

Perspectiva física del Océano

El agua que conforman los mares y océanos presenta la peculiar característica de contener un alto contenido de sales minerales y mantener en solución casi todos los elementos químicos conocidos por el hombre. La salinidad, nombre que se le asigna a esta propiedad, es de importancia vital tanto desde una perspectiva biológica -por su influencia sobre la presión osmótica y los equilibrios iónicos- y por consiguiente, sobre aspectos fisiológicos de los organismos vivos; como también, desde una perspectiva física, al influir sobre la dinámica de los océanos en fenómenos tales como la circulación horizontal y vertical de las masas de agua en los mares.

Desde épocas bastante antiguas ha sido una preocupación permanente de los estudiosos de la química de los océanos, estimar y definir el contenido de los distintos elementos presentes en el agua de mar. En 1660 *Robert Boyle* investigó la salinidad en las profundidades marinas y posteriormente *Antoine Lavoisier* publicó, en 1776, el primer estudio químico del agua del mar. Desde esas primeras investigaciones, conceptos como salinidad y clorinidad y nuevas aproximaciones a la cuantificación de los minerales ya conocidos -como la detección de otros nuevos-, se han sucedido vertiginosamente a la luz de nuevos instrumentos y técnicas de análisis cada vez más precisas; investigaciones que también han permitido obtener una mejor comprensión de la distribución global y regional del contenido de sales, tanto en la superficie como en la profundidad de los océanos. (Capítulo 8).

El sol es el motor que proporciona la energía para la circulación atmosférica y la consecuente generación y modulación de los climas sobre la superficie de la tierra y de los océanos. La circulación superficial de los océanos es también promovida por estas fuerzas, en combinación con la fricción del viento, la acción de la gravedad, la rotación de la tierra y la interferencia de los continentes, entre algunos de los factores más relevantes; pero también como una expresión de las características físico-químicas del agua de mar, ya que estas propiedades también intervienen en la conducta hidrodinámica de este fluido. Olas y mareas (Capítulo 9) y también los patrones de circulación de las masas de agua a nivel planetario, ya sea tanto en superficie como en profundidad, son una expresión de estos procesos. Estas peculiaridades de las masas de agua, en conjunto con la particular capacidad de retener la combinación de las características físico-química y biológicas de sus lugares de origen -a pesar de los procesos de movilización y del contacto con otras aguas de diferentes características-, las proveen de una identificación en su deambular por las cuencas oceánicas del planeta (Capítulo 10).

Pero de la misma manera que los procesos atmosféricos participan en el comportamiento global de la circulación oceánica, estos fenómenos también actúan influyendo en la definición climática sobre el planeta. Sin lugar a dudas que entre este tipo de eventos uno de los más llamativos resultados de la interacción océano-atmósfera es el denominado fenómeno del Niño, el que por su amplio impacto sobre las condiciones meteorológicas y climáticas globales es considerado, en la actualidad, como la mayor señal climática de corto período en nuestro planeta (Capítulo 11).

CAPITULO 8

LA SALINIDAD EN LOS OCÉANOS

Marco Salamanca y Wolfgang Schneider

1. Introducción	149
2. Concepto de la salinidad desde una perspectiva histórica	150
2.1. Los inicios	150
2.2. La era moderna	151
3. Salinidad y clorinidad	151
4. La nueva definición de salinidad	154
4.1. La definición de salinidad y eps	154
4.2. Clorinidad	155
5. Patrones de distribución de la salinidad	156
5.1. Salinidad en superficie	156
5.2. Salinidad en profundidad	157
6. Lecturas recomendadas	157

CAPITULO 8

LA SALINIDAD EN LOS OCÉANOS

Marco Salamanca y Wolfgang Schneider

1. Introducción

Sin lugar a dudas que la característica más notable de las aguas de los océanos es su alto contenido de sales disueltas, la que ha derivado de los procesos de formación del océano primitivo, así como de los posteriores aportes procedentes de la disolución parcial y lavado de la corteza terrestre, la actividad del magma y de los equilibrios entre atmósfera, océano, agua y suelo¹. La presencia de estas sales en solución, característica conocida como salinidad, es de gran importancia tanto desde una perspectiva biológica -por su influencia sobre los presión osmótica y los equilibrios iónicos- y consecuentemente con ello, sobre aspectos fisiológicos de los organismos vivos; como también, desde una perspectiva física al influir sobre la dinámica de los océanos en fenómenos tales como la circulación horizontal y vertical de las masas de agua en los mares.

¹ Ver capítulos 6 "Tectónica global de placas" y 7 "Morfología de los fondos oceánicos y características de la línea de costa".

2. Concepto de Salinidad desde una perspectiva histórica

2.1. Los inicios

El primer análisis del agua de mar con la finalidad de estimar el contenido de sales fue realizado en 1772, por el químico francés *Antoine Lavoisier*² quien lo efectuó mediante la evaporación del agua seguido de extracción con solventes. Si bien este análisis tiene la importancia de haber sido el primero, hoy sabemos que es imposible evaporar el agua de mar y pesar la sal que se obtiene como residuo; esto debido a que cómo algunas sales presentes en el agua de mar son el resultado de la hidratación de determinados iones, al eliminar el agua estas se desintegran.

Doce años más tarde (1784) el químico Sueco *Olof Bergman* también publicó resultados del análisis de agua de mar, pero mediante un nuevo método consistente en pesar las sales precipitados. *Bergman* además de realizar un análisis mucho más exacto del contenido de sales en el agua de mar, con este método, sentó las bases para el desarrollo de lo que posteriormente sería reconocido como la química analítica.

