

PRÁCTICA CORRIENTES DE SUPERFICIE

Objetivos de la actividad:

- Comprender y reconocer los principales movimientos superficiales del agua en los océanos.
- Ver cómo las corrientes influyen en el clima, redistribuyendo la energía del sol y el calor almacenado en la tierra.
- Comprender el rol que juegan los vientos, la gravedad y la rotación de la Tierra en la determinación de la dirección y velocidad de las corrientes oceánicas.
- Comprender la física de las surgencias y su importancia en la temperatura de las aguas costeras y la moderación del clima.

Glosario:

Efecto Coriolis: Una "fuerza" aparente en las partículas en movimiento que resulta de la rotación de la tierra. Hace que los cuerpos en movimiento se desvíen hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. La "fuerza" es proporcional a la velocidad y la latitud del objeto en movimiento.

Corrientes: El movimiento del agua a medida que fluye por una pendiente, empujada por la tensión del viento o por las fuerzas de marea. La velocidad del flujo generalmente se expresa en centímetros por segundo, o para corrientes de movimiento rápido en metros por segundo o en kilómetros por hora.

Topografía dinámica: las irregularidades en la superficie del mar producido por el viento o las diferencias de densidad, generalmente expresadas en metros dinámicos o fracciones de los mismos. Esta topografía cambia con el tiempo y las estaciones.

Ekman espiral: Representación teórica de un viento que sopla constantemente sobre una gran masa de agua, lo que hace que la capa superficial se desplace en un ángulo de 45° a la derecha en el hemisferio norte. El agua a profundidades sucesivas se desplaza cada vez más hacia la derecha en forma de espiral hasta que a cierta profundidad, conocida como la base de la corriente impulsada por el viento, el movimiento es esencialmente cero. Esta profundidad depende de la duración y la velocidad de los vientos, pero es de aproximadamente 100 metros.

Corriente geostrófica: Corriente generada al asumir un equilibrio exacto entre el gradiente de presión horizontal (densidad) y el efecto Coriolis. La forma habitual de derivar corrientes geostróficas es preparar un mapa de la topografía dinámica basado en observaciones de temperatura y salinidad para varias estaciones oceanográficas. La dirección de la corriente está indicada por los contornos de la topografía dinámica, y su velocidad por el espaciado entre los contornos. A pesar de que las suposiciones subyacentes solo son aproximadamente, las direcciones y las velocidades calculadas por este método están muy cerca de las direcciones y las velocidades reales.

Introducción:

La circulación superficial en los océanos es el resultado de varios procesos entre los que se incluyen el stress del viento que actúa sobre la superficie del agua y las diferencias de densidad debidas, entre otras causas, al calentamiento solar. Si supusiéramos que los sistemas de corrientes observados son simplemente el efecto de la acción del viento, deberíamos esperar que se acomodasen a los cinturones de vientos más importantes sobre la Tierra (Figura 1). De hecho lo hacen en buena medida; sin embargo, aparte del obstáculo obvio que constituyen los continentes, puede observarse una cierta desviación de las corrientes

respecto a la dirección del viento en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en sentido contrario en el hemisferio sur. Esta desviación es una consecuencia de la rotación de la Tierra, manifestada aquí a través del efecto de Coriolis. Recuérdese que el efecto de Coriolis actúa sobre todo objeto en movimiento, es directamente proporcional a la velocidad del mismo, actúa perpendicularmente a la velocidad y depende de la latitud, siendo máxima en los polos y nula en el ecuador. Este efecto hace que los objetos se desvíen más cuanto mayor sea su velocidad, y no tiene influencia en la energía del movimiento, modificando sólo la dirección, hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur.

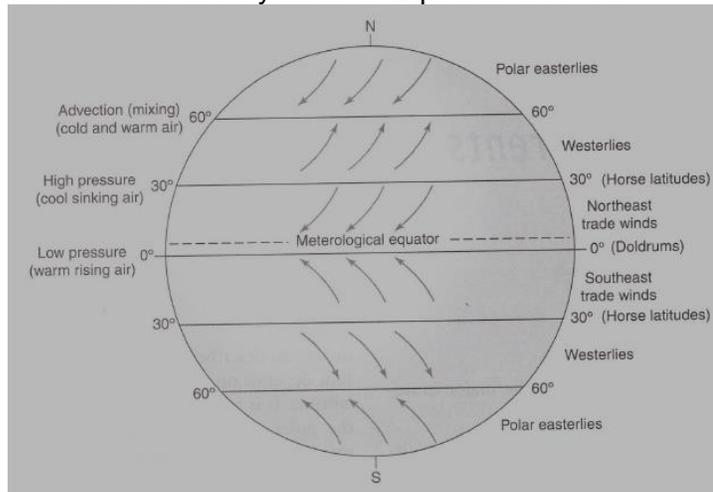


Figura 1. Principales cinturones de viento de la tierra y zonas de alta y baja presión. El ecuador meteorológico está a 5-10° norte del ecuador geográfico.

Principales corrientes del mundo

Podemos describir en forma muy simplificada los sistemas principales de corrientes superficiales como giros circulatorios limitados por los continentes y por el ecuador, con sentido horario en el hemisferio norte y antihorario en el sur (Figura 2). Estos giros circulatorios no están centrados en las cuencas sobre las que circulan, sino desplazados hacia el oeste, de modo que las **corrientes del oeste** de los océanos son, **como norma general, más intensas, estrechas, rápidas y profundas**, mientras que **las del este son más dispersas, anchas, someras y lentas**. Por ejemplo, la corriente de Kuroshio, en Japón, es seis veces más intensa en flujo que la corriente de California, que por su parte es cuatro veces más ancha. Las velocidades de la primera pueden alcanzar 10 km/h, mientras que en la segunda raramente llegan a los 2 km/h. Este fenómeno se conoce como *intensificación occidental* y es debida a la rotación de la Tierra y a la conservación del momento angular. El mismo fenómeno ocurre con la corriente del Golfo y la de Canarias. Las corrientes en los océanos del Sur son, en lo que se refiere a los aspectos descritos, imágenes especulares de las del norte, presentando también la *intensificación occidental*. Nótese que la línea divisoria entre las circulaciones del norte y del sur, está situado a unos pocos grados al norte del *ecuador geográfico* (Figura 2). Dicha línea, conocida como el *ecuador meteorológico* se encuentra levemente al norte del *ecuador geográfico* (5° en promedio). En el Hemisferio Norte, las masas terrestres continentales ocupan un área mayor que los océanos, y los vientos se ralentizan por la turbulencia y la fricción a medida que fluyen sobre un terreno irregular. En cambio, el Hemisferio Sur está dominado por océano, con menos áreas ocupadas por continentes y grandes extensiones de océano abierto. (Figura 2). Debido a esto, las aguas del océano sur están sujetas a vientos con velocidades generales mayores. Los marineros en el Océano Pacífico Sur eran conscientes de esto, dando

