestra en ciencias María del Pilar Torres García y la bióloga Marcela Frías Mondragón.

Para mí, que he tenido la incomparable oportunidad de ver crecer la biología mexicana desde sus albores hace más de seis décadas, y que di mis primeros pasos de investigador en el campo de la hidrobiología, es una satisfacción y un honor que Juan Luis Cifuentes, mi discípulo de antaño y hoy brillante colega a quien tanto estimo, me haya honrado pidiéndome estas líneas, que con placer he redactado.

ENRIQUE BELTRÁN





NOTA

La presente serie dividida en doce volúmenes, *El océano y sus recursos* tiene básicamente el propósito de atraer a los jóvenes que cursan las enseñanzas media-básica y superior, y dar al público en general una información amena sobre el maravilloso mundo que representan los océanos. Todo con el fin de despertar su interés por los fenómenos que se producen en la inmensidad de sus aguas, y sobre los recursos que contienen.

En este segundo volumen se presenta el estudio de la oceanografía geológica, cuyo campo es la investigación de cómo se originaron y han crecido los océanos; cómo influye la acción geológica en la modelación de las costas; cómo los sedimentos ofrecen una imagen de las diferentes eras geológicas del planeta y de los organismos que en ellas vivieron. Se expondrá asimismo la metodología y se describirá el equipo que se utiliza en el estudio de esta ciencia.

Al hacer referencia a la oceanografía química, se dan a conocer la composición y propiedades químicas del agua del mar; los ciclos químicos que se llevan a cabo en el océano; la metodología y el equipo empleados en el estudio de esta ciencia; y los diversos recursos químicos existentes en el mar.

Mayor información sobre las ciencias del mar se continuará ofreciendo en el volumen III, en el que hablaremos de la *oceanografía física*, y de las *matemáticas* y de la *ingeniería* en relación con nuestro tema.

LOS AUTORES



CRÉDITOS

Las figuras numeradas a continuación, aparecidas en el primer volumen de esta serie, *Panorama oceánico*, son cortesía de: S, Mónica Velasco; 16 y 19, de E. Rioja, por cortesía de la revista *Técnica Pesquera*; 14, 15, 20, 22, 23, 24, 27, 29 y 32 a 39, son cortesía de la revista *Técnica Pesquera*.

Todas las fotografías incluidas en el presente volumen, *Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*, son cortesía de la revista *Técnica Pesquera*.



I. OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA

NUESTRO planeta, cuya edad es de alrededor de 5 000 millones de años, ha estado sometido a constantes cambios, a lo que se denomina Dinámica de la Tierra o Geodinámica. Algunos de estos fenómenos pueden ser observados por el hombre, pues ocurren con rapidez, como un alud de nieve, un huracán, un ciclón, un terremoto o una erupción volcánica; sin embargo, en su mayor parte suceden con tanta lentitud que el tiempo de vida de un hombre, e incluso el de muchas generaciones, no bastarían para poder apreciarlos. Los procesos actuales de la corteza terrestre son, dentro de ciertos límites, los mismos que se han generado durante cientos de millones de años.

La forma y la estructura terrestre no son inmutables; ambas se transforman continuamente debido a la acción de distintos fenómenos geológicos, que se presentan ya sea a corto plazo, como un terremoto, o a través de un permanente proceso de evolución.

A lo largo del tiempo, la forma de la Tierra ha sido definida de diferente manera por los científicos. Primero se consideró que se trataba de una esfera de aproximadamente 13 000 kilómetros de diámetro, pero después con el apoyo de técnicas más refinadas, se llegó a la conclusión de que era un esferoide, aplanado, como consecuencia de los abultamientos ecuatoriales causados por la rotación de la Tierra, de tal manera que el diámetro ecuatorial calculado en 12 756 kilómetros es 42 kilómetros más grande que el polar, que es de 12 714 kilómetros.

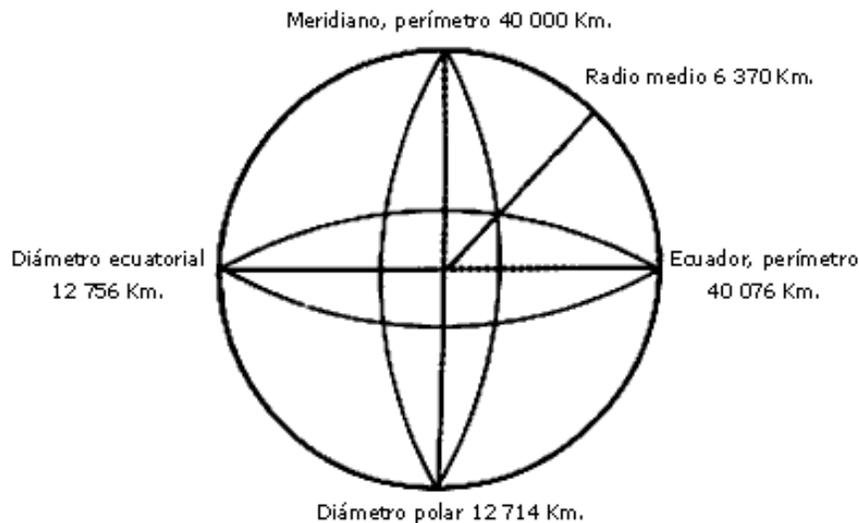


Figura 1. Dimensiones de la Tierra.

A partir de las observaciones realizadas desde satélites se descubrieron dos depresiones en el hemisferio Norte, las cuales dan a nuestro planeta la forma de una pera. Los científicos han coincidido en que éste es geode, por cuanto de que su forma no corresponde totalmente a la de una figura geométrica determinada.

Las investigaciones en torno a la detección de terremotos han revelado que la Tierra está integrada por una serie de capas sobrepuestas concéntricamente que van del centro a la superficie. La más externa, denominada *corteza sólida o litósfera*, tiene un grosor promedio de 35 kilómetros y está en contacto con la capa gaseosa (*atmósfera*) y con la capa líquida (*hidrósfera*). Probablemente la litósfera fue continua en un principio; en la actualidad se encuentra interrumpida por los continentes.

Dentro de la litósfera hay tres capas conocidas con el nombre de *manto*, cuyo grosor total es de 2 865 kilómetros y las cuales se componen de materiales metálicos que decrecen conforme se acercan a la superficie.

Debajo del manto se localizan otras tres capas que forman el *centro, núcleo central o nife*, de 3 473 kilómetros y conformado principalmente por níquel y hierro; su capa más interna es sólida y se encuentra rodeada por una capa líquida y homogénea.

La corteza terrestre o litósfera, que tiene una función estructural, puede diferenciarse en dos tipos: *corteza continental*, que es más gruesa, alcanza hasta 35 kilómetros y está formada sobre todo por rocas de tipo granítico, y *corteza oceánica*, más delgada, de 5 kilómetros de ancho y constituida por rocas basálticas de alta densidad y colores oscuros.

Los materiales rocosos de la corteza se pueden clasificar en *ígneos, sedimentarios y metamórficos*.

Los ígneos formaron la corteza original de la Tierra; provienen de rocas que fueron derretidas por el fuego y que, al enfriarse, dieron origen a la roca sólida, como el granito, muy común en la corteza continental; el basalto, en la oceánica, y la andesita, abundante en las islas oceánicas y en las montañas. Al material ígneo derretido se le denomina *magma*.

La corteza ígnea es transformable, pues se halla expuesta a la continua acción de agentes físicos y químicos. Por ejemplo, las corrientes de agua y la fuerza de los vientos son capaces de descomponerla y desintegrarla, en forma tal que llega a deslizarse hacia parajes más bajos provocando la llamada sedimentación, que es más intensa en los lagos, pantanos, lagunas, desembocadura de los ríos y en el fondo de los mares. Cuando dichos restos se solidifican o consolidan, adquieren una consistencia de verdaderas rocas a las cuales se denomina sedimentarias. Por cierto, algunas de ellas no llegan a consolidarse totalmente, y quedan por ello en forma de arena y fango.

Si se encuentran sujetas a altas temperaturas, a presiones o a ciertos fluidos subterráneos químicamente activos, tanto la corteza ígnea como la sedimentaria pueden transformarse en material metamórfico (es decir, la roca original se transforma). Existe un proceso que afecta a los tres tipos de roca: con el tiempo y de acuerdo con las condiciones que las rodean, puede cambiar de un tipo a otro.

La corteza continental está formada por las partes emergidas de la litósfera, que constituyen los continentes y las islas, mientras que la corteza oceánica está cubierta por el agua de los océanos y mares. El fondo oceánico está conformado principalmente por rocas ígneas basálticas, sobre las cuales se encuentra una capa de sedimentarias, que pueden o no estar consolidadas.



Figura 2. Ciclo de las rocas.

Todas las rocas ígneas basálticas están formadas por elementos y compuestos químicos llamados minerales como el cuarzo, los fosfatos, el manganeso, el oro, el yeso, la arcilla, el diamante y la calcita, entre otros. Además de minerales, las rocas sedimentarias pueden contener compuestos orgánicos de origen vegetal y animal como el petróleo, el gas natural, el carbón, etcétera.

Todo ese material que contiene la corteza ha sido y es de gran importancia económica, y constituye asimismo una fuente inagotable, como elemento de estudio, para la investigación científica.

La *geología* es la ciencia que estudia la dinámica de los cambios que ha sufrido la Tierra a través del tiempo —basándose en el análisis de las rocas y en la observación de las montañas, las planicies y las profundidades oceánicas— con el fin de explicar tanto el origen de los continentes y océanos como la diversidad de la superficie terrestre.

Cuando tales estudios se aplican al conocimiento de la corteza terrestre que está cubierta por las aguas oceánicas, se le llama *oceanografía geológica* o *geología marina*, cuyo objetivo principal es conocer la historia del planeta.

Esta disciplina puede definirse como el estudio geológico de la superficie terrestre cubierta por el agua del mar, de las islas oceánicas y de las zonas costeras y entre otras cosas se ocupa del origen de los bordes continentales, de las cuencas oceánicas y de las formaciones geológicas con ellas relacionadas; la composición, estructura, estratigrafía e historia de los sedimentos y rocas que subyacen en los océanos; los procesos de erosión, acarreo y depositación de los materiales geológicos en diversas condiciones climatológicas; y la comparación de sedimentos y medios marinos antiguos y modernos.

En un principio, los océanos cubrieron casi la totalidad de la corteza terrestre, donde se depositaron los primeros sedimentos, que eran principalmente de origen inorgánico. Durante la evolución geológica de la Tierra, el nivel del agua fue bajando hasta que cubrió únicamente, las tres cuartas partes del planeta, por lo cual quedaron al descubierto extensas zonas de tierra, es decir, los continentes e islas, donde se depositaron nuevos sedimentos.

Es razonable presuponer que el 75 por ciento de los sedimentos existentes en la actualidad en la corteza terrestre son de origen marino. Prueba de ello es que en muchas zonas terrestres se observa esta clase de sedimentos marinos antiguos.

Los sedimentos marinos, además del interés científico, tienen un creciente interés práctico, en virtud de que la humanidad utiliza cada vez más las costas y los fondos de los mares para extraer principalmente hidrocarburos; por esta razón, a los geólogos marinos se les identifica por sus actividades relacionadas con la explotación petrolera.

Estos geólogos analizan los sedimentos marinos actuales con el objeto de conocer sus características, así como los procesos en que se forman y modifican; por lo demás, dichos conocimientos se utilizan —por analogía— para estudiar los sedimentos antiguos que concentran material explotable, como el petróleo y el azufre.

Mediante el estudio de los distintos sedimentos oceánicos es posible conocer las características del ambiente en el que se produjo la sedimentación, como la topografía o forma del fondo, la profundidad y la dinámica del agua, tanto en la zona de estudio como en las áreas que la circundan. De esta manera se puede determinar la procedencia de las partículas sedimentarias, cuyo origen se encuentra en las precipitaciones químicas, en los depósitos de esqueletos o en la materia orgánica derivada de seres vivos marinos.

Los continuos cambios que ha sufrido la corteza terrestre y sus sedimentos a través de la historia del planeta se pueden interpretar estudiando la configuración de los fondos oceánicos, es decir, la topografía, que nos proporciona gran cantidad de datos acerca del pasado de la Tierra y de las particularidades que presenta en la actualidad.

A partir de tales estudios se elaboran mapas —llamados paleogeográficos— de la geografía de épocas antiguas en los que se muestra la manera en que la tierra y el mar se encontraban delimitados en un determinado momento de la historia geológica.

Para trazar los mapas paleogeográficos se utilizan los resultados del estudio de los sedimentos marinos. Uno de los primeros factores a tomarse en cuenta para ello es la batimetría; esto es, la profundidad que tuvieron los fondos marinos en otra época. Así, un periodo determinado de tiempo se puede reconstruir mediante el estudio de los restos animales o vegetales que han podido conservarse durante un lapso suficientemente largo. Dichos restos reciben el nombre de *fósiles*.

Como resultado de los estudios que se hacen empleando métodos radiactivos para determinar las edades de las rocas y de los fósiles que se encuentran en ellas, se han podido establecer las posibles eras por las que ha pasado nuestro planeta, así como la duración de las mismas, que se mide en millones de años. Los geólogos dividen la escala del tiempo geológico en cinco eras:

La Azoica, en donde se sitúa a las rocas más antiguas y cuya posible duración fue de 3 000 a 3 300 millones de años; en ella no se encuentran indicios de vida.

La Precámbrica, de aproximadamente 1 500 millones de años de duración. En esta era se hallaron los primeros materiales de probable origen orgánico y que, por tanto, son signos de la existencia de vida.

La Paleozoica, que abarcó de 300 a 500 millones de años de duración caracterizada por haberse iniciado la formación de la estructura actual de los continentes; contiene a representantes muy peculiares de diferentes grupos vegetales y animales.

La Mesozoica, de 130 a 150 millones de años de duración, en cuyo transcurso los mares avanzaron y retrocedieron sobre los continentes. Ha sido llamada también Era de los reptiles, tanto por el número como por el gran tamaño que alcanzaron entonces dichos animales.

La Cenozoica, considerada la de más corta existencia, pues duró de 60 a 75 millones de años. Durante esta etapa, el relieve terrestre adquirió su aspecto actual. Asimismo, en ella apareció y se desarrolló el hombre.

El comienzo y la terminación de las eras geológicas no han sido fijados arbitrariamente, puesto que se hicieron coincidir con acontecimientos geológicos y biológicos de importancia, mismos que se han presentado a lo largo de la historia de la Tierra.

Escala del tiempo geológico.

ERA	DURACIÓN (millones de años)
Azoica	300-330
Precámbrico	1 500
Paleozoica	300 - 500
Meozoica	130 - 150
Cenozoica	60 - 75

Para efectuar una reconstrucción paleogeográfica es fundamental conocer los datos sobre los climas antiguos, cuyas variaciones se pueden suponer comparando la distribución de la flora y fauna del pasado con la del presente, pues tal distribución es ocasionada precisamente por el efecto de los diferentes climas. Por ejemplo, es fácil distinguir los fósiles representativos de los polos y los trópicos; sin embargo, es

difícil hacerlo cuando se trata de fósiles situados en áreas con leves y locales variaciones de clima. A estos estudios se les denomina *paleoclimáticos*.

Se le llama *paleontología* a la ciencia que estudia los restos de organismos animales o vegetales conservados por un tiempo largo dentro de las rocas sedimentarias de nuestro globo. Esta ciencia guarda estrecha relación con la geología y la biología.



Figura 3. Fósiles de animales marinos.

Gracias a los avances de los estudios paleogeográficos, paleoclimáticos y paleontológicos se ha ido aclarando el conocimiento acerca de la evolución de la Tierra. Pero, a pesar de estos adelantos, los científicos siguen divididos en dos grupos en lo que se refiere a la explicación del origen de los continentes y de los fondos marinos actuales.

Uno de los grupos sostiene que, tomando en cuenta la forma actual de la superficie terrestre, los océanos se formaron debido a un hundimiento gradual de la Tierra que trajo aparejada una elevación compensatoria en los bordes de la zona hundida.

El otro grupo defiende la teoría de la traslación o migración de los Continentes, llamada también teoría de la *deriva continental*, que se inició con las observaciones del naturalista británico Francis Bacon en 1620. Este científico, creía que la forma peculiar que presentan los continentes a ambos lados del Atlántico no se debía a una mera coincidencia; es decir, Bacon supuso que tanto el continente americano como el europeo formaron parte de una masa continental originaria que se fragmentó.

La teoría de la deriva continental se basa en la semejanza que muchas costas presentan en los lados opuestos de los océanos, de tal manera que podrían embonar unos con otros como las piezas de un rompecabezas. Esta tesis fue presentada en 1910, por F. B. Taylor en Estados Unidos. Sin embargo, debe considerarse al geofísico alemán Alfred Wegener como al creador de esta hipótesis pues en 1912 la dio a conocer mas ampliamente en su obra *El origen de los continentes y océanos* .

Desde su inicio, esta teoría provocó serias discusiones entre los científicos, sobre todo por los argumentos que Wegener utilizaba para explicarla. En la actualidad, la teoría de la deriva continental gana cada vez más adeptos, en virtud de que los geofísicos descubrieron que los campos magnéticos de los estratos terrestres más antiguos no están en un eje Norte-Sur, lo cual explica que, al desplazarse, las masas de tierra hayan girado lentamente sobre el eje ecuatorial, separándose los continentes con la forma que actualmente presentan. Asimismo otros estudios realizados por algunos biólogos, encontraron un gran parecido entre la flora y la fauna de la América del Sur y de Africa, lo que favorece a esta teoría.

La teoría de la deriva continental sostiene que la historia de la Tierra ha pasado por cuatro fases. En la primera, se supone que las masas continentales estaban unidas formando un solo continente —o

protocontinente —, al que se le llamó *Pangea* y que posiblemente existió hasta hace 200 millones de años.

En la segunda fase, hace 135 millones de años, se cree que la zona norte y la sur empezaron a separarse, por razones desconocidas, formando dos grandes bloques continentales, el *Gondwana* situado en el Sur y constituido por Sudamérica, África, Madagascar, India, Australia y la Antártida; y *Laurasia*, al Norte, formado por América del Norte, Groenlandia, Europa y Asia.

En la tercera fase, hace 65 millones de años se supone un desplazamiento hacia el Norte de la mayor parte de los continentes, con excepción de la Antártida, que lo hizo hacia el Sur, y de América, que se movió hacia el Oeste.

Por último, se asegura que en la cuarta fase los continentes alcanzaron sus actuales posiciones. En este caso se considera que la formación de las montañas se debió al replegamiento de la corteza de los bloques continentales, originado a su vez por la fricción ocurrida al desplazarse ésta sobre el material que se encuentra debajo de la corteza.

Existe la predicción de que durante 50 millones de años América continuará desplazándose hacia el Oeste y Eurasia hacia el Este.



Figura 4. Fases de la deriva continental.

Según los geólogos contemporáneos, este desplazamiento se debe a que la litósfera, que se fractura fácilmente, se encuentra asentada sobre la primera capa del manto, la cual tiene una consistencia fluida debido a sus altas temperaturas. Esto permitió que la litósfera se dividiera en 6 placas tectónicas, que se han movido independientemente, ya sea de manera paralela o por choque entre sí, lo cual hace que se desplace una por debajo de otra; a este fenómeno se le conoce como *tectónica de placas*.

Dichos estudios que tratan de explicar la historia de la Tierra pertenecen a la geofísica, rama de la geología que ha alcanzado un desarrollo considerable en el campo marino, sobre todo por el avance —logrado en los últimos 50 años— de técnicas como la sismología, la gravimetría (medición de la gravedad) y el geomagnetismo (estudio del magnetismo terrestre).

La utilidad de la geología marina se amplía cada vez más, pues aparte de la información científica, proporciona otros datos que dan la pauta para aprovechar recursos marinos como los hidrocarburos y los aceites minerales combustibles. Un dato interesante es que estos recursos provienen de organismos muertos que se depositaron con los sedimentos en los fondos someros de los mares hace millones de años.

La oceanografía geológica o geología marina no es una ciencia puramente teórica o especulativa; por lo contrario, tiene una aplicación directa en un gran número de actividades humanas. Gracias a esta ciencia el hombre puede conocer la potencialidad de los recursos geológicos del mar y aprovecharlos de manera racional para su beneficio.

Indice



II. EL NACIMIENTO Y CRECIMIENTO DE LOS OCÉANOS

PARA estudiar el nacimiento y crecimiento de los océanos es necesario analizar los cambios que ocurrieron tanto en los océanos mismos como en la atmósfera a lo largo de evolución de nuestro planeta.

En diferentes épocas ha tratado de explicarse el origen de la Tierra, pero no se ha logrado aceptar como verdadera una sola hipótesis; sin embargo, la teoría más admitida en la actualidad es la de la gran explosión,¹ basada en la idea de que el Universo estuvo alguna vez concentrado, y que su expansión violenta dio origen al mundo que conocemos. El Sistema Solar nació de esa nube de gas y polvo que se convirtió en materia sólida debido a la acción de las fuerzas eléctricas y de gravitación. El Sol quedó entonces en el centro, y a su alrededor una lámina aplanada de materia que se desintegró mientras giraba y que se convirtió en los actuales planetas.

Durante la formación de la Tierra, la materia se fue acumulando hasta conformarse en cuerpos sólidos, del tamaño de los asteroides, y en objetos tal vez más grandes que alcanzaban dimensiones semejantes a las de la Luna.

Se cree que la Tierra no habría podido tomar su forma actual si en sus proximidades hubiera existido una gran cantidad de los gases primitivos presentes en el origen del sistema solar. Parece ser que esos gases fueron arrastrados, en su mayor parte, fuera de la región donde la Tierra fue formándose.

Los meteoritos, cuerpos sólidos a los que se les ha calculado una edad de 4.5 a 4.7 millones de años, constituyeron los núcleos en torno a los cuales empezaron a formarse los planetas. Puede ser que el calentamiento radiactivo del núcleo de la Tierra, estructurado éste de hierro y níquel, haya derretido y hundido los meteoritos hasta el centro, originando un aumento sustancial del calor —hasta de 100 000°C—, que a su vez terminó por fundirlo todo.

Con el tiempo fue enfriándose la bola gaseosa, y cuando las temperaturas fueron suficientemente bajas algunos gases se licuaron, mientras que algunos líquidos se solidificaron. Probablemente, las primeras sustancias que sufrieron tal cambio fueron las más pesadas, las cuales se desplazaron hacia el centro de la Tierra. Dichas sustancias conservan en la actualidad el suficiente calor para que dicho centro esté constituido por materiales semisólidos y elásticos. Poco después, las sustancias más ligeras se solidificaron también y formaron una corteza sólida alrededor del núcleo. A medida que dicha capa sólida iba engrosando se arrugaba y plegaba creando las cadenas de montañas. Esa corteza quedó rodeada en su exterior por una capa gaseosa originando un paisaje semejante al de la Luna.

Durante el proceso de acumulación de rocas, sustancias como el agua y gases inertes se concentraron debajo de la superficie de la corteza, por lo que los científicos creen hoy en día que la mayor parte del agua que existía sobre la Tierra brotó desde el interior de ella como resultado de la actividad volcánica, de la fuerza giratoria y de la gravitación de todo el cosmos. El geólogo Arnold Urey supone que alrededor del 10 por ciento del agua que se encuentra actualmente en los océanos existía ya, como agua superficial, al terminar de formarse el planeta.

En esa época la Tierra quizás estuvo rodeada por una atmósfera primitiva constituida por gases pesados como el kriptón y el xenón, por otros más ligeros, como el neón y el argón y por pequeñas cantidades de hidrógeno y helio. Con seguridad, esta atmósfera se fue perdiendo para dar lugar a una "segunda atmósfera" conformada por los materiales volátiles que escapaban del interior de la Tierra, como el nitrógeno, el bióxido de carbono y el vapor de agua; su temperatura era muy elevada debido al calor emitido por la tierra sólida, razón por la cual no existía agua líquida.

Con el tiempo, la nueva atmósfera se enfrió, y se piensa que, cuando ésta alcanzó una temperatura crítica de 374°C, el agua líquida fue apareciendo en pocas cantidades, conservándose también el vapor de agua.

Es posible que las lluvias hayan empezado a caer cuando descendió la temperatura. El agua se encontraba entonces en forma de vapor, en nubes cuyo espesor probable era de miles de kilómetros. En un principio, la corteza sólida estaba tan caliente que el agua de las lluvias, al posarse sobre ella, se evaporaba instantáneamente. Sin embargo, la temperatura bajó todavía más, lo cual permitió que en algunos puntos se depositaran pequeñas cantidades de agua líquida.

La lluvia siguió cayendo con abundancia durante siglos. Los terrenos bajos, las cuencas y hondonadas se llenaron de agua, y los ríos bajaron caudalosamente desde las montañas para dar origen a los océanos. En la actualidad, el volumen total de agua existente en el planeta es de 1 080 billones de kilómetros cúbicos, lo que representa 900 veces más que el volumen que tienen los océanos, el cual alcanza apenas 1.2 billones de kilómetros cúbicos.

Desde su origen, los mares, así como la atmósfera, han sufrido una transformación constante. Las lluvias arrastraban hacia la Tierra gases atmosféricos como el metano, el amoníaco, el bióxido de carbono y el ácido clorhídrico, que por medio de las reacciones químicas fueron integrando los compuestos característicos tanto de la tierra como de las aguas.

La composición del agua del mar se fue complementando debido a la acumulación de sales y minerales. Al principio la concentración era mínima, pero creció a medida que los ríos erosionaban la corteza sólida de la Tierra, y conforme las fuertes mareas reducían las costas a arena; además, como resultado de la influencia del clima sobre los mismos minerales metálicos, éstos se fueron añadiendo al océano en cantidades crecientes. Las sustancias disueltas se vieron incrementadas por las erupciones, probablemente muy frecuentes, de volcanes submarinos y terrestres, erupciones ocurridas debido al escaso grosor de la corteza recién formada. Todo esto produjo la salinidad del mar, que actualmente tiene un promedio de 35 gramos de sales en un litro de agua, por lo que se dice que presenta una concentración de 35 partes por mil.

Del interior de la Tierra se desprendieron también sustancias volátiles en forma de amonio —como los compuestos a base de carbono y los de nitrógeno—, que durante ese tiempo se mantenían en altas concentraciones. Tales sustancias se mezclaban con el agua de los océanos, por lo cual éstos adquirirían un aspecto oscuro y parduzco.

Es posible que dichos compuestos hayan también existido en la atmósfera colaborando a formar, con el vapor de agua, densas nubes que debieron impedir a la luz del Sol llegar a la superficie de la Tierra. Entonces el planeta debió estar en oscuridad durante millones de años. Probablemente, sólo los rayos ultravioleta, los rayos X y otras radiaciones de alta energía procedentes del Sol pudieron penetrar en la capa de nubes y llegar a la Tierra.

Se ha pensado que, en un principio, la Tierra carecía de oxígeno. Esto se ha podido comprobar gracias al avance de las técnicas que permiten estudiar los meteoritos. Así, se descubrió que los meteoritos que estructuran el centro del planeta están formados por sustancias ricas en hidrógeno, y no por sustancias oxidantes.

La atmósfera oxidante del planeta, que apareció cuando éste tenía una edad aproximada de 2 000 millones de años, dio origen a la transparencia tanto de la atmósfera como del agua. En la alta atmósfera de la Tierra, el nitrógeno y el hidrógeno reaccionaron lentamente para producir amoníaco, que luego descendió a la superficie de la Tierra y se disolvió en el agua, quedando una atmósfera con poco nitrógeno y unos océanos impregnados de amoníaco.

A medida que crecían los primeros océanos, los ríos que llevaban el agua de lluvia arrastraban desde la tierra minerales disueltos, entre ellos la sustancia más abundante: el cloruro de sodio, llamado comúnmente sal; además, llegaron al océano otras sustancias químicas en cantidades menores: cloruro de magnesio, sulfato de magnesio y sulfato de calcio, entre otras. Actualmente, el cloro, el sodio, el magnesio, el azufre y el calcio son los elementos más comunes disueltos en el mar, aunque también se

encuentra cobre, plomo, uranio, oro, estaño y otros.

Uno de los hechos más significativos de aquella época fue la aparición de la vida en los océanos. Los organismos vivos más simples se pudieron formar gracias a que los compuestos químicos existentes se volatilizaron y fueron transportados a la alta atmósfera activados por la luz ultravioleta o por descargas eléctricas.

Esos compuestos, al precipitarse en forma de lluvia sobre los océanos, produjeron reacciones químicas que dieron lugar a otros compuestos los cuales fueron nuevamente llevados a la alta atmósfera y, después de volver a ser activados, cayeron otra vez a los océanos. Este fenómeno se repitió varias veces hasta que provocó la aparición de compuestos orgánicos complejos y, por fin, la de los primeros seres vivos.

Estos acontecimientos constituyeron un factor importante para la vida y el mantenimiento de las primeras funciones vitales. Así, los océanos se poblaron con los organismos vivos más simples, que han evolucionado gradualmente en el transcurso de miles de millones de años hasta formar la compleja fauna y flora que observamos en nuestro medio actual.

Durante esa época, el oxígeno se acumuló en la atmósfera gracias a la concentración del vapor de agua a gran altura, y debido a la fotosíntesis de los vegetales verdes con que elaboran su sustancia orgánica.

Los organismos fotosintetizadores que existían en el océano desprendían cantidades cada vez mayores de oxígeno libre, el cual reaccionó rápidamente con todo lo que encontró a su alrededor. Este fenómeno inició una profunda y lenta "revolución del oxígeno" sobre la Tierra.

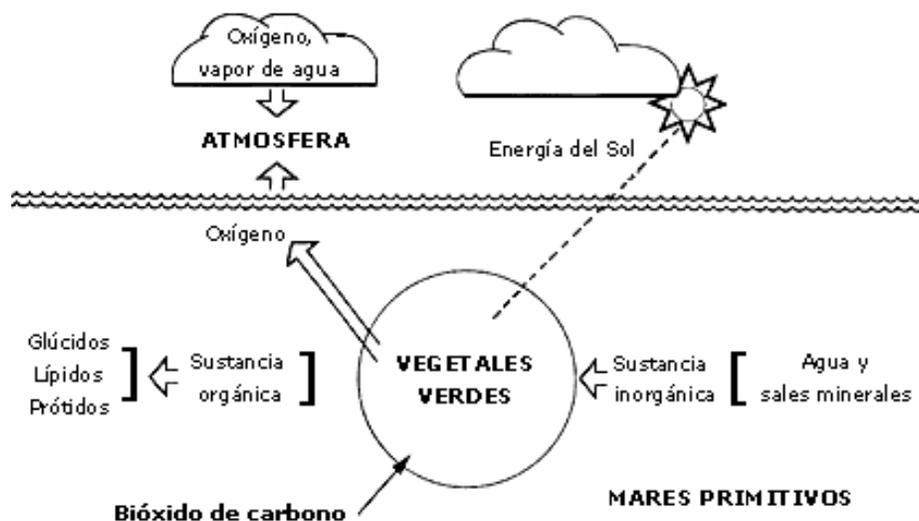


Figura 5. Revolución del oxígeno.

Finalmente, esa revolución transformó la atmósfera primitiva —que contenía metano, amoníaco y ácido clorhídrico— en la atmósfera moderna compuesta por oxígeno molecular libre, que se encuentra en aquella en 21 por ciento; por nitrógeno molecular —79 por ciento— y por bióxido de carbono —0.03 por ciento— y por vapor de agua en cantidades variables. El oxígeno molecular, además, se encuentra disuelto en el agua del océano.

También es importante destacar que, en aquella época, las moléculas del oxígeno se recombinaron y modificaron en las zonas más elevadas de la atmósfera debido a la intensidad de la radiación cósmica. Como resultado de ello se formó una capa de ozono, situada a varios miles de kilómetros de altura y que existe todavía en la actualidad. Esta capa constituye una excelente pantalla de protección contra las radiaciones de alta energía.