Entre 1824 y 1836 la técnica de titulación volumétrica fue desarrollada por *Joseph Louis Gay-Lussac*³ a partir de la cual el determinó que el contenido de sales en aguas de mar abierto es, desde un punto de vista geográfico, aproximadamente constante. Esta observación fue confirmada primero por *Alexander Marcet*⁴ en 1819-1822, y posteriormente en 1895 por Sir *John Murray*, quienes descubrieron que se pueden lograr análisis altamente precisos y exactos mediante métodos gravimétricos haciendo precipitar los iones en forma selectiva (Cuadro 8.1.), y así, de la masa de cada precipitado estimar la cantidad de cada ion. *Marcet* propuso además que el agua de mar contenía pequeñas cantidades de todas las sustancias solubles y que la abundancia relativa de algunas de ellas era constante; hipótesis actualmente conocida como el principio de *Marcet* o Regla de Proporciones Constantes. Esta regla establece que: "independientemente como la salinidad varía de un lugar a otro, las razones entre las cantidades de los iones mayores en el agua de mar del océano abierto son aproximadamente constantes".

Alrededor de 1855 el 99% de los elementos que componían la sal marina había sido descubierta y también detectados en el agua de mar, con las excepciones del Fluor, que solo fue aislado en 1886 y el Yodo en 1811 a partir de cenizas de algas marinas. El concepto de salinidad, introducido como el término para expresar el contenido de sales en el agua de mar fue acuñado por *Georg Forchhammer*, y utilizado a partir de 1855. Este químico, que realizó exhaustivos análisis de agua de mar, pudo además confirmar la validez del principio de *Marcet* para los iones más abundantes, tales como el cloruro (Cl⁻), sodio (Na⁺), Calcio (Ca²⁺), Potasio

Cuadro 8.1. Ejemplo de la precipitación selectiva de algunos iones contenidos en el agua de mar.

ión	Precipitado
SO ₄ ⁻	Ba SO ₄ (Sulfato de Bario)
Ca ²⁺	Ca CCO ₂ H (Oxalato de Calcio)
Cl ⁻	Ag Cl ₂ (Cloruro de Plata)
Mg ²⁺	Mg ₂ P ₂ O ₇ (Pirofosfato de Mg)

Cuadro 8.2. Constituyentes del agua de mar

	g/1000g agua de mar	% (en peso)
Cationes:		
Na ⁺ :	10,77	30,66
K ⁺ :	0,40	1,13
Ca ²⁺ :	0,41	1,17
Mg ²⁺ :	1,29	3,65
Aniones:		
Cl ⁻ :	19,35	55,02
SO ₄ ⁼ :	2,71	7,71
HCO ₃ ⁻ :	0,12	0,30

² Químico francés y padre de la química moderna (1743-1794). Formuló el principio de la conservación de la masa en las reacciones químicas y fue uno de los primeros científicos en introducir procedimientos cuantitativos en las investigaciones químicas. Murió guillotinado en la Place de la Révolution, (hoy Plaza de la Concordia) en París, la mañana del 9 de mayo de 1794.

³ Químico y físico francés (1778-1850) conocido por su contribución a las leyes de los gases. En 1802 fue el primero en formular la ley según la cual un gas se expande proporcionalmente a su temperatura (absoluta) si se mantiene constante la presión. Esta ley es conocida en la actualidad como "Ley de Charles".

⁴ Uno de los primeros químicos marino, además de médico científico en otras áreas (1770-1822). Realizó una de las primeras mediciones de la concentración de las sales mayores en agua de mar y también inventó una botella de capaz que obtiene muestras de agua directamente de las profundidades del océano.

(K⁺), Magnesio (Mg²⁺) y Sulfato (SO₄⁻); *Forchhammer* estableció además que la salinidad del agua de mar podía ser inferida de la medición de Cloruro (o clorinidad), lo que en 1883 fue llevado por primera vez a la práctica por *Murray*⁵.

2.2. La era moderna

La era moderna de la oceanografía comenzó en 1876 con la expedición del "Challenger", siendo uno de los hitos el análisis de 77 muestras de agua de mar recolectadas por esta expedición en todos los mares del mundo. Los resultados de estos análisis, que fueron publicadas por *William Dittmar*⁶ en 1884, confirmaron el Principio de *Marcet*, dejando definitivamente establecido que efectivamente había una relación constante entre los constituyentes mayores del agua de mar (Cuadro 8.2.) Este concepto fue modificado levemente por *Cox* en 1967 quién realizó análisis más precisos de los constituyentes mayores y demostró la existencia de leves, aunque significativas diferencias en la composición del agua, especialmente entre el agua de superficie y la del océano profundo, así como también entre las aguas costeras y las del océano abierto.

3. Salinidad y Clorinidad

Desde el punto de vista de la oceanografía y de acuerdo con el principio de *Marcet*, la salinidad y la clorinidad están interrelacionados, es por esta razón que se utilizan con el mismo propósito: determinar en la forma más precisa y exacta posible el contenido de sales en un cierto volumen o masa de agua de mar. El conocimiento de la salinidad del agua de mar es de importancia fundamental en oceanografía en general. En el caso de la oceanografía física por ejemplo, el conocimiento de la salinidad junto con las mediciones de la temperatura en un determinado lugar, permite obtener los valores de densidad, parámetro fundamental para realizar cálculos dinámicos que permiten conocer las corrientes y el transporte de sales en el océano.