a las latitudes altas del sur nombres tan descriptivos como los *rugientes cuarenta* y *gritando los sesenta*. El ecuador meteorológico también marca la convergencia entre las velocidades de los vientos alisios del noreste y sureste, y es una zona de aire caliente que asciende (baja presión), ondulantes nubes cargadas de agua, y viento errático. Es conocido como el *doldrums* y fue el flagelo de los barcos de vela que intentaron cruzar el ecuador.

Las corrientes ecuatoriales norte y sur que fluyen hacia el oeste hacen que el agua se acumule en el Océano Pacífico ecuatorial occidental, y los satélites meteorológicos han medido esta topografía de la superficie del océano. La disminución periódica de las tensiones de los vientos alisios del sur en la superficie del océano hace que la protuberancia de las aguas cálidas de la superficie se mueva hacia el este a lo largo del ecuador, dando como resultado un fenómeno llamado El Niño.

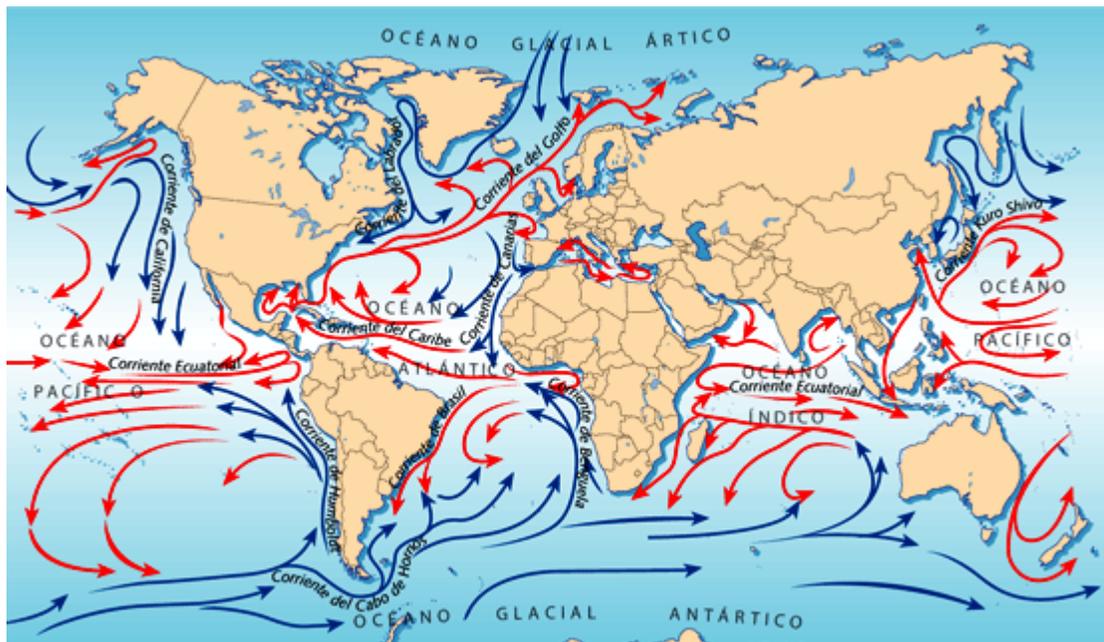


Figura 2. Principales sistemas de corrientes oceánicas de superficie del mundo.

Volúmenes de Flujo de Agua

Las corrientes principales transportan enormes volúmenes de agua. La unidad de flujo es el Sverdrup (Sv), nombrada así por Harold Sverdrup, un famoso oceanógrafo, es utilizada para indicar un flujo de 1.000.000 metros cúbicos por segundo. Los volúmenes de transporte de agua de las principales corrientes del Océano Pacífico Norte se muestran en la Figura 3.

Los datos del Océano Atlántico son más difíciles de obtener, pero se estima que el flujo de la Corriente del Golfo es por lo menos de 55 Sv, y la de la Corriente de las Canarias va de 2-16 Sv aproximadamente. La intensificación del Oeste está claramente demostrada en esta figura.

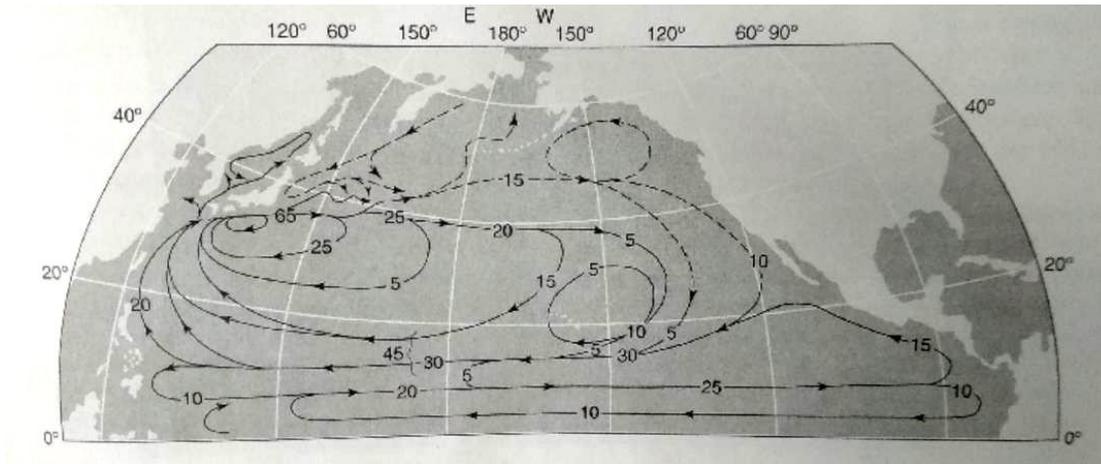


Figura 3. Mapa de transporte del Pacífico Norte. Las líneas con flechas indican la dirección aproximada del transporte de agua a menos de 1500 metros de profundidad, y los números muestran los volúmenes de agua transportados en sverdrups. Las líneas quebradas muestran corrientes de agua fría; las líneas sólidas muestran corrientes cálidas.