Así, al formarse como planeta la Tierra quedó integrada por una corteza sólida o *litósfera*; por una líquida

o *hidrósfera*, que dio origen a los océanos, ríos, lagos, glaciares y agua subterránea, dejando al descubierto las partes emergidas de la litósfera, que son las que forman los continentes e islas, rodeadas por una capa externa gaseosa llamada *atmósfera*.

El material rocoso que apareció en las cuencas oceánicas comprimió la corteza superficial hacia los continentes, por lo cual los grandes océanos se extendieron hasta alcanzar la dimensión que se conoce en nuestros días.

Los fondos oceánicos se configuraron durante un periodo muy prolongado, y en la actualidad presentan un relieve muy rugoso. La estupenda escena oculta en las profundidades se compone de altas montañas, empinados cañones y asombrosas trincheras y hendiduras. Al conjunto de agua salada que cubrió estos fondos oceánicos, formando una masa única por estar en libre comunicación, recibió el nombre genérico de *océano*.

Si nos situáramos en el Polo Sur podríamos observar que las aguas rodean al continente Antártico y se extienden hacia el norte entre los demás continentes, formando tres enormes golfos. Por esta razón, la masa oceánica se ha dividido en tres partes: Atlántico, Índico y Pacífico.

Dentro del Atlántico se encuentra el mar Ártico, el mar de Noruega, las aguas del Archipiélago canadiense y todos los mares adyacentes que se comunican con él. El Pacífico baña las costas occidentales de América y las orientales de Asia, y continúa hasta el continente Antártico. El Índico está limitado por África, Asia y Oceanía.

Los geólogos marinos, basándose en las características estructurales de la corteza oceánica y de la continental, así como en la forma de los fondos oceánicos, han propuesto una clasificación para diferenciar los cuerpos de agua marina.

En esta clasificación, los océanos Atlántico, Pacífico e Índico son considerados como verdaderos océanos, puesto que alcanzan una profundidad promedio de 3 000 metros, cubren cortezas oceánicas y tienen áreas de más de 10,000,000 de kilómetros cuadrados.

Los geólogos han dividido los mares en: continentales, cuya profundidad no excede los 1 500 metros y cuya corteza, debajo sus aguas, es de tipo continental, como la del Mar del Norte; Interiores: estos mares tienen una profundidad de menos de 5 000 metros y un área no mayor de 500,000 kilómetros cuadrados; sus fondos pueden ser tanto de corteza oceánica como continental; por ejemplo, el Mar Negro y el Mar Caribe. También se considera al Mar Mediterráneo por presentar una profundidad de 1 000 a 2 500 metros.

Clasificación geológica de los océanos y mares.

TIPO	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLO
Océano	Profundidad superior a 3 000 metros; área de 1 millón de kilómetros cuadrados; corteza oceánica.	Océano Atlántico
Mar continental	Profundidad inferior a 1 500 metros, corteza continental	Mar del norte

Mar interior	Profundidad inferior a 500 metros; área inferior a 500 000 kilómetros cuadrados; corteza oceánica o continental.	Mar Negro
---------------------	---	------------------

Mar mediterráneo	Profundidad de 1000 a 2500 metros, área inferior a 1 millón de kilómetros cuadrados; corteza oceánica.
-------------------------	---

A pesar de los enormes progresos realizados durante el presente siglo en todas las ramas de la ciencia, al hombre le quedan múltiples misterios por resolver. Uno de ellos es el relacionado con el origen de esa gran masa de agua, que es el océano. Cabe subrayar que al respecto sólo existen conjeturas, y que aún queda mucho por investigar a fin de entender mejor la evolución del planeta.

NOTAS

1 Véase Luis F. Rodríguez, *Un universo en expansión*, La ciencia desde México 1, FCE/CONACYT, México, 1986



III. ACCIÓN GEOLÓGICA EN EL MAR PARA LA FORMACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE COSTA

LOS geólogos y los geofísicos marinos han descrito la historia y la constitución de las dos terceras partes de la superficie terrestre que se encuentra bajo las aguas oceánicas. Asimismo, han dividido dicha superficie, según sus características estructurales y topográficas, en regiones o provincias. Tal es el caso de los *márgenes continentales* y de las *cuencas oceánicas*, dos de las más importantes.

El mayor margen continental o precontinental incluye la zona donde los continentes y los océanos están en relación, es decir, corresponde a aquellos sectores de los fondos marinos que clásicamente se han denominado *plataforma* y *talud continental* y que hacen que el paso de los continentes a las profundidades oceánicas no sea repentino.

Cualquier perfil del borde precontinental aparece estructuralmente como una depresión de la corteza terrestre, que a través de los años cambia conforme se va rellenando de sedimentos. Su borde interno está constituido por la *zona costera*, que forma parte del dominio continental y contiene diversos detalles topográficos, como son las playas, las líneas de costa, los acantilados, las lagunas litorales y los esteros, entre otros. Su borde externo hace contacto con los fondos oceánicos; en esta área se pueden distinguir tres grandes provincias:

Plataforma continental. Es el sector más plano. Continúa el relieve del continente y se extiende a una profundidad de 200 metros.

Talud continental. Corresponde a una zona de pendientes más acentuada, por abajo de los 200 metros de profundidad. Su extensión varía en los diferentes mares.

Borde continental. Se sitúa al pie del talud. Forma el límite del precontinente y su unión con los grandes fondos oceánicos.

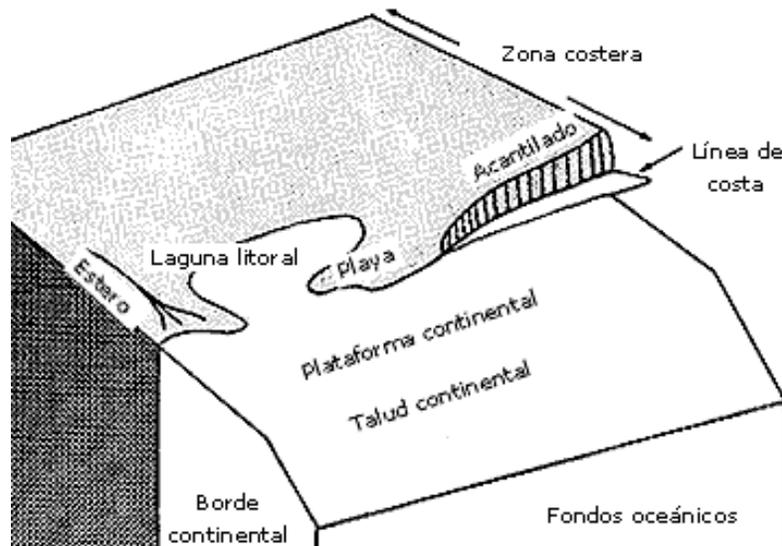


Figura 6. Márgenes continentales.

De las provincias de los márgenes continentales, la que mejor se ha estudiado es la zona costera, puesto que en ella se efectúa el más alto número de actividades humanas. Esta zona puede dividirse en cuatro unidades: la costa, la ribera, la línea de costa y la playa.

La zona costera ha cambiado durante la evolución del océano. Esto se explica porque los continentes se

han elevado haciendo que la costa emerja y que la línea de costa se desplace hacia el mar. Este desplazamiento puede ser provocado por la actividad tectónica o por la acumulación de los materiales sedimentarios que son acarreados por el mar hacia la costa.

En otros lugares, la línea de costa se ha desplazado hacia el interior de los continentes. A este fenómeno se le llama *retirada o sumersión*, y puede ser originado tanto por movimientos tectónicos como por la erosión de la costa. Dicha zona costera puede cambiar su topografía debido a la acción de agentes —denominados geomórficos— de origen terrestre o marino. Los terrestres, como los ríos, los glaciares y los volcanes, además del plegamiento de la corteza, forman las líneas de costa *primarias*, mientras que los de origen marino, como el oleaje, las corrientes oceánicas y las mareas, junto con la influencia de algunos organismos, como los corales, moldean las líneas de costas *secundarias*.

Las características actuales de las costas han sido determinadas por la acción que el mar ha ejercido desde épocas geológicas. El agua de los océanos ha sido, por la dinámica de sus movimientos —olas, corrientes y mareas— y en menor escala por su acción química, la principal responsable del modelado de las costas. También otros factores contribuyen a esto, como los fenómenos atmosféricos, las aguas salvajes, la desembocadura de los ríos y los seres vivos.

En un principio, las costas debieron haber tenido un perfil homogéneo, y quizás después sufrieron una continua transformación originada por la influencia de agentes externos e internos como la erosión y la sedimentación, que ayudaron al desgaste y acumulación de material.

Los agentes externos son los que pertenecen al medio ambiente y que actúan sobre el litoral, como el oleaje, las corrientes, el viento, la acción del congelamiento y deshielo, los procesos químicos y la actividad de los seres vivos.

El impacto del oleaje suele recaer sobre los materiales de la costa y transformarlos. La fuerza de las olas adquiere intensidades según la potencia del viento, la profundidad y características del fondo. Esta fuerza puede ser de 30 toneladas por metro cuadrado. Se ha calculado que a 70 metros de profundidad las olas ejercen todavía una acción.

Los cambios en el perfil de las costas ocurren como consecuencia del golpe directo de las olas, que ejercen una fuerza muy grande, especialmente durante los fuertes temporales. A esta fuerza se suma la presión generada por el aire comprimido que va por delante de la ola.

Los fragmentos que las olas van arrancando a las rocas o los que ya existían en el fondo del mar, son lanzados por las olas una y otra vez, contribuyendo enérgicamente al modelado de la costa.

En los océanos existen varios tipos de corrientes marinas. Unas son constantes, como la corriente de Perú que circula en el Océano Pacífico, y otras son transitorias, puesto que se forman en función de presiones variables de aire y a raíz de los cambios en la constitución del agua.

Entre las corrientes que intervienen en la configuración de la costa destacan, a saber, las originadas por el ir y venir de las olas, que genera las corrientes de incidencia y de resaca, las cuales desgastan las rocas y transportan los materiales resultantes de este desgaste; en otro caso sobresalen las de marea, que pueden alcanzar fuerza cuando se desplazan por lugares estrechos, adquiriendo mayor velocidad; por último están las que descargan, originadas al ocurrir una invasión de agua dulce en el mar.

El viento es uno de los factores que ha hecho cambiar más la fisonomía de las costas. Así, al soplar desde mar adentro hacia tierra, y a la inversa, provoca alteraciones en el nivel del agua. El viento se fortalece en épocas de ciclones y tifones.

En los mares polares y subpolares, las rocas costeras sufren modificaciones a raíz de la acción continua del agua durante el ciclo de congelamiento y deshielo.

El principal proceso químico que se observa en las costas es el de disolución, o sea, el agua del mar es capaz en este caso de disolver las rocas, provocándoles oquedades o aislando fragmentos y confiriéndoles estructuras peculiares.

La influencia de los seres vivos en torno a la forma de la costa ha sido lenta y continua; por ejemplo, conforme crecen, las colonias que forman los arrecifes de coral van formando grandes barreras que modifican la costa.

Los agentes internos corresponden a las características propias de la estructura de las rocas de la costa, como la naturaleza y grado de dureza de las mismas, la abundancia y tamaño de los materiales sueltos, la profundidad del mar en las proximidades de la orilla.

La erosión de las costas rocosas provocada por las olas sucede lentamente, aun en los lugares donde las rocas son relativamente blandas. Los índices de erosión por año en los acantilados son de un metro, y representa aproximadamente el 5 por ciento del material de erosión que llega a las playas del mundo.

Los ríos y los vientos transportan los productos de la erosión desde el continente hasta la costa, donde las olas y las corrientes los distribuyen, además de cambiar la velocidad de erosión y la de depósito según la cantidad de energía que interviene en el proceso. Se considera que el flujo de energía de los océanos en las aguas costeras es de 5 000 millones de Kilowatts.

En el modelado de la costa también resulta importante el movimiento de los sedimentos a lo largo de las orillas. Por ejemplo, la cantidad de arena de playa que se transporta sobre varias costas puede alcanzar un volumen superior al millón de metros cúbicos por año.

Las principales fuentes de los sedimentos de playas y orillas están representadas por los ríos, que transportan grandes cantidades de arena hasta el océano; los acantilados marinos de material no consolidado, que son desgastados por las olas, y los restos de origen biológico, como las conchas, los fragmentos de corales y otros esqueletos de pequeños organismos marinos. La arena arrastrada por el viento puede actuar como una fuente de sedimento en las orillas, aunque los vientos, por lo general, son más eficaces quitando arena de las playas que depositándola.

La cantidad de sedimentos de erosión acumulados en una área determinada puede obtenerse mediante la evaluación de los aportes y las pérdidas sedimentarias, tomando en cuenta su relación con las diferentes fuentes que las originan y con los mecanismos de transporte. Los geólogos marinos han calculado estos índices de erosión y depositación, lo que ha sido muy útil para conocer las características de la costa a fin de comprender los procesos que han intervenido en la formación de los litorales. Así, se ha estimado que la cantidad de sedimentos producidos varía desde las 20 toneladas anuales por kilómetro cuadrado —región de los Apalaches, en América del Norte— hasta las 2 600 toneladas —montañas del Himalaya, en Asia.

Como resultado de la erosión y de la acumulación, los litorales van adquiriendo una topografía muy peculiar.

La superficie rocosa más o menos inclinada y expuesta a la actividad directa del oleaje recibe el nombre de *acantilado marino*, donde la erosión es más intensa en su base debido a que la fuerza del oleaje y el impacto de los fragmentos rocosos son mayores. Así, la roca queda desnuda, vulnerable a la formación de entrantes, cuevas o galerías que, cuando alcanzan determinado tamaño causan el hundimiento o desplome —según los distintos tipos de roca de la parte superior. De esta manera el acantilado retrocede ante la socavación de su base.

Este retroceso es más rápido en las costas de latitudes altas, donde la congelación del agua dentro de las grietas de la roca provoca la expansión y fragmentación de la misma. Así, van acrecentándose las cuevas. Los materiales hundidos, que a veces son fragmentos muy grandes, quedan al pie del cantil, formando una acumulación llamada terraza, la cual frena el avance de la ala y disminuye su energía. El acantilado se

estabiliza o retrocede lentamente hasta que los fragmentos desprendidos son eliminados iniciando nuevamente el proceso.

La forma, altura y demás caracteres del acantilado varían de acuerdo en el tipo de roca. En las rocas compactas, como las calizas, cuarcitas y basaltos, el acantilado se forma alto y vertical, mientras que en las más blandas, como las mangas y arcillas, la pendiente se hace más tenue por los deslizamientos. En ello también influye la disposición de las rocas. Cuando los estratos son horizontales, verticales o de inclinación opuesta al mar, se favorece la formación de cantiles abruptos; por el contrario, cuando las capas están inclinadas hacia el mar, producen pendientes más suaves, en favor de los planos de estratificación.

En los acantilados que han retrocedido suele formarse una superficie suavemente inclinada hacia el mar, la cual se extiende al pie del acantilado en el denominado espacio intermareal, es decir, desde la altura mínima de la marea baja, hasta la máxima de la marea alta, que son los límites entre los cuales actúa el oleaje.

En las costas con material compacto, la formación de los acantilados es más o menos uniforme, dando una costa casi recta. Por el contrario, donde las rocas tienen distinta resistencia se crea una erosión diferente y los tramos más débiles retroceden con mayor rapidez formando grandes entrantes que reciben el nombre de *bahías o ensenadas*, y los tramos más resistentes constituyen las *salientes o promontorios*.

Si los promontorios siguen siendo golpeados por el oleaje suelen formarse cuevas en ambos lados. Dichas cuevas pueden ser tan profundas que llegan a comunicarse entre sí produciendo arcos o puentes naturales llamados *foradadas*, como las de Cabo San Lucas en la parte Sur de Baja California, en México. Estos arcos pueden derrumbarse y dar origen a un islote costero separado de la línea de la costa.

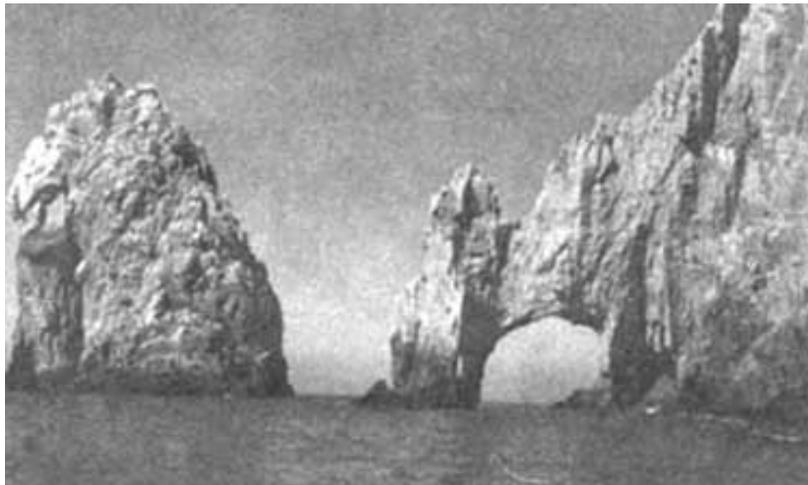


Figura 7. Arco del Cabo San Lucas en baja California Sur.

La acción desgastadora del mar sobre el acantilado produce pequeñas grietas que, al aumentar de tamaño, se convierten en *cuevas marinas*. Cuando el agua entra a presión por la cueva, el aire de ésta se comprime y tiende a salir violentamente por la parte superior, acompañado de agua pulverizada, produciendo una especie de rugido. A este tipo de formación costera se le ha llamado hoyo *soplador o bufadora*.

Los materiales que se desprenden de las rocas, así como los que proceden del continente acarreados por los ríos, son transportados por el mar y depositados, de diversas formas, en sitios favorables. El transporte perpendicular a la costa se realiza por el avance de la ola o por el flujo de la marea alta, que empujan los materiales hacia la orilla, que mientras que la resaca del oleaje y el refluo de la marea llevan a estos materiales hacia mar adentro.

Las corrientes litorales o de deriva, resultantes de la acción oblicua del oleaje sobre el litoral, también transportan a los materiales con dirección a la costa.

Los fragmentos transportados varían en cuanto a su composición y tamaño, pero fundamentalmente son de tipo arenoso y arcilloso. El hecho de que estos materiales se depositen tanto en sentido transversal como longitudinal a la costa constituye un punto de referencia para establecer sus tamaños.

Los de mayor dimensión, como los grandes trozos de roca, las piedras —llamadas cantos— de tamaño medio que el agua rueda, las piedras más pequeñas &—gravas o gravillas— y las arenas gruesas o medianas permanecen cerca de la costa, los fangos y barros —constituidos principalmente por polvos, precoloides y coloides— son llevados mar adentro.

Las costas son caracterizadas por la acumulación de esos materiales. Cuando en ellas se deposita fundamentalmente arena, considerado como el sedimento más abundante en las costas del mundo, se forman las llamadas *playas*. Dichos materiales se establecen generalmente en lugares abrigados, como los fondos de ensenadas o bahías donde las corrientes marinas pierden fuerza. Los granos de arena son producto casi siempre de la desintegración de granitos —formados principalmente por cuarzo— cuyo tamaño varía de 2 milímetros a 50 micras.

Dimensiones de los sedimentos. Según J. Boucart.

TIPO	TAMAÑO en milímetros (mm)
Fragmentos grandes	Más de 500
Cantos	500 - 250
Gravas	25 - 10
Gravillas	10 - 5
Gránulos	5 - 2
Arenas gruesas	2 - 0.2
Arenas medias	0.2 - 0.05
Polvos	0.005 - 0.002
Precoloides o suspensoides	0.002 - 0.0001
Coloides	0.0001

La fisonomía de las playas es muy diversa, según su pendiente, anchura y longitud, aspectos que cambian de acuerdo con el régimen del oleaje, las mareas y la profundidad del fondo.

En las zonas de aguas poco profundas se depositan arenas o cantos en el lugar donde el oleaje, la resaca y las mareas alcanzan un punto de equilibrio formando las *barras costeras*, las cuales, según sus características, pueden recibir diversos nombres, como *cordones litorales* y *restingas*, o *flechas*, que son salientes de la costa conformadas por arena gruesa.

Los materiales que se concentran inicialmente están cubiertos por el agua, pero conforme pasa el tiempo aumentan su altura hasta sobresalir de la superficie del agua y dar origen a la barra. Con frecuencia, estas barras crecen a partir de la punta de un promontorio y, por efecto de las mareas y el oleaje, pueden emigrar hacia la costa, cerrando una ensenada o una bahía, lo que origina una *laguna litoral* o *albufera*.

Con el paso de los años la albufera se rellena de sedimentos marinos y fluviales. En ese momento, sus bocas que comunican al mar se cierran y tienden a desaparecer, como en la Laguna de Términos, en

Campeche, México, y como las albuferas de Valencia, en España, y las de Venecia, en Italia.

Los islotes pueden unirse de nuevo al continente debido a la formación de cúmulos llamados *tómbolos*, que se localizan entre la costa y los islotes.

Además de los depósitos de material exclusivamente marino deben considerarse los depósitos fluvio-marinos, que son acúmulos mixtos resultantes de la superposición del mar y de los ríos en la desembocadura de éstos. En estas regiones se forman los deltas, los estuarios y las marismas; por ejemplo, está el delta del Mississippi, en el Golfo de México, el delta del Po, en el Mar Adriático, y los estuarios y marismas de las costas de Nayarit y Sinaloa, en México.

La morfología general y la evolución de la costa se ven influenciadas también por la dirección de las cordilleras, que se encargan de cambiar el curso de los vientos, así como por las variaciones del nivel del mar.

Las costas de los dos grandes océanos, el Atlántico y el Pacífico, tienen una estrecha relación con la dirección de las cordilleras de los continentes.

En la *costa atlántica* existe una multitud de entrantes y salientes, por lo que dicha costa parece encontrarse recortada formando ondas, debido a que los pliegues de la corteza —las cordilleras— son perpendiculares al litoral.

La *costa pacífica*, que es rectilínea, cuenta con islas largas separadas por estrechos brazos de mar, debido a que las montañas corren paralelas al litoral. Las costas, en función de las variaciones que sufren por los cambios del nivel del mar, se pueden distinguir en costas de emersión y de inmersión.

Costas de emersión. Son aquellas en que el continente está o ha estado recientemente sujeto a un movimiento de elevación que incide en la existencia de costas bajas, monótonas, y de pendientes suaves; de abundantes playas, barras, albuferas, marismas, deltas y dunas. Por lo general ahí existen acantilados, así como otras formas situadas fuera del alcance del mar, a consecuencia del levantamiento continental, como las que se ven en la costa del Sahara.

Las *costas de inmersión* deben su formación al hundimiento del continente y sobre todo, a la reciente elevación del nivel del mar; es decir, cuando los hielos se hundieron durante la última glaciación. Por ello son tan comunes en la actualidad.

La morfología inicial de este tipo de costa depende de las características de la zona dadas por el mar. Al principio la costa es recortada, siguiendo las colinas y valles preexistentes que forman promontorios, islas y ensenadas. Conforme avanza la erosión costera se van estructurando acantilados en los promontorios, y depósitos de playas y barras en las ensenadas. Más tarde, al continuar el retroceso de la costa, ésta puede hacerse recta, predominando en ella los acantilados. Por último, si la erosión actúa sobre materiales de diferente constitución, pueden volver a formarse salientes y entrantes.

Cuando el mar invade valles fluviales, el tramo del río que queda bajo las aguas da origen a las llamadas *rías*, como las rías gallegas en España. En los valles glaciares tales formaciones están constituidas por los *fiordos*, como los de la costa noruega.

En las costas de las regiones tropicales, una formación que puede considerarse como de inmersión son los *arrecifes coralinos*, contruidos por el crecimiento de colonias de corales, llamadas madreporas, cuyo esqueleto es de carbonato de calcio. También las algas calcáreas y los moluscos contribuyen a la creación de esos arrecifes.

Existen tres tipos de arrecifes: el *costero o litoral marginal*, que es estrecho y cuya colonia se establece a poca distancia de la costa. El *arrecife barrera*, que es de mayor anchura y está alejado del litoral, además de que entre él y la costa hay un canal; un ejemplo es la Gran Barrera del Queensland australiano. Los

atolones son arrecifes que rodean una pequeña isla volcánica dejando en el centro una laguna; si se encuentran sobre el nivel del agua se convierten entonces en islas coralinas, características del sur del Pacífico y del Índico.

Los fenómenos geológicos que han dado origen a los diferentes tipos de costa han influido también en la estructuración de la plataforma continental, donde los depósitos de sedimentos continentales han formado una zona llamada *línea de barro*.

Así, se ha visto que el modelado de las costas ocurre principalmente debido a la acción continua, durante años, del oleaje y de los materiales que arrastra. Por lo tanto, las costas y las zonas cercanas a ellas se encuentran en constante evolución sobre todo a raíz de los fenómenos geológicos que se suceden en el mar a través del tiempo.

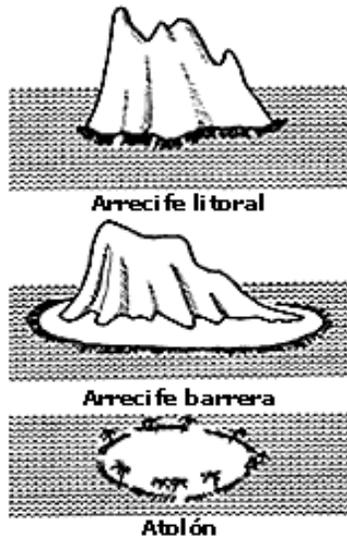


Figura 8. Arrecifes de coral.



IV. LA LÍNEA DE LA COSTA COMO ZONA DE INTERACCIÓN DEL AIRE, EL MAR Y LA TIERRA

LAS aguas de la costa y de los estuarios son la porción del océano que predomina sobre el quehacer cotidiano de la humanidad. Alrededor de dos terceras partes de la población mundial vive cerca de las costas, donde se siente la influencia de los oleajes, provocados por los cambios meteorológicos bruscos, y de las mareas, que ocasionan marcados altibajos en el nivel del mar. Y es precisamente por esto que las playas y los estuarios son aprovechados para construir ciudades y puertos donde se puedan desempeñar actividades industriales, recreativas y comerciales.

En esas aguas poco profundas se establece la relación entre el aire, el mar y la tierra. Los fenómenos costeros se inician en ella con la mezcla, la separación y el transporte de los sedimentos y de las aguas que escurren desde la tierra.

Las olas, los vientos y las corrientes, en combinación con los fenómenos que ocurren en la tierra —como las lluvias y la transportación del agua de los continentes hasta el mar—, determinan la configuración de la costa y la batimetría, es decir, la distribución de las profundidades.

La orilla del océano representa la zona donde se encuentran los bancos de arena y de coral, las fuertes corrientes y las olas destructivas; por eso constituye una zona de peligro para la navegación. En consecuencia, los marineros deben conocerla con el fin de cuidar a sus embarcaciones y tripulación.

La plataforma continental interesa especialmente a los industriales, puesto que allí se concentra tanto la mayor parte de la vida animal y vegetal del mar —base de la alimentación humana— como los ricos depósitos petrolíferos y minerales. Por otra parte, el interés de los científicos radica en que en ella se genera una gran cantidad de fenómenos fisicoquímicos y biológicos.

El hombre ha logrado aprovechar cada vez más los fenómenos que ocurren en las zonas costeras. Sólo así han podido incrementarse actividades que permiten utilizar los recursos existentes en dichas zonas; tal es el caso del tráfico de embarcaciones y del acceso a las profundidades oceánicas. Sin embargo, con el exceso de construcciones y de dragados costeros, con la pesca indiscriminada y las descargas de desechos, el hombre también ha contribuido a la perturbación de las zonas costeras.

Los fenómenos fisicoquímicos que se generan en los océanos también tienen repercusiones en los continentes; por ejemplo, son los que determinan el clima. En efecto: las características del medio terrestre se deben, en su mayor parte, a la influencia de los océanos.

Las zonas costeras pueden diferenciarse según su estructura, en dos tipos principales: *la costa con barrera de islas* y *la costa con acantilados marinos*.

En *la costa con barrera de islas* es posible distinguir si se hace un recorrido del continente hacia el océano, la *planicie costera* que es donde se inicia la zona costera y donde se hacen los primeros depósitos de arena; ahí existe una vegetación inicial a la que se llama *pionera*. Esta planicie se continúa con la *ribera* u *orilla*, que es la superficie sólida y sedimentaria relacionada con las corrientes producidas por el oleaje y con la influencia de las aguas de escurrimiento de los continentes. Esta ribera alcanza unos 400 000 kilómetros de longitud en todo el planeta.

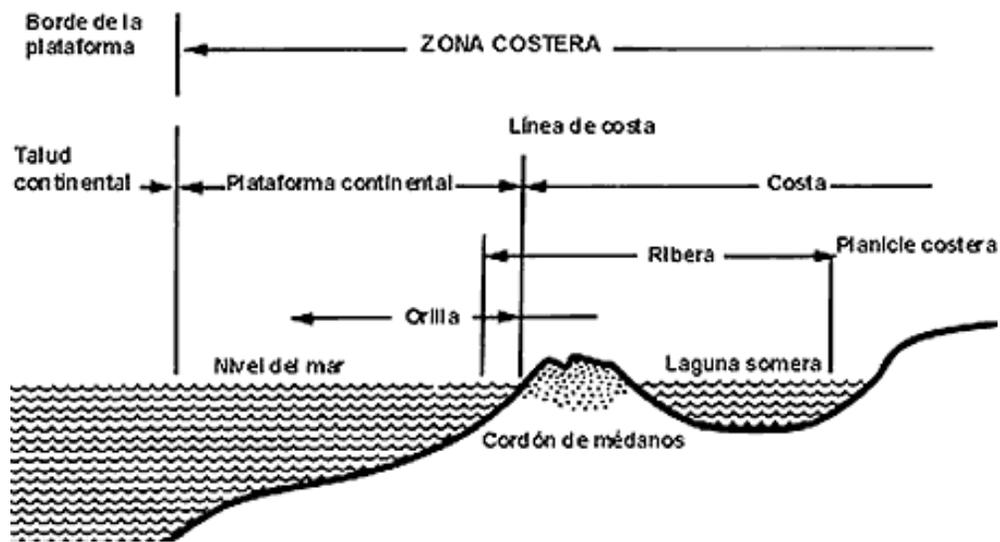


Figura 9. Perfil de la costa con barrera de islas.

La ribera abarca la *playa*, la cual está cubierta por grandes cantidades de arena que forman los cordones de médanos; su extensión y tamaño dependen de la longitud y altura de las olas, de la amplitud de las mareas y de las dimensiones de los componentes sólidos que depositan las olas. Esta ribera se extiende del lado de la tierra hasta la planicie costera, que bordea la orilla posterior de la playa.

Entre los cordones de médanos y la planicie costera se pueden contar lagunas litorales, en donde los ríos desembocan propiciando la formación de estuarios o esteros.

A su vez, la ribera se pone en contacto con la plataforma continental; es la llamada *línea de costa*, que cambia de acuerdo con la acción de las mareas, quedando más adentro de la tierra cuando se presenta la pleamar o marea alta, o más retirada de ella a la bajamar.

En las *costas con acantilado* la planicie costera está formada por las elevaciones continentales que terminan en cortes casi de 90 grados sobre la ribera, en donde se encuentra bien establecida la vegetación. Esta ribera es muy corta, pues alcanza de cero a tres metros de longitud; por lo tanto, la playa es pequeña o no existe, y el corte del cantil puede ser la línea de costa o estar muy cerca de ella. Durante la pleamar, el oleaje puede golpear sobre el acantilado.