Es sabido que la composición química de las aguas naturales varía significativamente como consecuencia de la alteración de los componentes durante el ciclo hidrológico debido a las diferentes reacciones que ocurren. Así por ejemplo, algunos compuestos precipitan, otras se disuelven o desgasifican; pero en el caso de los océanos la situación es la opuesta ya que la composición química de las aguas es notablemente similar entre los diferentes océanos y también entre la superficie y el fondo (es una solución compleja que en promedio tiene un 3,5% de sales disueltas). Sin embargo, y considerando que los gradientes horizontales y verticales de la salinidad en el océano son muy pequeños, es un requisito esencial que las mediciones de salinidad tengan una exactitud mejor que $\pm 0,01$ y en casos extremos mejor que $\pm 0,002$. Variaciones mayores de salinidad se presentan en áreas costeras y estuarinas donde exactitudes significativamente menores se requieren para describir la distribución de salinidad.

Los iones más abundantes en el agua de mar son Cloro, Sodio, Calcio, Potasio, Magnesio y Sulfato y se encuentran en proporciones constantes debido a que su concentración, está controlada por la adición o remoción de ellos hacia la columna de agua. Por esta razón, estas sustancias se han denominado iones conservativos. En cambio, otros compuestos y elementos presentes en el agua de mar no se encuentran en proporciones constantes, ya que sus concentraciones son alteradas por procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la columna de agua y sedimentos. Estas sustancias químicas se denominan no conservativas, aunque la mayoría de las sustancias en el agua de mar son no conservativas, ellas conforman una pequeña fracción de la masa total de sales del océano.

⁵ *Sir John Murray* (1841-1914) Oceanógrafo canadiense, uno de los propulsores de la oceanografía moderna. Tomó parte en la célebre expedición oceanográfica del *Challenger* y dirigió la publicación de los resultados de esa campaña en cincuenta volúmenes de memorias científicas. En 1912, *Murray* escribió en colaboración con *J. Hjort*, una obra de síntesis sobre los temas trabajados durante toda su vida con el título *Las profundidades del Océano*, considerado un tratado fundamental de oceanografía.

⁶ Químico Inglés (1833 -1892) profesor del Anderson College en Glasgow. Diseñó un aparato para extraer gases de muestras de agua de mar, el que fue utilizado en forma complementaria con el aparato de *Jacobsen* para analizar las muestras obtenidas durante esta expedición.

Alrededor de 1900 el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (CIEM) inició una investigación de las propiedades iónicas del agua de mar y encargó al investigador danés *Martin Knudsen*⁷ relacionar la clorinidad (contenido de cloruros), salinidad y densidad del agua de mar, para lo cual primero debió definir el término salinidad, dando así en 1902, la siguiente definición: "El contenido de sal es el peso de las sales inorgánicas en un kg de agua de mar si todo el Bromo y Yodo son reemplazados por una cantidad equivalente de Cloro y todos los carbonatos son reemplazados por una cantidad equivalente de óxidos". El tiempo de calentamiento fue de 72 horas a 480 °C. *Knudsen* preparó veinticuatro muestras para determinar la clorinidad, utilizando solo nueve⁸. Dado que la determinación de salinidad era en ese entonces muy difícil de realizar y además se veía afectada en su precisión por numerosas dificultades técnicas, *Knudsen* propuso entonces definir la salinidad en términos de clorinidad de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S^{\circ}/\text{oo} = 1,805 \text{ Cl}^{\circ}/\text{oo} + 0,03$$

A partir de esta aproximación el término clorinidad fue definido por *Sorensen*, en 1902, como: "el peso de Cloro en un kg de agua de mar equivalente a la cantidad total de halógenos", siendo utilizado de esa forma hasta 1940 cuando fue redefinida por *Jacobsen* y *Knudsen* como "El número de la clorinidad, en partes por mil (‰) de una muestra de agua de mar es, por definición, idéntico al número de masa en unidades de gramo de peso atómico de Ag necesarios para precipitar los halógenos contenidos en 0,3285234 kg de la muestra de agua de mar (todos los pesos son al vacío)." Esta definición que hasta hace poco era la utilizada por todos los oceanógrafos, está basada en un procedimiento analítico y es independiente de cualquier definición de los pesos atómicos de Ag, Cl, Br, y I. Algunas veces el contenido de cloro en el agua de mar se estima en relación a volumen y no a masa de la muestra, ocasión en que se usa el término "clorosidad" (CL), que se define como "el contenido de Cloro presente en un dm³ de agua de mar a una temperatura (20° C), cuando todo el Br y el I están expresados en un equivalente de Cl.

De acuerdo con lo indicado anteriormente, existen entonces dos formas de aproximarse a la estimación de la salinidad: i) una se refiere al contenido total de sales en una unidad de agua de mar y ii) de acuerdo relación entre salinidad y clorinidad dada por *Knudsen*. Según el primer método, si se mezclan dos muestras de agua de mar de iguales volúmenes, la salinidad final sería la media de las dos salinidades originales; mientras que si la salinidad es determinada según la clorinidad y calculada de acuerdo a la ecuación de *Knudsen*, se produciría una pequeña variación implicando que la salinidad sería una propiedad no conservativa y que además no concordaría con los valores a obtener utilizando el método anterior. La ecuación de *Knudsen* asume que toda el agua de mar tiene una razón Salinidad (‰)/Clorinidad (‰) constante, ya que ambas tienen la misma razón iónica, esto significa que en agua diluida también existirá esta razón constante, implicando que toda el agua de río que entra al mar tiene la misma composición química, lo que en la práctica no es efectivamente así.