Velocidad de Flujo y Topografía Dinámica

Las velocidades más altas sostenidas, registradas, se encuentran en la Corriente de Kuroshio, la cual es conocida por moverse a 3m/s. Velocidades de 50cm/s han sido reportadas en el flujo al oeste cerca del ecuador. Una forma ideal de medir la velocidad y dirección de las corrientes sería estableciendo correntómetros en todos lados y a todas las profundidades. Sin embargo, el altísimo costo y las dificultades logísticas que esto implican, hace que este tipo de instrumentos se utilicen sólo en áreas restringidas. El otro método más comúnmente utilizado para determinar movimientos de corrientes de gran escala, basado en la distribución de densidad (y por tanto, de la presión) en una región oceánica de interés. Lo significativo son las variaciones o anomalías horizontales de la densidad. La distribución de dichas anomalías puede relacionarse con la desviación de la superficie del agua con respecto a la horizontal; con ellas puede construirse un mapa mostrando la *topografía dinámica* que en esencia describe las irregularidades de la superficie del mar. La topografía refleja los gradientes de presión horizontales, y a partir de ella es posible obtener aproximaciones de corrientes reales. Para esto, se toman una serie de medidas de temperatura y salinidad a una profundidad de aprox. 1 km en un cierto número de estaciones. De estos datos se pueden obtener gradientes de presión horizontales que se grafican en una carta de topografía dinámica. Si graficamos los valores de igual topografía dinámica y asumimos que sólo el efecto de Coriolis está actuando, entonces teóricamente el flujo será paralelo a los contornos. Cuando se colocan puntas de flecha marcando la dirección correcta a los contornos, se indica la dirección del flujo. Estas líneas son llamadas líneas de flujo. La figura 4 muestra una carta en la que se observa la topografía dinámica y las "líneas de flujo" para la Corriente de Kuroshio en el Océano Pacífico Occidental. El espacio entre líneas nos da una idea de la velocidad de flujo. En donde las líneas se encuentran muy próximas, el gradiente de presión horizontal es alto y por tanto el flujo será más rápido.

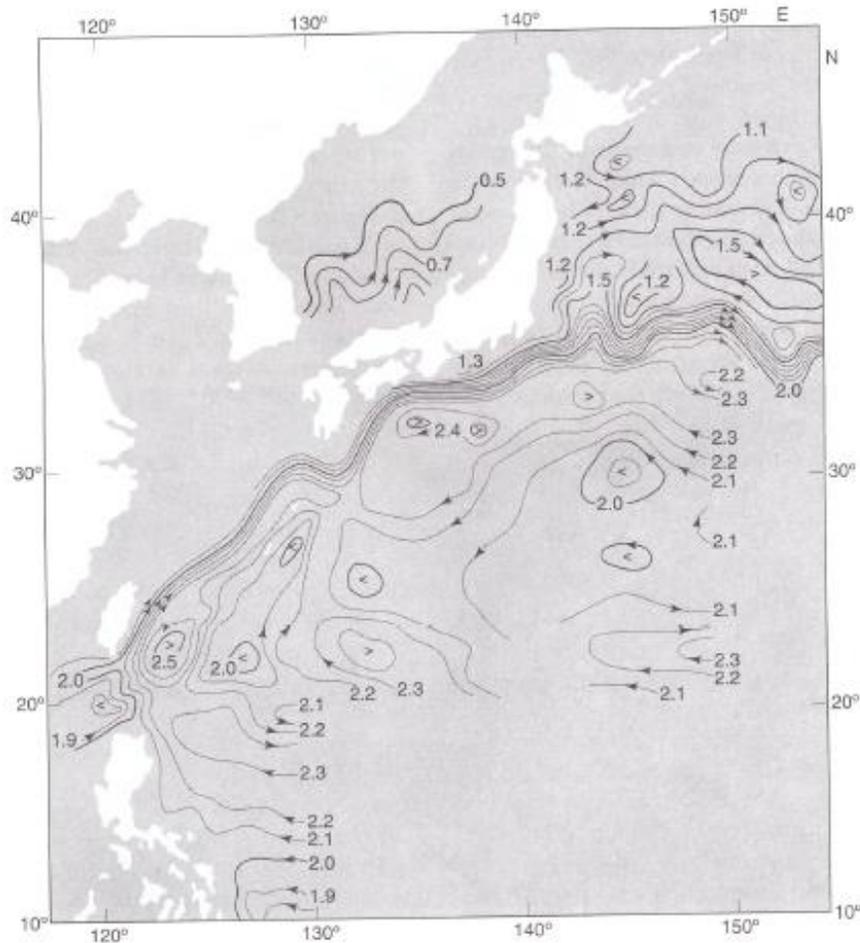


Figura 4. Mapa de topografía dinámica para la corriente de Kuroshio. Los números a lo largo de los contornos indican la elevación de la superficie del mar en metros, y las líneas de corriente muestran la dirección del flujo. Tenga en cuenta que la corriente es en sentido horario desde las áreas de alta presión hacia las áreas de baja presión