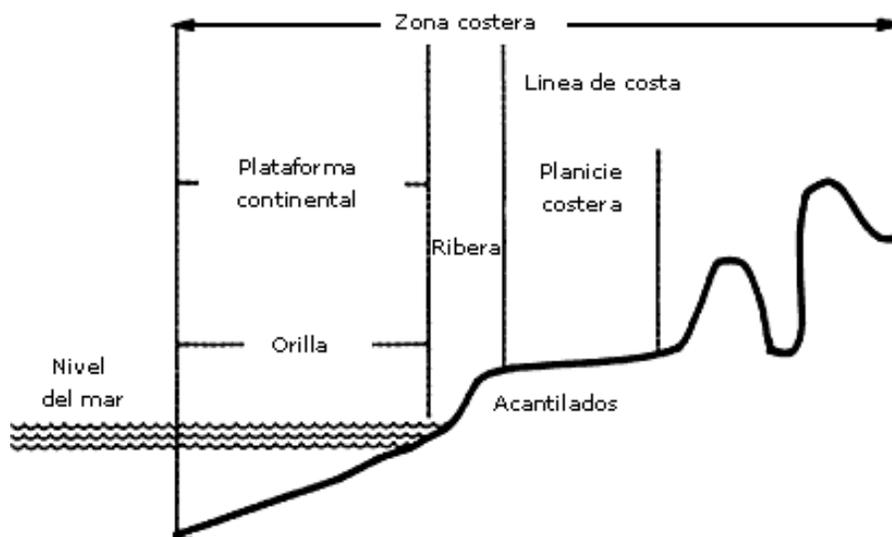


Figura 10. Perfil de la costa de acantilados.

La ribera u orilla es la región donde se produce el mayor intercambio de energía entre el océano y los continentes. La energía que se agota en los procesos de la orilla proviene del mar, y es producida por la

fuerza de los vientos que corren sobre la superficie oceánica, por la atracción gravitatoria que ejercen la Luna y el Sol sobre la masa del océano y por las diferentes perturbaciones que se presentan en las estaciones del año tanto en la atmósfera como en las zonas terrestres que hacen contacto con el mar.

Todos estos fenómenos influyen en la formación de olas y corrientes de diferentes magnitudes que transportan energía hacia la costa. La configuración de la zona continental y de las plataformas adyacentes modifica y concentra ese flujo de energía, regulando la intensidad de la acción de las olas y corrientes en las aguas costeras.

Las diferentes acciones que suceden en el ambiente de la orilla se hacen más complicadas debido a las distintas formas en que se comporta el flujo de energía. Un ejemplo de estas variaciones es cuando la ola llega bruscamente a la playa con un índice elevado de energía y luego se va desvaneciendo sobre el fondo para, posteriormente, regresar hacia el mar produciendo una corriente de resaca cuya fuerza depende de las características topográficas de la orilla.

Si se compara el flujo de energía de las aguas someras con el de las aguas profundas podrá observarse que en estas últimas es relativamente débil, mientras que en las primeras presenta valores muy elevados debido a la interacción de las olas entre sí, de las corrientes con las olas y de ambas con las características estructurales del fondo. En algunos lugares de la costa este flujo de energía alcanza índices muy altos, ya que las olas producen corrientes de fondo dirigidas en el sentido en el que se propagan las ondas. Es por ello que dichas corrientes acarrean gran cantidad de sedimentos generan los llamados ríos y cataratas de arena, como las de la costa de Cabo San Lucas, en Baja California, México.

La profundidad de la zona costera varía de acuerdo con la presión ejercida por el oleaje; disminuye en la zona de rompiente de las olas, formando un banco, para después aumentar y volver a disminuir hacia la orilla de la playa. Conforme se va modificando la orilla, la dirección de las olas puede reorientarse; es así como se crean olas superficiales, que se desplazan hacia la playa, y olas marginales, que corren paralelas a la playa. Así se forman olas altas y bajas que accionan sobre las corrientes de resaca.

Para poder darse cuenta de la importancia que tienen los fenómenos geológicos litorales en el establecimiento de la línea de costa como la zona de interacción entre el aire, el mar y la tierra ha de compararse el potencial del mar para erosionar la Tierra contra la capacidad de la tierra para aportar sedimentos derivados de esa erosión, ya que en la línea de costa confluyen la acción marina y la terrestre.

El estudio de estos fenómenos que acontecen en la costa es la base de la *geología dinámica*, que también se encarga de analizar la formación de los diferentes tipos de costa a través de los procesos de sedimentación y erosión.

Esta dinámica de la geología marina ha permitido calcular que si la cantidad de sedimentos transportados se mantiene constante "borrará la topografía, es decir, las características del terreno que sobresale del nivel del mar, en menos de 10 millones de años", periodo muy breve en la escala geológica del tiempo.

El estudio de los fenómenos que concurren en la línea de costa se encuentran en una etapa incipiente; durante los últimos cinco años, los experimentos y observaciones han progresado sólo hasta el punto de que permiten formular y someter a prueba conceptos generales. Como consecuencia de ello, los conocimientos sobre la energía y la tecnología para la zona litoral no han avanzado, de manera que los problemas de hoy pudieran ser tratados en forma adecuada.

En cambio, cada vez son mayores las demandas de vivienda, recreación, industria, transporte marítimo, recursos marinos y eliminación de diferentes clases de desechos que se acumulan en las zonas litorales de todo el mundo. En resumen, las demandas crecientes sobrepasan en exceso a las posibilidades tecnológicas para satisfacerlas, originando un problema que alcanza proporciones mundiales.

La utilización de la extensión lineal del frente de las playas es de gran importancia para el hombre a fin de poder evaluar su posible permanencia en ella a través de los años. Por ello es fundamental que se

desarrollen técnicas que permitan preservar las playas y los puertos, así como construir nuevas instalaciones en las costas. Todo esto se podrá lograr si continúa investigándose la interacción entre el aire, y el mar y la tierra.

Indice



V. ORIGEN Y DESARROLLO DE LAS PLATAFORMAS CONTINENTALES Y DE LOS FONDOS OCEÁNICOS

GENERALMENTE, la correspondencia entre el dominio continental y el marino no se da de manera brusca, pues va aumentando poco a poco la pendiente de descenso hasta llegar a las profundidades del océano.

La zona de transición tiene el aspecto de una plataforma que se inicia inmediatamente después de la línea de costa. En periodos geológicos recientes, gran parte de esta plataforma se encontraba fuera del mar. Al cambiar el nivel del agua durante las glaciaciones, la plataforma fue cubriéndose, pero conservó la mayoría de sus características continentales, que han cambiado a través del tiempo debido a los procesos de erosión y sedimentación. A esta plataforma se le llama plataforma continental.

La *plataforma continental* es la primera provincia del borde externo del margen continental y se encuentra después de la zona costera, hacia el mar. Con el avance y retroceso de la línea de costa, las características de las plataformas han cambiado; unas son de tipo continental y otras totalmente submarinas.

Estas plataformas que son muy diversas, resultan más irregulares en las regiones tropicales que en las zonas frías. Están conformadas por procesos de sedimentación y por la actividad de organismos sedentarios como los corales. En la costa del Océano Pacífico de América del Norte, la plataforma es reducida, puesto que allí existen fuertes corrientes. En la Sonda de Campeche, situada en el Golfo de México y en donde el movimiento de las aguas oceánicas es mínimo, se encuentra muy extendida. En la desembocadura de los grandes ríos, que son áreas de sedimentación, alcanzan grandes dimensiones. Se considera que la plataforma más ancha del mundo es la del Mar de Barents en el Océano Artico, que tiene 1 000 kilómetros de longitud.

La extensión promedio de las plataformas continentales mundiales es de 200 a 600 metros, y su profundidad media es de 150 a 200 metros.

La zona que ha estado expuesta a la acción de los glaciares presenta las plataformas continentales de mayor profundidad, como las de Groenlandia, que llegan a tener de 300 a 400 metros de profundidad, en contraste con la del Mar de Beaufort, al norte de Alaska, que sólo tiene 70 metros en determinados sitios.

En algunos lugares, las plataformas continentales tienen uno o dos escalones en el borde que las une al talud continental. Dichos escalones son planicies marginales.

El *talud continental* es de mayor declive que la plataforma, y llega de 1 500 a 3 000 metros de profundidad, donde se localiza el borde continental.

La topografía del talud es muy irregular. Está cubierta en 50 o 60 por ciento por fango sedimentario; en 25 por arena; en 15 por roca desnuda y en 10 por ciento por restos orgánicos. Además, abunda en depresiones y cuencas. Su origen es tectónico y sedimentario.

Una de las irregularidades más marcadas en el talud son los cañones submarinos, surcos profundos cortados verticalmente en forma de V a modo de valles sumergidos. Estos se localizan a profundidades de 2 000 a 4 000 metros. El Gran Cañón de Hudson, situado en la costa oriental de América del Norte, tiene 300 kilómetros de longitud y su mayor profundidad es de 3 500 metros.

La inclinación de la superficie del talud varía en las diferentes regiones del planeta. Con 2° 55", la mínima, se encuentra en la costa de la India, y con 5° 20", la máxima, se halla en la costa del Océano Pacífico de América del Norte.

El *borde continental* se ubica a continuación del talud, y es difícil reconocer el lugar en donde se inicia. Es

la zona de transición entre el talud y el suelo profundo del océano. Su inclinación es semejante a la de la plataforma continental, y tiene un metro más de profundidad por cada 1 000 metros.

El conocimiento en torno al *fondo oceánico* es muy reciente. Por ejemplo, lo accidentado de la estructura de este fondo no se sospechaba antes de la segunda Guerra Mundial, pero con el desarrollo de la ecosonda de registro, —aparato que produce explosiones y calcula la profundidad por el tiempo que tardan los ecos en regresar a la superficie— los detalles de la topografía submarina fueron revelándose progresivamente.

A raíz de esos estudios se encontró que el fondo oceánico está dominado por cadenas montañosas volcánicas que forman los grandes dorsales o elevaciones, los cuales alcanzan miles de kilómetros de largo, con decenas de kilómetros de ancho y crestas que se levantan de dos a tres kilómetros por encima de las planicies abisales. Además se descubrieron otros tipos de formaciones topográficas, como fallas, fosas marginales, arcos insulares, trincheras, cañones submarinos, montañas, islas y el piso abisal.

Entre los grandes dorsales o elevaciones de cadenas montañosas volcánicas destaca el sistema que recorre al Atlántico en toda su extensión, formando una franja, alrededor de la Tierra, de 60 000 kilómetros de longitud y de 800 a 4 000 kilómetros de ancho. Este sistema se inicia en la cuenca euroasiática del Ártico, pasa por Islandia y las Azores, en el Atlántico Sur; se dirige hacia el Este y da vuelta al sudeste de África hasta el Océano Índico; vuelve hacia el sur, para pasar por el sur de Australia, y cruza el Pacífico sur y el oriental hasta las Islas Galápagos y el Golfo de California, ascendiendo hacia el Norte.

Otro elemento topográfico predominante del fondo oceánico son las zonas de fractura o fallas, que consisten en cortes lineales que se presentan en los pisos y las llanuras abisales. El trazado de las fallas se mantiene constante y rectilíneo a lo largo de miles de kilómetros.

Generalmente, las fracturas están bordeadas por volcanes. Las cuatro mejor estudiadas son las que se extienden paralelamente entre sí, de Este a Oeste, a través de 6 000 kilómetros en el noroeste del Pacífico: la de Mendocina, Murray, Clarion y Clipperton, perpendiculares a la Gran Falla de San Andrés, que corre desde el Golfo de Alaska hasta Centroamérica. Esta falla, que es marina en su mayor parte, se adentra en California (Estados Unidos) y en Baja California (México). Estas fallas son regiones sísmicas activas que se forman por el movimiento de las capas tectónicas.



Figura 11. Las cuatro grandes fallas del Pacífico.

Las fosas marginales y el sistema de arco insular constituyen otra estructura oceánica, son arqueadas y poseen una cadena marginal de islas volcánicas en su lado cóncavo. Estas fosas submarinas se encuentran junto a los bordes de los continentes, como las de Java y las Aleutianas, o cerca de los grandes bloques insulares. Son escarpadas, su perfil tiene forma de V y su longitud alcanza cientos de kilómetros. Resulta curioso que, en todos los mares, tengan aproximadamente la misma profundidad. Su origen ha sido muy

discutido, pero posiblemente tiene que ver con las alteraciones ocurridas en la corteza terrestre.

Con el empleo de nuevas técnicas de estudio y con el uso de batiscafos de investigación, se han descubierto más fosas oceánicas. A la fecha se tienen reportadas cuatro en el Atlántico, dos en el Índico y 15 en el Pacífico; es decir, en lugares de alta actividad sísmica. Uno de los más clásicos ejemplos lo constituye la Fosa de Tonga, situada entre las islas de Tonga y las islas de Samoa, en el Océano Índico; tiene unos 2 000 kilómetros de longitud, unos 100 kilómetros de anchura y de 10 a 11 kilómetros de profundidad.

En algunas de estas fosas, las líneas de islas dispuestas en arco sobresalen de la superficie del agua formando los llamados arcos insulares, que son relativamente recientes, y cuyo origen se debió a los movimientos de las capas tectónicas. Por ejemplo, está el arco de las islas Aleutianas, ubicado en el Pacífico Norte, cerca del Mar de Bering; la Fosa de las Marianas, al sur de Japón, y el Arco del Caribe, en el Océano Atlántico.

El piso de las fosas oceánicas está integrado por roca basáltica oscura de origen volcánico. En las fosas cercanas a los continentes, esta roca es cubierta por sedimentos derivados de las masas de tierra contiguas; por ejemplo, está el caso de la Fosa de América Central, localizada en el Pacífico Medio, y la de Perú y Atacama, en el Pacífico Sur.

De todos los accidentes submarinos los más asombrosos son las grandes trincheras, los sitios más profundos del océano. Es muy extraño que las grandes trincheras se localicen principalmente cerca de la tierra, pues lo más lógico sería encontrarlas en el centro del mar. Se asocian con las cadenas de islas y las cordilleras montañosas que se levantan a lo largo de las orillas de los continentes, y reflejan las fuerzas titánicas que siguen modelando la Tierra.

Las trincheras son la consecuencia de ese levantamiento y agitación de la corteza terrestre. Casi todas ellas se sitúan en el Pacífico, sobre la línea de actividad volcánica y sísmica. Mientras las cadenas montañosas, se levantan, el fondo del mar se hunde.

La trinchera más profunda que se ha encontrado es la de las Marianas, que se halla en el oeste del Pacífico. Tiene una profundidad de 11 000 metros. Con el tiempo, los submarinos de las grandes profundidades nos dirán mucho más sobre los fenómenos que dieron origen a estas trincheras oceánicas.

En el fondo del mar se encuentran también los cañones submarinos, que son canales hendidos profundamente en la roca del fondo y los cuales constituyen uno de los principales enigmas científicos. Se sabe que, en la tierra, las fuerzas de la erosión, el viento, la lluvia y las corrientes de los ríos han abierto los cañones, como el Gran Cañón del río Colorado, pero en el océano no existen estos factores de erosión.

En un principio se creyó que esos cañones habían sido abiertos por antiguos ríos en épocas en que el nivel del mar era mucho más bajo que en la actualidad. Esa teoría fue desechada, cuando se descubrieron cañones a miles de metros de profundidad, cuando resultó imposible creer que el nivel del mar hubiera estado tan bajo.

Los geólogos adoptaron otra teoría, que no fue aceptada unánimemente. Propuesta por el doctor Reginald A. Daly, de la Universidad de Harvard, dice que las "corrientes de turbiedad", enormes ríos de lodo que fluyen en el fondo del océano, han abierto los cañones. Esas corrientes, que se mueven a velocidades de 30 a 80 kilómetros por hora, actuaron supuestamente en el fondo del mar como los ríos que corren sobre la tierra: arrastrando tanto arena cortante y grava como lodo blando, en un curso en el que se excavarían grandes cañones. Sin embargo, todavía se tiene mucho que estudiar sobre los cañones submarinos.

Sobre la superficie del fondo oceánico también existen salientes que reciben el nombre común de montañas oceánicas las cuales se pueden diferenciar en tres tipos distintos: islas volcánicas, montañas marinas y guyots.

Las *islas volcánicas* son elevaciones aisladas generalmente alejadas de los continentes, y posiblemente originadas debido a la segmentación de las grandes cordilleras. Su parte más elevada sobresale de la superficie del mar, y se diferencian de las islas continentales por ser de menor tamaño.

Existen picos colosales que se levantan desde las profundidades. El mayor es el de la Isla Mauna Kea, en Hawai, que tiene 9 450 metros desde el fondo del mar hasta su cima, y el cual sobresale 4 250 metros de la superficie de las aguas.

Las *montañas marinas* son elevaciones que alcanzan más o menos un kilómetro de altitud, y se pueden encontrar aisladas o en grupos de 10 a 100. Son más abundantes en el Océano Pacífico que en el Atlántico. Algunos geólogos marinos estiman que existen 20 000 en todos los mares y que se originaron a raíz del hundimiento de volcanes provocado por movimientos de la corteza terrestre.

En la zona situada entre la costa de Nueva Inglaterra, donde se localiza el Banco de Georges y las Bermudas, se encuentra una de las mayores agrupaciones de montañas marinas. Si estas elevaciones son de cima plana reciben el nombre de *guyots*, y posiblemente tienen el mismo origen que las montañas marinas. Se supone que fueron islas que se sumergieron, pero esta teoría es todavía muy discutida. En la actualidad sólo se conocen unos cuantos cientos de ellos, la mayoría en el Océano Pacífico. Algunos muestran formaciones coralinas, como los del Archipiélago Tuamotu, en el Océano Pacífico meridional, entre Australia y América del sur.

Las regiones planas que se encuentran en el fondo del océano entre las formaciones topográficas representan al llamado *piso abisal*, que tiene una inclinación muy ligera, menor de un metro por cada 1 000 metros; se hallan en profundidades de 5 000 a 10 000 metros, como los planos abisales que se localizan a los lados de los dorsales atlánticos. Su origen es muy discutido, y para determinados autores su formación se debió a la influencia de grandes volúmenes de lava solidificada que se escurrió sobre el lecho oceánico; para otros, son el resultado de un proceso de sedimentación continua.

En las últimas décadas han sido descubiertas en los fondos oceánicos unas salientes rocosas en forma de tubos con paredes de aspecto esponjoso, de color amarillento naranja, que lanzan por su boca una columna de humo negro-grisáceo que llegan a alcanzar hasta 50 metros de altura. Son las llamadas *chimeneas o fumarolas*. Fueron localizadas en varias regiones del océano. Las que se encontraron en las Islas Galápagos y en la falla RiveraTamayo a 21° Norte en la entrada del Golfo de California han sido muy estudiadas.

En las salidas o bocas de estas chimeneas se concentran temperaturas muy altas, que van de los 350 a 570° C, aunque la temperatura del agua en esa zona es de 2° C. La presión con que sale la columna de humo debe ser muy fuerte, pues logra vencer las 250 atmósferas que se tienen a 2 700 metros de profundidad.

El humo contiene sulfuros y metales como el zinc y el hierro, por lo que se piensa que pudieran ser fuentes futuras de estos minerales.

En un diámetro de 30 metros alrededor de una chimenea se han descubierto abundantes organismos, como pogonóforos, ostras, ofiúridos, poliquetos y esponjas, todos de mayor tamaño que los que viven en otras zonas del océano.



Figura 12. Chimenea en el Océano Pacífico mexicano.

Hoy es evidente que las crestas de los dorsales, las fracturas y los sistemas de fosas se caracterizan no sólo por su topografía, sino por otros fenómenos físicos, como los terremotos. Esta actividad sísmica se genera a poca profundidad, desde 10 hasta 20 kilómetros, a lo largo de las crestas de los dorsales y sus fracturas, mientras que en los sistemas de fosas se producen a cualquier profundidad, hasta un máximo de 70 kilómetros.

Como se ha visto, la imagen del fondo del océano está constituida por escarpadas montañas, depresiones y fallas; paisaje cuyos perfiles son considerablemente más contrastados y escarpados que los continentales. Existe una explicación: desde sus orígenes, las montañas de la Tierra han estado expuestas a la erosión, los efectos del agua y del viento, de las heladas y del calor, lo que las ha desgastado poco a poco. Por lo contrario, las masas rocosas de los océanos se levantan en lugares donde no hay estaciones ni grandes diferencias de temperatura, y donde, por consiguiente, no ha habido destrucción.

En un futuro, las investigaciones que se han hecho permitirán no sólo evaluar los tiempos de la contracción y destrucción de la corteza, en los sistemas montañosos y de fosas, sino también comprender mejor la distribución y la causa de los terremotos. A su vez, esto podrá ayudar a alcanzar esa meta fundamental: la predicción de los movimientos telúricos. Los trabajos de los hombres de ciencia han puesto al descubierto muchos de los secretos de la historia geológica del océano.



Indice |



VI. LOS SEDIMENTOS OCEÁNICOS COMO IMAGEN DEL PASADO

LOS geólogos, además de estudiar los continuos fenómenos que se presentan en la corteza terrestre con el objeto de indagar sus posibles causas, realizan minuciosas investigaciones, algunas de ellas los han llevado a descubrir acontecimientos que ocurrieron en otras épocas y que causaron grandes transformaciones en el planeta. Esos científicos pueden ser considerados como historiadores que se encargan de revisar la información dejada por los sedimentos durante la evolución de la Tierra.

Los sedimentos son restos de materia inorgánica y orgánica que se depositaron sobre la corteza de la Tierra, tanto en los continentes como en el fondo del mar, y constituyen un registro fiel de las condiciones del medio ambiente y de los organismos que han existido a través de la historia del planeta. Como las páginas de un libro, cada capa sedimentaria revela las condiciones y los organismos que vivieron en un momento dado de esa historia. Este interesante estudio ha dado origen a una importante rama de la geología que se denomina *estratigrafía*.

Los geólogos marinos ponen su empeño en estudiar las capas que forman la corteza oceánica. Dicha corteza está estructurada por rocas ígneas que pasaron por el estado de lava líquida, y por sedimentos que se han ido depositando hasta formar, en su mayoría, las llamadas rocas metamórficas.

En las capas sedimentarias se establecieron los restos de organismos que existieron en otras épocas. Dichos restos reciben el nombre de *fósiles*, que equivalen para los geólogos lo que los viejos manuscritos estudiados a los historiadores, puesto que en ellos se ha registrado la evolución de la corteza terrestre. El estudio de los fósiles dio origen a otra rama de la ciencia llamada *paleontología*.

La naturaleza de los materiales que contienen los sedimentos puede variar desde depósitos muy blandos, como el aluvión de los ríos, hasta un material duro, como las piedras formadas por la acumulación continua de sales calcáreas.

Para calcular la edad geológica de una roca metamórfica se toma como base el espesor de los sedimentos que la forman, calculando el índice medio de acumulación de los sedimentos.

El índice de acumulación sedimentaria en los océanos es muy variable, porque es determinado por una serie de factores que lo pueden acelerar o retardar. Por ejemplo, cerca de los márgenes continentales es muy rápido, sobre todo donde los grandes ríos desembocan en el mar. Ríos como el Mississippi o el Amazonas descargan hasta un kilómetro cúbico de sedimentos por año; la mayor parte de ellos se depositan cerca de la base del talud continental. Sin embargo, pueden ir a parar, por grandes cantidades, a miles de kilómetros de la fuente que los produce. Las avalanchas submarinas y las corrientes hacen posible este desplazamiento.

En algunas regiones oceánicas, un centímetro de espesor de sedimentos puede representar la acumulación lograda en un millón de años, como lo muestran las rocas formadas, casi en su totalidad de arcilla y provenientes de un lugar profundo, alejado de los continentes e islas. En otras zonas hay especies que registran la concentración de un solo año, sobre todo cuando la sedimentación se acumula cerca de un continente, en el lugar donde se descarga un río. Dichas especies están formadas, principalmente, por arena y fango.

En la mayor parte de los fondos oceánicos, el índice medio de acumulación de los sedimentos se encuentra entre esos dos extremos, de manera que un centímetro significará, de tal manera, entre 1 000 y 10 000 años de acumulación.

Las fuentes de donde proceden los sedimentos marinos son los continentes, el propio océano y la atmósfera. La mayor parte de ellos se deriva de la erosión de la tierra continental; es decir, del desgaste de

las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que finalmente son transportadas hasta el mar por los ríos. Los de origen oceánico están constituidas por los restos de los organismos que viven en él, así como por las partes que se desprenden de los volcanes submarinos a causa de las corrientes y de la desintegración por acción química. De la atmósfera proceden gases como el bióxido de carbono, que contribuyen a estructurar las calizas marinas, las cuales forman a su vez fangos calcáreos en los fondos marinos.

La clasificación de los sedimentos marinos ha sido muy variada; las más aceptadas son las que se basan en la localidad donde se deposita el sedimento y la fuente marina de donde procede.

Y según la fuente de donde provienen, se clasifican, de acuerdo con J. G. Weihaupt (1964) así:

<i>Provincia</i>	<i>Profundidad</i>	<i>Tipo de sedimento</i>
Litoral	De alta a baja mar	Arena de playa
Nerítico	hasta 200 metros	Arrecifes coralinos
Batial	de 200 a 3700 metros	Limo y lodo, fangos calcáreos
Abisal	de 3700 a 6000 metros	Fangos silíceos, arcilla marrón
Hadal	+ de 6000 metros	Limo y arcilla marrón

Y según la fuente de donde provienen, se clasifican conforme al mismo autor en:

<i>Fuente</i>	<i>Sedimento</i>	<i>Tipo de sedimento</i>
Continental	Terrígeno	Arenas cuarcíticas y de feldespatos, barros de deltas y de estuarios
Oceánica	Biógeno	Fangos calcáreos
Oceánica	Fisicoquímico	Nódulo de manganeso, glauconita
Extraterrestres	Cosmogénos	Componentes de arcilla marina marrón

Los sedimentos que se depositan en los fondos oceánicos, forman diferentes capas, llamadas estratos, que se colocan de diversas formas, generalmente paralelos, de acuerdo con el tipo de sedimento y las características del ambiente en donde está ocurriendo el proceso.

En el estudio de la historia geológica de los fondos marinos juegan un papel muy significativo los sedimentos formados por restos de plantas y animales que vivieron y murieron en el mar. La concentración de los mismos cambia debido a la circulación casi constante de las masas de aguas oceánicas.

Los restos de esqueletos y caparzones, compuestos principalmente por carbonato de calcio y sílice, son elementos comunes de los sedimentos que se depositan en el fondo marino; reciben el nombre de pelágicos, están constituidos por fangos silicosos, calcáreos y arcillas, y cubren las tres cuartas partes del fondo oceánico.

Entre los vegetales que aportan sílice a los sedimentos marinos destacan las diatomeas, que cuando se acumulan y sedimentan reciben el nombre de *fango de diatomeas*, y los animales que proporcionan este sílice son los radiolarios formando el *fango de radiolarios*. Las diatomeas se localizan a profundidades promedio de 3 900 metros, mientras los radiolarios llegan hasta los 5 500 metros.

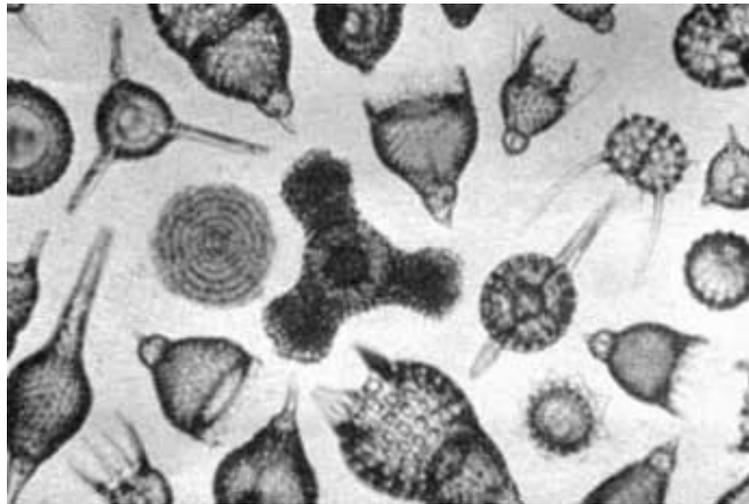
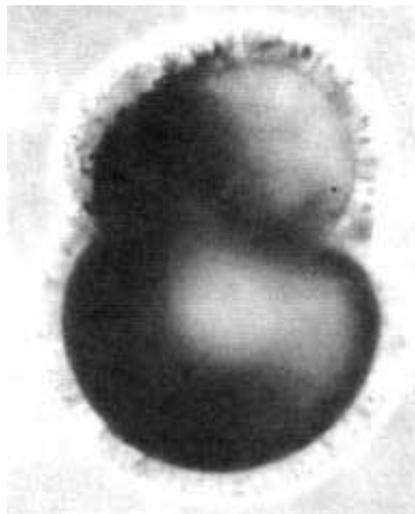


Figura 13. Diatomeas y radiolarios.

Los sedimentos ricos en carbonato de calcio están formados por restos de foraminíferos, cocolitofóridos y pterópodos. Entre los foraminíferos, los más abundantes son las globigerinas, pequeños animales que tienen una concha que mide medio milímetro, y está constituida por cámaras globulares. A estos sedimentos se les conoce como *fango de foraminíferos* o *globigerinas*.



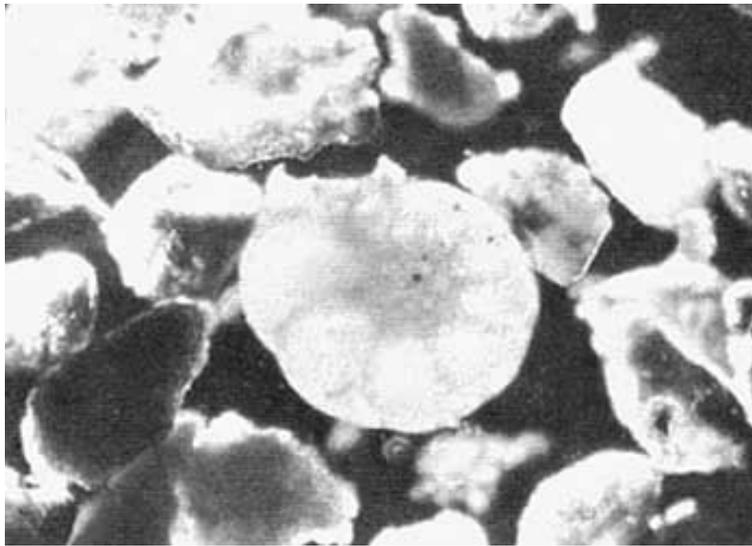


Figura 14. Globigerina y foraminíferos.

La segunda fuente productora de sedimentos calcáreos son los coccolitofóridos, organismos microscópicos protegidos por una concha formada de carbonato de calcio; éstos abundan en los fangos de cocolitos.

Los *fangos de pterópodos* están estructurados por conchas de estos pequeños moluscos, que se localizan en aguas someras a profundidades promedio de 2 000 metros. Estos fangos son pocos abundantes, pues el material calcáreo de sus conchas es soluble.

Comúnmente, en lugar de un sedimento de origen puramente biológico, se encuentra a los esqueletos mezclados con arena o arcilla en diversas proporciones. Muchas muestras del fondo no contienen ningún material biogénico y consisten, totalmente, de arena o arcilla. Cubren más o menos 100 millones de kilómetros cuadrados de los fondos profundos del océano.

Por lo general, en extensas zonas del Océano Pacífico, sobre todo en las latitudes medias, sólo se halla arcilla y material volcánico; en cambio, en las latitudes altas son abundantes los sedimentos con restos orgánicos, debido a que el ritmo de sedimentación es rápido y permite que el carbonato de calcio y el sílice queden sepultados antes de que se disuelvan.

La descripción estratigráfica de la corteza terrestre elaborada a través del tiempo ha permitido establecer la historia del planeta, para lo cual se han tenido que unir también los conocimientos aportados por la estratigrafía y la paleontología.