La imposibilidad de establecer aproximaciones confiables de salinidad a partir de los métodos anteriores llevó a la búsqueda de otras formas para la cuantificación de este parámetro, siendo la medición de la conductividad⁹ eléctrica del agua de mar el método que finalmente resolvió el problema. Si bien esta posibilidad había

Cuadro 8.3. Función utilizada para la calibración de salinómetros a partir de los valores de conductividad del agua estándar.

$$S^{\circ}/\text{oo} = -0.08996 + 28.29720 R_{15} + 12.80823 R_{15}^2 - 10.67869 R_{15}^3 + 5.98624 R_{15}^4 - 1.32311 R_{15}^5$$

Donde R_{15} es la razón de Conductividad a 15°C relativa a un "agua estándar" que tiene una salinidad de 35,00 ‰ y una clorinidad de 19.374 ‰

La Salinidad definida en esta ecuación es lo más cerca posible al contenido total de sales del agua de mar.

⁷ Físico danés también responsable de la invención de las botellas "Knudsen" que mejoraron la precisión en la toma de muestras de agua y la medición de la temperatura en profundidad.

⁸ Siete de las muestras seleccionadas *Knudsen* eran del mar Báltico y puesto que comparados con muestras oceánicas tenían un muy bajo contenido de sales, se debe indicar que estas estimaciones no fueron representativas de todos los océanos

⁹ La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad que tiene un material para conducir la corriente eléctrica.

Cuadro 8.4. Instrumentos para la medición de la salinidad

Salinómetro. Instrumento que permite medir la salinidad estimando la conductividad eléctrica de una solución. La conductividad es medida colocando electrodos de platino en agua de mar, aplicando una corriente eléctrica de un voltaje conocido y midiendo la corriente que fluye entre los electrodos. La corriente depende de la conductividad de la solución, el voltaje aplicado y volumen de agua salada entre los electrodos. Si los electrodos están en un tubo de vidrio que no conduce la electricidad y en un volumen de agua exactamente conocido, entonces la corriente es independiente de otros objetos cerca de la celda de conductividad. Las mejores medidas de salinidad a partir de la conductividad dan estimaciones de la salinidad con una exactitud de ± 0.005 eps. Esta propiedad es directamente proporcional al contenidos de sales en una solución, por consiguiente y mediante los algoritmos apropiados actualmente incluidos en los microprocesadores que controlan el funcionamiento de estos instrumentos, se efectúa la conversión del valor de la conductividad eléctrica en el correspondiente valor de la salinidad. Sonda de registro continuo (CTDs). En la actualidad, el instrumento estándar que se utiliza para medir la temperatura, salinidad y a menudo también el contenido en oxígeno disuelto es el CTD (Por sus siglas en inglés: Conductivity Temperature, Depth -conductividad, temperatura y profundidad-). Cada uno de los sensores del CTD emplea el principio de la medida eléctrica. Un termómetro de platino cambia su resistencia eléctrica con la temperatura. Si se incorpora un oscilador eléctrico, un cambio en su resistencia produce un cambio de la frecuencia del oscilador, que puede ser medido. La conductividad del agua de mar se puede medir de una manera similar como el cambio de la frecuencia de un segundo oscilador, y un cambio en la presión produce un cambio de la frecuencia en un tercer oscilador. La señal combinada se envía hacia arriba a través del cable conductor, mediante el cual se baja el CTD. Esto produce lecturas continuas de temperatura y conductividad en función de la profundidad a una razón de hasta 30 lecturas por segundo. Los circuitos eléctricos permiten la medición en rápida sucesión, pero sufren de "deriva instrumental" lo que significa que sus calibraciones cambian con el tiempo. Los sistemas de CTD por lo tanto tienen que ser calibrados comparando sus lecturas regularmente contra instrumentos más estables. Por lo tanto se utilizan siempre conjuntamente con termómetros reversibles y un dispositivo de muestreo de agua múltiple.

Refractómetro. Este instrumento, el más simple de todos, permite medir la salinidad en base al índice de refracción. Un rayo de luz al atravesar un líquido, sufre una desviación que es proporcional a la cantidad de sales presentes en la solución. Utilizando este principio, el refractómetro permite la salinidad midiendo el grado de desviación de los rayos luminosos. Es un método con el que se obtienen valores aproximados, pero tiene la ventaja de ser rápido y utilizar solo unas gotas de la muestra.

sido explorada por Knudsen en 1902, no fue sino hasta 1961 y gracias al desarrollo de equipos electrónicos confiables -los que fueron construidos por Brown y Hamon-, que esto fue finalmente posible. Ante la aparición de este nuevo y preciso método, un grupo de científicos se abocó entonces a la tarea de investigar la relación entre la salinidad, clorinidad, densidad y conductividad sobre la base de mar de más de 300 muestras obtenidas en todos los océanos del mundo. A partir de los resultados de este estudio se desarrollaron las "Tablas Oceanográficas Internacionales (Volumen I)", las que en conjunto con UNESCO y el Instituto Nacional de Oceanografía (Wormly U.K.) fueron finalmente publicadas en 1966. La preparación de las Tablas fue supervisada por el Panel Conjunto de Expertos para Tablas Oceanográficas y Estándares y en 1967 el Comité Ejecutivo del SCOR¹⁰ y el IAPSO¹¹ las avalaron y recomendaron "para uso de todos los oceanógrafos".

Las estimaciones de salinidad realizadas a partir de medidas de conductividad requieren que exista una estandarización de los instrumentos que se utilizan para estos fines, por tal razón se estableció un patrón de medición único, conocido como Agua Estándar, que permite la calibración universal de estos de estos instrumentos (Cuadro 8.3), ya sean salinómetros o CTDs (Cuadro 8.4).