El Origen de la Topografía Dinámica

¿Cómo se forman y se mantienen las irregularidades en la superficie del mar? Para responder esta pregunta debemos examinar la interacción entre el viento, la gravedad y el efecto de Coriolis. En 1905, V.W. Ekman brindó la explicación teórica para que sirviera como piedra angular para todos los estudios subsiguientes sobre corrientes generadas por vientos. El desplazamiento de las aguas superficiales por acción del viento se produce de un modo bastante poco intuitivo. En 1886, el científico y explorador noruego Fridtjof Nansen realizó una expedición por el Mar Ártico, observando que los movimientos de los témpanos de hielo forzados por el viento no eran paralelos al mismo, sino que se producían con un ángulo de entre 20° y 40° a la derecha. Ekman estudió este problema teóricamente, asumiendo ciertas simplificaciones. Dado un viento de velocidad constante soplando sobre un océano

homogéneo; (el océano no tenía variaciones en densidad y su superficie se mantenía horizontal), el agua superficial fluiría 45° hacia la izquierda de la dirección del viento en el Hemisferio Sur. Sin embargo, esta capa superficial de pocos metros de espesor, pone en movimiento una capa subyacente que se desvía más hacia la derecha (en el hemisferio Norte), pero con menor velocidad debido a la fricción. Las capas subsiguientes hacia abajo se ponen en movimiento, y cada una de ellas se desvía más hacia la derecha hasta que en profundidad hay una corriente débil que fluye en la dirección opuesta. Esta rotación con la profundidad de la corriente generada por el viento es conocida como **Espiral de Ekman** (Figura 5). La base de la columna de agua impulsada por el viento varía con la velocidad y la persistencia del viento, pero generalmente se considera que está a una profundidad de 100 metros. Esta teoría en sí misma fue revolucionaria, pero más importante es el hecho de que la dirección promedio del flujo en toda la columna de agua es de 90° a la derecha de la dirección del viento en el hemisferio norte y de 90° a la izquierda en el hemisferio sur. Este movimiento neto de agua en ángulo recto con respecto al viento se conoce como *transporte Ekman*.

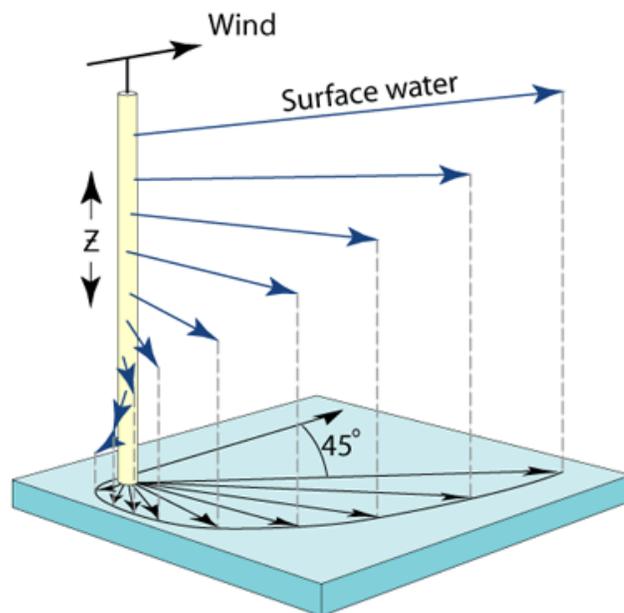


Figura 5. Espiral de Ekman en el hemisferio Norte.

Ahora estamos prontos para ver cómo se desarrolla la topografía dinámica. Los vientos alisios del noreste y los vientos del oeste en el hemisferio norte empujan el agua hacia una elevación cerca del centro de los giros de las corrientes, debido al transporte de Ekman. Esta elevación de agua superficial cálida es inestable, y el agua tiende a retornar a una condición de nivel estable con una distribución uniforme de agua cálida cerca de la superficie y agua fría abajo. Cuando la masa de agua comienza a fluir en bajada por gravedad (a una región de menor presión) el efecto de Coriolis desvía su movimiento a la derecha después que alcanza

una velocidad apreciable. A medida que continúa bajando se desvía más lejos a la derecha porque el efecto de Coriolis opera continuamente a la derecha de su movimiento. Una vez que se ha desviado 90° no puede cambiar más lejos sin fluir cuesta arriba. En este punto hay un balance perfecto entre la fuerza de Coriolis y la gravedad, y la masa de agua continúa moviéndose alrededor de la elevación paralela al contorno de la topografía dinámica, o líneas de corrientes (Figura 6). Si se vuelve ligeramente hacia abajo gana velocidad, y el efecto de Coriolis la desvía hacia la derecha nuevamente. En este punto se alcanza un balance entre las fuerzas de Coriolis y la presión (gravedad).

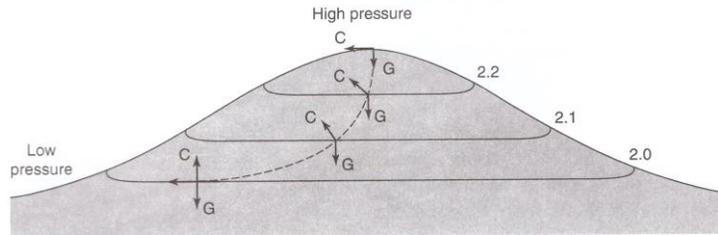


Figura 6. Diagrama de las fuerzas generadoras de corrientes geostróficas en el hemisferio Norte

Las corrientes generadas de esta manera son llamadas **corrientes geostróficas**. Un esquema de este fenómeno para el Atlántico Norte se muestra en la Figura 7. Se puede apreciar que una vez que el montículo de agua es elevada por los vientos, no es atenuado flujo geostrófico, debido a que el agua simplemente se mueve alrededor del montículo de agua. Sin embargo, en la naturaleza, esto no es exactamente cierto, ya que se produce cierta fricción en las corrientes de movimiento rápido y las parcelas de agua finalmente se mueven en espiral hacia abajo. Se dice que si el viento cesa, el océano se vuelve perfectamente plano en cerca de 3 años y las corrientes de superficie tal como las conocemos dejarán de existir; de todos modos las diferencias de densidad continuarán causando movimiento en las profundidades.