En la actualidad, fósil significa cualquier evidencia de la vida que existió en eras geológicas pasadas. Se convierten en fósiles los esqueletos o conchas que se hayan recristalizado a causa del calor y de la presión y rellenado con depósitos de sales procedentes de las rocas vecinas. Puede tratarse de huellas petrificadas o de restos de animales que quedaron presos en el hielo ártico, en ámbar, arena movediza, depósitos de grava, pozos de brea o pantanos. O bien, pueden ser moldes de carbón dejados en la roca a raíz de la combustión y vaporización de las partes blandas de un animal.

Generalmente, los fósiles se depositan en rocas sedimentarias, como en las formadas por lodo (o lutitas), pero también pueden constituir todo el volumen de ciertas rocas llamadas coquinas y calizas; asimismo, pueden encontrarse en rocas de origen ígneo.

El ingeniero inglés William Smith (1769-1839) descubrió que una misma roca contenía generalmente el mismo tipo de fósiles, mientras que las rocas que se encontraban arriba o abajo tenían fósiles diferentes. Más tarde, dos científicos franceses, Georges Cuvier (1769-1832) y Alexandre Brongniart (1770-1847) establecieron la edad de los fósiles y observaron que los organismos fósiles encontrados en las capas superiores tenían mayor parecido con los seres vivos actuales que aquellos que se encontraban en las rocas más profundas.

A principios del presente siglo se desarrollaron técnicas para calcular la edad de las rocas con métodos radiactivos. Este recurso se basaba en el hecho de que algunos elementos químicos, como el uranio²³⁸, pueden presentar una descomposición radiactiva transformándose en otros elementos, como el helio y el plomo, en un tiempo determinado llamado "vida media" que para el uranio es de 4 mil millones de años. Al conocer este tiempo se puede calcular la edad de la roca donde se encuentra el elemento.

Esos métodos han proliferado y se emplean con diferentes elementos. En las rocas ígneas se usa el uranio y el torio, y en las rocas sedimentarias el potasio radiactivo.

Comparando las observaciones sobre la edad radiactiva con los fósiles encontrados en las rocas, se ha podido establecer la existencia de ciertos fósiles que caracterizan a un determinado tiempo geológico. A éstos se les llama *fósiles indicadores o índices*.

Por lo anterior, los fósiles ayudan a calcular la edad de una capa rocosa. Si dicha capa contiene un fósil indicador o índice, entonces toda la capa tendrá la misma edad, igual que todos los fósiles que se encuentran en ella, los cuales sirven a su vez como indicadores cuando se localizan aislados.

Los datos aportados por la oceanografía geológica a la historia del planeta han sido fundamentales; sin embargo, el conocimiento no está completo. Por esta razón se deben seguir estudiando los sedimentos oceánicos, implantar nuevas técnicas de investigación y construir nuevas herramientas que permitan establecer la antigüedad y las etapas de formación del fondo oceánico. De la misma manera se debe estudiar la historia y el desarrollo de las cuencas oceánicas, con el fin de entender mejor la historia de la Tierra.



VII. LAS ERAS GEOLÓGICAS Y SUS HABITANTES

CON base en los conocimientos aportados por geólogos y paleontólogos ha llegado a descubrirse y reconocerse los acontecimientos sucedidos en la Tierra, así como las transformaciones que ésta ha sufrido desde que se formó.

Los estudios sobre los estratos rocosos y los fósiles que en ellos se encuentran proporcionan una valiosa información sobre cómo apareció la vida en el planeta y sobre la manera en que los seres vivos han evolucionado en el tiempo. También permiten conocer importantes indicios sobre las relaciones entre los organismos desaparecidos y los vivientes, y la relación que éstos han tenido y tienen con el medio ambiente.

Con todos estos conocimientos se ha podido establecer la llamada Tabla geológica, en donde se registran cinco grandes etapas o eras con los tiempos que posiblemente duraron y los organismos que en ella existieron. Las eras se subdividen a su vez en periodos y épocas.

La historia de la Tierra, que data de hace 5 000 millones de años, se inicia con la llamada era Azoica, durante la cual se formó la parte profunda de la corteza terrestre y en la que se encuentran rocas ígneas y metamórficas, como gneis, cuarcitas, granitos y mármoles carentes de fósiles, razón por la cual se ha considerado que no había posibilidades de que existiera vida. Se le ha calculado de 3 000 a 3 300 millones de años.

Durante la era Azoica se produjeron muchos cambios geológicos que modificaron profundamente el relieve terrestre, tanto por causas de origen interno —plegamientos y erupciones volcánicas— como por causas externas —erosiones y sedimentaciones. La distribución de tierras y océanos, así como las características del clima, eran variables. Estos fenómenos son estudiados por la paleogeografía y la paleoclimatología.

A la siguiente era, llamada Precámbrica, se le calculan aproximadamente 1 500 millones de años, y ha sido dividida por algunos autores en dos periodos: el Arqueozoico y el Proterozoico. En el Arqueozoico se encuentran rocas sedimentarias, como pizarras con grafitos y mantos con calizas que han sido considerados los primeros indicios de vida por su naturaleza de origen orgánico, aunque sólo se localizan en muy raras regiones del planeta.

En el periodo Proterozoico se encuentran ya sedimentos con huellas de bacterias, restos de algas marinas primitivas y algunos fragmentos fósiles animales imperfectamente constituidos, como esponjas y gusanos marinos.

Durante la era Precámbrica comienzan los procesos geológicos de gliptogénesis y orogénesis, formándose rocas metamórficas. Se cree que entonces el clima era frío y húmedo, con épocas glaciares, aunque cambiaba a cálido y árido. La aparición de la vida se dio posiblemente al principio de esta era, a partir de gases atmosféricos como el amoníaco, el metano, el sulfhídrico y el bióxido de carbono, entre otros, que sintetizaron compuestos orgánicos del tipo de los azúcares, proteínas y ácidos nucleicos. La energía fue seguramente suministrada por descargas eléctricas y por los rayos ultravioleta de la luz solar.

A partir de estos compuestos orgánicos fueron formándose los seres vivos, que quizá eran semejantes a los virus y a las bacterias anaerobias. Posteriormente surgieron algas azules que realizaban ya su fotosíntesis —es decir, elaboraban su propio alimento— desprendiendo oxígeno que pasaba a la atmósfera, lo cual favoreció la respiración aeróbica. Se conocen fósiles de bacterias y de algas primitivas en rocas con una antigüedad de 2 000 a 3 000 millones de años.

Los fósiles precámbricos están representados por bacterias, algas, protozoos y celenterados. Los yacimientos con mayor abundancia de fósiles proceden de algunas regiones de Canadá y de Australia.

En la era Paleozoica, llamada también primaria, que duró de 300 a 500 millones de años, se empezó a formar la estructura actual de los océanos y de los continentes. Se presentaron cambios esporádicos en el nivel del mar y en el tamaño y distribución de los océanos. Para su mejor estudio, esta era fue dividida en seis periodos, caracterizados por fósiles pertenecientes a grupos biológicos peculiares. Desde el más antiguo al más actual se les denomina: Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico. Algunos autores dividen al carbonífero en dos, quedando entonces siete periodos: Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Mississippiano, Pennsilvaniano y Pérmico.

En los estratos pertenecientes a la era Paleozoica se encuentran extensos grupos de rocas sedimentarias de origen marino, en las que aparecen por primera vez abundantes fósiles perfectamente conservados, principalmente radiolarios y foraminíferos, así como animales ya de un tamaño mayor y de organización más complicada, como los trilobites.

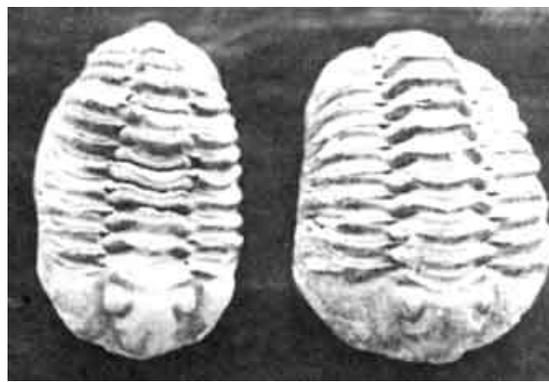


Figura 15. Trilobites.

En los primeros periodos de esta era no se encuentran fósiles de vegetales marinos como las algas, pero al final, sobre todo a partir del carbonífero, se descubren restos de vegetales terrestres, como los helechos y las gimnospermas, que formaron selvas extensas y espesas. En la actualidad constituyen importantes depósitos de hulla y antracita, de gran valor para la industria.

La fauna marina se fue enriqueciendo con la sucesiva aparición de los corales, los trilobites y los moluscos, como los cefalópodos, y en el Silúrico surgieron los primeros animales terrestres, como los escorpiones, a los que siguieron los insectos primitivos. En el mar aparecieron los peces, tenían su esqueleto blando.

Al final de la era, los anfibios —primero— y algunos reptiles —después— constituyeron los primeros vertebrados terrestres. Entre los reptiles destacan los pteromorfos, antecesores de los mamíferos, ya que presentan rasgos comunes. El desarrollo de los reptiles en esta era es preparatorio al gran auge que tuvieron en la siguiente.

A fines de la era Paleozoica hubo importantes cambios en el relieve de la corteza terrestre, surgieron las cordilleras tanto en el océano como en la tierra, y se produjeron las primeras invasiones glaciares extensas, lo que permitió el aumento de la extensión y altitud de los continentes, todo lo cual determinó profundas perturbaciones en los climas existentes y, como consecuencia, en los organismos que poblaron las extensiones continentales.

La era Mesozoica, llamada Secundaria, se caracterizó por el avance y retroceso de los mares sobre los continentes debido a las intensas glaciaciones que ocurrieron y a la escasa actividad volcánica. Abarca los periodos Triásico, Jurásico, Cretácico, y se le calcula una duración de 150 a 160 millones de años.

Los vegetales marinos continuaron su desarrollo, y surgieron todas las formas que se conocen en la actualidad. Las terrestres alcanzaron gran auge, lo cual constituye uno de los hechos biológicos de mayor significación en esta era. Aparecieron las coníferas, las cicadales y las ginkgoales, que han llegado a nuestros días con numerosas especies. A finales de la era, en el Cretácico, se conformaron las primeras plantas con flores: las angiospermas.

Entre los fósiles animales puede observarse que muchos de los invertebrados tienen formas semejantes a las actuales, como sucede con los corales; sin embargo, entre los moluscos existieron formas muy extrañas y grandes, como los ammonites. También abundaron los equinodermos. Los peces óseos aparecieron al principio de la era, mientras que los anfibios primitivos fueron sustituidos por los actuales anuros y urodelos.

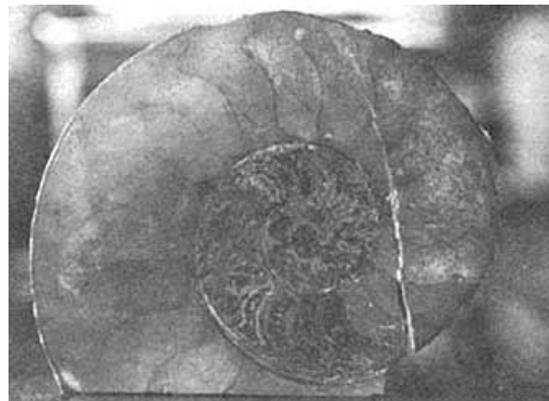


Figura 16. Ammonite.

Los reptiles se desarrollaron tanto en número como en tamaño; por eso a esta era se le llamó Era de los reptiles. Los ictiosaurios eran reptiles voladores, y los dinosaurios grandes reptiles terrestres, como el *Tyrannosaurus*, bípedo y carnívoro, considerado como el mayor de los animales terrestres. De todos estos reptiles sólo los cocodrilos, las tortugas y las serpientes han llegado

a nuestros días. La desaparición de los grandes reptiles al final de la era Mesozoica es uno de los enigmas de la geología histórica.

Al final de la era aparecieron las primeras aves y mamíferos, que tenían gran semejanza con los reptiles, de los cuales provinieron sin duda. Las aves tenían dientes, garras, alas y una larga cola, y eran más bien planeadoras que voladoras. Como los mamíferos que se desarrollan en huevos se les llama ovíparos.

La última era, la Cenozoica, es la de más corta existencia, con 60 a 75 millones de años, en cuyo transcurso el planeta adquirió su aspecto actual; los océanos, las costas, las montañas, y los valles adoptaron poco a poco las características que hoy presentan. Se divide en dos penodos: Terciario y Cuaternario.

El Terciario abarca cinco épocas: Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Plioceno. Los organismos marinos mostraron características muy semejantes a las actuales. La vegetación estaba formada por angiospermas; las gimnospermas se redujeron y quedaron distribuidas sólo en las zonas de altas altitudes y montañas.

Los mamíferos dominaron entre los animales. Esto se demuestra por la gran variedad de sus restos, lo cual confirma esa marcada preponderancia. Abundaron en tamaño y en especies quizás a raíz de la ventaja que les proporcionó contar con un desarrollo progresivo del encéfalo. A esta era Cenozoica también se le ha llamado Era de los mamíferos. Las ballenas de esta era representaban la primera adaptación de los mamíferos al medio marino.

En el periodo Cuaternario, denominado también Antropozoico en virtud de que en él apareció y se desarrolló el hombre, ocurrieron una serie de glaciaciones separadas por periodos interglaciares en los que los hielos desaparecían y el clima se hacía más seco y suave. El nivel del mar cambió mucho en esta época debido al crecimiento y disminución de los glaciares; en general, en el periodo glacial hubo bajos niveles, mientras que en el interglacial fueron altos.

La flora y la fauna del Cuaternario tuvieron que adaptarse a estos cambios climáticos. Durante las glaciaciones dominaron las praderas, mientras que en los interglaciares lo hicieron los bosques. La fauna emprendió migraciones con las que se defendió de estos cambios.

Los grandes mamíferos, como los mamuts y mastodontes, se extinguieron. En el Pleistoceno aparece la especie humana, que después de pasar por diferentes formas, evolucionó hasta alcanzar las características de las razas actuales.

Tabla geológica.

ERA	PERÍODO ÉPOCA	DURACIÓN FLORA (millones de años)	FAUNA	
CENOZOICA	Cuaternario o Antropozoico	60 - 75	cenofítica (angiospermas y actuales)	
	Terciario	Holoceno o reciente		Era del hombre y los mamíferos
		Pleistoceno o glacial		
		Plioceno		
		Mioceno		
		Oligoceno		
		Eoceno		
Paleoceno				
MEZOZOICA	Cretácico			
O	Jurásico	130 - 150		
SECUNDARIO			Mesofítica	

	Triásico			(gimnospermas)	Era de los reptiles y ammonites
	Pérmico				
		Pennsylvaniano			
PALEOZOICO O PRIMARIO	Carbonífero		300 -	Paleofítica	Era de los trilobites
		Mississippiano	500	(Pteridofitas y coníferas)	
	Devónico				
	Silúrico				
	Ordovícico				
	Cámbrico				
PRECÁMBRICO	Proterozoico			Arqueofita	Invertebrados menos evolucionados
	Arqueozoico		1 500	(bacterias y algas)	
AZOICA			3 000 - 3300		

Con los datos aportados por la investigación geológica y paleontológica han podido establecerse las divisiones del tiempo en la historia geológica del planeta, reconstruir el esquema de los organismos que vivieron en el pasado, así como definir las condiciones del medio ambiente en las que se encontraban.



VIII. LOS MINERALES Y LOS ENERGÉTICOS EN EL OCÉANO

LA EXPLORACIÓN de las profundidades oceánicas no se ha limitado sólo al descubrimiento de extrañas y asombrosas criaturas, o aclarar el origen y evolución geológica de nuestro planeta, sino que también se han desarrollado ciencias aplicadas cuya finalidad es aprovechar los recursos que los mares le ofrecen a la humanidad.

La geología no es sólo una ciencia teórica y especulativa, ya que también maneja técnicas de gran utilidad para el hombre, como la localización y explotación de los minerales, rocas y aguas subterráneas; el aprovechamiento de fuentes naturales de energía —carbón, petróleo, gas natural, minerales radiactivos, etcétera— el estudio de los terrenos para construir tanto en continentes como en costas, así como las investigaciones que permiten prevenir catástrofes naturales producidas por inundaciones, erupciones volcánicas y terremotos.

Un nuevo campo de la geología aplicada es el estudio de la geología del espacio; por ejemplo, el análisis de las muestras de las rocas lunares traídas por los astronautas del programa Apolo.

La geología ha servido al hombre para que aproveche los minerales, que en la tierra son cada vez más difíciles de encontrar. A medida que se agotan los yacimientos continentales, el porvenir de la minería se desplaza hacia la exploración y explotación submarinas, ya que el océano contiene casi todos los minerales conocidos.

El mar oculta, diseminados en el seno de sus aguas, miles de millones de toneladas de aproximadamente 77 elementos químicos, como el cloro, sodio, magnesio, azufre, aluminio, yodo, cobre, zinc, plomo, mercurio, oro, estaño, fosfatos y otros muchos. En la actualidad, los tres principales minerales que se extraen de manera rentable del mar son la sal, único producto que el hombre obtiene en grandes cantidades; el magnesio, junto con sus compuestos, y el bromo, pero aun falta explotar otra gran riqueza mineral del océano.

Cantidades estimadas de sustancias en el agua del mar (Según V. Romanosky)

Sustancia	Cantidad (miles de millones de toneladas)
Cloruro Sódico	38 000 000
Sulfatos	3 300 000
Magnesio	1 600 000
Potasa	480 000
Bromo	83 000
Oro	10 000

Los océanos contienen 1 350 millones de kilómetros cúbicos de agua. Los técnicos calculan que en cada cuatro kilómetros cúbicos de agua del mar existen 165 millones de toneladas de minerales; sin embargo, los problemas que se presentan para aprovecharlos son innumerables, ya que estos minerales se encuentran esparcidos en concentraciones tan pequeñas que su extracción es, por el momento, impracticable.

Una de las incógnitas que más ha inquietado a los químicos es cómo extraer de las aguas oceánicas los 10

millones de toneladas de oro que, según los cálculos, están disueltos en su seno. El químico alemán Ernst Bayer, de la Universidad de Tubinga, fue el primero que extrajo oro del agua del mar. Pero su método no fue costeable. De un total de 100 litros de agua, sólo pudo extraer, después de un largo y costoso proceso, 1.4 millonésimas de gramo de ese metal, por lo que se necesitarían 97 millones de litros de agua para obtener sólo un poco más de un gramo y medio de oro.

Obtener minerales del océano no es un hecho nuevo. Se sabe que hace 4 000 años el hombre aprendió a conseguir sal común mediante la evaporación solar del agua del mar. Hace 2 000 años los polinesios arrancaban pedazos de coral de los arrecifes, y producían con ellos bloques para sus construcciones. De las conchas de los caracoles *Murex* los fenicios obtenían sustancias que utilizaban como colorantes.

Durante muchos años el hombre no prestó atención a la minería marina, pero conforme se incrementaron los conocimientos sobre los océanos se fueron abriendo las posibilidades de aprovechar esos recursos. Los minerales del mar se pueden dividir en: sustancias disueltas; compuestos depositados en playas; depósitos minerales de las plataformas, taludes continentales y zonas profundas del océano, y filones o masas metalíferas diseminadas.

Entre las sustancias disueltas se encuentra azufre, bromo, litio, magnesio, fosfatos, potasio y sodio. Actualmente se han empezado a diseñar técnicas de explotación rentable, por lo que ya es posible extraer azufre, bromo, magnesio, potasio y sodio de las aguas oceánicas. Por ejemplo, una fábrica de Texas extrae el magnesio, valioso y liviano metal. Se ha calculado que en cada cuatro metros cúbicos de mar hay 5.75 millones de toneladas de este mineral, que se utiliza en la construcción de aviones y en vehículos espaciales, ya que es 35 por ciento más ligero que el aluminio y alcanza una solidez mayor en aleaciones. También se emplea para producir medicinas, dentífricos y tintas de imprenta. La misma fábrica obtiene del agua del mar el 80 por ciento del suministro nacional de bromo, contenido en gasolina refinada y en medicinas.

El cloro y el sodio, que forman la sal común, han sido aprovechados desde tiempo inmemorial. Actualmente se producen y se consumen 130 millones de toneladas anuales de sal en el mundo. Una de las salinas más grandes es la de Guerrero Negro, en Baja California Sur, que tiene una extensión de 22 mil hectáreas de concentración y 3 000 de cristalización de sal. Esta salina produce cinco millones de toneladas anuales, y le sigue en tamaño y producción la de Japón, que elabora tres millones de toneladas. En Australia hay cuatro salinas, de donde se sacan cinco millones de toneladas. Estos tres países producen al año 13 millones de toneladas de sal de exportación, así como 117 millones que sirven para consumo local.

Las salinas se sitúan en zonas cálidas y secas. El agua del mar se conduce por canales a los estanques de concentración, en donde se ve aclarada como consecuencia de la sedimentación de las partículas que contiene. Después se lleva a estanques más pequeños y poco profundos, llamados de cristalización. Aquí el agua se evapora y da lugar a unos cristales de sal que forman una costra en el fondo, la cual se recoge, se lava, se seca y se almacena. El resto del agua se regresa al mar, sin separar otros minerales como el bromo y el potasio, que podrían ser utilizados.

El rendimiento general de las salinas es de 1.3 toneladas de sal por cada 1 000 metros cúbicos de agua procesada. La sal, según la cantidad de cloruro de sodio que contiene, se clasifica en: de primera calidad, que tiene 96 por ciento de sal y se usa para la alimentación; de segunda, que contiene de 94 a 95 por ciento, y se emplea en la industria química, y de tercera, con 90 a 91 por ciento, que se utiliza en la refrigeración y en otras áreas industriales.

El bromo es un metal que abunda en el mar, donde por cada metro cúbico de agua se encuentran 65 gramos. Cuando empezaron a emplearse los combustibles líquidos en los motores surgió la necesidad de usar el bromo como antidetonante. Por esta razón se incrementó su consumo de tal manera que se construyeron fábricas de extracción en Europa, África y América. Entre las principales destacan las rusas, situadas en el Mar Negro, y las inglesas, en el Mar Muerto.

La obtención de las sustancias minerales disueltas en el agua del mar requiere de métodos complicados, pero ya existen técnicas de extracción. Se ha observado que los organismos marinos aprovechan para su uso algunas sustancias. Los caracoles, las ostras y los corales emplean el calcio para formar su vivienda; ciertas algas fijan el yodo, y el fitoplancton absorbe fosfatos y nitratos.

El hombre ha podido obtener minerales con la ayuda de los seres vivos del océano. Por ejemplo, casi todo el suministro mundial de yodo se ha podido obtener mediante el procesamiento de algas marinas, sobre todo de los depósitos antiguos de las que están en tierra.

Los compuestos depositados en las playas, llamados placeres, son como tesoros ocultos del fondo marino. Dichas sustancias proceden de los continentes. Por ejemplo, las aguas de los ríos erosionan las rocas y arrastran los minerales que éstas contienen hasta la playa, donde se empiezan a formar nuevos yacimientos. Posteriormente, las mareas y el oleaje separan los diferentes componentes. Los más pesados quedan entonces en las capas inferiores, formándose así los yacimientos definitivos.

Algunos de los placeres de oro más importantes se encuentran en Nome, al oeste de Alaska, los cuales son considerados como de los más grandes, comparables con los que se explotaron hace un siglo en Canadá, Australia y California.

Los yacimientos costeros que además de ser extensos suelen ser muy ricos, se hallan repartidos a lo largo y a lo ancho de las costas, debido a que el nivel del agua ha cambiado en el transcurso de los años. Así, debido a que los minerales en la playa no se encuentran a grandes profundidades, su explotación resulta relativamente fácil. Ello ha permitido el descubrimiento de gran cantidad de yacimientos, lo que ha estimulado el desarrollo de la minería marina.

En muchos países, la explotación de los minerales de las playas está proporcionando grandes ingresos anuales. Por ejemplo, Australia obtiene alrededor de 50 millones de dólares por la explotación de los minerales que se extraen de sus costas. El 93 por ciento de la producción del mineral de rutilo que obtiene ese país, mineral que contiene altas cantidades de titanio, proviene de los yacimientos australianos. De estos mismos lugares se extrae zircón en abundancia, que se utiliza para producir el zirconio, indispensable en la construcción de turbinas, reactores nucleares y en la industria eléctrica.

En las costas africanas se descubrieron grandes yacimientos de diamantes. Estas piedras preciosas son comparables en calidad a las que se extraen de la tierra. Las actividades de esta clase de extracción fueron iniciadas por el barco-fábrica *Diamantkus* que filtra 300 toneladas de barro cada hora para obtener alrededor de 700 kilates de diamantes en un día. En la actualidad funciona en África una flota de barcos extractores de diamantes.

En las costas de México se han encontrado placeres, como los de ilmenita, magnetita, rutilo y zircón, situados en las playas de Colima; de cobre y cinc, localizados en Guaymas y Santa Rosalía, Baja California Sur; de oro, ubicados en la desembocadura de los ríos de Sinaloa; y de fosforita, que están en las costas de la península de Baja California. Algunos de éstos como la fosforita, ya se encuentran en producción.

Recientemente se han descubierto muchas riquezas minerales en el Antártico. En Tierra Victoria, cerca del glacial de Rennick, han encontrado molibdeno, torio, uranio, cobalto y platino. En el glacial de Lille se localizó molibdeno, y en el glacial de Scott, en los montes Transantárticos centrales se localizó un depósito de uranio.

El hallazgo más importante de esa región corrió a cargo del geólogo Edward J. Zeller —de la Universidad de Kansas, Estados Unidos—, quien encontró un gran depósito de torio en el glacial de Darwin, en la sierra Transantártica. El torio es un elemento radiactivo capaz de sustituir al uranio en la producción de energía nuclear.

Se han descubierto asimismo otros minerales más escasos llamados tierras raras, como el cerio, el itrio, el

lantano, el estaño, el niobio y el zirconio, elementos que tienen múltiples usos en la industria farmacéutica y en la petrolera, entre otras.

Los yacimientos de las plataformas continentales se formaron durante las glaciaciones ocurridas en el Pleistoceno, cuando el nivel del mar era de 90 a 150 metros más bajo que el actual. Por lo tanto, las playas de aquel entonces, en donde se depositaron los minerales, actualmente forman parte de la plataforma continental cubierta por agua. Los principales minerales que se encuentran en las plataformas continentales son la fosforita, la glauconita, el carbón y el petróleo y sus derivados.

La fosforita fue localizada en yacimientos formados por nódulos hasta de 60 centímetros de diámetro situados en los bordes de las plataformas y en bancos submarinos.

La glauconita es común en las plataformas, donde se encuentra en capas de arena de color verdoso. Estos dos minerales sirven para preparar abonos.

Los yacimientos de carbón que existen en la plataforma continental son semejantes a los que se encuentran en el continente, y muchos de ellos son continuación de éstos. La explotación de los mismos se efectúa ya en plataformas de poca profundidad, como sucede en las costas de Japón, Taiwán, Turquía, Reino Unido, Canadá y Chile, en donde se extrae carbón con un valor anual de 350 millones de dólares.



Figura 17. Distribución de minerales en las costas.

Los yacimientos de petróleo que se encuentran exclusivamente debajo de los sedimentos del fondo oceánico, se localizan a profundidades que varían de cientos a miles de metros. Sin embargo, en la actualidad sólo se explotan los de la plataforma continental.

El petróleo, a diferencia de los otros minerales, es de origen orgánico. Los restos de vegetales y animales de los periodos Cretácico y Terciario se mezclaron con otros sedimentos, como arena, limo y arcilla, y se transformaron conforme se fueron enterrando a raíz de la erosión continental; debido a esta descomposición la materia orgánica alcanzó un estado en que el carbono y el hidrógeno se combinaron, en ausencia total de oxígeno, formando los hidrocarburos.

El número de átomos de carbono que integran las moléculas de los hidrocarburos son variables constituyendo compuestos que reciben el nombre común de productos del petróleo. Tal es el caso del petróleo crudo y el gas.

Productos del petróleo*

<i>Producto</i>	<i>No. de átomos de carbono</i>	<i>usos</i>
Gas	1 - 4	Gas combustible
Gasolina	4 - 12	Combustible para motores
Nafta	7 - 12	Solvente
Kerosina	12 - 15	Combustible para motores diesel, calefacciones, tinta para imprenta
Combustóleo	15 - 18	Combustible para motores diesel
Aceite lubricante	16 - 20	Lubricación
Parafina asfalto	20 - 34	Impermeabilizantes, revestimiento de caminos

*Tomado del *American Society Testing Materials*.

Para que estos productos del petróleo se acumulen en cantidades explotables, es necesario que se depositen en secciones espesas de estratos sedimentarios, los cuales están formados por rocas de estructura laminar orgánica que constituyen las principales fuentes de hidrocarburos; en capas permeables de reservorio, como la piedra arenisca; y en capas impermeables consistentes en láminas compactas; estructuras abovedadas, de estratos permeables, que dan cabida al petróleo crudo. Así, el petróleo y sus derivados quedan depositados dentro de estas capas de reservorio o rocas-almacenes, de naturaleza porosa.

En las plataformas continentales hay un sinnúmero de yacimientos de petróleo, cuyas características son semejantes a las de la zona continental. Estos depósitos son explotados en países como Estados Unidos, Gran Bretaña, Unión Soviética, los países árabes, México y Venezuela, donde se perforan pozos a una distancia hasta de 100 kilómetros de la costa.

Todos los recursos minerales hallados en playas, plataformas y taludes continentales quedan superados en cantidad por los gigantescos campos de nódulos metalíferos, que cubren amplias zonas del fondo marino profundo.

A partir de 1870 el buque *Challenger* comenzó a descubrir nódulos o acumulaciones de minerales en el fondo del Océano Atlántico. Los estudios oceanográficos posteriores han demostrado que aproximadamente 40 millones de kilómetros cuadrados del fondo del océano están cubiertos por esos nódulos, lo que representa el 10 por ciento del área total del fondo de los mares, calculada en 360 millones de kilómetros cuadrados.

Estos nódulos miden desde unos cuantos milímetros hasta 30 centímetros de diámetro, con un tamaño promedio de tres centímetros. Sin embargo, existen algunos nódulos de mayor tamaño, como el que se obtuvo al este de Filipinas en 1958 y el cual pesó 850 kilogramos. Según otros autores, llegó a encontrarse un nódulo de cuatro toneladas.

Los nódulos se componen principalmente de manganeso así como de hierro, níquel, cobre y cobalto dispuestos en capas concéntricas. Se estima que los depósitos más ricos pueden producir hasta 45 por ciento de manganeso, metal indispensable en la producción de acero. En el centro llevan algún objeto duro, como pequeñas piedras de lapilli o pómez volcánica, dientes antiguos de tiburones, pedazos de hueso

de ballena, trozos de corales y de esponjas calcáreas. Sus capas se distribuyen de tal modo que les dan una consistencia porosa y ligera.

Sobre el origen de los nódulos se ha discutido mucho, y todavía se sigue investigando al respecto. Algunos piensan que la formación de los mismos se inicia cuando los objetos duros, que generalmente se encuentran en el fondo, comienzan a recubrirse de los minerales debido a la atracción eléctrica, de manera semejante a como las otras producen sus perlas. Como se han encontrado algunos sin centro duro, se ha pensado que los nódulos se formaron a partir de un pequeño nódulo más antiguo. Se cree también que en su formación intervienen ciertas bacterias que transforman los elementos metálicos del agua del mar.

Estas acumulaciones, que tardan miles de años en formarse, provienen de materias suspendidas en las aguas oceánicas. Se calcula que 10 millones de toneladas de estos compuestos son transformados cada año en nódulos de manganeso.

Existen depósitos muy ricos de manganeso, como la llamada "provincia de mineral", situada en el Pacífico norte, desde el Ecuador hasta las islas Hawai. Con cerca de 6 millones de kilómetros cuadrados, este depósito contiene cuando menos 26 mil millones de toneladas de mineral.