¹⁰ Scientific Commission for Oceanic Research

¹¹ International Association for the Physical Sciences of the Ocean

A partir de las nuevas estimaciones fue también posible redefinir la relación entre la salinidad y la clorinidad estableciendo la siguiente ecuación:

$$S\text{‰} = 1,80655 \text{ Cl‰}$$

que además es compatible con la ecuación propuesta por *Knudsen*, en 1902. Para salinidad entre 32 ‰ y 38 ‰ la diferencia de esta ecuación y la antigua es de solo 0,26 ‰ mientras que a una salinidad de 35 ‰ dan idénticos resultados. El coeficiente 0,03 de la antigua ecuación fue eliminado. Se debe entender en todo caso que esta definición de Clorinidad es arbitraria y ni tiene ningún significado químico.

4. La nueva definición de Salinidad

Debido a las diferencias que aún existen en la definición de salinidad, ya sea en términos de Clorinidad, i.e., $(S\text{‰}) = 1,80655 \text{ Cl‰}$ o de conductividad a 15°C, el panel de expertos de la (UNESCO/ICES/SCOR/IAPSO) que publicó las Tablas Oceanográficas Internacionales y Estándares en 1966 propuso una nueva definición de Salinidad y recomendó en 1981 el uso de la Escala Práctica de Salinidad¹² (EPS). El nuevo concepto de Salinidad fue necesario para permitir que todos los instrumentos construidos para mediciones de salinidad (basados en la relación conductividad-temperatura y profundidad; CTD'S) informaran sus datos de una manera consistente y compatible con análisis de muestras realizados con salinómetros en laboratorios. Por otra parte, las Tablas Oceanográficas Internacionales (UNESCO 1966) que entregan la salinidad en función de la conductividad eléctrica de una muestra de agua de mar no van más allá de 10 °C, lo cual las hace limitadas para la mayoría de las aplicaciones de los CTD. En este caso las mediciones de salinidad han estado basada en dos definiciones diferentes: i) por una parte la clásica de *Brown y Allentof* (1966) utilizando salinómetros y ii) de *Fofonof y Lewis* (1979) con los CTD, aunque ambas usan la conductividad eléctrica del agua de mar.

La precisión de los instrumentos *in situ* (CTD) y los salinómetros no han mejorado sustancialmente respecto a las discrepancias de las dos definiciones de salinidad. Por lo tanto, fue fundamental reemplazar las definiciones que estaban en uso por una sola ecuación y por la ambigüedad que existía en la relación de clorinidad-salinidad-conductividad cuando las razones iónicas cambiaban. Así los cálculos de densidad, usando las razones de conductividad obtenidos con instrumentos modernos es aproximadamente un orden de magnitud más cercana a la "densidad real" que aquella calculada a partir de la clorinidad. Por esta razón la escala Práctica de Salinidad elimina la relación entre Salinidad y Clorinidad en establece una relación definitiva entre la salinidad y conductividad.

La nueva definición de salinidad y EPS fueron adoptadas por todas las grandes agrupaciones internacionales de oceanografía, por lo tanto su uso ahora es obligatorio para informar las mediciones de salinidad.

4.1. La definición de salinidad y eps.

Hay dos conceptos que se deben definir:

- a) Salinidad Absoluta cuyo símbolo es (S_A) la cual es definida como la razón de masa de material disuelto en el agua de mar y la masa de solución.

$$S_A = \frac{\text{masa material disuelto}}{\text{masa de solución que la contiene.}}$$

En la práctica esta cantidad no puede ser medida directamente y por lo tanto se define una escala práctica de salinidad.

¹² Conocida también por su denominación en Inglés PSU (Practical Salinity Unit)

- b) Escala Práctica de Salinidad símbolo (S) la cual se basa en un agua de mar estándar que tiene una razón de Conductividad / (K_{15}) igual a la unidad (1) a 15°C (a una atmósfera de presión) respecto a una solución de KCl que contiene 32.4356 g KCl en una masa de 1kg de solución.

Para proporcionar continuidad con las escalas previas, el agua estándar seleccionada para dar la razón de conductividad igual a 1, fue tomada del océano Atlántico Norte y tiene una Clorinidad de $19,3740 \times 10^{-3}$. Esto define el punto de salinidad 35×10^{-3} de la nueva escala.

- c) La EPS es definida en términos de la razón K_{15} según la siguiente ecuación:

$$S(x10^3) = a_0 + a_1 K_{15}^{1/2} + a_2 K_{15} + a_3 K_{15}^{3/2} + a_4 K_{15}^2 + a_5 K_{15}^{5/2}$$

Donde:

$$a_0 = 00080$$

$$a_1 = -0.1692$$

$$a_2 = 25.3851$$

$$a_3 = 14.0941$$

$$a_4 = -7.0261$$

$$a_5 = 2.7081$$

$$\bullet a_i = 35.0000$$

$$K_{15} = \frac{\text{Conductividad } (S_{15,0})}{\text{Conductividad } (35,15,0)}$$

Así todos las muestras que tiene el mismo valor de K_{15} tendrán entonces la misma EPS.

- d) La EPS se relaciona con la S_A de acuerdo a la siguiente relación

$$S_A = a + b S$$

Donde los parámetros a y b dependen de las razones iónicas de la muestra. Para agua estándar $a=0$ y $b = 1.0049 \pm 0.0003$, así cualquier mejoramiento de este coeficiente servirán para cambiar S_A pero no S. Si $a = 0$ esto representa un error insignificativo para todas las masas de agua oceánica respecto a S.

Para designar la salinidad se recomienda abandonar el símbolo ‰ y ser reemplazado por 10^{-3} así por ejemplo: $S = 35 \times 10^{-3}$ equivale a S‰ 35 o lo que es lo mismo 0,035 g/ Kg.