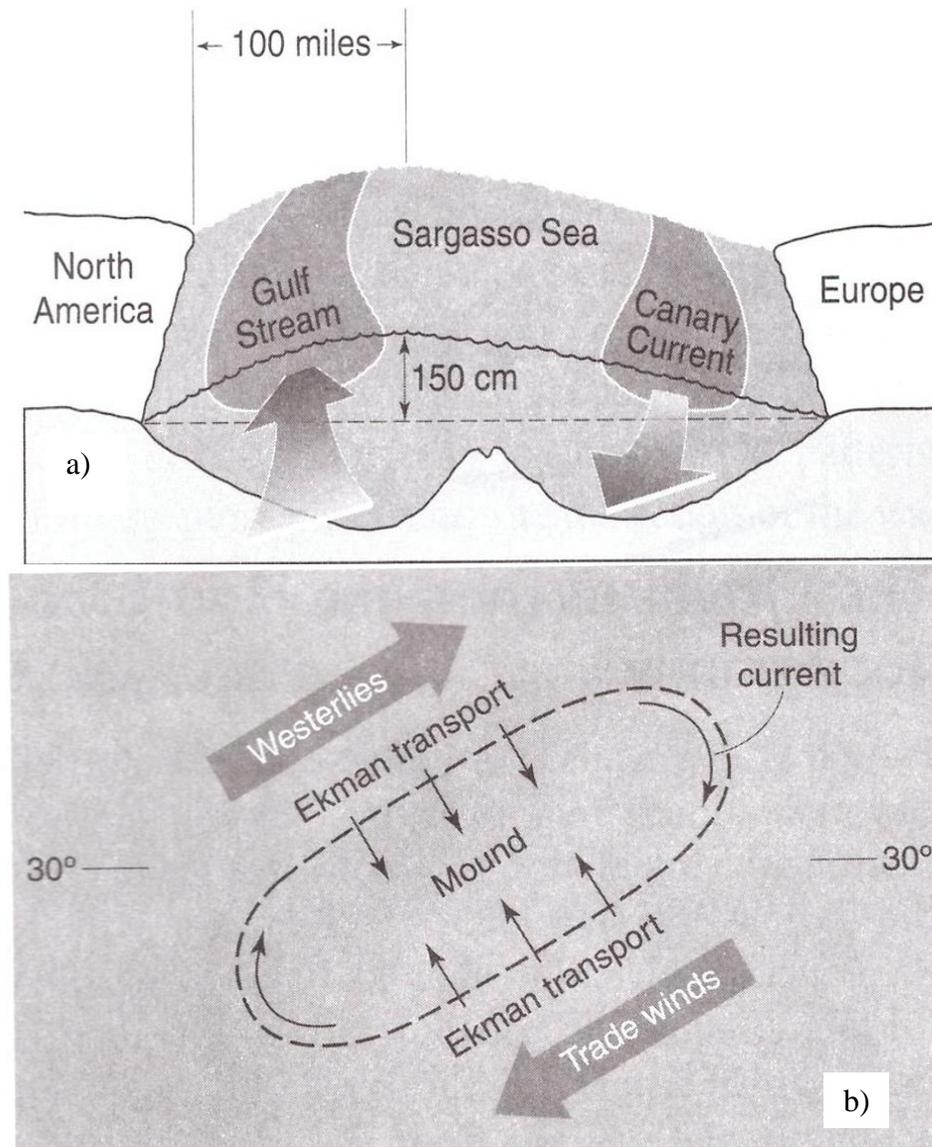


Figura 7. a) El montículo en el océano Atlántico Norte entre la corriente del Golfo y la corriente Canaria. El mar de los Sargazos es una región de aguas cálidas y transparentes, de color azul profundo y que contiene grandes cantidades de sargazo o algas marinas. B) La creación de un área oceánica de alta presión a 30 ° N por el viento predominante.

EJERCICIOS

1. Basado en la información de la Figura 2, describe las siguientes corrientes como relativamente cálidas o frías, y rápidas o lentas (basadas en la intensificación occidental)

Corriente	Temperatura relativa	Velocidad relativa
California		
Kuroshio		
Benguela		
Corriente del Golfo		
Canaria		
Labrador		
Agulhas		

2. a) ¿Cuál es la única corriente que mezcla completamente las aguas entre el océano Atlántico, Pacífico y el Índico?

b) ¿Por qué es tan difícil para los marineros que utilizan un buque de vela dejar el Océano Atlántico Sur y entrar en el Océano Pacífico Sur?

3. La carrera de yates "America's cup" se sostuvo tradicionalmente de Newport, Rhode Island (41° N 71° W) en costa este de los EEUU. Cuando la carrera la ganó Australia, la misma se trasladó a Perth, en la costa suroeste de Australia (32° S 115° E).

a) ¿Qué cambio de temperatura esperaría usted ver en el agua de Perth, Australia, en comparación con la locación de la carrera de Rhode Island?

¿Qué cambios en la altura de las olas (que están controladas en gran parte por la fuerza del viento superficial) esperaría encontrar en Australia?

¿Que cambia en la fuerza y la dirección de las corrientes?

b) La carrera America's Cup también se ha celebrado en el Pacífico Oriental, frente a San Diego, California (32°N117°W). ¿Esperaría que las condiciones oceánicas de San Diego sean más semejantes a las de New Port, Rhode Island, o más semejante a la de Perth, Australia? Explique su razón.

4. Utilizando la escala del mapa de la corriente de California (figura 8), determina el máximo y mínimo de la velocidad del Punto Concepción. Utiliza la escala más cercana para determinarla.