La principal dificultad para su aprovechamiento es que los valiosos nódulos se encuentran a una profundidad de 4 300 metros, lo que representa numerosos problemas para su explotación. Su extracción costeable depende de que se diseñen técnicas eficaces de recuperación para llevarlos a la superficie y transportarlos a tierra para su posterior elaboración.

En México, se han localizado depósitos de nódulos en el Océano Pacífico con mayor volumen y concentración en el área de las fallas Clarion y Clipperton dentro de su zona económica submarina.

Otro tipo de nódulos encontrados en el fondo del mar, generalmente en las cercanías de los taludes continentales son los formados por altas concentraciones de fosfato, hasta un 30 por ciento, y pequeñas cantidades de compuestos metálicos, originados por la descomposición de restos de seres vivos.

Frente a las costas de California, se localizó una zona de 15 000 kilómetros cuadrados que contiene 1 000 millones de toneladas de nódulos de fosfatos; éstos llegan a pesar hasta 100 kilogramos, sin embargo, su diámetro promedio es de 5 centímetros.

La antigua esperanza de la humanidad de extraer tesoros del mar se ha empezado a convertir en realidad al aprovechar los minerales de los océanos. La máxima importancia la tienen los depósitos submarinos de petróleo y gas natural, descubiertos hasta la fecha, que son y seguirán siendo la fuente principal de energía de que dispone el hombre.

También se están obteniendo, a partir de los sedimentos marinos, diferentes materias primas: mineral de hierro frente a las costas japonesas; zinc en las aguas del archipiélago malayo; diamantes en las aguas de Africa del Sudoeste y existen ya, instalaciones costeras dedicadas a la extracción de sodio, magnesio, níquel, cobalto y cobre.

Sin embargo, falta que la ciencia y la industria elaboren tecnologías costeables para la explotación de los 15 000 millones de toneladas de cobre; igual cantidad de toneladas de manganeso; 20 000 millones de toneladas de uranio; 10 000 millones de toneladas de oro; o 500 millones de toneladas de plata, además de otras valiosísimas sustancias que se hallan en las aguas marinas.





IX. METODOLOGÍA Y EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE LA OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA

LA OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA o geología marina se encarga de estudiar la naturaleza y desarrollo de las cuencas oceánicas y los cambios que han sufrido desde que se formó nuestro planeta. Para realizar este estudio es necesario conocer la parte sólida de la superficie terrestre cubierta por el agua del mar, para lo cual se han diseñado equipo y metodologías que nos permiten obtener muestras de esta corteza.

Se puede considerar que las primeras muestras del fondo marino fueron recolectadas por los primitivos navegantes. Por lo menos, se sabe que los bateleros o remeros egipcios del delta del Nilo, reconocían la proximidad de la costa sondeando con largas varas, que recogían fango en su punta como primeras muestras de los sedimentos del mar.

Al iniciarse la investigación oceánica, se utilizaron las *sondas de mano*, tradicional instrumento de medición de todos los marinos, compuesta de una larga cuerda de cáñamo y un peso, útil para obtener los datos de profundidad.

Posteriormente se diseñó un sistema de muestreo en base a un tipo de sonda llamada *escandallo*, abriéndole en su extremo inferior, una cavidad a la que se le untaba sebo para que se adhiriera el fango del fondo. Este método fue utilizado en el transcurso de los siglos y permitió reconocer los fondos marinos, pudiendo elaborarse, más tarde, las primeras cartas marinas en donde se señalaron los diversos materiales que formaban los fondos: arena fina, conchuela, limo, cascajo, etcétera.

En esta época, el conocimiento sobre el fondo marino quedaba limitado al estudio de las costas y de áreas de poca profundidad, pero poco a poco surgió la inquietud por conocer zonas más profundas del océano.

Entonces el geólogo marino se encontró con el problema de que para obtener esta información tenía que utilizar métodos indirectos, ya que su presencia física a grandes profundidades quedaba limitada debido a las elevadas presiones que allí se manifiestan. A 5 000 metros de profundidad existe una presión de 500 kilogramos por centímetro cuadrado; presión prohibitiva, que sólo algunos batiscafos especiales pueden soportar. En consecuencia, la mayoría de los estudios se realizan, en la actualidad, desde barcos oceanográficos con características especiales para situarse en alta mar, con errores no superiores a unas cuantas docenas de metros; una muestra geológica de la que no se sepa exactamente donde se tomó no sirve.

La tecnología propició el diseño de aparatos que permitieran estudios más completos, debido a que las simples descripciones con las que se contaba no eran suficientes para el avance del conocimiento de los fondos marinos, sobre todo de las profundidades oceánicas. Así, se inicia la construcción de aparatos llamados *sondas o nucleadores*, con los que se intensifican estos estudios. Se reporta que la primera sonda fue diseñada y construida por Brooke, oceanógrafo de los Estados Unidos, para la famosa expedición del barco *Porcupine* en 1870.

Posteriormente, en la expedición del *Challenger* (1872-1873) se empleó un *tubo-botella* que era una especie de sacabocados, el cual recogía, además de la muestra del fondo, la del agua que lo recubría; cuando el fondo estaba compuesto de fango el resultado era satisfactorio, pero cuando contenía arena, se salía por falta de la cohesión necesaria, por lo que tuvo que diseñarse un mecanismo de cierre.

A mediados del siglo pasado, cuando los países lograban mayor comunicación entre sí por el desarrollo del intercambio comercial y por la aparición de la telegrafía, se iniciaron los estudios y trabajos para el tendido de los cables submarinos a través del fondo oceánico.

Un esfuerzo importante que se llevó a cabo en esta época para conocer el fondo marino fue el de Cyrus

Field, técnico estadounidense, cuando instaló un cable telegráfico a través del Atlántico.

Al tener la necesidad de conocer, aunque fuese de manera aproximada, la configuración del fondo del mar, solicitó la asesoría del teniente de navío Matthew Fontaine Maury, considerado como el padre de la oceanografía moderna, quien había propuesto realizar el estudio sistemático de los océanos.

En base al proyecto de Maury, la armada de los Estados Unidos decidió equipar algunos de sus barcos para la Investigación oceanográfica. Se emplearon una serie de aparatos entre los que se encontraba la sonda de mano, con la que se empezó a medir las profundidades, que eran prácticamente desconocidas.

Con los datos que se obtuvieron, se trazaron cartas de navegación más completas señalando las diferentes profundidades, así como el lugar donde se encontraban. Todo esto se tradujo en la comprobación de que el fondo oceánico contenía planicies, enormes salientes y profundas depresiones, presentando una imagen tan variada como la que se observa en los continentes.

La sonda de Brooke fue sustituida por la *sonda mecánica*, que tenía un cable de acero enrollado en una especie de grúa o cabrestante movido por un motor de vapor; este cable llevaba en el extremo un peso, el cual al tocar el fondo se soltaba disminuyendo la tensión del cable, lo que hacía que el cabrestante dejara de accionar y la cantidad de cable desenrollado indicaba la profundidad que tenía la zona. La incorporación del motor facilitó la maniobra para lanzar cables de mayor dimensión y llegar a zonas más profundas, aumentando el número de mediciones en menor tiempo.

Con los datos que se obtuvieron con este tipo de muestreo se pudieron hacer cartas más exactas y el Instituto de Oceanografía de Berlín publicó, en 1912, el primer mapa alemán sobre profundidades, el que se basaba en 6 mil mediciones, que para esa época eran muchas, pero para nuestros días resultan escasas, debido a que los cartógrafos necesitan, de 1 500 a 2 000 sondeos para levantar el perfil del fondo oceánico de un área comprendida entre un grado de latitud.

Estos sondeos se efectuaron en vísperas de la guerra de 1914-1918. Fue entonces cuando apareció un nuevo método de sondeo —la primera *ecosonda* práctica— creada por el físico alemán Alexander Behm, en 1919. Todos los barcos equipados con este instrumento podían y pueden medir continuamente el fondo con ondas sonoras que se envían hacia el fondo del mar, donde son reflejados y registrados en dicho instrumento; el tiempo que tarda la señal en regresar al barco multiplicado por la velocidad de propagación del sonido, dividido entre 2, es la distancia que hay del barco al fondo del océano; asimismo, es posible registrar su perfil en un *ecógrafo*, aparato que reproduce las líneas del fondo sobre un papel formando una gráfica o *ecograma*, mientras el barco está navegando, pudiendo saber en cualquier momento la profundidad, el tipo y las características del fondo marino.

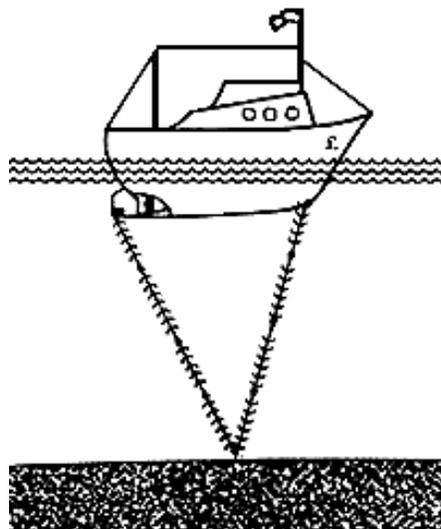


Figura 18. Ecosonda.

La tecnología para diseñar ecosondas se ha desarrollado mucho, llegando a utilizar las ondas ultrasónicas en las ecosondas de precisión, con las que pueden estudiarse las máximas profundidades del mar.

Durante los últimos años, se han introducido múltiples perfeccionamientos a los aparatos de sondeo ultrasónico. Gracias a ellos, actualmente es posible determinar la profundidad con la máxima precisión.

Asimismo, las sondas o nucleadores se fueron perfeccionando, pudiéndose obtener muestras a mayor profundidad y de mayor longitud. En la expedición holandesa del barco *Willebrod Snellius* que se realizó en los años de 1929-1930, se colectaron muestras de dos metros de longitud, facilitándose el estudio de la estratificación de los sedimentos. Esta estratificación consiste en que los diferentes componentes del fondo oceánico —barro de globigerinas, arcilla roja, cienos azules—, se colocan en capas alternadas.

Estos instrumentos consisten en un tubo largo, cuyo extremo inferior tiene un diafragma que permite el paso de la muestra, pero no su salida. En la parte superior posee un agujero para la salida del agua desplazada por la muestra del fondo, pero se cierra mediante un mecanismo cuando el nucleador es izado al barco, impidiendo la entrada de agua al tubo donde está la muestra.

En 1935, el científico Piggot, en los Estados Unidos, construyó una sonda que hace las veces de cañón: lanza un tubo proyectil que cuando llega y toca el fondo se dispara, permitiendo recoger sedimento a mayor profundidad, e incluso, en rocas de estructura medianamente dura. Los investigadores franceses han perfeccionado el aparato adaptándole un disparador eléctrico.

En el viaje de estudios que realizó Piggot en el Atlántico, desde Halifax, Canadá hasta Cabo Land's End, Inglaterra, muestreó fondos que se encontraban a más de 4 000 metros de profundidad y cada núcleo muestreado con una longitud de 3 metros. Con sus estudios, se pudo comprobar que la sucesión de sedimentos es distinta a uno y otro lado de la cresta dorsal Centroatlántica. Esta observación, unida a otras, como el estudio de la distribución de las conchas de foraminíferos, permitió suponer que esta cordillera meridiana emergió durante la era Cuaternaria, ya que estos organismos son indicadores de las condiciones ecológicas que existieron en esas épocas.

Un enorme adelanto en el diseño de estas sondas se presenta cuando el oceanógrafo Kullenberg emplea, en 1947, la presión hidrostática del agua del mar para producir un vacío parcial en el tubo muestreador y obtener muestras de gran longitud. Este vacío hace que la muestra no presente resistencia, permitiendo al tubo hundirse más en el piso del océano.

Esta sonda, *sonda de pistón* o *sonda de Kullenberg* fue utilizada en la expedición que realizó el barco oceanográfico *Skagerrak* por el Mediterráneo, donde se colectaron muestras de 10 a 13 metros de longitud, a una profundidad de 3 000 metros. Con el estudio de estas muestras se pudo establecer una cronología de las erupciones del Vesubio y del Etna, por las cenizas que se conservan en su seno, mezcladas con otros sedimentos. Se comprobaron, por ejemplo, las erupciones del Vesubio, que se efectuaron en el año 79 y en 1906.

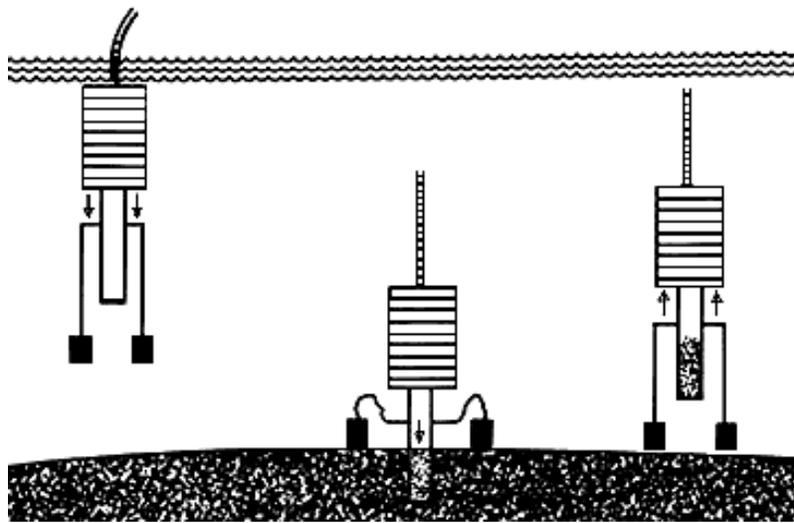


Figura 19. Sonda de pistón o de Kullenberg.

Uno de los trabajos de mayor alcance en el estudio de los fondos oceánicos, lo realizó la nave oceanográfica *Allbatross*, del Instituto Sueco de Oceanografía, en 1947. Esta nave recorrió colectando muestras del fondo, los océanos Atlántico y Pacífico, siguiendo una marcha paralela al ecuador; se colectaron más de 300 muestras de fondos, a una profundidad de 5 000 metros y con una longitud de 10 a 19 metros. Si se toma en cuenta que en el Océano Atlántico se ha calculado que los sedimentos aumentan 8 milímetros cada mil años, una muestra de 15 metros representará la sedimentación de unos 2 millones de años.

En este estudio se concluyó, por el tipo de flora y fauna fósil que se encontró en los sedimentos, que la era Terciaria tenía un clima cálido; en brusco contraste con el de la era Cuaternaria que le siguió, en la que se formaron los inmensos casquetes polares.

Con esta sonda de pistón se han logrado obtener núcleos del sedimento oceánico hasta de 30 metros. Una sola de estas muestras contiene la huella del pasado geológico y biológico de los océanos, herencia de un millón de años de historia de la Tierra y de la vida.

Las sondas se pueden dejar caer libremente desde el barco o bajarlas lentamente y se disparan antes de llegar al fondo. La extracción de muestras se facilita por la presencia de un tubo de plástico transparente u opaco en el interior de la sonda que protege la muestra para su posterior análisis. Estos tubos que guardan la muestra se pueden cortar fraccionándolos cada 10 o 20 centímetros con una sierra; en estos cortes se puede observar la estratificación y el tipo de sedimento.

Con el fin de lograr mejores resultados, las muestras se cubren con parafina o plástico para que conserven sus características y de esta forma poderlas estudiar posteriormente en los laboratorios en tierra. El análisis de las muestras colectadas por las sondas, es una tarea delicada. Por esta razón generalmente en los barcos oceanográficos va un equipo humano compuesto por químicos, mineralogistas, geólogos, físicos y biólogos.

El número de muestras puede llegar a ser considerable en poco tiempo; si la sonda recoge sedimento sólo en la parte superficial, constituye una sola muestra, pero, cuando ésta tiene 8 metros, representa por sí sola un mínimo de 40 muestras y máximo de 80, según si se cortan cada 10 o 20 centímetros.

De estas muestras se miden algunos caracteres de los sedimentos como son: el contenido de agua, su rigidez, su permeabilidad y su densidad. Asimismo se hacen cultivos de bacterias que son de gran importancia para el estudio de las modificaciones químicas que provocan en los fondos y, también, para medir grados de contaminación del mar.

Como en muchas ocasiones no se dispone de buques lo suficientemente grandes para comenzar el trabajo

de análisis a bordo, las muestras se conservan sin cortar y, llegando a la base, se colocan a una temperatura constante de 5° C, no habiendo pasado más de 10 días a la temperatura ambiente. En el laboratorio son seccionadas en fracciones de 1.50 metros, aserradas en sentido longitudinal con su tubo de plástico. La mitad se conserva en la cámara frigorífica, mientras la otra sirve para los análisis.

Cuando las muestras llegan al laboratorio, todo un equipo entra en actividad para proceder a su estudio, que es largo y minucioso. Las determinaciones más comunes para las muestras son: la determinación granulométrica, la dosificación de carbonatos y el estudio de las arcillas con los rayos X.

Entre otros análisis que se realizan destacan el examen en el microscopio para observar restos de microorganismo y de fósiles; el análisis químico para determinar el hierro, níquel, manganeso y otros elementos como los radiactivos, y el análisis mineralógico para conocer los componentes minerales, además de buscar restos de meteoritos o partículas cósmicas.

En los estudios de los núcleos del fondo del mar, también han sido utilizadas las dragas para colectarlas; éstas permiten obtener grandes cantidades de sedimento, con conchas, gravas, y otros fragmentos de fondo duro, así como rocas, que no cabrían en el tubo de las sondas.

Una de las más utilizadas es la draga tipo Petersen; ésta se sumerge suspendida de un cable de acero hacia el fondo y cuando lo toca se cierra en forma violenta, recolectando una muestra de los sedimentos y, en ocasiones, dependiendo de la constitución del fondo, recoge fragmentos rocosos o coralinos. El cierre de la draga se lleva a cabo tirando el cable al llegar aquella al fondo o con un mecanismo automático que se dispara con un peso o mensajero que se envía desde el barco.

Al compararse de una manera seriada los resultados de los estudios de los fondos oceánicos, se observa que su perfil ha ido cambiando a lo largo de miles de años, porque ha sido posible comprobar que en muchas áreas se han acumulado grandes capas de sedimentos sobre el fondo rocoso.

Cuando el estudio se hace utilizando únicamente la ecosonda, las ondas reflejadas solo registran la información sobre los sedimentos superficiales y no los datos de las capas profundas. Por esa razón, el doctor Maurice Ewing, oceanógrafo estadounidense, desarrolló una técnica combinando la ecosonda con explosiones sísmicas provocadas, al arrojar al agua desde un buque, cargas de dinamita y TNT, que explotan a escasa profundidad a intervalos determinados.

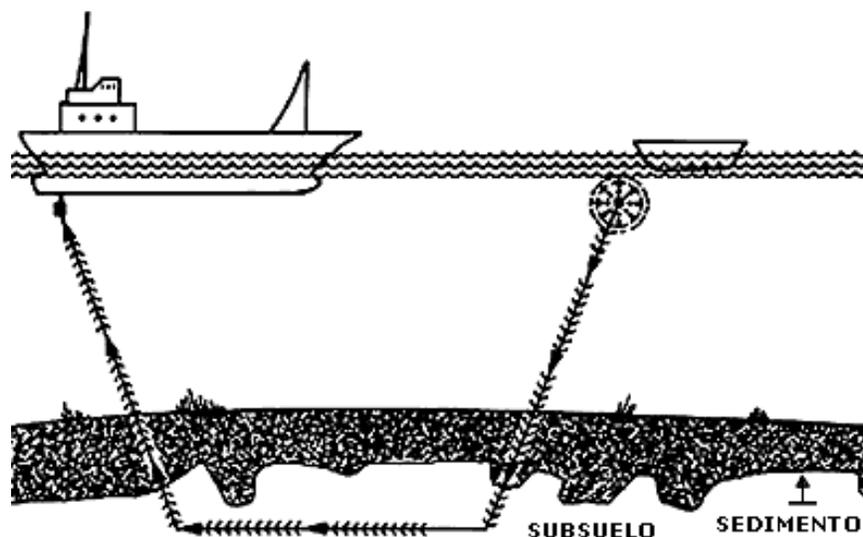


Figura 20. Método de Maurice Ewing.

Estas explosiones producen ondas sonoras que chocan con la superficie de la capa del sedimento que genera un primer eco y después se transmiten hasta el fondo rocoso golpeando en él y produciendo un segundo eco. Ambos ecos son recogidos por el registrador de la ecosonda produciéndose el ecograma correspondiente. En la actualidad la dinamita ha sido sustituida por aire comprimido y descargas

eléctricas.

Los distintos tiempos de recepción de las diferentes ondas reflejadas proporcionan una idea más exacta sobre la disposición y el espesor de la capa de sedimentos, que en el Atlántico alcanza unos 650 metros y cerca de 300 en el Pacífico.

Para apoyar las investigaciones del fondo oceánico utilizando las sondas y las dragas, se emplean métodos relacionados con la *prospección geofísica* de gran aplicación en oceanografía sobre todo cuando ésta tiene finalidades prácticas. Este tipo de prospección consiste en determinar la naturaleza y la estructura del sustrato, empleando métodos indirectos como los usados en sismología, en gravimetría y en los estudios del magnetismo terrestre.

Para situar las riquezas de los fondos oceánicos también se han diseñado métodos para su localización y explotación. Los técnicos estadounidenses extraen los valiosos nódulos de manganeso con aparatos semejantes a enormes escobas que giran o a gigantescas aspiradoras. La codiciada materia prima es izada hasta los barcos mediante tubos aspiradores y desde allí conducida a tierra para su elaboración, pero hasta la fecha ninguna explotación sistemática se ha podido realizar.

Los geólogos que se ocupan en la búsqueda del petróleo en el fondo del mar tienen que determinar la naturaleza de las capas geológicas existentes bajo la capa sedimentaria reciente. Trabajan en aguas poco profundas, principalmente en la zona costera y en la plataforma continental, buscando en el mar la prolongación de las cuencas reconocidas con éxito y ya explotadas en tierra. Para realizar la exploración del petróleo y posteriormente su aprovechamiento, las plataformas de perforación se elevan sobre la superficie del mar, llegando a perforar hasta 90 metros de profundidad.

Los métodos de perforación son muy variados, siendo los principales: el de *percusión*, que consiste en el golpeteo del terreno por la sonda que va abriéndose paso arrancando fragmentos y el de *rotación*, donde la sonda excava el pozo al girar. Las cabezas de las sondas están provistas de barrenas y coronas dentadas de materiales muy duros como aceros especiales, diamantes y otros. En la actualidad se han alcanzado profundidades de perforación de casi 8 000 metros en algunos pozos petrolíferos marinos.

En nuestros días, la exploración petrolera se ha extendido hasta el talud continental y los grandes fondos marinos. En el talud continental del Golfo de México se ha perforado a profundidades de 1 500 metros y con el buque perforador *Glomar Challenger* se ha llegado a profundidades de 6 000 metros en grandes cuencas abisales.

Dentro del programa de investigación de las profundidades oceánicas de los Estados Unidos se utiliza para perforar un barco singular llamado FLIP (*Floating Instrument Platform*), de 110 metros de eslora que para realizar estudios en un lugar determinado del océano, se coloca verticalmente, hundiendo su proa quedando su popa a flote.

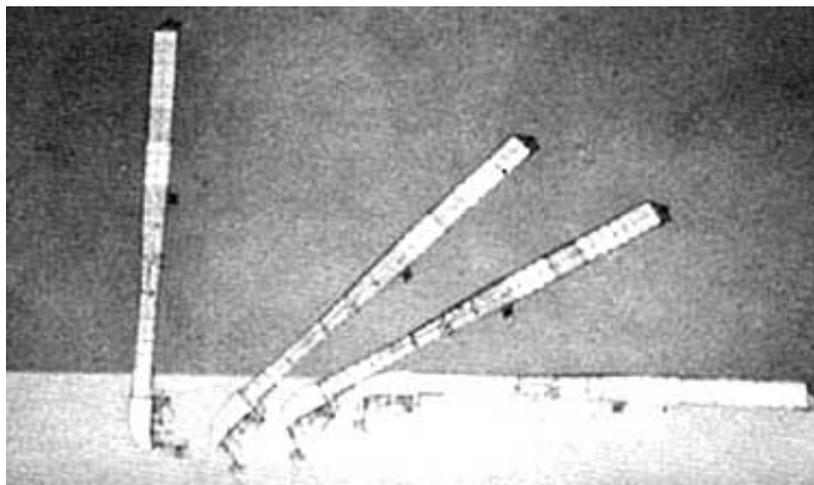


Figura 21. Barco FLIP. Posición vertical.

Esta posición permite que el FLIP tenga gran estabilidad y pueda permanecer el tiempo necesario en la zona de trabajo. Su construcción permite que en la popa se localicen cuatro pisos de camarotes y laboratorios, en donde el mobiliario y equipo pueden usarse mientras la nave se encuentra en posición vertical.

En estos estudios sobre los océanos, desde las más antiguas expediciones, existen entre los científicos de todo el mundo, una colaboración que no reconoce fronteras, ni nacionalidades; así, por ejemplo, en la famosa expedición del *Challenger* aportaron su colaboración, además de los investigadores ingleses, que la organizaron, especialistas alemanes, franceses y españoles.

Desde 1968 se inició un proyecto de perforación para la investigación de los sedimentos y las rocas de las cuencas oceánicas profundas, con el fin de estudiar su edad y la historia de su evolución. En este proyecto intervienen geólogos de la Institución de Scripps de Oceanografía de la Universidad de California —que dirige el proyecto—, el Observatorio Geológico Lamont Doherty de la Universidad de Columbia, la Institución Oceanográfica de Woods Hole, el Instituto de Ciencias Marinas y de la Atmósfera de Miami y la Universidad de Washington, además de geólogos de todo el mundo.

El programa científico de este proyecto, al que se le ha llamado JOIDES —Programa oceanográfico para la extracción de muestras profundas de la Tierra—, se preparó en un panel de discusión, en el que participaron tanto geólogos de los Estados Unidos como del resto del mundo, quienes han contribuido para que este notable esfuerzo científico alcance los resultados que de él se esperan.

La obtención de muestras para el programa JOIDES se realiza desde un buque perforador que fue diseñado especialmente para este trabajo: el *Glomar Challenger*, con 122 metros de eslora y 10 500 toneladas de desplazamiento. En su estructura tiene incorporada una torre de perforación que se eleva 60 metros sobre la línea de flotación.

Puede operar en aguas muy profundas sin anclas y no moverse encima de un mismo lugar del océano, debido a que tiene un dispositivo acústico que manda señales al fondo del océano y después las recoge con otros aparatos llamados hidrófonos. Éstos están colocados en el casco del buque y los trasmite a una computadora electrónica que se encuentra en el barco, la cual se encarga de calcular la distancia que se ha separado del sitio donde tiene que estar y de enviar instrucciones a las máquinas y a las hélices para que produzcan la potencia necesaria y la embarcación se coloque nuevamente en la posición correcta. Con este mecanismo se puede mantener en ella, a pesar de los vientos y de las corrientes marinas.

Después de un año de perforaciones el *Glomar Challenger* ha establecido un record que hace honor a la nave histórica, a la que debe su nombre, por haber recolectado casi 5 000 metros longitudinales de muestras del fondo oceánico, a una profundidad de 6 000 metros logrando que el nucleador penetre a 1 000 metros en la corteza terrestre.

La perforación desde el *Glomar Challenger* se hace con un método similar a la del barrenado —que se utiliza para perforar los pozos petroleros—, y asegura obtener muestras de la totalidad del manto de sedimentos que cubre la mayor parte de las cuencas oceánicas profundas. Estas muestras son cortadas en tramos de 10 a 20 metros e incluidas en plásticos para su posterior estudio.

El programa científico JOIDES tiene como objetivo principal el tratar de conocer la edad de las cuencas oceánicas, su historia y los procesos de formación y de cambio, y para ello ha realizado desde su inicio cientos de cruceros con duración de 2 meses cada uno en todos los mares del mundo.

Se sabe que el planeta es dinámico, continuamente ocurren cambios. Uno de los conceptos más importantes del pensamiento geológico moderno compartido por todos los que estudian la historia de la Tierra, es que el fondo del océano se está expandiendo lentamente y en ocasiones sufre transformaciones por reacomodos o hundimientos de la corteza terrestre.

Parece ser, según los primeros resultados del proyecto de investigación JOIDES, que los continentes a ambos lados del Océano Atlántico se han estado separando lentamente a lo largo del tiempo y un nuevo fondo oceánico se está formando a lo largo de la gran cadena de montañas en el centro del Océano Atlántico. Basándose en la edad de los sedimentos, es posible medir el ritmo con el que se está separando América del Norte de Europa y América del Sur de África. Este ritmo, de algunos centímetros por año, es un proceso muy veloz en términos geológicos. También es posible calcular, retrocediendo en el tiempo, cuándo se formó el Océano Atlántico si se piensa que el Atlántico Norte inició su formación hace unos 200 millones de años, y el Atlántico Sur unos 150 millones de años.

El campo de estudio de las profundidades oceánicas, a través de la oceanografía geológica está cambiando constantemente, y ya atesora gran cantidad de conocimientos acerca de la Tierra. Esta información es importante para la comprensión de la evolución y formación del planeta, a fin de entender el origen de los océanos, y pronosticar y evaluar los recursos minerales potenciales de los mares del mundo.



X. OCEANOGRAFÍA QUÍMICA

EN FORMAS diversas y cantidades variables el mar contiene casi todos los elementos químicos conocidos, aunque algunos de ellos se encuentran en pequeñas cantidades o trazas recibiendo el nombre de *oligoelementos*. Todas las materias disueltas en el mar proceden originalmente de los continentes.

La existencia de diferentes sales disueltas en el agua del mar se debe a que durante miles de millones de años los ríos constantemente han transportado hasta el océano sustancias procedentes de la erosión, causada por las lluvias

La concentración de sales se mantiene más o menos constante a pesar de que las aguas de escurrimiento aportan anualmente al mar 400 millones de toneladas de sustancias sólidas además de que, al evaporarse el agua del océano, ésta pasa a la atmósfera en forma de agua destilada dejando las sales. Los cambios de concentración que se podían presentar por estos fenómenos son muy pequeños al grado de que es difícil que el hombre los alcance a percibir.

Estos materiales cedidos por la tierra al mar provienen de la erosión del suelo, la corrosión de materiales, la combustión y la erosión costera; y se ha calculado que casi 50 billones de toneladas de sales se encuentran disueltas en el agua de los océanos. El mar devuelve a la tierra algunos compuestos, principalmente en las pulverizaciones que acompañan a la lluvia costera, estableciéndose un depósito de materiales metálicos. También aportan sustancias sólidas al agua del mar las emanaciones producidas por los volcanes submarinos, como cloruro de hidrógeno, cloruro de sodio, cloruro de potasio, etcétera.

El agua del mar está formada en un 96.5 por ciento de agua y 3.5 por ciento de sales disueltas; en promedio contiene 35 gramos de sales por litro, por lo que se dice que tiene 35 partes por mil (35,000), aunque esta proporción varía según las zonas del planeta siendo el término medio de 27 a 33 partes por mil; por ejemplo, el Mar Báltico, que cuenta con gran cantidad de aportes de agua dulce, su salinidad es de cero a dos partes por mil, mientras que el Mar Rojo y el Mar Muerto alcanzan más de 40 partes; en el Mar Menor, que es un mar cerrado, tiene 52 partes, en tanto que el Mediterráneo presenta la media de 37 a 39 y algunos mares árticos un poco menos, o sea, de 30 a 33 partes por mil.

Los principales elementos químicos que se encuentran en el mar son: cloro, sodio, carbono, azufre, calcio, potasio y magnesio. Estos elementos están asociados entre ellos formando combinaciones muy variadas: por ejemplo, el carbono forma tanto carbonatos como bicarbonatos, el azufre, principalmente sulfatos, el cloro se presenta en forma de cloruros. Entre todas estas sustancias disueltas en el agua del mar, el cloruro de sodio es el más abundante por representar el 80 por ciento de las sales que componen esta agua.