4.2. Clorinidad

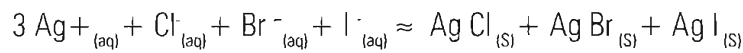
Ya que los iones mayores están presentes en proporciones constantes en el agua de mar, su concentración puede ser usada para inferir la salinidad del agua de mar. Así, antes de la invención del salinómetro, la salinidad era calculada a partir de la concentración de Cloruro en el agua de mar por lo sencillo y exacto que es determinarlo.

La relación empírica entre la clorinidad y salinidad ya se indicó anteriormente es:

$$S \times 10^{-3} = 1.80655 \times Cl \times 10^{-3}$$

Donde la clorinidad es definida como la masa en gramos de halógenos (expresados como el contenido de cloruros) que pueden ser precipitados de 1000g de agua de mar por Ag^+ . En la práctica la clorinidad es determinada titulando la muestra de agua con una solución valorada de $AgNO_3$.

La reacción de titulación es:



$$\text{Clorinidad} = \frac{\text{Peso Atómico De Cl}^{-} \times \text{Moles necesarios de Ag}^{\times} \text{ para precipitar Cl}^{-}, \text{Br}^{-}, \text{I}^{-} \times 1000}{1000 \text{ g de Agua de Mar}}$$

5. Patrones de distribución de la Salinidad

La distribución de salinidad de la superficie del mar tiene tendencia a ser zonal, pero las corrientes marinas pueden introducir alteraciones en este esquema. Los principales procesos responsables de esta distribución son: la evaporación, la precipitación y la mezcla, así las aguas más saladas están en latitudes medias donde la evaporación es alta, mientras que aguas menos saladas están las zonas próximas al ecuador en donde las lluvias bajan la concentración de sales en superficie, y en las latitudes altas donde el hielo derretido en las estaciones más cálida también desaliniza las aguas superficiales (Fig. 8.1.) Los valores más altos se presentan en regiones con alta evaporación como el este del Mediterráneo (39 psu) y el Mar Rojo (41 psu); también en mares como el Caribe y el Mediterráneo. Los valores más bajos se presentan localmente cerca de las costas donde desembocan grandes ríos y en regiones polares en donde la salinidad es casi nula. Sin embargo y desde una perspectiva global las variaciones de salinidad, tanto en superficie como en profundidad, se producen en un rango muy estrecho. La salinidad promedio del agua de mar es $S = 34.7$ psu y cerca del 50 % del agua está en el rango 34.6 psu a 34.8 psu.

5.1. Salinidad en superficie

La distribución de la salinidad superficial en la cuenca del pacífico sur oriental, (considerando el área comprendida entre los 5 y 42 grados de latitud sur, y desde la línea de costa hasta los 160 grados de longitud oeste), presenta un rango de variación del orden de 2.8 psu. La zona con la salinidad más alta -por sobre las 36 psu- se encuentra ubicada en un núcleo en la zona oceánica, abarcando aproximadamente de los 12 a los 28 grados de latitud sur, y los 105 y 150 de longitud Oeste (esto es a partir de unos 2800 km hacia el este, frente a la costa comprendida entre Lima, Perú y el norte de Coquimbo, Chile); mientras que hacia el sur de este núcleo, se evidencia una disminución progresiva en los valores de la salinidad superficial. En el caso de las aguas asociadas a la zona costera de esta región, la concentración superficial de sales en el agua presenta una disminución progresiva, con valores de salinidad de 35 psu al sur de Perú que disminuyen hasta los 34 psu en las cercanías de Valdivia. Un patrón semejante se repite en las aguas más oceánicas, pero con un leve desplazamiento hacia el sur respecto de los valores de salinidad observados en las aguas costeras para la misma latitud. Este patrón de distribución superficial de la salinidad es sostenido tanto por la presencia de la rama costera de la corriente de Humboldt, que transporta aguas menos salinas desde la zona subantártica, como por el incremento de la insolación hacia la zona ecuatorial que al acrecentar la evaporación del agua superficial contribuye al aumento de la salinidad en el agua de esta región (Fig 8.2.)

Mayores disminuciones que las observadas en la zona oceánica se presentan en zonas con grandes aportes de agua dulce, tales como en la desembocadura de ríos (Río Bío-Bío, Maule), en zonas costeras de alta pluviosidad (zona de los canales), o en áreas de hielo y deshielo entre estaciones frías y más cálidas (fiordos australes del sur de Chile, continente antártico). El caso contrario -mayores incrementos- suelen presentarse en zonas de alta insolación y circulación restringida de las aguas costeras, tales como la costa norte de Chile, en donde la alta evaporación del agua superficial puede incrementar

considerablemente la salinidad en las capas superiores, y algunas lagunas costeras con conexión esporádica con el mar abierto, tal como ocurre en las lagunas costeras de Topocalma, Cahuil, Bucalemu y Boyeruca, ubicadas en la VI Región de Chile.

5.2. Salinidad en profundidad

La distribución de la salinidad en profundidad presenta también variaciones en un rango muy pequeño. En este caso, considerando el contenido de sales en las aguas vecinas a la costa y hasta una longitud de 110 grados -a lo largo de la línea que se proyecta desde el puerto de Caldera hacia el oeste, se visualiza que los valores más altos de salinidad (34.8 a 35 PSU) se encuentran en aguas superficiales y hasta unos 350 metros, pero no a partir inmediatamente de la línea de costa, sino que desde aproximadamente los 78°O y en dirección oeste. En la zona próxima a la costa y tanto en superficie como en profundidad, la salinidad tiene valores que oscilan en rangos intermedios (34.4 a 34.7 psu). Las aguas con salinidades más bajas se encuentran en dos núcleos, uno más superficial y menos salino (entre 34,2 y 34,3 psu), distribuido entre los 75 y 90° O y a una profundidad de unos 100 metros, en la proximidad de la costa, y hasta bajo de los 200 metros en su extremo más oceánico; y otro núcleo un poco más salino (entre 34,3 y 34,4 psu) que se distribuye entre los 72 a los 110° O, a una profundidad, en la zona más costera, de entre 400 a 700 metros, mientras que en la parte más oceánica (en la zona de los 110° O) llega a alcanzar una profundidad entre 400 a 1000 metros (Fig. 8.3.)