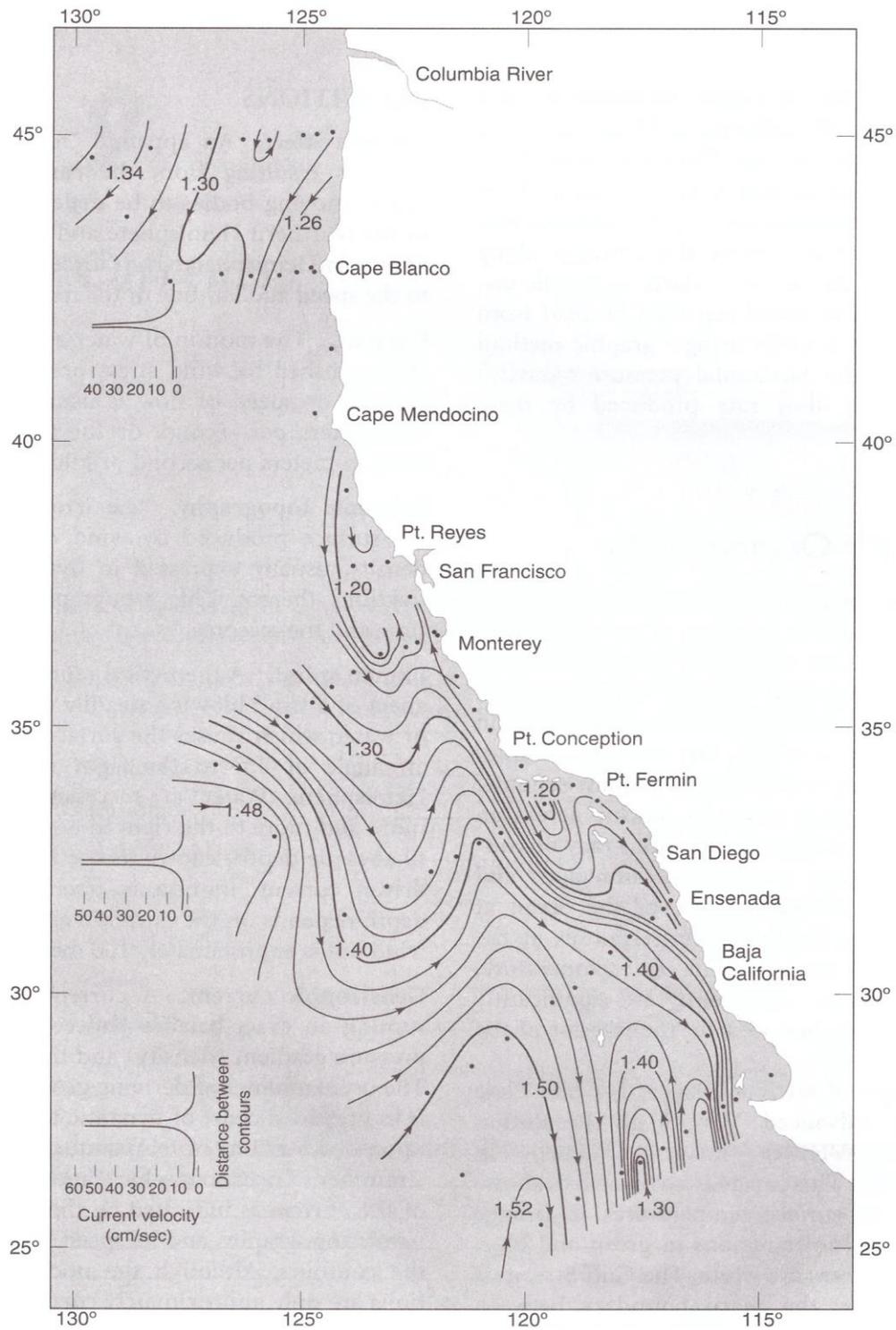


Figura 8. Topografía dinámica del mar superficial durante el verano de 1993 de California y Baja California.

5. La sección transversal de temperatura de San Francisco (California) a Honolulu (Hawaii), se muestra en la figura 9. La sección atraviesa la Corriente de California y el agua central del este del Pacífico Norte a una profundidad de 500 metros. La temperatura del agua superficial y la salinidad, y los perfiles de temperatura y profundidad se tomaron en 21 estaciones. La siguiente tabla muestra las lecturas de temperatura superficial y salinidad. La corriente de California se reconoce por aguas superficiales más frías, salinidades bajas e isoterms irregulares. El Agua Central del Pacífico Nororiental Oriental (ACPNO) es mucho más cálida, con salinidades superiores al 34,8%. Existe una transición con salinidades en el rango de 34,0-34,8% entre las dos masas.

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Salinidad Superficial	33,2	32,9	33,10	33,20	-	33,50	33,45	33,40	33,41	34,65	34,95
Temperatura superficial	11,2	12,5	14,8	14,5	15,0	15,8	15,2	15,7	16,0	17,0	17,5
Estación	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Salinidad Superficial	35,10	35,20	35,20	35,20	35,25	35,10	35,15	35,10	35,10	35,15	
Temperatura superficial	18,5	18,9	19,0	19,8	20,5	22,0	22,4	22,8	23,2	23,7	

- a) Grafica los datos de la salinidad superficial (tabla anterior) de cada estación en la gráfica arriba de la figura 9, utilizando la escala de salinidad ubicada al lado derecho. Utiliza color y conecta los puntos de cada estación con una línea.
- b) Grafica la temperatura de cada estación (tabla anterior) de la misma manera, utilizando la escala de temperatura ubicada del lado izquierdo de la gráfica. Usa un color diferente y conecta los puntos de los datos con línea punteada.
- c) ¿A qué distancia de San Francisco se encuentra la región del ACPNO en la sección? Una capa mixta superficial puede reconocerse por la isoterma vertical. ¿A qué profundidad se extiende la capa mixta superficial?
- d) ¿Qué tan grande es la corriente de californiana en esta sección?
- e) Rellene la tabla a continuación, para comparar estas tres masas superficiales.

Corriente	Forma isoterma	Temperatura del agua superficie	Salinidad
Corriente de California			
Zona de transición			
Agua central del este del Pacífico Norte			