Principales elementos del agua del mar

<i>Elemento</i>	<i>Concentración en gramos por litro</i>
Cloro	19.0
Sodio	11.0
Magnesio	1.3
Azufre	1.0

Calcio	0.5
Potasio	0.4

Además de estos compuestos cuya proporción en el agua del mar es constante, existen otros cuyas cantidades varían de acuerdo con las estaciones del año, o con la actividad biológica, como los fosfatos y los nitratos.

Asimismo, están disueltos en el océano todos los gases que se encuentran en la atmósfera como el nitrógeno, el oxígeno, el bióxido de carbono y los gases raros distribuidos en cantidades variables dependiendo de las características físicas, principalmente la temperatura y la salinidad, que determinan la concentración de ellos en el agua de la superficie al establecer un equilibrio con la atmósfera y al controlar la solubilidad de estos gases.

La acción metabólica de los organismos que viven en el mar influye en los cambios de concentración de los gases disueltos en el agua. El oxígeno es de gran importancia en estos procesos biológicos, y por eso, es el que más ampliamente se estudia ya que su distribución y concentración permiten conocer las posibilidades de que abunden los organismos en un área determinada del océano. El bióxido de carbono también es importante en estos procesos, en cambio el nitrógeno es aparentemente inerte.

Gases de la atmósfera y del agua del mar

<i>Gas</i>	<i>Concentración en la atmósfera (%)</i>	<i>Concentración en el agua del mar</i>
Nitrógeno	78.08	63.6
Oxígeno	20.94	33.4
Bioxido de carbono	0.03	1.4
Gases raros: neón, helio, kryptón, xenón y argón	0.95	1.6

La actividad dentro de los seres vivos es fundamental en la composición del agua del mar y en los cambios de concentración de sus elementos. Cuando un organismo está realizando su metabolismo utiliza los componentes del agua, pero cuando excreta, defeca o muere se produce la descomposición bacteriana y los elementos vuelven a quedar libres.

Aunque en cantidades muy pequeñas se encuentran en el agua del océano compuestos que provienen de la desintegración radiactiva, como plomo y argón, entre otros.

Constituyen el campo de estudio de la oceanografía química el conocimiento de la composición química del agua del mar y sus procesos químicos, el equilibrio dinámico de los sistemas químicos, los ciclos químicos, las relaciones entre los fenómenos físicos, geológicos y biológicos con la química del mar, la

influencia de las actividades del hombre y la relación química del océano con la atmósfera y la litósfera.

El oceanógrafo químico estudia: la relación entre los componentes químicos del agua del mar con la abundancia de organismos, el intercambio entre el océano y la atmósfera y los efectos de la eliminación de desechos al mar.

Además de estos conocimientos básicos, se ocupa de hacer los estudios para desarrollar nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento de los recursos químicos del océano.

La oceanografía química se combina con otras ciencias para entender mejor la actividad química del mar. Por ejemplo, para estudiar el comportamiento de los gases se relaciona con la física, originando la *fisicoquímica marina*.

Los organismos marinos utilizan a los elementos químicos de muy diferentes maneras. El carbono, el hidrógeno y el oxígeno son empleados en la fotosíntesis, proceso que emplea la energía de la luz para transformar sustancia inorgánica, como el bióxido de carbono y el agua entre otras, en sustancia orgánica, como los hidratos de carbono o azúcares, las grasas y las proteínas, en las que se almacena la energía siendo esto la base de la vida.

El estudio de la relación de estas características químicas del agua del mar con los organismos, es tratado por una ciencia de creación reciente: la *bioquímica marina*, que utiliza los conocimientos sobre el mar que aportan tanto la química como la biología.

Los vegetales acuáticos aprovechan mejor la radiación solar que los terrestres, el alga verde marina *Chlorella* aprovecha el dos por ciento de la luz incidente, contra el uno por ciento de las plantas terrestres. Estos vegetales acuáticos se encuentran a profundidades menores de 200 metros, ya que la luz sólo penetra hasta esas zonas; sin embargo existen otros organismos como las bacterias y mayor profundidad y que realizan reacciones químicas para obtener energía y producir nueva materia orgánica a través de la quimiosíntesis.

Hasta la fecha se sabe que existe como materia que se produce: aminoácidos, proteínas, hidratos de carbono, vitaminas, sustancia orgánica en descomposición y toxinas. Para llegar a conocer estos procesos, tendrán que mejorar las técnicas de análisis bioquímicas, como las cromatográficas.

La materia orgánica que forman las pequeñas plantas verdes marinas, llegan a otros organismos llamados consumidores que la aprovechan y con ella realizan toda su actividad biológica para posteriormente regresar esta materia al mar cuando realizan su excreción, defecación así como cuando mueren, contando nuevamente con elementos inorgánicos para formar materia orgánica.

Sin embargo, esta materia orgánica puede llegar al océano por otras vías. La lluvia y los ríos aportan 80 millones de toneladas de nitrógeno orgánico en forma de amoníaco y nitrato, pero solamente 10 millones llegan al fondo del mar en forma de nitrógeno orgánico y no se sabe lo que ocurre con los otros 70 millones de toneladas.

La bioquímica marina tiene otros aspectos importantes de investigación, como los relacionados con los procesos metabólicos, las hormonas y los sistemas de enzimas en los organismos marinos. Son importantes los estudios de la composición química de estos organismos encontrando que el yodo está presente en las algas en cantidades que han permitido extraerlo durante muchos años para la industria farmacéutica; el fósforo, en la langosta en forma de fosfatos y el sílice en las esponjas.

La utilización de algunos de estos compuestos que contienen los seres vivos oceánicos para el tratamiento de ciertas enfermedades del hombre, está permitiendo desarrollar una nueva rama de la oceanografía química, la *farmacología marina*.

La futura explotación de los minerales del mar depende, en primer término, de contar con técnicas

analíticas confiables que permitan aplicarse a escala comercial. Se pueden apreciar las dificultades que se presentan para analizar el agua del mar debido a que la concentración del elemento más abundante, el cloro, es un trillón de veces mayor que la del más escaso, el radón.

La utilidad práctica del conocimiento de la composición química del agua del mar se encuentra al observar que los compuestos antidetonantes que se emplean en la gasolina, contienen bromo, gran parte del cual se extrae del océano, lo mismo ocurre con los importantes elementos químicos: magnesio, calcio y potasio que se utilizan en la industria. Una milla cúbica de agua de mar contiene veinticinco toneladas de oro y siete de uranio, pero será preciso que las técnicas químicas adelanten mucho para que se puedan emplear, comercialmente, estas concentraciones.

En los últimos años ha despertado gran interés la eliminación de los desechos radiactivos e industriales en el océano, pareciendo más conveniente y seguro arrojarlos en los lugares más profundos. Sin embargo, el análisis químico ha demostrado que, aun desde profundidades de 7 kilómetros, estos materiales vuelven a la superficie o penetran a los organismos, algunos de los cuales consume el hombre.

La contaminación de las aguas por desechos del petróleo que se tiran al mar por la operación de los barcos y de los puertos, o durante su explotación, cada día se transforma en un problema mayor y las posibles soluciones se buscan tratando de entender la química del océano.

La oceanografía química divide su campo de acción en investigaciones sobre química inorgánica, química orgánica, fisicoquímica, bioquímica, química industrial y farmacéutica marina. No obstante, son escasos los conocimientos de la química del mar y pocos los químicos que se dedican al estudio del océano, debido a que la mayor parte de estos profesionales son absorbidos por la industria en los continentes. Sin embargo, esta rama representa un terreno prácticamente virgen, en el que los jóvenes químicos podrán hallar temas de investigación útiles y apasionantes.



XI. LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DEL MAR

LA COMPOSICIÓN química del agua del mar a menudo es descrita a base de fantasías, que a veces parecen trabajos escritos por alquimistas, es decir, los químicos de la Edad Media que, dejándose arrastrar por su imaginación, la describen compuesta por toneladas de metales preciosos.

Es cierto que el mar contiene, diseminados en el seno de sus aguas, algunos de esos metales, pero su extracción, a escala industrial y económica, a pesar de los repetidos ensayos hechos en muchos lugares, no es rentable.

Sin embargo, si estos metales no son, por el momento, aprovechados por el hombre, la sal que el océano contiene, sabor que pueden apreciar todos los que la prueban, ha sido altamente utilizada a través de la historia, por lo que su valor es infinitamente superior al que podrían tener los metales.

El primer componente del mar es el *agua*, compuesto que tiene cada una de sus moléculas formadas por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno (H_2O). En el sistema solar parece ser que solo se encuentra en la Tierra y que en los otros planetas puede estar en forma de cristales de hielo.

En nuestro planeta es abundante y se estima que existen 1 370 millones de kilómetros cúbicos de agua, la mayor parte de ella formando el agua del océano, otra parte como agua dulce en los continentes, como hielo o nieve en las montañas y glaciares y como vapor de agua en la atmósfera. Se ha calculado que por cada litro de vapor de agua existen 33 litros de agua dulce, 1 500 litros de agua de los hielos y las nieves y 90 mil litros de agua en los océanos.

El agua de los océanos no es pura, sino que contiene en solución una gran variedad de elementos y compuestos químicos llamados sales, en una proporción de 96.5 por ciento de agua y 3.5 por ciento de estos últimos.

Las sustancias disueltas en el agua llegan a ella a través de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, encargada de determinar las propiedades químicas del agua oceánica.

Una gran cantidad de químicos analistas se ha entregado al estudio de la composición química del agua oceánica, tratando de determinar con exactitud su composición salina. Desde los tiempos del químico Lavoisier hasta nuestros días, los análisis se han sucedido repetidamente. Las primeras determinaciones de las sales disueltas en el agua del mar, hechas con precisión, se deben al oceanógrafo William Dittmar que analizó 77 muestras recolectadas en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico en la expedición del *Challenger* alrededor del mundo que se realizó durante los años 1873 a 1876. En 1884 determinó halógenos, sulfatos, cloruros, carbonatos de sodio, magnesio, calcio y potasio. Y descubrió que estas sales se encontraban en cantidades más o menos constantes, por ejemplo el ión cloruro representa siempre el 56 por ciento de los sólidos totales disueltos en el agua del mar, y el magnesio el 4 por ciento.

Estos compuestos se encuentran en cantidades más abundantes, proporcionan al mar sus características especiales de salinidad, desempeñan un papel muy importante en los equilibrios fisicoquímicos y en los fenómenos bioquímicos del medio marino.

Las sales disueltas en el océano constituyen casi 50 billones de toneladas y están formadas por 10 elementos principales por encontrarse en mayores proporciones: cloro, sodio, magnesio, azufre, calcio, potasio, bromo, estroncio, boro y flúor.

Cloro	89 500 000
Sodio	49 500 000
Magnesio	6 400 000
Azufre	4 200 000
Calcio	1 900 000
Potasio	1 800 000
Bromo	306 000
Estroncio	38 000
Boro	23 000
Flúor	6 100

El *cloro* y el *sodio* son los constituyentes fundamentales del agua del mar y se encuentran en forma de *cloruro de sodio* que se conoce como la sal común. Representa el 80 por ciento de las sales en solución.

Esta cantidad y composición del cloro y el sodio en el agua del mar es muy semejante a la de los líquidos orgánicos como la sangre, los líquidos viscerales que forman el medio interno de los animales y que juegan un papel decisivo en la fisiología, es decir, en las funciones de estos seres vivientes.

Después del cloro y el sodio, el *magnesio* es el elemento más abundante en el agua del mar, se encuentra en una relación constante respecto al cloro. Se combina con otros elementos formando cloruro de magnesio, sulfato de magnesio y bromuro de magnesio y está presente en el esqueleto de algunos organismos marinos. La extracción a escala industrial de estas sales apenas se inicia.

El *azufre* se encuentra en forma de *sulfatos*, compuestos cuya concentración varía poco, aunque pueden cambiar notablemente sus proporciones en las aguas próximas al litoral debido a la influencia de las aguas fluviales, más ricas en sulfatos que las marinas. En cuencas oceánicas más o menos cerradas, como el Mar Negro, existen bacterias que para respirar no necesitan oxígeno, reducen los sulfatos marinos y los hacen precipitarse al fondo en forma de sulfuros.

La cantidad de *calcio* que contienen las aguas oceánicas es menor que la de los elementos anteriores y su relación con el cloro permanece relativamente constante. Este calcio, combinándose con los carbonatos, constituye la estructura del esqueleto calizo, interior o exterior, de un gran número de organismos, como los foraminíferos, pequeños animales del plancton marino, los corales y las algas marinas que viven en el fondo del mar y que forman el bentos; también se encuentran en los caparazones de los crustáceos y en la concha de los moluscos. Al morir estos organismos sus esqueletos caen al fondo, en donde llegan a formar acumulaciones submarinas de calcio de gran extensión.



Figura 22. Conchas de foraminíferos.

El calcio en el mar presenta una extraordinaria movilidad determinada por la abundancia y distribución de estos organismos oceánicos, debido a que el calcio concentrado por los seres vivos para formar su esqueleto o su caparazón se disuelve lentamente una vez muertos y de esta manera se mantiene constante la cantidad de calcio en el mar a causa de este comportamiento cíclico.

El sexto elemento en abundancia es el *potasio*, que tiene su relación constante con el cloro. En las zonas litorales la cantidad de potasio puede modificarse al ser asimilado por los vegetales marinos que tapizan el fondo costero. En la cantidad de potasio también intervienen otros factores como: aportes de agua dulce, presencia en el agua del mar de sustancia orgánica en descomposición llamada detritus y formación de compuestos arcillosos.

El *bromo* forma bromuros, aunque su proporción es pequeña al encontrarse 65 g/m^3 de agua del mar, se ha logrado extraerlo en cantidades industriales y se utiliza como detonante de los combustibles líquidos.

El *estroncio* es un elemento que se ha encontrado en el agua oceánica pero ha sido poco estudiado, se detecta junto con el calcio por la dificultad técnica para poder separarlo. Puede formar parte del esqueleto de algunos organismos marinos.

Los últimos elementos que los oceanógrafos químicos consideran como componentes principales del agua del mar son el *boro* y el *flúor*.

El boro está en forma de ácido bórico y colabora en el equilibrio de los carbohidratos. El flúor constituye fluoruros conociéndose poco sobre su significado en el mar.

Además de estos elementos que se encuentran en mayor proporción y en concentraciones constantes en el agua del mar, existen otros que están disueltos en pequeñas cantidades resultando difícil identificarlos con técnicas sencillas de análisis químicos. Estos elementos llamados por su escasez *oligoelementos*, alternan entre un nivel máximo de varias partes por un millón a una parte por 10 billones de agua del mar y generalmente se detecta una porción en la estructura de los organismos que habitan el océano.

Se calcula que son 79 los oligoelementos que están presentes en el agua oceánica, algunos de ellos tienen una concentración relativamente constante pero la mayoría varían por dos razones: al ser utilizados por los seres vivos que posteriormente los regresan al agua y por la actividad geoquímica del mar.

La mayoría de estos oligoelementos son asimilados por los organismos vivos acumulándose en su cuerpo, por lo que pueden presentarse en cantidades mayores que las que se encuentran en el agua donde habitan.

Por su concentración los oligoelementos se dividen en dos grupos. Unos son los de concentración

relativamente constante como hierro, manganeso, cobre, sílice, yodo y fósforo. Otros que tienen concentraciones variables y que se encuentran en cantidades infinitesimales que a veces sólo se sospecha que existan porque no se han aislado propiamente del agua del mar, son el cadmio, titanio, cromo, talio, germanio, antimonio y cloro, este último único de estos elementos que sí ha podido extraerse del agua del mar.

A pesar de ser escaso el *hierro* en el agua del mar es uno de los elementos indispensables para la vida en el océano. Se encuentra en las aguas litorales procedente de los aportes fluviales de donde lo toman los organismos, como pequeños vegetales hasta los grandes mamíferos que lo utilizan para formar la hemoglobina de su sangre.

El hierro abunda en los sedimentos marinos, sobre todo en los lodos de la plataforma continental y del litoral en forma de hierro metálico como carbonato ferroso, sulfato o sulfuro de hierro. Su concentración es de 3.4 microgramos por litro de agua de mar. Su origen puede ser: *destrítico*, es decir, de partículas minerales arrastradas por los ríos después de ser desgastadas de las rocas; *químico*, por precipitación de las sales de hierro de los sedimentos, y *biológico*, por la resultante de la actividad orgánica de los animales y vegetales.

El *manganeso* es más abundante en los vegetales marinos que en el medio líquido y cuya concentración alcanza 0.5 microgramo por litro. También se puede encontrar en los nódulos localizados en los fondos marinos.

La concentración de *cobre* es de 1 microgramo por litro y se incrementa si es mayor el aporte de agua dulce. En los moluscos forma parte de la hemocianina, que es su pigmento sanguíneo.

Uno de los oligoelementos más abundantes es el *sílice*, del que se encuentran 3 gramos disueltos por cada litro de agua. Su concentración varía de acuerdo a las cantidades que utilizan las diatomeas y los dinoflagelados, organismos microscópicos del plancton que forman sus caparazones con este elemento.

El *yodo* es más frecuente en las algas pardas que disuelto en el agua del mar, en la que existen 64 microgramos por litro y se utiliza en su mayor parte en la industria farmacéutica.

El *fósforo* se presenta como fosfatos y es otro elemento indispensable para los seres vivos. Su concentración en el agua es de 88 microgramos por litro. Forma parte de la cubierta de los dinoflagelados y permite que éstos produzcan bioluminiscencia.

Otros de estos oligoelementos provienen de la actividad radiactiva y uno de los más interesantes es el *radio*, que se encuentra en mayor cantidad en las capas profundas del mar; gracias a su presencia los oceanógrafos pueden calcular la edad de los sedimentos. La existencia de este radio en depósitos litorales es un factor de interés terapéutico en el tratamiento de afecciones reumáticas, de ahí el empleo de lodos marinos para tratarlas.

Gran cantidad de estos oligoelementos y los compuestos que los forman, combinados con otras sustancias orgánicas más, integran los llamados *nutrientes* que son indispensables para iniciar las cadenas de alimentación en el océano.

El aprovechamiento de los oligoelementos por los organismos cambia según las diferentes especies. Por ejemplo, el hierro puede ser indispensable para el crecimiento de los peces y no de los moluscos.

El agua del mar también contiene gases en disolución. Todos los gases atmosféricos se encuentran en el agua del mar, siendo los más abundantes el *nitrógeno*, el *oxígeno* y el *bióxido de carbono*, de los cuales el último se halla principalmente como carbonato y bicarbonato porque reacciona químicamente con el agua marina.

Los gases raros también están presentes en pequeñas cantidades como: argón, kriptón, xenón, neón y helio

y, en ausencia de oxígeno, suele haber ácido sulfhídrico y probablemente también metano en zonas de agua estancada y con activos procesos fermentativos.

Como cada gas tiene su propia solubilidad, la proporción en que están disueltos en el mar no es igual a la que presentan en la atmósfera y se encuentra un promedio de nitrógeno de 64 por ciento, de oxígeno de 34 por ciento y de bióxido de carbono de 1.6 por ciento. Los gases raros representan una proporción de casi el 1.7 por ciento.

La distribución de los gases disueltos depende de la temperatura, la salinidad, las corrientes, la difusión, la mezcla y la actividad biológica, variando inversamente en ellas; por ejemplo a mayor temperatura disminuye la concentración de gases.

La fotosíntesis de los vegetales marinos y la respiración de los organismos vivos afectan la cantidad de oxígeno y de bióxido de carbono disueltos, cantidad que varía de acuerdo con la abundancia de los animales y los vegetales.

El agua superficial del mar mantiene un equilibrio con la atmósfera absorbiendo o perdiendo gases debido a las corrientes del mar que originan la evaporación, el enfriamiento y la congelación, y también a la mezcla provocada por las olas y turbulencias resultado de la acción del viento. La circulación vertical y horizontal profunda del océano se encarga luego de distribuir los gases disueltos en toda su masa.

El *nitrógeno* es el gas que se encuentra en mayor proporción en el mar, pero por su carácter inerte no interviene en el ciclo biológico de las sustancias nitrogenadas, aunque existen en el mar ciertas bacterias que son capaces de producirlo y otras de fijarlo.

La reserva principal en el agua del mar está constituida por los nitratos y en menor cantidad por el amoníaco y los nitritos. Estas 3 combinaciones de nitrógeno son indispensables para que los vegetales marinos puedan sintetizar sus proteínas.

La distribución del nitrógeno depende de la temperatura, la salinidad, la circulación de los procesos de mezcla y la difusión que se realiza en las aguas oceánicas. En total se han calculado 15 microgramos por litro.

El oxígeno es el gas que más se ha estudiado dada su importancia en los procesos biológicos. Sin embargo, el proceso de absorción del oxígeno por los océanos y su transporte hacia las profundidades, son los problemas que más interesan a los oceanógrafos químicos, que todavía no cuentan con una respuesta satisfactoria para explicarlos.

La distribución del oxígeno en el océano depende de la circulación de las masas de agua. En la superficie del agua está en equilibrio con la cantidad que existe en la atmósfera siendo sus valores altos, mientras que en las capas profundas la cantidad de oxígeno depende de la temperatura que estas aguas tienen en el momento en que se hundieron.

En las regiones polares el agua fría es rica en oxígeno y cuando avanza hacia las zonas tropicales se hunde perdiendo parte del oxígeno durante el recorrido, pero conservando todavía abundante cantidad.

El oxígeno en el océano puede variar de cero a 8.5 centímetros cúbicos por litro. Por debajo de los 2 000 metros la concentración de oxígeno apenas varía, manteniéndose entre 3.4 y 6.6 centímetros cúbicos por litro en el Atlántico y algo menos en el Pacífico.

El oxígeno del mar procede en primer lugar del contenido en la atmósfera y en segundo lugar del producido en la actividad fotosintética de los vegetales verdes que viven en las capas superficiales, donde penetra adecuada cantidad de energía luminosa.

El agua oceánica representa el principal regulador de la cantidad de *bióxido de carbono* en la atmósfera, ya

que cuando este gas se produce durante la respiración de los organismos o por los procesos de la industria, aumenta su cantidad en el aire y cuando éste hace contacto con el agua de la superficie marina se disuelve transformándose en ácido carbónico.

El bióxido de carbono disuelto en el agua del mar, suele encontrarse en la pequeña cantidad de 0.3 centímetros cúbicos por litro como promedio, debido a que tiene gran solubilidad para reaccionar químicamente con el agua del mar formándose en carbonatos y bicarbonatos.

Tanto el bióxido de carbono, como los carbonatos y bicarbonatos tienen especial importancia en la vida marina. El bióxido de carbono interviene como elemento fundamental en el proceso de la fotosíntesis, y los carbonatos y bicarbonatos son parte de la mayoría de las estructuras esqueléticas de los seres marinos de naturaleza calcárea, y de ellos toman los organismos marinos los materiales necesarios para formarlas.

El bióxido de carbono llega a los océanos principalmente del aire atmosférico, contribuyendo asimismo a producirlo la respiración de los vegetales y los animales marinos. Este gas es consumido por los vegetales verdes durante el proceso de la fotosíntesis.

En la superficie donde el agua está en contacto con la atmósfera, el contenido total de bióxido de carbono depende principalmente de la salinidad y de la temperatura tendiendo a mantener una situación de equilibrio entre la cantidad de bióxido de carbono atmosférico y el que se encuentra disuelto en el agua.

Sin embargo, en aguas superficiales con temperatura y salinidades altas la cantidad de bióxido de carbono disuelto desciende por la actividad fotosintética, en la cual se consumen grandes cantidades del gas, trayendo como consecuencia una precipitación de los carbonatos.

En cambio, en aguas profundas, donde las temperaturas y salinidades son más bajas, las variaciones en el contenido de bióxido de carbono total son más amplias. Entre los 400 y 600 metros de profundidad el contenido alcanza su máxima concentración, como en las aguas profundas del Atlántico que están prácticamente saturadas de carbonatos.

En relación con la abundancia de bióxido de carbono en el océano, se tiene que considerar que durante los últimos 100 años el hombre ha utilizado en su industria abundantes combustibles de origen fósil, como petróleo, carbón y gas natural, lo que ha producido aproximadamente 2 000 millones de toneladas de este gas, que se fueron añadiendo a la atmósfera cada año y si todo quedara en ella aumentaría hasta alcanzar 1.6 partes por millón al año, pero como sólo se queda la mitad el aumento ha sido de 0.7 partes por millón. Ello se debe a que la mayor parte del bióxido de carbono penetra en los océanos, es decir, éstos actúan como un moderador.

En el agua del mar existe un equilibrio entre las variaciones de oxígeno y de bióxido de carbono, ocasionado por el consumo del primero durante la respiración de los organismos marinos y su producción en el proceso fotosintético.

La zona donde la producción de oxígeno por fotosíntesis excede al consumo respiratorio es la zona fotosintética, y la profundidad donde el consumo y la producción son iguales se llama *zona o profundidad de compensación*. Esta profundidad varía grandemente de un océano a otro y depende, principalmente, de la transparencia del agua, por lo que la profundidad de compensación será menor en los lugares de mayor densidad de partículas en suspensión, a lo que se denomina *turbiedad*.

La proporción en que se encuentran todos estos gases disueltos en el agua del mar está íntimamente relacionada con la abundancia y distribución de los seres vivos en el océano.

A veces, los biólogos y los aficionados a montar acuarios marinos, necesitan fabricar agua de mar artificial, logrando preparar una solución que si no resulta del todo idéntica a la del mar, al menos se aproxima bastante. Esto lo hacen agregando a un litro de agua destilada cloruro de sodio, magnesio, calcio, potasio, estroncio, sulfato de sodio, bicarbonato sódico, bromuro de potasio, fluoruro sódico y ácido bórico

en una proporción de 35 gramos por litro.

Fórmula del agua del mar*

Cloruro de sodio	24	gramos
Cloruro de magnesio	5	"
Sulfato neutro de sodio	4	"
Cloruro de calcio	1.1	"
Cloruro de potasio	0.7	"
Bicarbonato de sodio	0.2	"
Bromuro de sodio	0.096	"
Ácido bórico	0.026	"
Cloruro de estroncio	0.024	"
Fluoruro de sodio	0.003	"
Agua destilada	1.000	mililitros

(*Salinidad aproximada 34.5%-pH 7.9-8.3)

Los oceanógrafos continúan estudiando la composición química del agua de los océanos, no sólo para entender los interesantes problemas científicos que se plantean en su estudio, sino con el afán de contestarse preguntas como: ¿hay alguna esperanza de que se pueda utilizar la abundancia de elementos químicos disueltos en el agua del mar en beneficio del hombre? Los estudiosos del mar darán algún día la respuesta.



XII. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL AGUA DE MAR: SALINIDAD, CLORINIDAD Y pH

LAS principales propiedades químicas del agua de mar son la salinidad, la clorinidad y el pH.

La *salinidad* es una de las características que más interesa estudiar al oceanógrafo, sea químico, físico o biólogo. Esta propiedad resulta de la combinación de las diferentes sales que se encuentran disueltas en el agua oceánica, siendo las principales los cloruros, carbonatos y sulfatos. Se puede decir que básicamente el mar es una solución acuosa de sales, característica que le confiere su sabor.

De estas sales, el cloruro de sodio, conocido como sal común, destaca por su cantidad, ya que constituye por sí sola el 80 por ciento de las sales. El restante 20 por ciento corresponde a los otros componentes.

Conforme los primeros investigadores se dieron cuenta de que las proporciones de algunas de estas sales se mantenían aparentemente constantes en las muestras de agua marina, surgió la necesidad de hacer uniformes y comparables entre sí las distintas medidas de salinidad de los diferentes mares y ello obligó a los oceanógrafos químicos a proponer una definición de la misma: "Salinidad es la cantidad total en gramos de las sustancias sólidas contenidas en un kilogramo de agua del mar." Se representa en partes por mil, y se encuentra en los océanos como salinidad media la de 35 partes por mil, o sea que un kilogramo de agua de mar contiene 35 gramos de sales disueltas.

Los primeros científicos que aportaron datos confiables sobre la salinidad del agua fueron Forchhammer, Natterer y Dittmar en la segunda mitad del siglo pasado. Ellos demostraron que los componentes disueltos en el agua del mar permanecen más o menos constantes, encontrándose también que los cloruros representan aproximadamente el 56 por ciento y el magnesio el 4 por ciento.

Posteriormente, en 1902, se reunió una Comisión Internacional con el objeto de señalar normas comunes para determinar la salinidad de los mares, para que los investigadores pudieran contar con datos comparables. Esta Comisión acordó definir la salinidad como: "La cantidad de sales por kilogramo de agua marina, en el momento que todas las sustancias químicas llamadas carbonatos se convirtieran en óxidos, y el bromo y el yodo fueran reemplazados por cloro, y toda la materia orgánica se encontrara oxidada."

La determinación de la salinidad, según esta definición, presenta muchas dificultades, y sería prácticamente imposible realizar los cientos de determinaciones que requiere una campaña oceanográfica. Afortunadamente, un hecho experimental, vino a simplificar el problema al comprobarse a través de miles de análisis efectuados con muestras de agua obtenidas en todas las partes del océano, que la cantidad de las diferentes sales permanece prácticamente constante, lo cual permitió al científico danés Martin Knudsen medir la salinidad en función de la cantidad de cloro que se encuentra en el agua del mar, a lo que se le dio el nombre de *clorinidad*.

La clorinidad se define como: "La cantidad total de gramos de cloro contenida en un kilogramo de agua del mar, admitiendo que el yodo y el bromo han sido sustituidos por el cloro." Esta clorinidad así definida es más sencilla de determinar por análisis químico y permite calcular la salinidad hasta con una precisión de dos centésimas de gramo.

La relación entre la clorinidad y la salinidad se ha establecido para los diferentes mares y se han elaborado las tablas correspondientes basadas en las Tablas Hidrográficas de Knudsen que permiten pasar rápidamente de la clorinidad a la salinidad, calculando únicamente la clorinidad y sumándole una cantidad que ha sido determinada por la Comisión Internacional.

Existen otros métodos para determinar la salinidad de los mares, que dan valores aproximados apoyados

en las propiedades físicas del agua del mar como la densidad, el índice de refracción, la conductividad eléctrica y la temperatura de congelación; cada uno de ellos ofrece sus ventajas y sus inconvenientes.

Desde hace algunos años, los científicos de Estados Unidos utilizan el método eléctrico para determinar la salinidad. Se basa en los cambios que sufre la conductividad eléctrica del agua marina en relación a la cantidad de sales disueltas. Cuanto más concentrada esté el agua marina, será mejor conductora. Se ha demostrado que este método es el más confiable.

A partir de innumerables mediciones realizadas en diferentes puntos del océano, se ha podido determinar que 35 partes por mil es la salinidad media del agua del mar, con ligeras variaciones de un océano a otro. En los mares del Hemisferio Norte se encuentra menor salinidad que en el sur, debido a que los continentes están más próximos y tienen mayor escurrimiento de agua dulce que los del Sur pero tomando en cuenta el promedio de cada océano se tiene que en el Pacífico es de 34.62 partes por mil, en el Índico 34.76 y, finalmente, en el Atlántico 34.90 partes por mil.

La salinidad varía en dirección tanto horizontal como vertical y aun en un mismo punto puede sufrir variaciones en las diferentes estaciones del año. Los factores que hacen cambiar la salinidad son, en primer lugar, la temperatura ya que si es elevada provoca una evaporación intensa y por lo tanto un incremento de salinidad resultante de la concentración de sales; en segundo lugar, los aportes de agua dulce, que por dilución, disminuye la salinidad.