La distribución de la salinidad en profundidad, esta condicionada por la denominada circulación termohalina, que es la movilización de las masas de agua en sentido vertical como una consecuencia de las diferencias en densidad. Estas masas de agua, una vez distribuidas en la columna de agua de acuerdo a su densidad, son movilizadas hacia otras latitudes ya sea por la acción de las diferencias de presión hidrostática generadas por el ascenso y descenso de las masas de agua, como también por las distintas fuerzas que tienen acción sobre el desplazamiento de los fluidos en el planeta¹³. En el caso de la distribución superficial de la salinidad y si bien los factores antes mencionados también contribuyen a movilizar superficialmente las masas de agua, la distribución de la salinidad en superficie está más bien condicionada por factores climáticos y continentales tales como pluviosidad, evaporación, aporte de aguas dulces continentales.

6. Lecturas recomendadas

Boyer, T.P., Levitus, S., Antonov, J., Conkright, M., O' Brien, T., & Stephens, C. 1998. World Ocean Atlas 1998 Vol. 5: Salinity of the Pacific Ocean. NOAA Atlas NESDIS 31. U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 166 pp.

Emery, W.J., & Meincke, J. 1986. Global water masses: summary and review, *Oceanologica Acta*, 9 (4): 383-391.

Neumann, G. & Pierson jr., W. J. 1966. *Principles of Physical Oceanography*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs N.J.

Pickard, G. L. & Emery, W. J. 1990. *Descriptive Physical Oceanography* 5th ed. Pergamon Press, Oxford.

Schneider, W., Fuenzalida, R., Rodríguez-Rubio, E., Garcés-Vargas, J. & Bravo, L. 2003. Characteristics and formation of Eastern South Pacific Intermediate Water. *Geophysical Research Letters*, 30 (11): 1581

¹³ Ver capítulo 10 "Corrientes Marinas y Masas de Agua"

Stewart, R.H. 2003. Introduction to Physical Oceanography, August 2003 Edition, 344 pp.

Strub, P.T., Mesías, J.M., Montecino, V., Rutllant, J., & Salinas, S. 1998. Coastal Ocean Circulation off Western South America, in *The Sea*, 11, edited by Robinson, A.R, and K.H. Brink, John Wiley and Sons, 273-313.

Tomczak, M., & Godfrey, J. S. 1994. *Regional Oceanography: An Introduction*, Pergamon, 422 pp.

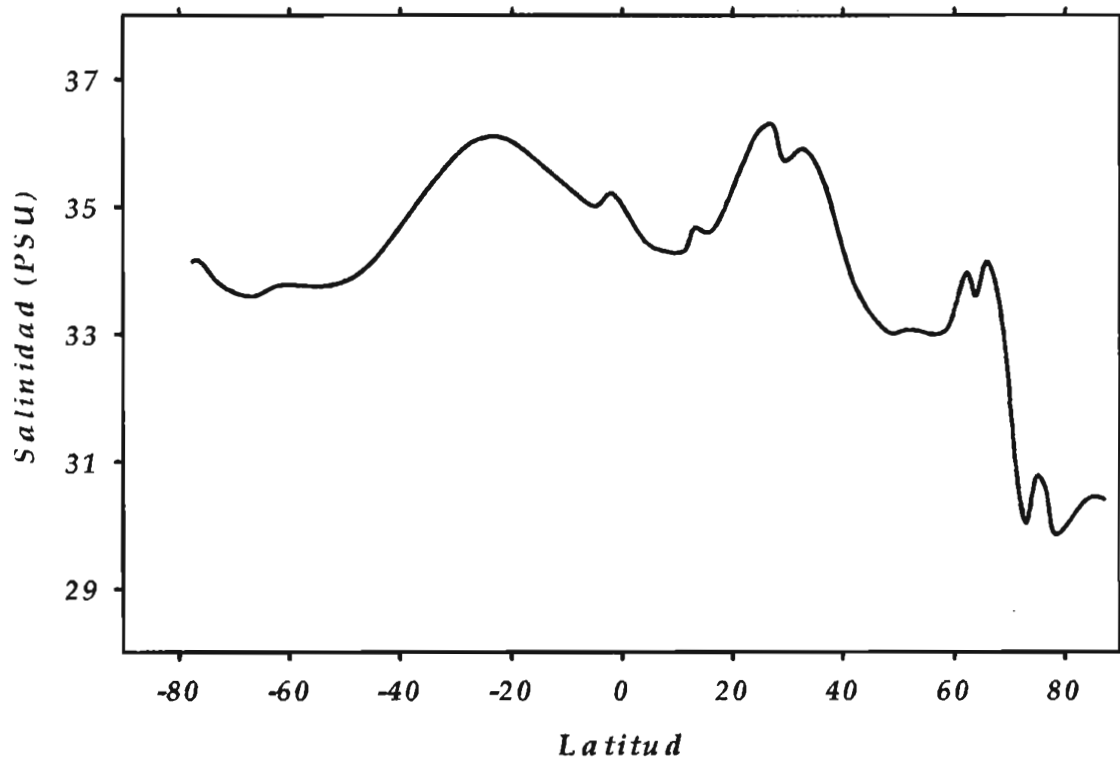


Figura 8.1. Distribución latitudinal de la salinidad superficial promedio (modificado de Stewart, 2003).