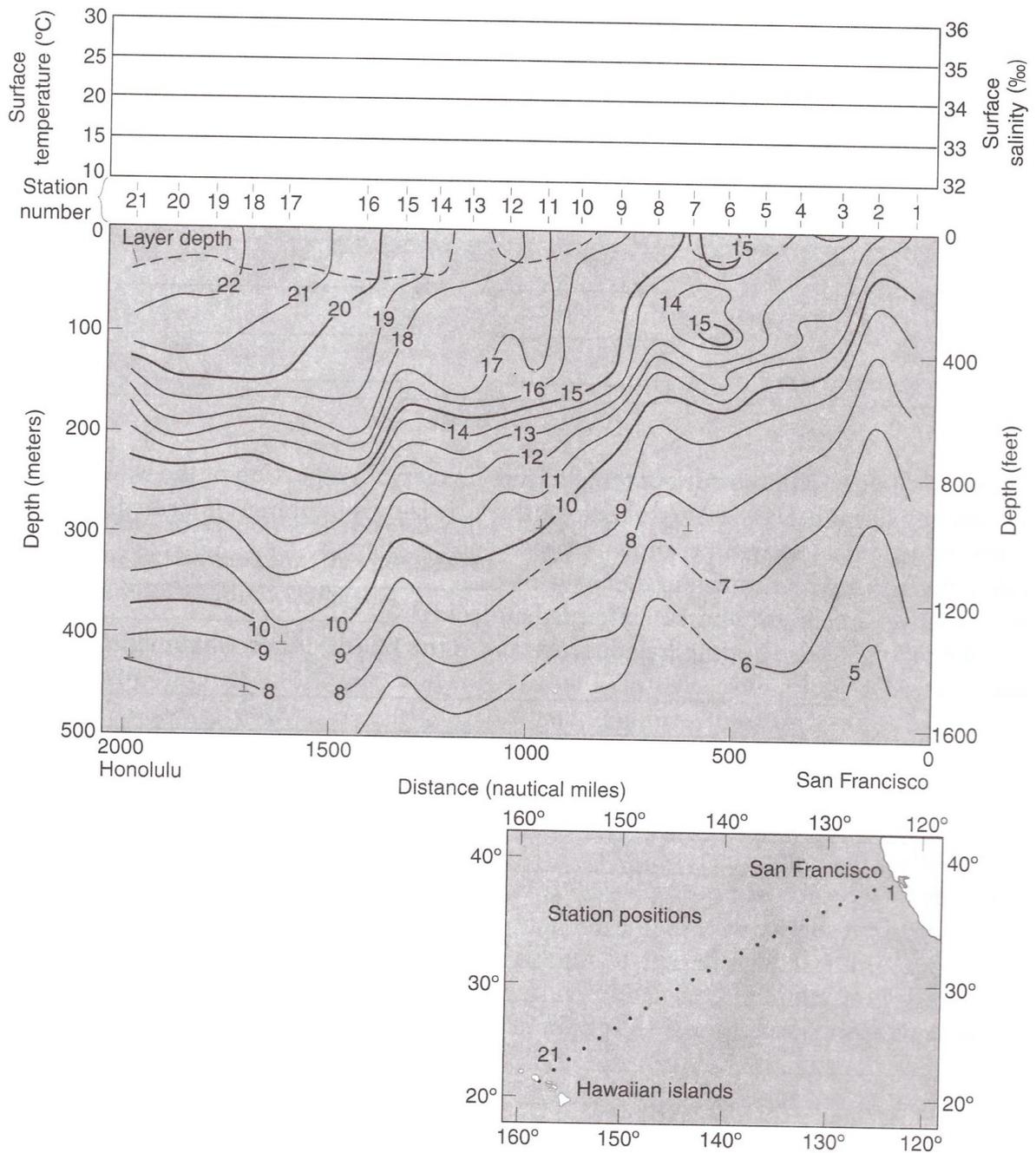


Figura 9. Sección transversal de la temperatura a 500 metros desde San Francisco a las islas Hawaianas

6. La lámina a color 10 muestra la imagen de las temperaturas superficiales del mar al Oeste del Océano Atlántico en Noviembre de 1982. Las temperaturas cálidas se muestran en naranja y, temperaturas intermedias están en verde y amarillo, y las temperaturas más frías en azul.

- a) ¿Cuál es la corriente más grande mostrada en la figura?
- ¿Cuál es la temperatura relativa (cálida/intermedia/fría)?

b) ¿Dicha corriente sigue un camino recto en toda la imagen? En caso negativo, ¿qué podría haber causado la ocurrencia de “meandros” laterales?

c) ¿Qué es la característica localizada cerca de la localización 39°N y 72°W? ¿Cuál es la temperatura relativa de dicha característica comparado con las aguas superficiales adyacente?

¿Cómo pudo haberse formado dicha característica? (Pista: piensa en corrientes superficiales de meandros)