Relación temperatura / salinidad

<i>Profundidad en metros</i>	<i>Temperatura 0° C</i>	<i>Salinidad</i>
0	26.44	37.45
50	18.21	36.02
100	13.44	35.34
500	9.46	35.11
1 000	6.17	34.90
1 500	5.25	34.05

De aquí que, por regla general, se presente una mayor salinidad en las zonas tropicales que en las de latitud elevada.

Con los datos que se han obtenido al medir las variaciones de salinidad, los oceanógrafos químicos elaboraron la Carta General de Salinidad para los diferentes océanos del planeta, y al unir los puntos de igual salinidad establecieron unas curvas a las que se les llama isohalinas, muy útiles de conocer para la oceanografía y el aprovechamiento de los organismos en la pesca.

En el Océano Atlántico, la salinidad más elevada se encuentra en las latitudes tropicales localizadas entre los trópicos de Cáncer y el de Capricornio, alcanzando más de 36 partes por mil, por tratarse de zonas en donde la evaporación ocasionada por el sol es mayor durante todo el año y las lluvias son escasas. En el Ecuador se observa una concentración de sales más elevada, aunque menor a la de las zonas tropicales debido a que, si bien la temperatura se mantiene alta, las lluvias, en cambio, son abundantes.

En las latitudes altas del Océano Atlántico, cerca de los polos, la salinidad desciende a 34 partes por mil, porque al encontrarse la temperatura baja, la evaporación es débil y además se presenta la fusión periódica de los glaciares y, por consiguiente, aumenta la cantidad de agua dulce, lo que hace que descienda la

concentración salina.

Con ligeras variaciones se observa un comportamiento semejante en el Océano Pacífico, y sólo se encuentra que su zona tropical es menos salada sin rebasar nunca las 36 partes por mil. En el océano Índico las variaciones también son mínimas.

En los mares interiores, como los mediterráneos, los golfos y las zonas costeras, la salinidad es muy variable, siendo en las lagunas costeras y los estuarios donde presentan las variaciones más intensas.

En los mares interiores se pueden registrar aumentos considerables, como en el Mar Rojo, donde sus aguas superficiales constituyen las más saladas del mundo, ya que pasan de 40 partes por mil. Asimismo, el Golfo Pérsico tiene su agua superficial con una salinidad superior a 40 partes por mil.

El Mar Muerto, situado en los límites entre Palestina y Jordania, es en realidad un lago salado de forma alargada con una superficie de 926 kilómetros cuadrados, encontrándose a 392 metros debajo del nivel del Mediterráneo. Sus aguas son tan densas por su salinidad que un hombre flota en ellas sin esfuerzo. Los ojos arden irritados por la luz que se refleja en la sal y si se trata de beber el agua, es de un sabor intolerable. Al salir del agua, es necesario limpiar el cuerpo con agua fresca para desprender la salmuera que se le adhiere.

Muchos objetos así como los detritos fluviales, flotan sobre el agua, en vez de hundirse en su seno. Tan extraordinaria concentración salina se debe al clima cálido y seco, que produce una intensa evaporación. Las sales aportadas por los ríos se han ido concentrando progresivamente y se calcula que la totalidad de las sales actualmente disueltas en este Mar Muerto necesitaron más de 30 mil años para acumularse. Esta masa de agua se halla tan cargada de sales, sobre todo de cloruro de magnesio, que un litro de agua de la zona superficial contiene casi 10 veces más de sales que el agua normal del océano, es decir, tiene 275 gramos de sales.

Sin embargo existen otros mares interiores en que la salinidad disminuye, al grado de que sus aguas resultan prácticamente dulces, tal es el caso del Mar Báltico situado entre Suecia, Polonia y la URSS, en donde la salinidad decrece regularmente hasta valores que no rebasan una parte por mil.

Variaciones de salinidad

MAR	SALINIDAD %
Golfo de botnia	5.0
Báltico	1-10
Promedio	34-35
Mar de los Sargazos	38
Golfo Pérsico	40
Mar Rojo	225

En la zona costera, en las lagunas litorales y en las áreas donde los ríos se abren hacia el mar formando los esteros, la salinidad se presenta baja descendiendo desde la boca hasta su interior llegando a alcanzar concentraciones de cero partes por mil, sobre todo en aquellos lugares donde se deja de sentir el efecto de las mareas conociéndose sus aguas como salobres. En estas zonas estuarinas la salinidad presenta una variación estacional notable. Generalmente disminuye en la época de lluvias y aumenta en la de sequía, pero en las altas latitudes la variación estacional se invierte siendo en verano cuando se da el mínimo de

salinidad, porque los ríos aumentan su caudal a consecuencia del deshielo.

Aunque generalmente las aguas estuarinas están más diluidas que las oceánicas, se localizan zonas cálidas en donde la evaporación es muy elevada, presentándose salinidades superiores a la del mar. Casos extremos se pueden encontrar en lagunas costeras con poca profundidad y con escasa comunicación con el mar, como por ejemplo la Laguna Madre en México, que tiene salinidad de 65 partes por mil y el Sivash, en el Mar de Azof, que llega a 132 partes por mil.

La salinidad interviene directamente sobre las características físicoquímicas del agua del mar relacionándose con la temperatura, la densidad y el pH; caracteriza las masas de agua oceánicas e influye en la distribución de los seres vivos, ya que sus estructuras y funcionamiento están íntimamente ligados a las variaciones de la salinidad.

Esta propiedad también es importante para la navegación tomándola en cuenta los arquitectos navales para el diseño de sus embarcaciones. Por ejemplo, la baja concentración de sales del Mar Báltico presenta dos consecuencias; como el agua es menos densa, es decir, menos pesada, la flotabilidad de los barcos disminuye de modo sensible, lo cual hace que se cambie el tonelaje de los que van a navegar en él y además esta agua se congela más fácilmente que el agua de mayor salinidad, por lo tanto, los puertos sufren la consecuencia y sólo son utilizables en ciertas épocas del año.

Otro de los factores que requieren de un mayor estudio es el pH, es decir, la relación entre la concentración de iones hidrógeno (H^+) y oxhidrilos (OH^-) que le confiere las características de alcalinidad o de acidez a una solución. El agua oceánica es ligeramente alcalina, y el valor de su pH está entre 7.5 y 8.4 y varía en función de la temperatura; si ésta aumenta, el pH disminuye y tiende a la acidez; también puede variar en función de la salinidad, de la presión o profundidad y de la actividad vital de los organismos marinos.

El valor del pH es un dato de importancia en la oceanografía química desde cualquier punto de vista que se considere, por lo que se ha hecho clásica la técnica de su registro en las naves científicas y en los laboratorios en tierra, a la vez que se toman otros datos de importancia, tales como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto etcétera, pudiéndolo medir por métodos colorimétricos casi ya no utilizados en la oceanografía química o por métodos eléctricos al aplicar el potenciómetro, resultando más precisos.



Figura 23. Potenciómetro.

Las medidas del pH no pueden hacerse con facilidad *in situ*, sino atendiendo a la presión atmosférica, lo que produce errores, por ser diferentes las presiones parciales del bióxido de carbono en la atmósfera y en las profundidades de que proceden las muestras. Hoy en día, estos errores son calculados por las tablas de corrección.

El conocimiento del pH del agua del mar tiene importancia en oceanografía biológica, ya que muchos fenómenos biológicos pueden estar regulados por el mismo; parece ser que incluso puede haber una influencia del pH en las migraciones de diversas especies de animales marinos. Por tal razón es de interés su determinación y valoración.

Estas propiedades químicas del agua del mar, al caracterizar masas de agua del océano, permiten seguir su curso y modificaciones a lo largo de miles de kilómetros del mar y así entender el desarrollo de muchas especies marinas, por lo que su conocimiento no sólo tiene un interés científico, sino que presenta una importancia práctica para el aprovechamiento de los recursos vivos del mar.



XIII. LOS CICLOS QUÍMICOS EN EL OCÉANO

DESDE la época primigenia de los océanos hasta la era actual, han pasado miles de millones de años, en los cuales se han presentado una serie de cambios fisicoquímicos y geológicos. Dentro de estos cambios, es importante resaltar que la mayor parte del agua existente en el planeta brotó del interior de la corteza terrestre como resultado de la actividad volcánica, durante su desarrollo geológico.

Asimismo uno de los fenómenos más significativos de la evolución de la Tierra fue la disociación fotoquímica del agua en hidrógeno y oxígeno, por acción de la luz ultravioleta de la alta atmósfera. Esto permitió que el oxígeno reaccionara con otros elementos como el carbono, el nitrógeno, el azufre y el hierro, dando las características químicas a la atmósfera y a los océanos, y facilitando que se originaran los organismos vivos.

Los ciclos químicos que se sucedieron en el océano durante 4 500 millones de años, fueron fundamentales para la evolución de la vida sobre el planeta, y para que la atmósfera pasara de sombría y maloliente a luminosa e inodora. El océano turbio se pobló de seres vivos que se fueron desarrollando y al aumentar en número invadieron la Tierra.

La aparición de la vida determinó que los cambios químicos en el océano primitivo se incrementaran. Este tenía poco o nada de oxígeno, contenía sales inorgánicas y complejas moléculas orgánicas que proporcionaron las bases para los primeros procesos vitales.

En un principio el oxígeno se acumuló, debido a la descomposición del vapor de agua a gran altura y posteriormente con la aparición de los vegetales verdes se iniciaron los procesos de síntesis de la materia orgánica por medio de la fotosíntesis, aumentando este gas hasta el punto que hoy la atmósfera contiene 20 por ciento de oxígeno gaseoso y una cantidad considerable de este elemento está disuelta en el agua del océano. Este fenómeno convirtió a la atmósfera y al océano en ambientes adecuados para los procesos metabólicos de los organismos que requieren oxígeno.

Durante el proceso de fotosíntesis se desprendieron cada vez cantidades mayores de oxígeno, que del océano pasaron a la atmósfera, la cual se fue modificando, originándose lo que se puede considerar como la atmósfera que ya no contiene metano, amoníaco, ácido cianhídrico, como la antigua y, por el contrario, presenta agua, nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono.

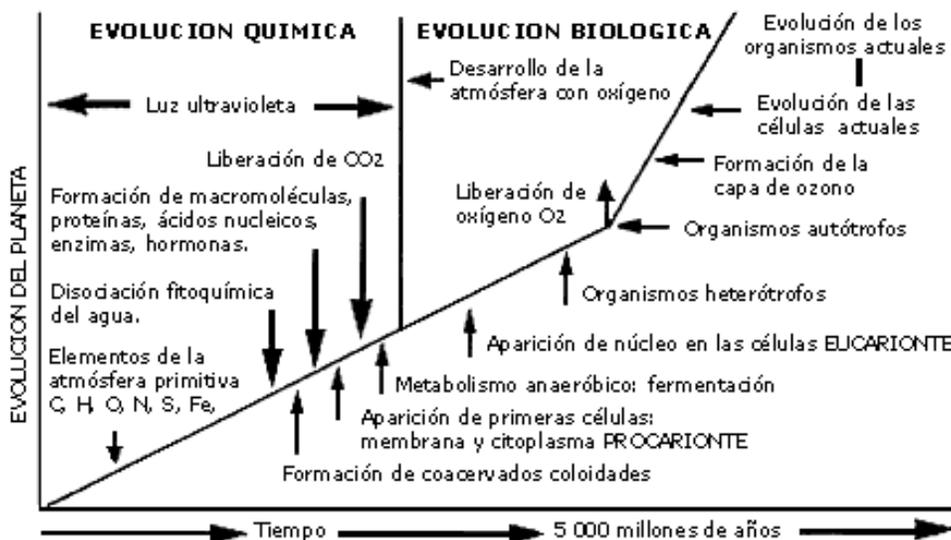


Figura 24. Evolución química.

Además en las zonas más elevadas de la atmósfera, por la intensidad de la radiación cósmica, provocó que

las moléculas de oxígeno se recombinaron y modificaron dando origen a una capa de ozono (O_3), situada a varios cientos de kilómetros de altura y que actúa como una excelente pantalla de protección contra las radiaciones de alta energía, como los rayos ultravioleta y los rayos X, lo que hizo que los seres vivos contaran con un mejor ambiente para desarrollarse.

El oxígeno tiene un comportamiento cíclico en el océano, se encuentra como componente de la atmósfera y llega al mar al disolverse en el agua, de donde lo toman los vegetales y los animales para su respiración. Con las corrientes y el oleaje la cantidad de oxígeno en el agua aumenta, pero también contribuyen a incrementar su cantidad los vegetales verdes, que durante el proceso de fotosíntesis, fijan el carbono y desprenden el oxígeno, como resultado de las reacciones químicas que efectúan, completándose el ciclo del oxígeno en el mar. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua del mar es inversamente proporcional a la profundidad, encontrándose en los grandes fondos marinos áreas carentes de este gas.

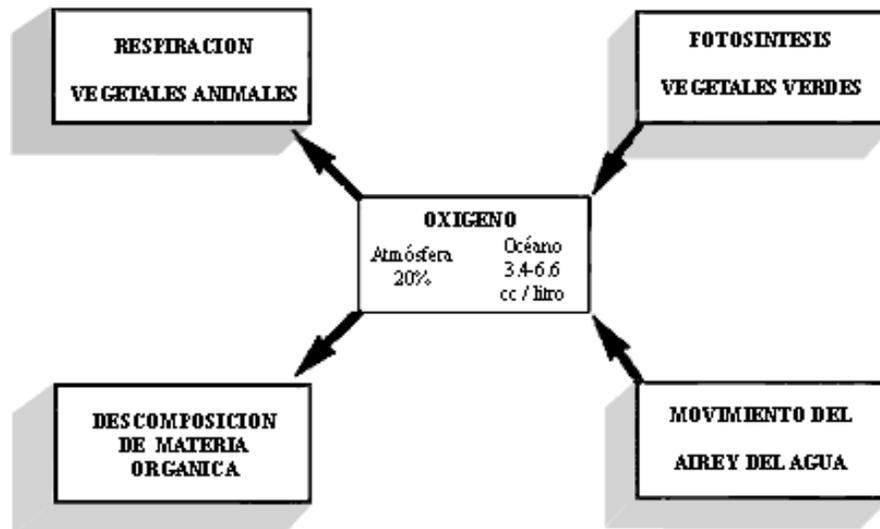


Figura 25. Ciclo del oxígeno.

En la mayoría de los océanos los ciclos químicos que actualmente se producen pertenecen, en gran parte, a un sistema oxidante. En algunas zonas, sin embargo, aparecen situaciones en que el oxígeno se ha agotado por la descomposición de sustancia orgánica, en una proporción grande para que resulte insuficiente el oxígeno proveniente de la atmósfera o de las plantas fotosintetizadoras y, por lo tanto, prevalecen condiciones de carencias de este gas o anóxicas. En los océanos estos sectores están limitados a lugares como las aguas profundas del Mar Negro o la Fosa de Curazao, en el Mar Caribe.

Para los procesos metabólicos de síntesis también es indispensable el bióxido de carbono, el cual se encuentra en el mar en diferentes concentraciones, llegando a él, fundamentalmente, desde la tierra y la atmósfera como desecho de los procesos industriales del hombre, que al quemar la materia lo desprende durante las reacciones de combustión. También las erupciones volcánicas submarinas producen el bióxido de carbono existente en los océanos.

Este bióxido de carbono es fijado por los vegetales verdes y junto con los nutrientes se transformó en sustancia orgánica, en la que queda acumulada la energía procedente del Sol, que es fijada por la clorofila, sustancia que le da el color verde a los vegetales.

Cuando los vegetales y los animales del mar realizan su respiración, utilizan el oxígeno que se encuentra disuelto en el agua y desprenden bióxido de carbono. Asimismo, cuando estos vegetales y animales mueren se desprende bióxido de carbono por la descomposición bacteriana, y es así como se repite el ciclo del carbono en el mar.

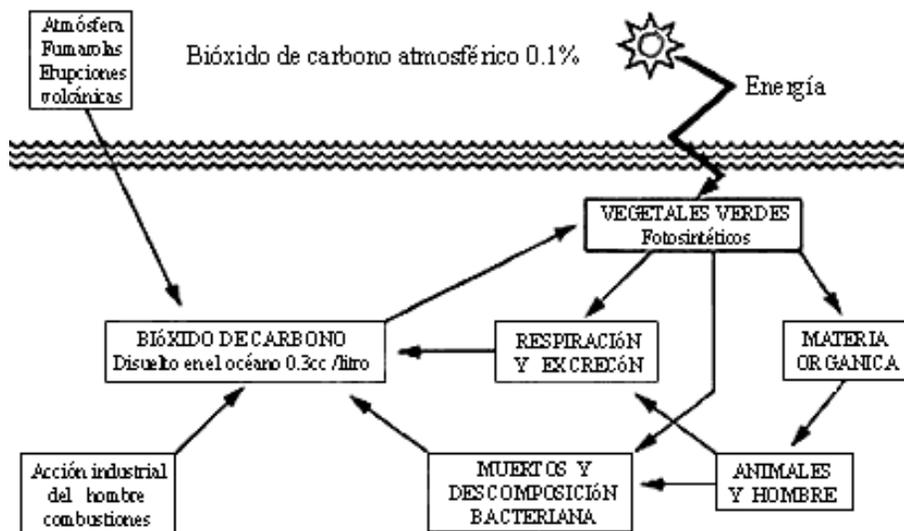


Figura 26. Ciclo del bióxido de carbono.

El carbono también se encuentra en las aguas oceánicas en forma de carbonatos, los que llegan al mar al disolverse en los continentes las rocas carbonatadas del tipo de las calizas, y al ser arrastrados los sedimentos hasta la costa por los ríos. Estos carbonatos, en especial el carbonato de calcio, son fijados por organismos como las algas coralinas, los corales y los moluscos, para formar sus exoesqueletos, que cuando mueren quedan depositados el fondo, siendo una fuente de estos carbonatos.

Dentro de los ciclos químicos del océano se encuentran el de los componentes químicos que intervienen en la salinidad la cual es característica de las aguas del mar.

La salinidad del océano está dada, fundamentalmente, por el sodio y el cloro, además de otros elementos como el magnesio, el calcio y el potasio, cuyas cantidades han variado de acuerdo a sus características fisicoquímicas a través de los años. Estos elementos proceden de la disgregación de masas de la tierra, que son arrastradas por las aguas de la costa a diferentes zonas oceánicas y también pueden originarse por el envejecimiento de los sedimentos oceánicos.

Los compuestos químicos que se formaron de estos elementos, como el cloruro de sodio, que es uno de los principales, tienen un comportamiento cíclico, lo que permite encontrarlos en proporciones constantes en el agua del océano. Este hecho ha sido demostrado al analizar las muestras recogidas en todo el mundo durante las expediciones oceanográficas.

Estas sales llegan al océano, principalmente, por los aportes de los ríos, como producto de la disgregación de las rocas por la acción de los factores del clima en la tierra; en el mar se disuelven en el agua, donde las fijan los organismos vivientes o se sedimentan colaborando a formar la topografía de los fondos marinos, pero volviendo a combinarse con las aguas al morir los organismos o al desgastarse la corteza de sedimentación, estableciéndose el ciclo químico de las sales en el océano, que hace que su composición química se mantenga constante.

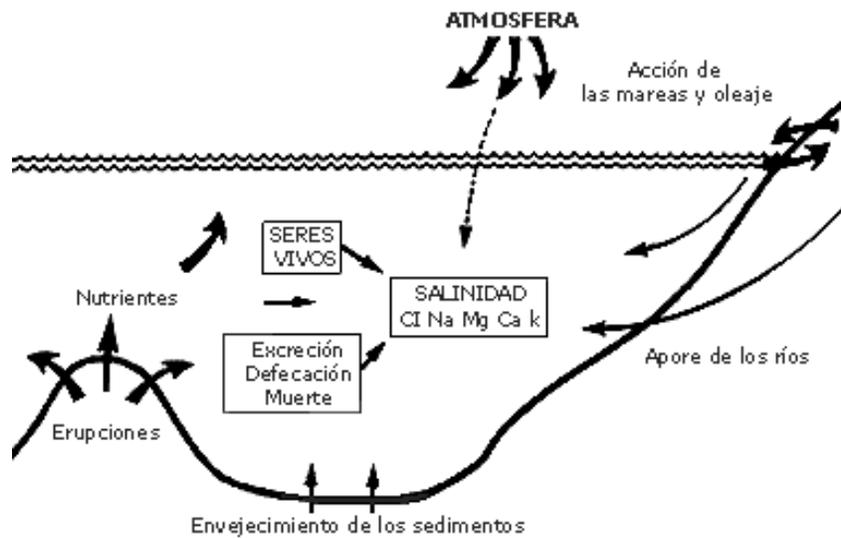


Figura 27. Ciclo de las sales en el mar.

Otro de los ciclos químicos que se realizan en el mar, es el de los elementos llamados nutrientes que intervienen, de manera básica, en la vida de los océanos. Estos nutrientes son indispensables para la producción de alimento hecha por los vegetales. Están compuestos a base de nitrógeno, fósforo, sílice, manganeso, cobre y hierro; en su ciclo intervienen una serie de procesos químicos y biológicos, que determinan su concentración en las diferentes capas del agua del mar.

Cuando los organismos expulsan los desechos de su metabolismo o mueren, la materia orgánica queda en las capas superficiales y se hunde por gravedad hasta las profundidades donde, por acción de las bacterias y de la actividad química, se descompone, liberándose así los nutrientes, los cuales pueden ser utilizados nuevamente por otros vegetales para elaborar nueva sustancia orgánica por el proceso de fotosíntesis y pasar a los animales.

La circulación del agua interviene en la concentración de estos nutrientes en las diferentes capas del océano y se puede considerar que los nutrientes se encuentran en los primeros 1 000 metros de profundidad y la degradación de la materia orgánica puede ocurrir en toda esta zona; mientras que la fotosíntesis se realiza en los 100 metros de profundidad oceánica en la llamada zona eufótica, que es aquella en que penetra la luz del Sol.

Los nutrientes salen nuevamente a la superficie, por corrientes de agua ascendentes, que se producen al cambiar la temperatura de las diferentes masas de agua, en las llamadas zonas de surgencia o afloramiento, donde los toman los pequeños vegetales que forman el fitoplancton, los que al utilizar la energía solar y el bióxido de carbono vuelven a elaborar sustancia orgánica.

El principal elemento de estos nutrientes es el *nitrógeno*, cuyo ciclo en el mar es complejo. Este elemento se encuentra en estado gaseoso en la atmósfera y parte de él disuelto en el agua del mar; químicamente es muy estable y el que está en el mar responde con facilidad a una multitud de reacciones químicas y biológicas, encontrándose, generalmente, en forma de nitritos y de nitratos gracias a la acción de las bacterias; estos compuestos son fácilmente asimilables por los vegetales verdes. Este nitrógeno asimilado representa el 35 por ciento del total del océano y el otro 65 por ciento se presenta en forma de nitrógeno gaseoso.

La provisión y distribución del total de nitrógeno se lleva a cabo por los aportes continentales, por las corrientes oceánicas y por las excreciones y muerte de los vegetales y animales marinos. El nitrógeno llega en forma de compuestos nitrogenados no asimilables, pero gracias a la acción de las bacterias y de las algas verde-azules, durante el proceso llamado *nitrificación*, se transforman en nitrógeno soluble, que es fijado por los vegetales verdes para formar nuevamente materia orgánica, la que es aprovechada por ellos o por los animales cuando se los comen, repitiéndose el ciclo.

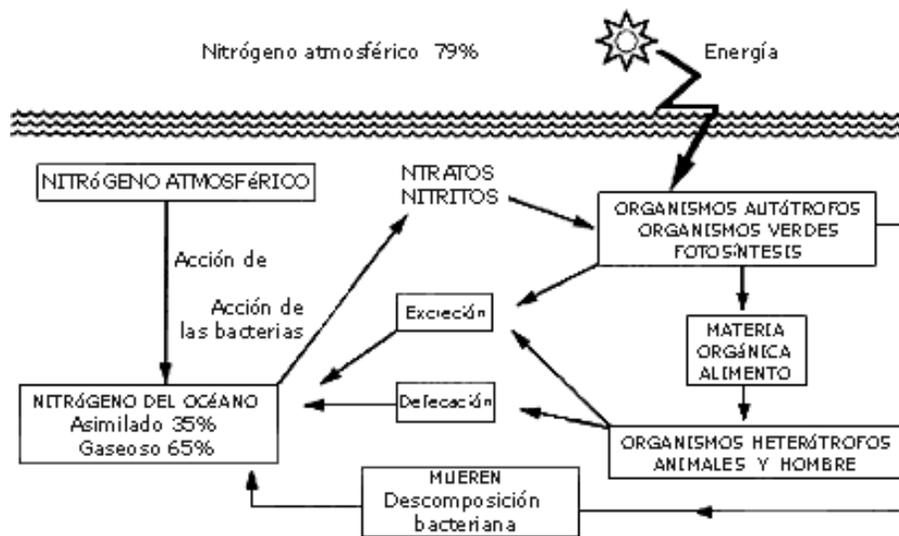


Figura 28. Ciclo del nitrógeno.

Los ciclos químicos del océano son muy complejos, por lo que no se les conoce profundamente. Los ciclos de los metales que sólo presentan rastros, los de los gases disueltos y los de la materia orgánica, son quizás los más difíciles de comprender, pero se continúa trabajando para llegar a ello. Para subrayar la importancia de este conocimiento, basta considerar la plaga que afecta a la humanidad: la contaminación.

En la actualidad, la contaminación ambiental preocupa mucho, ya que se ha convertido en uno de los problemas más críticos de la supervivencia en este planeta. Los subproductos de la actividad humana que pueden tener efecto directo sobre los ciclos químicos del medio oceánico, son los desperdicios sólidos de toda clase y naturaleza, los radiactivos, los subproductos de síntesis orgánica a gran escala, los insecticidas, etcétera. El hombre ha pensado que tiene en el océano un auxiliar potencial para los problemas de eliminación de residuos; sin embargo, se debe alcanzar una mejor comprensión de los procesos de transporte y de mezcla, del mecanismo de los diversos ciclos químicos de los elementos y compuestos del agua del mar, para conservar sus características, ya que si se agregan nuevos elementos y compuestos, se podrían cambiar los ritmos propios de estos ciclos, así como sus productos finales.

La comprensión de los fenómenos físicos, químicos, biológicos y geológicos del océano, junto con la inventiva del hombre para aprovechar este medio en su propio beneficio, es probablemente el más importante esfuerzo científico que necesita hoy el mundo, si es que el hombre espera gozar de una larga y próspera existencia en su planeta.



XIV. LA UTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS QUÍMICOS DEL AGUA DE MAR

EL APROVECHAMIENTO de los recursos químicos del océano se encuentra en sus inicios, debido a que es necesario procesar grandes cantidades de agua del mar para lograr obtenerlos en pequeñas proporciones lo que hace, hasta el momento, en la mayor parte de los casos incosteable su extracción.

Uno de los compuestos en el que se ha logrado un bajo costo de explotación es el *cloruro de sodio* o sal común, que es aprovechada por el hombre directa o indirectamente, calculándose que en las salinas de todo el mundo existe una reserva para atender las necesidades de la humanidad durante mil años; sabiendo que como término medio, cada ser humano consume al año 8 kilos de sal.

Otro de los compuestos que se extrae de manera costeable, es el *magnesio*, gracias a su abundancia. Se encuentra disuelto en el agua del mar acompañado por otras sales como las que se forman a base de sodio, potasio y calcio, por lo que es imposible obtenerlo por la simple evaporación, ya que todas las sales que están con él cristalizan simultáneamente y es preciso recurrir a un método que obligue al magnesio a precipitarse por sí solo formando la magnesia, que es un óxido de este elemento, obtenido por la utilización de la cal. El empleo de este metal tan ligero en diversas industrias ha permitido el desarrollo de los métodos de extracción en el presente siglo, y en la actualidad la mayor parte de este elemento se obtiene del agua del mar a pesar de que también se encuentra en tierra.

La planta Dow Chemical Company fue la primera que logró extraer, en 1916, una tonelada de magnesio marino. A partir de 1943, en los Estados Unidos se ha incrementado esta industria y para ese año se lograron obtener 82 000 toneladas, sobre una producción total en el mundo de 240 000 toneladas, es decir el 34 por ciento. Como actualmente se consume en cantidades cada vez más grandes en la industria de las aleaciones ligeras, cimiento de la navegación aérea y de la industria del automóvil, la producción mundial alcanza más de 10 millones de toneladas.

El magnesio, fácilmente oxidable, arde al aire, produciendo una llama blanca de brillo deslumbrador, por lo que los fotógrafos lo usaban en polvo, en hilos o en cintas, que actualmente han sido sustituidas por bombillas del mismo metal, de manejo más cómodo y seguro.

El *potasio*, también es un elemento que el hombre obtiene por métodos rentables de las aguas marinas en forma de hidróxido de potasio o potasa, para utilizarlo principalmente como abono. Además se emplea para producir jabones y detergentes blanqueadores y en la fabricación de explosivos.

Su extracción es muy difícil porque con él también se encuentran el sodio y el magnesio, con los que se forman sales dobles, como el cloruro o el sulfato magnésico-potásico.

El potasio no se precipita en las salinas, sino que permanece en salmuera, es decir, agua cargada de sal, en donde se concentra hasta más de 100 veces a la proporción normal del agua del mar.

La producción de potasa ha aumentado en el mundo. En los Estados Unidos se extrae explotando las aguas madres de las salinas del mar y de los grandes lagos salados del interior, obteniendo cientos de miles de toneladas de potasa, que sin embargo, no bastan para satisfacer sus necesidades, cada vez mayores. Los ingleses intensificaron la producción de la potasa en el Mar Muerto. Los italianos instalaron fábricas en Nápoles, entre otros países.

El último elemento que se considera que se obtiene con tecnología costeable es el bromo. Es curioso conocer que ésta fue la primera sustancia extraída del agua del mar: en 1826, Balard, procesando la salmuera tratada por el cloro, que presenta un color rojo anaranjado, logró separar el bromo.

Actualmente lo extraen por este mismo método, ponen en contacto el agua marina concentrada en salmuera con el gas cloro presentándose una reacción en la que se disuelven los bromuros. Estos bromuros, una vez liberados, son arrastrados por su mezcla con otros componentes; luego se agrega el ácido sulfúrico que libera el bromo, cuyos vapores son condensados. Como el transporte del bromo es difícil y peligroso, las fábricas que lo producen lo comercializan elaborando productos derivados que le entregan a la industria para su utilización.

En la primera Guerra Mundial se empleó en la fabricación de gases asfixiantes; antes se usaba para preparar materias colorantes en farmacia y en fotografía que sólo consumían insignificantes cantidades. Desde 1940, gracias al descubrimiento de las sustancias antidetonantes que se preparan con bromo, la producción mundial de este elemento llegó a las 30 000 toneladas, y desde entonces tiende a aumentar. En nuestros días, la gran mayoría del bromo que se utiliza es de origen marino y se consumen cientos de toneladas al año en preparación de gasolinas.

Existen otros elementos que en el agua de mar se encuentran en bajas proporciones, pero se han logrado utilizar obteniéndolos a partir de los organismos que los fijan en su cuerpo o en sus esqueletos, tal es el caso del *calcio* que en forma de carbonatos se encuentra en gran número de seres vivos como las algas coralinas, los foraminíferos, los corales, los moluscos, los artrópodos, etcétera.

Cuando los restos de estos organismos caen al fondo del océano se acumulan sedimentos llamados, según el caso, barros de foraminíferos, barros coralinos, arenas conchíferas, etcétera y que son ricos en calcio formando calizas que el hombre explota industrialmente.

Otros elementos además de presentar concentraciones mínimas, no son fijados por los organismos, por lo que son llamados, desde el punto de vista industrial, elementos secundarios. Algunos de ellos, como el hierro, el cobre y el oro han llamado la atención del hombre.

El *hierro* se encuentra en estado de partículas de hidróxido férrico, cuya solubilidad es débil en el medio marino. Se origina de la erosión de rocas continentales llegando al mar por los aportes fluviales, formando yacimientos que se han acumulado desde el periodo Terciario. También este elemento es asimilado por organismos marinos, sobre todo las diatomeas, donde se encuentra en una concentración 6 000 veces mayor que en el agua marina.