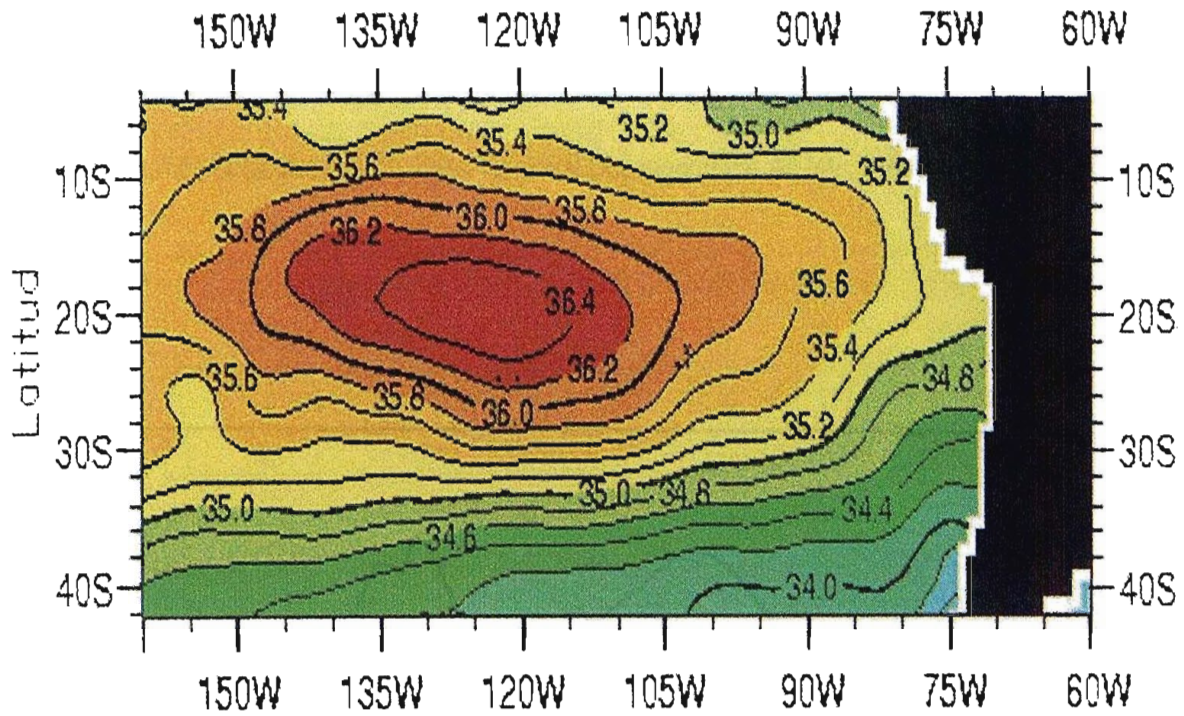


Figura 8.2. Distribución de la salinidad superficial en el Océano Pacífico, frente a la costa sur de Perú y norte de Chile (modificado de World Ocean Atlas, 1998).

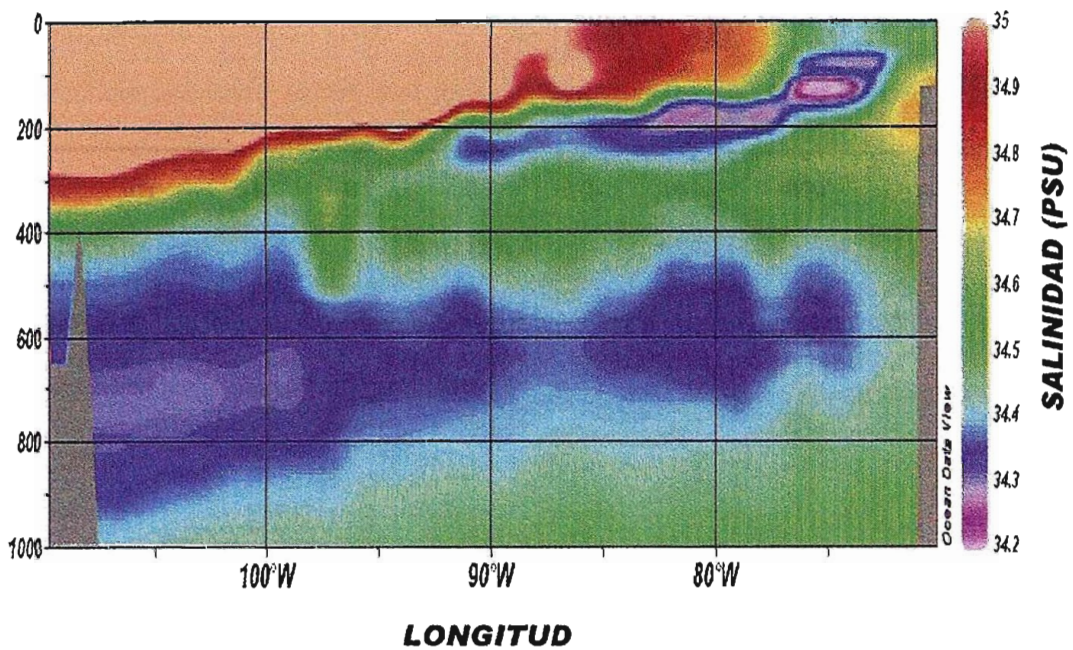


Figura 8.3. Distribución de la salinidad en profundidad (0 a 1000 metros), en un corte perpendicular a la costa de Chile, a lo largo del los 27°S (proximidad de Caldera).