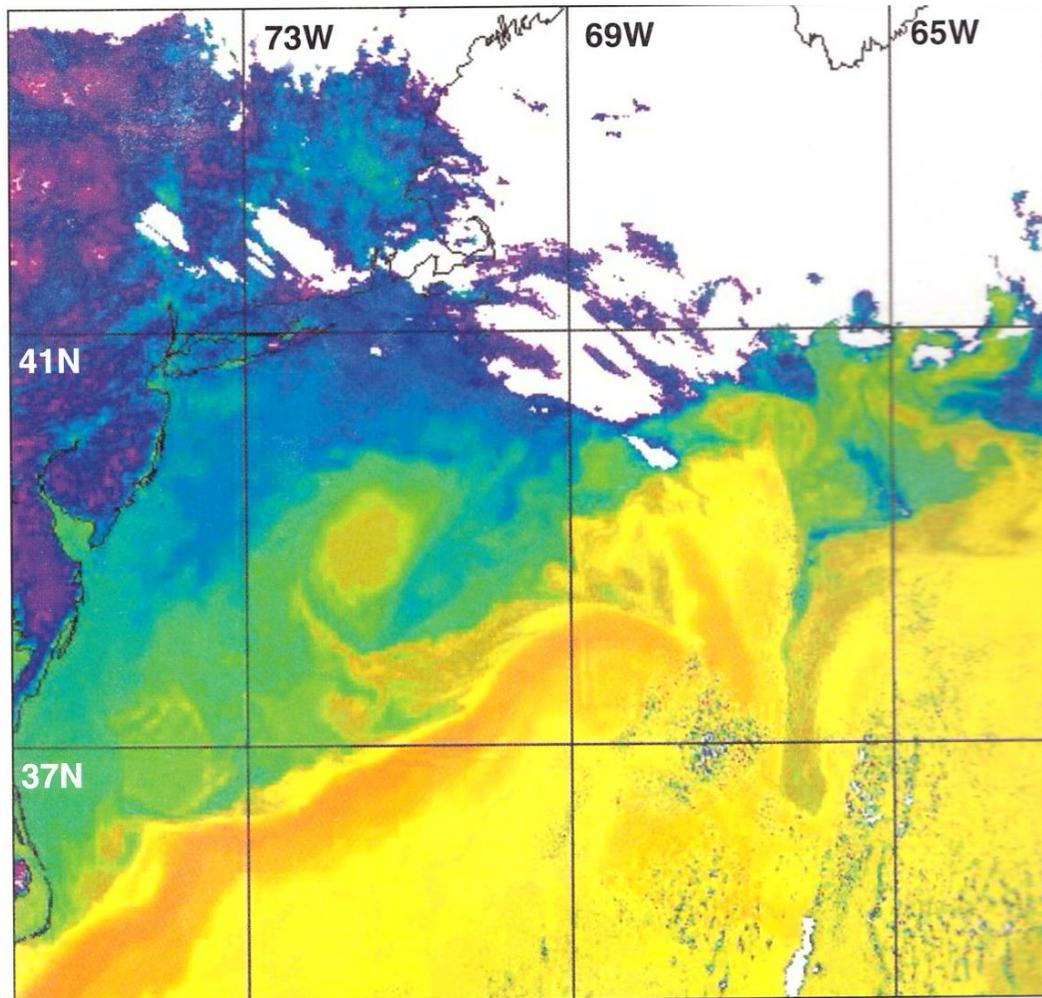


Figura 10. Radiómetro avanzado de muy alta resolución. Oeste del Océano Atlántico en Noviembre de 1982

7. En esta misma región del Atlántico Norte se muestra en la figura 11, con estaciones oceanográficas (y datos de salinidad) de muestreos de agua superficial, en un ejercicio anterior del práctico 6 se dibujaron las isohalinas.

a) Compara las isohalinas de la Figura 11 con los datos de temperatura superficial de la figura a color 10. ¿Cuál provee de mayor detalle de información, la imagen 10 o las estaciones de salinidad de la figura 11?

b) ¿Se observan meandros laterales evidentes en la figura de color 10 que no son fácilmente evidenciadas en los datos de salinidad del ejercicio? Si los datos de la figura 10 son más detallados, ¿por qué sería deseable enviar buques oceanográficos a esta región del océano?

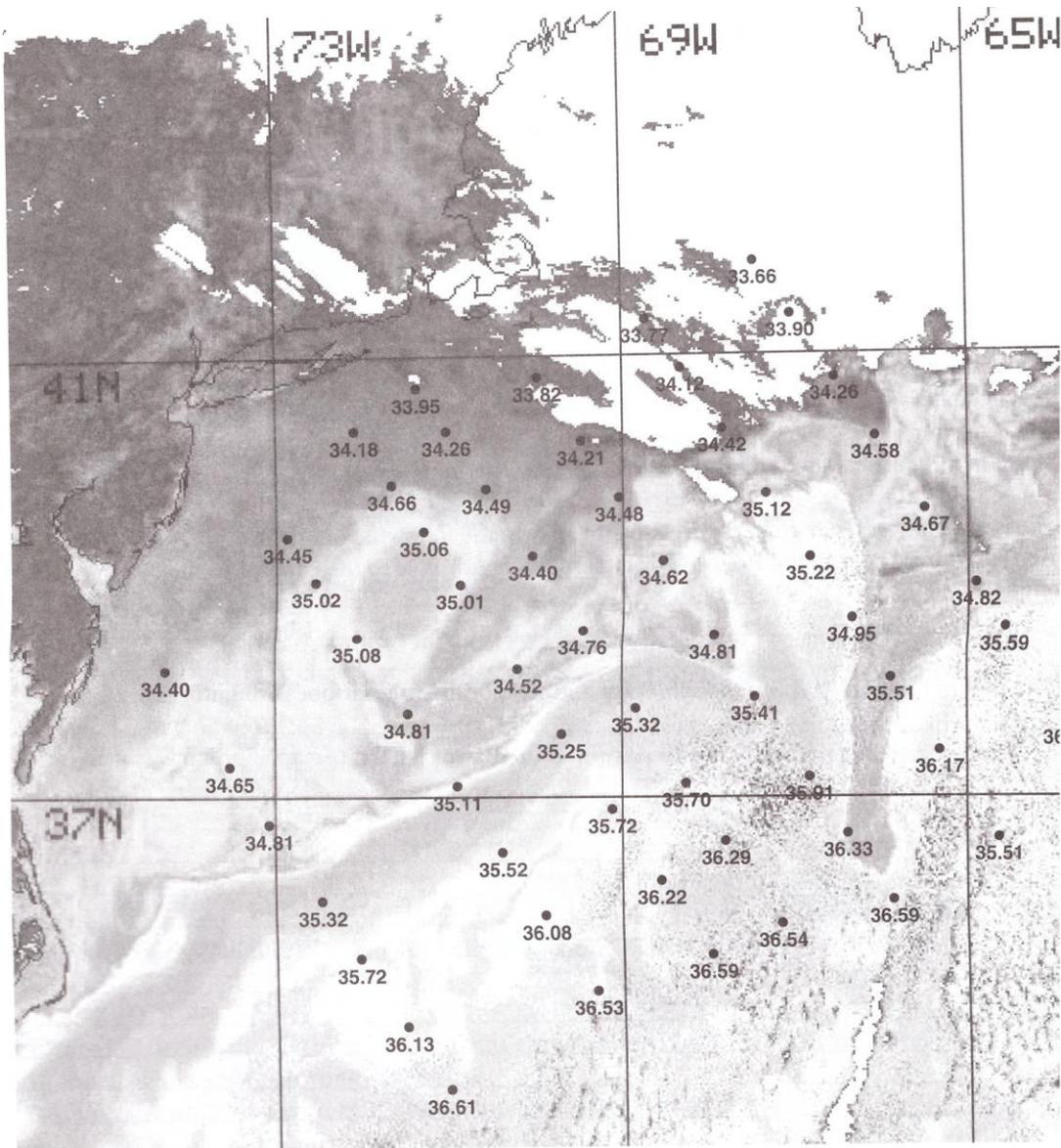


Figura 11. Valores de salinidad superficial de 60 estaciones en el Oeste del Océano Atlántico