El *cobre* llega al océano por los aportes de agua dulce, que es más rica en este elemento. Este metal interviene en el ciclo vital de los organismos marinos de diversas formas, por ejemplo favorece la fijación de las larvas de las ostras y su metamorfosis hasta la fase adulta.

Si la concentración del cobre es de un gramo por metro cúbico, se convierte en tóxica para los organismos marinos. Esta propiedad ha sido utilizada por el hombre para conservar la superficie sumergida de las embarcaciones, limpia de organismos.

Se ha calculado que un metro cúbico de agua del mar contiene 0.008 miligramos de *oro* y que reunido todo el oro del mar, se formaría un cubo de 800 metros de lado, con 10 000 millones de toneladas que se estima que contiene todo el volumen del agua oceánica. De ahí que algunos hombres se propusieran extraer el oro marino, dándose cuenta posteriormente que no era costeable.

Además, entre los elementos secundarios se encuentran también aluminio, yodo, arsénico, plomo, uranio, cobalto, níquel, mercurio, plata, nitrógeno y muchos más de interés para el hombre, cuya extracción industrial por el momento no es rentable pero, debido al descenso de las reservas continentales de estos elementos, se tiene que pensar que en el futuro el mar representaría el lugar de donde obtenerlo.

El mayor compuesto que se encuentra formando a los océanos es el *agua pura* libre de sales. Los adelantos de la ciencia y la tecnología permiten al hombre obtener agua dulce del mar por métodos cada día más baratos; sin embargo, han pasado muchos años para que empiece a resultar costeable desalinizar el agua de mar y competir con los suministros naturales de agua dulce.

El océano está convirtiéndose cada vez mas en una fuente para la creciente demanda mundial de agua dulce, especialmente en las regiones desérticas y en las fajas de agua dulce. La producción mundial de agua desalinizada suma actualmente algo menos de un millón de metros cúbicos diarios, valuado en varios millones de dólares anuales.

En conclusión, está claro que los océanos tienen un gran potencial como fuente de minerales y como fuente de agua dulce para satisfacer las crecientes necesidades humanas, pero hay que tomar en cuenta que los recursos potenciales no tienen valor, a menos que se les pueda explotar de manera costeable, y en competencia con el aprovechamiento de otros recursos; para esto se debe acelerar la investigación científica de los océanos y enriquecer la tecnología, desarrollando nuevos métodos, a fin de utilizar sus recursos químicos potenciales con mayor efectividad.



XV. METODOLOGÍA Y EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE LA OCEANOGRAFÍA QUÍMICA

CON excepción de los seres vivos que se encuentran en el océano y del material sólido inorgánico que tiene en suspensión, el mar es una solución acuosa formada por agua que disuelve a gran cantidad de elementos y compuestos. El comportamiento químico de esta solución es muy complejo y es estudiado por la oceanografía química.

Cualquier investigación realizada por esta ciencia se basa en una serie de datos que deben ser conocidos profundamente debido a que toda observación de la química del océano está influenciada por otras variables, básicamente físicas, aunque también intervienen algunas geológicas y biológicas.

Las principales variables o características fisicoquímicas que interaccionan en el mar son la temperatura, la salinidad, la concentración de nutrientes, y pueden cambiar con respecto al tiempo y al espacio donde se presentan; es importante conocer la periodicidad y extensión de estas modificaciones en el océano, con lo cual los oceanógrafos pueden pronosticar el estado del mar en forma semejante a los pronósticos meteorológicos.

En el caso de variabilidad en el tiempo, es necesario repetir durante años, meses, días y horas el registro de datos en la misma zona, mientras que en el caso de cambios en el espacio, es deseable obtener observaciones simultáneas en diferentes zonas del océano, necesitándose el uso de 2 o más barcos o unidades de registro. Los barcos deben permanecer con el mínimo de deriva y navegar a bajas velocidades cuando se realiza una determinación.

La mayoría de las acciones y algunas observaciones se hacen mientras el barco está más o menos fijo en un punto del mar, tales como la toma de muestras de agua y temperatura a diferentes profundidades, muestras de fondo, muestreos biológicos, mediciones de visibilidad, y otras.

Para hacer estudios de oceanografía química, las muestras de agua del mar se recolectan de diferentes profundidades por medio de instrumentos especiales. Las muestras obtenidas son colocadas en frascos de vidrios y analizadas algunas veces en el barco y otras son llevadas a los laboratorios en tierra, para conocer sus constituyentes, tales como salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes, entre otros.

Como los métodos de análisis para cada constituyente químico son diferentes, el volumen necesario, de la muestra, el tipo de frasco usado, el tiempo permitido antes del análisis y los métodos de toma de muestras son especiales en cada caso.

Las muestras para análisis del *oxígeno disuelto* en el agua del mar son las que generalmente se recolectan en primer lugar y se colocan en frascos de vidrio color ámbar, de 250 milímetros con tapón de vidrio esmerilado.

Antes de la toma de las muestras, los frascos y el tapón deben ser enjuagados con una pequeña cantidad de agua de la muestra, girando la botella para que el agua moje todas las paredes evitando ser agitadas.

Teniendo en cuenta que el contenido de oxígeno disuelto varía con rapidez en la muestra, es conveniente efectuar la primera determinación a bordo, inmediatamente después de la colecta, en el propio laboratorio del barco. La segunda dosificación se puede hacer en el mismo barco, o bien en los laboratorios de tierra.

Las muestras de oxígeno disuelto deben ser procesadas lo más rápido posible y su contenido se determina por el método Winkler; éste consiste en la oxidación del hidróxido de manganeso por el oxígeno del agua del mar, cuando se les añade ácido; el manganeso oxidado reacciona con yoduro de potasio y pone en libertad una cantidad de yodo equivalente a la cantidad de oxígeno que se titula, es decir, se calcula su

contenido, con una solución valorada de tiosulfato de sodio, usando como indicador el almidón soluble, y la cantidad de almidón que se gasta corresponderá a la cantidad de oxígeno disuelto en la muestra.

El precipitado que se forma será más o menos de color castaño, según sea el contenido de oxígeno del agua. Si el precipitado toma un tono blanco, significa que no hay oxígeno o es escaso; si es amarillo claro el contenido de oxígeno es pobre, si es castaño existe mucho gas.

Este procedimiento simple y más o menos exacto ha sido sustituido por otros, como el del C^{14} desarrollado por el oceanógrafo Steeman Nielsen, en el que se agrega a la muestra C^{14} , se expone a la luz y después se mide la cantidad de carbono marcado que es fijado por los pequeños vegetales verdes marinos cuando realizan su fotosíntesis, pudiéndose calcular la cantidad de oxígeno presente.

Actualmente existen aparatos electrónicos para determinar oxígeno disuelto, pero la precisión de algunos de ellos deja todavía mucho que desear; además, la inmersión de los elementos a fin de recoger muestras a profundidades medianas y grandes aún se encuentra en experimentación.

En relación con el *nitrógeno disuelto* no se puede determinar por métodos químicos directos, por lo que se usan las técnicas gasométricas; para lo cual la muestra de agua marina se acidifica y se le hace el vacío, o bien se hierve para liberar los gases. El gas residual que queda después de haber sido hervida la muestra o después que se ha aplicado el vacío, se determina como nitrógeno más los otros gases inertes como el argón, helio, etcétera.

La presencia de otros gases disueltos como el sulfuro de hidrógeno o el ácido sulfhídrico, puede ser detectado por su característico olor a huevo podrido.

Actualmente, para medir los gases disueltos en el agua oceánica, se han diseñado aparatos llamados *autoanalizadores químicos*, que pueden determinar sus cantidades en base a medios calorimétricos. Estos aparatos pueden además registrar la presencia de otros componentes del agua del mar como nitratos, nitritos, silicatos, fosfatos, etcétera. Además tienen la gran ventaja de reducir los posibles errores de manipulación.

Las cantidades de gases disueltos en el agua del mar se reportan en milímetros o centímetros cúbicos, a presión y temperatura normales.

El agua del mar contiene en promedio 35 gramos de sales por cada litro de agua. La determinación química de la concentración de las sustancias disueltas que intervienen en la salinidad del océano no es difícil pues ciertos elementos disueltos, tales como el cloro y sodio, se encuentran presentes en muy alta concentración, formando el 80 por ciento de las sales disueltas, mientras otras, como el manganeso, el níquel, el oro, etcétera, están en pequeñas cantidades y algunas de ellas no han podido ser determinadas en el agua del mar, y sólo se han encontrado en organismos y depósitos salinos. Además del sodio y el potasio, constituyentes difíciles de determinar con precisión, es virtualmente imposible separar sustancias relacionadas con ellos, tales como fosfatos, arseniatos, calcio, estroncio, cloruros, bromuros y yoduros. En estos casos, los elementos combinados se determinan juntos y se reportan como si fueran uno solo; esto es, el calcio y el estroncio se reportan como calcio, y los cloruros, bromuros y yoduros se reportan a su vez como cloruros.

Hasta hace pocos años, la salinidad se calculaba mediante una dosificación química normalizada, método creado por el oceanógrafo danés Knudsen, el que se basa en determinar la clorinidad del agua del mar, es decir, la cantidad de cloro por litro de agua, la cual es proporcional a la cantidad de sales.

Las muestras de agua para la determinación de salinidad son preservadas en frascos especiales que tienen un tapón de vidrio o porcelana con un sello de hule, el que se cierra herméticamente por medio de un dispositivo que los mismos llevan en el cuello.

Los frascos son numerados, almacenados y colocados en sus cajas. Si las muestras se van a analizar a

bordo, se deben dejar reposar un mínimo de 6 horas para permitirles que adquieran la misma temperatura, tanto del laboratorio como de los aparatos y reactivos químicos que se usan en el análisis.

La clorinidad se determina en el método de Knudsen, por medio de una solución de nitrato de plata, la cual se valora comparando su acción sobre el agua del mar llamada "normal", que sirve de patrón y por lo general contiene más o menos 19 gramos de cloro por kilogramo de agua del mar. Bajo los auspicios de la Asociación Internacional de Oceanografía Física, esta agua patrón, una vez verificada, se vende en ampollas cerradas, siendo distribuidas por el Laboratorio Oceanográfico de Charlott en Lund, Dinamarca. A fin de determinar la clorinidad de la muestra con la precisión exigida en los trabajos de oceanografía química, en los que se requiere una exactitud hasta centésimas, en estos laboratorios se utiliza toda una batería de pipetas, buretas, etcétera, rigurosamente calibradas. Con este método se logra una aproximación de más o menos 2 centésimas de gramo por mil de la salinidad.

Desde hace 3 lustros, gracias a las investigaciones de los oceanógrafos anglosajones, la industria ofrece aparatos de laboratorio basados en el principio de la inducción, y que pueden proporcionar el valor de la salinidad con la misma precisión que con el método Knudsen. La ventaja del instrumento electrónico es la de poder utilizarse a bordo, y permite además procesar un número de muestras considerables.

Aparte de estos métodos directos que se basan en las propiedades químicas, otros métodos para determinar la salinidad son por medios físicos, como la densidad, índice de refracción, temperatura de congelación y conductividad eléctrica.

El primer método consiste en medir directamente la *densidad* de la muestra del agua, pasándola por un aparato especial, el *picnómetro*, método muy preciso, aunque largo y minucioso que exige infinitas precauciones y no puede emplearse para un trabajo en serie.

La determinación de la salinidad por medio de la densidad también se puede medir directamente introduciendo en el agua el aparato llamado *densímetro* o *hidrómetro* en el que se registra su peso específico, que cambia según la cantidad de sales disueltas que contenga.

Este método se utiliza cuando no se necesita gran precisión, como en el caso de estudios biológicos que solo requiere aproximaciones a 0.1% y no de 0.01% como en los de oceanografía física y química.

Para medir la salinidad en base al *índice de refracción* se utiliza el *refractómetro*, que permite conocer la desviación de los rayos luminosos según la cantidad de sales, iluminando una escala; la parte iluminada aumenta de acuerdo a como se incrementa la salinidad en la muestra. Es un método con el que se obtienen valores aproximados, con la ventaja de ser rápido y permite utilizar unas gotas de la muestra.

El método por medio de la *temperatura de congelación* consiste en determinar la temperatura en la que la muestra de agua marina se congela, siendo esta temperatura más baja mientras más salada sea el agua. Este método es muy laborioso y requiere de un laboratorio bien equipado para obtener resultados exactos.

Actualmente el método más usado para medir con precisión la salinidad se basa en la determinación de la *conductividad eléctrica* del agua del mar. El agua pura no es conductora de electricidad, pero cuando contiene sales disueltas, sus moléculas se encargan de transportar cargas eléctricas, siendo esta conductividad directamente proporcional a la cantidad de sales que existen en disolución.

A partir de numerosas determinaciones simultáneas de salinidad y conductividad, se han podido elaborar tablas, en las que, después de una corrección por el efecto de la temperatura, se puede determinar la salinidad con una precisión semejante a la obtenida con el método de clorinidad, con la ventaja de que la medida de la conductividad es más rápida y fácil. Se han construido aparatos, como la batisonda, que va registrando la conductividad de forma continua conforme desciende, registrando la salinidad a diferentes profundidades.

Cada uno de estos métodos ofrece ventajas e inconvenientes y se selecciona de acuerdo a la exactitud que

las investigaciones exijan; sin embargo, para el trabajo de rutina el más utilizado es el método químico que mide la clorinidad.

Además de los gases y elementos en disolución, interesa a los oceanógrafos químicos el contenido de sales nutritivas, como los fosfatos, los nitratos y el sílice, que condicionan la abundancia y la distribución de los seres vivos en el seno de las aguas oceánicas. La muestra se guarda en botellas de plástico de 200 mililitros de capacidad, dejando un espacio de aire de aproximadamente 2 centímetros; se guardan en refrigeración a menos de 18° C hasta su análisis. Estas determinaciones se efectúan en los laboratorios, mediante dosificaciones químicas, o bien, por medio de procedimientos fotométricos.

Son muchos los datos que faltan de conocer de la química del océano, por lo que los científicos están haciendo cada vez mayores esfuerzos para incrementar estos conocimientos y así contar con la información que permita entender los fenómenos químicos que se desarrollan en las aguas marinas y para aprovechar la enorme riqueza que representan estos recursos.



EDMOND HALLEY (1656-1743)

Astrónomo y geofísico inglés quien fue uno de los primeros científicos que observó la salinidad del mar y sugirió que la salinidad del océano se iba incrementando al paso de los años, y que la antigüedad de las cosas podía ser calculada de acuerdo a su salinidad.

Consideraba que las interacciones entre la tierra y el océano durante todo el tiempo geológico habían sido iguales a las que observaba en 1715, y se lamentó que los antiguos griegos y romanos no hubiesen medido la salinidad del mar de modo tal que se pudiera conocer el incremento de la salinidad en 2 mil años, pensando que al principio el contenido de sal era nulo.

Fue astrónomo del Colegio de la Reina en Oxford, estableció la periodicidad en ondas elípticas del movimiento de los cometas. Predijo el retorno de un cometa brillante en diciembre de 1758, lo que sucedió después de su muerte; a este cometa se le llamó "cometa de Halley" en su honor; aparece cada 75 o 76 años, siendo la última vez que se observó en 1985-1986.

Realizó también investigaciones sobre astronomía estelar, matemáticas, en especial geometría y geofísica.

DITTMAR WILLIAM (1833-1892)

Químico escocés. Trabajó en el Laboratorio Bunsen de Heidelberg y en la Universidad de Manchester. Analizó muestras de agua de mar durante el viaje del H.M.S.Challenger de 1873-1876 estableciendo el postulado de que "aunque la salinidad del agua del mar varía de lugar a lugar, las proporciones de los principales constituyentes permanecen casi constantes", de gran trascendencia en la oceanografía química.

Estudió el peso atómico del platino y la composición gravimétrica del agua.

ALFRED LOTHAR WEGENER (1880-1930)

Meteorólogo, geólogo y geofísico alemán, creador de la teoría de la deriva continental. Propuso que un océano continuo rodeaba a una masa de tierra que posteriormente formó a los continentes.

Realizó cuatro expediciones científicas a Groenlandia, muriendo en la última de ellas. Con los datos que obtuvo estudió los cambios que se presentaron en las glaciaciones en relación con las posiciones relativas de los polos. También propuso una teoría sobre el origen de los cráteres lunares.

HESS HARRY HAMMOND (1906-1969)

Geólogo y geofísico norteamericano. Trabajó en la Universidad de Princeton, Estados Unidos. Estudió los fondos oceánicos hasta profundidades de 11 kilómetros y describió cientos de montañas marinas del Océano Pacífico y a un tipo de ellas las designó guyots en honor del geógrafo suizo-norteamericano Guyot.

Realizó investigaciones sobre la formación de la corteza y la expansión de los fondos oceánicos, proponiendo las bases para el desarrollo de la sismografía.

Indice



GLOSARIO

aerobio. Organismo que realiza su respiración utilizando oxígeno.

alga. Vegetal acuático que realiza su fotosíntesis por medio de pigmentos verdes, rojos, amarillos o cafés. Puede estar formada por una o varias células.

amplitud de marea. Diferencia entre la marea baja y la alta.

anaerobio. Organismo que respira sin utilizar el oxígeno.

angiosperma. Vegetal con flores que presenta una cavidad cerrada u ovario, dentro de la cual están los óvulos y en ellas quedan encerradas las semillas.

antracita. Carbón fósil seco que arde con dificultad.

anuros. Clase de los anfibios que no presentan cola como la rana, sapo, etcétera.

arrecife. Agrupación de rocas que se encuentra bajo las aguas del mar. Cuando está formado principalmente por corales se le denomina arrecife de coral.

bacteria. Organismo unicelular microscópico sin núcleo, pero con gránulos de cromatina dispersos en el citoplasma y provistos a veces de organoides de la locomoción llamados flagelos. Muchas especies viven en aguas dulces o marinas, en el suelo y en materias orgánicas en putrefacción; otras están asociadas con organismos pudiendo ser patógenas.

bajamar. Descenso máximo de la marea.

batimetría. Medición de las profundidades del mar.

bentos. Organismos que viven en el fondo de los mares, lagos y ríos.

bioluminiscencia. Propiedad que presentan algunos seres vivos que les permite emitir luz propia.

cantil. Escalón que se forma en la costa o en el fondo del mar.

celenterado o cindaria. Animales invertebrados, en su mayoría marinos, provistos de una boca rodeada por tentáculos con células urticantes; forma fija llamada pólipos y libre nadadora o medusa. Vgr. las medusas y las anémonas de mar.

cicadal. Vegetal primitivo, la mayoría fósil, tropical y subtropical con su tronco sin ramas, llega alcanzar 20 metros de altura y sus hojas forman una copa.

ciclón. Viento con gran velocidad que gira formando grandes círculos.

cima. Parte más alta de los montes, cerros, etcétera.

clorofila. Pigmento verde que presentan la mayoría de los vegetales y que les permite realizar la fotosíntesis.

cocolitofórido. Organismo microscópico que presenta flagelos como órganos de locomoción y un exoesqueleto formado por pequeñas piezas calizas en forma de rombo.

coloide. Estado de algunos cuerpos formado por dos fases, una continua o dispersora y otra dividida o dispersa, entre las cuales existe una relación. La materia viva está constituida por estados coloidales.

conífera. Planta leñosa con hojas lineales o en forma de aguja, sus semillas se colocan en una estructura llamada cono.

coral. Colonia de animales pertenecientes a los celenterados, tienen forma de pólipo y su cuerpo está cubierto por un exosqueleto calcáreo.

cuarcita. Roca formada por cuarzo; de color blanco lechoso, gris o rojiza, de estructura granulosa o compacta.

defecar. Función de los animales que consiste en expulsar las sustancias que sobran de la alimentación llamadas heces fecales.

delta. Zona generalmente triangular comprendida entre los brazos de un río en su desembocadura.

deriva. Desviación que sufre una embarcación por acción del viento o de las corrientes marinas.

detritos. Restos orgánicos producidos por la descomposición de vegetales y animales.

diatomea. Vegetal microscópico con su célula cubierta por una pared dividida en dos tapas o valvas formadas por sílice; integran el fitoplancton.

dinoflagelado. Organismo microscópico cubierto por una membrana silicosa dividida en dos zonas por un surco, la epitoca y la hipoteca. Presenta dos flagelos, uno transversal y otro longitudinal.

draga. Aparato que se utiliza para coleccionar muestras del fondo en cuerpos de agua. Barco que tiene una máquina con la que extrae el fango y la arena del fondo marino.

ecograma. Gráfica producida por la ecosonda.

ecosonda. Aparato que utiliza el sonido reflejado o eco y sirve para caracterizar las profundidades del mar y detectar bancos de peces.

eras geológicas. Grandes etapas en las que se ha dividido la historia de la Tierra.

erosión. Modificaciones que se presentan en el suelo y en las rocas por la acción de los agentes como ríos, torrentes, viento, etcétera, y el hombre.

escorpión. Animal perteneciente a los arácnidos con su cuerpo dividido en dos regiones. La posterior o abdomen terminada en una cola en donde se localiza la glándula del veneno.

esponja. Animal caracterizado por presentar poros en el exterior de su cuerpo, los que comunican con un sistema de canales. Su esqueleto está formado por espículas o por fibras elásticas.

estratigrafía. Estudio de las rocas formadas por varias capas o estratos.

estuario o estero. Área donde desemboca un río en el mar, formándose un valle en donde se mueve el agua de la marea.

exosqueleto. Estructura que protege o sostiene externamente el cuerpo de un organismo.

filon. Conjunto de metales que rellena grandes fracturas que se presentan en los suelos rocosos antiguos.

fisiográfico. Geografía física.

fitoplancton. Vegetales, generalmente microscópicos, que se encuentran flotando en el seno de las aguas dulces o marinas.

flujo de energía. Camino que sigue la energía en una cadena de alimentación.

foraminífero. Animal microscópico perteneciente a los protozoarios que poseen conchas o caparazones calcáreo o silicosos.

fósil. Restos o impresiones de seres vivos que se conservan desde épocas geológicas pasadas.

fotosíntesis. Elaboración de sustancia orgánica (alimento) a partir del bióxido de carbono y del agua, en presencia de clorofila y utilizando la energía solar; durante el proceso se libera oxígeno.

gases inertes. También llamados gases nobles por considerar que presentaban tendencia a combinarse, sin embargo, en la actualidad se sabe que sí se combinan con otros elementos.

geomagnetismo. Estudio del campo magnético de la Tierra.

geomórfico. Estructuración de los mapas del globo terráqueo.

gimnosperma. Vegetal que presenta las semillas desnudas.

ginkgoal. Planta perteneciente a los gimnospermas con una sola especie viviente, *Ginkgo biloba*, árbol a menudo cultivado.

gliptogénesis. Primera fase del ciclo geológico en la que se destruyen los materiales y el relieve de la corteza terrestre.

granito. Roca ígnea compacta de grano grueso compuesta principalmente por cuarzo y mica.

granulometría. Estudio del tamaño y las características de los componentes de los sedimentos.

gravimetría. Estudio de la gravitación terrestre y mediciones de sus variaciones en los diversos lugares.

hulla. Carbón de piedra.

insecto. Animal terrestre del grupo de los artrópodos con el cuerpo dividido en cabeza, tórax y abdomen. Tiene un par de antenas, tres pares de patas y una o dos alas.

ion. Radical químico que resulta de la disolución de un compuesto y que presenta carga eléctrica (H^+ , OH^-).

marisma. Zona baja de terreno que se inunda con el agua del mar.

mármol. Roca metamórfica de textura compacta y cristalina que, al mezclarse con otras sustancias, forma manchas o vetas.

masa de agua. Cuerpo de agua del mar caracterizado por su salinidad y su temperatura.

médano. Cúmulo de arena que se deposita en la costa.

metabolismo. Conjunto de reacciones químicas que se desarrollan en los seres vivos durante sus funciones. Comprende la fase de construcción de materia orgánica o anabolismo y la de destrucción o catabolismo.

micra. Unidad de longitud para seres microscópicos correspondiente a la milésima parte de un milímetro.

mineral. Sustancia inorgánica que se encuentra en la superficie o en las capas de la corteza terrestre.

molusco. Grupo de animales de cuerpo no segmentado y generalmente protegido por una concha calcárea, con cabeza y pie muscular; comprende a los ostiones, caracoles, pulpos, etcétera.

ofiúrido. Animal del grupo de los equinodermos en forma de estrella, con brazos largos y delgados, que se rompen fácilmente.

orogénesis. Procesos que se presentan en la formación de las montañas.

ostra. Molusco que presenta su cuerpo cubierto por una concha formada por dos tapas o valvas, como los ostiones.

ozono. Gas derivado del oxígeno que se encuentra en la zona superior de la atmósfera.

paleoclimático. Descripción del clima en el pasado geológico.

paleogeográfico. Descripción de la Tierra en el pasado geológico.

paleontología. Ciencia que trata de la vida del pasado geológico.

peces. Animales vertebrados acuáticos, de respiración branquial, cuyo cuerpo está cubierto de escamas, presenta aletas como órganos de locomoción.

pigmento. Sustancia colorante. En los seres vivos se puede encontrar disuelto formando organoides en sus células.

plancton. Organismos pequeños que se encuentran flotando en la región superficial de las aguas dulces y marinas. Pueden presentar pequeños movimientos de desplazamiento.

pleamar. Ascenso máximo de la marea.

pogonóforo. Animal que se encuentra en las profundidades oceánicas. Vive fijo en tubos quitinosos, su cuerpo tiene forma de gusano. Es poco conocido.

poliqueto. Animal del grupo de los anélidos, con su cuerpo anillado cubierto por gran cantidad de cerdas llamadas quetas. La mayoría marinos, puede vivir fijo o reptar.

presión atmosférica. Presión que ejerce la atmósfera sobre los cuerpos.

protozoo. Animal microscópico que se caracteriza por tener su cuerpo formado por una sola célula pero que realiza todas las funciones de los organismos.

pterópodo. Molusco marino llamado mariposa del mar por presentar su pie como alas.

quimiosíntesis. Forma de nutrición autótrofa de ciertas bacterias, en las que por reacciones químicas transforma la sustancia inorgánica en orgánica (alimento).

radiolario. Animal microscópico marino del grupo de los protozoarios que tiene su célula protegida por un esqueleto silíceo.

reptil. Animal vertebrado, la mayoría terrestre, sólo las tortugas y cocodrilos son acuáticos. Cuerpo protegido por una piel córnea.

resaca. Regreso de las olas después de haber alcanzado la orilla.

roca basáltica. Tipo de roca ígnea que se encuentra en el fondo oceánico.

roca ígnea. Roca formada por enfriamiento y solidificación de material mineral móvil caliente llamado magma.

roca metamórfica. Roca que se ha cambiado en contextura y en composición, por calor, presión o soluciones químicamente activas.

roca sedimentaria. Roca formada por la acumulación de sedimentos.

salmuera. Agua que contiene concentraciones altas de sal.

sedimentación. Acumulación de partículas de materia orgánica e inorgánica, que se colocan sin combinar.

sismología. Estudio de las sacudidas de las capas de la corteza terrestre.

somero. Aguas con poca profundidad.

tectónica. Estudio del origen y el desarrollo de las amplias características estructurales de la Tierra.

tifón. Huracán o tromba marina.

topografía. Descripción detallada de la superficie de la corteza terrestre.

trilobite. Artrópodo marino que existió en el Cámbrico y en el Silúrico. Su cuerpo formado por tres lóbulos estaba provisto de apéndices articulados.

urodelo. Vertebrado de la clase de los anfibios que presenta cola como la salamandra.

virus. Agente infeccioso específico, considerado como el ser vivo más primitivo; invade vegetales, animales y bacterias. Solamente se multiplica dentro de la célula huésped. Presenta tamaño submicroscópico.



BIBLIOGRAFÍA

- Albatros. *Enciclopedia del mar*. Compañía Internacional Editora, S.A. Barcelona, 1977, vols I-III.
- E. Beltrán, *et al.* *Tercer curso de biología*. Editorial E . C . L . A . L . México, 1962.
- V.I.J. Castell, *et al.* *Ecología marina*. Fondo de Cultura Científica, Caracas, 1967.
- J. Croft. *El mar y sus habitantes*. Bruguera, México, 1980.
- P. F. Charlton de Rivero. Y P.J. Bermúdez. *Micropaleontología general*. Ediciones Gea, España, 1963.
- S.G. Chávez. *Elementos de oceanografía*. C . E . C . S . A . , México, 1975.
- W. Emmons, *et al.* *Geología. Principios y procesos*. McGraw-Hill, México, 1965.
- A. Holmes. *Geología física*. Ediciones Omega, Barcelona, 1973.
- R. Ingle. *Curiosidades del mar*, Bruguera, México, 1980.
- L. D. Leet, y S. Judson. *Fundamentos de geología física*. Limusa, México, 1977.
- C. F. Lozano. *Oceanografía, biología marina y pesca I*. Paraninfo, S.A., Madrid, 1978.
- R. Moody. *The Fossil World*. Hamlyn, Londres, 1977.
- A. Nason. *Biología*. Limusa-Wiley, S.A., México, 1971.
- M. J. Pentz, *Principales accidentes de la superficie terrestre*. The Open University. McGraw-Hill, México, 1974.
- M. D. Raup, y S.M. Stanley. *Principles of Paleontology*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1971.
- F. L. Rodríguez. *Un Universo en expansión*. Fondo de Cultura Económica, México, 1986.
- V. Romanovsky, *et al.* *El mar*. Editorial Labor, Barcelona, 1961.
- A. Rudel. *Las ciencias naturales*. Geología. Montaner y Simón, 5. A. Barcelona, 1979.
- Scientific American. *Oceanografía*. H. Blume Ediciones, Madrid, 1978.
- C. R. Vetter. *Oceanografía. La última frontera*. "El Ateneo", Buenos Aires,. 1973.
- G. J. Weihaupt. *Exploración de los océanos*. Editorial Continental, S.A. de C.V., México, 1984.
- J. H. Zumberge. *Elementos de geología*. Editorial Continental, S.A. de C.V., México,. 1961.





COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de julio de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 2000 ejemplares.

La Ciencia para Todos es una colección coordinada editorialmente por *Marco Antonio Pulidos* y *María del Carmen Farías*.



CONTRAPORTADA

La publicación de *El océano y sus recursos* se corresponde con la exhortación que hacen los autores: "¡Hay que conocer el mar!" En el pasado, los estudios marinos eran labor exclusiva de los países desarrollados. En nuestros días y por diversas razones —una de ellas la sobreexplotación de los recursos marinos—, participan en el estudio de los océanos la mayoría de los países. Existe ya la conciencia de que si seguimos usando el mar sin un conocimiento adecuado de sus posibilidades reales, podría presentarse una disminución de su fertilidad y una merma de sus recursos, tan indispensables al hombre.

Se sabe ahora que el océano absorbe la mayor parte del bióxido de carbono que produce la industria moderna; que regula el clima y las condiciones metereológicas; que extrae calor de las regiones ecuatoriales y lo envía a las templadas permitiendo así en ellas la vida. El estudio del mar, entonces, se caracteriza por la complejidad: es necesario analizar y eslabonar una cadena enorme de fenómenos, muchos de los cuales apenas empiezan a ser comprendidos.

Juan Luis Cifuentes Lemus, María del Pilar Torres-García y Marcela Frías Mondragón forman parte del personal académico de tiempo completo del Laboratorio de Invertebrados de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Con *El océano y sus recursos*, han emprendido la abrumadora tarea de ofrecer al estudioso, al interesado, una obra panorámica, en doce volúmenes, que enfoca todos los ángulos de las investigaciones oceánicas más recientes. El valor de cada volumen aumenta con los apéndices, los glosarios y las bibliografías selectas que los acompañan.

