

11. Estratificación estacional y frentes de marea

La estructura vertical de la columna es crítica para determinar la disponibilidad de luz y nutrientes al fitoplancton. En este capítulo consideraremos los procesos físicos que determinan si una región se estratificará en primavera. Derivaremos una condición para la estratificación estacional que indica que durante el verano es posible dividir la plataforma en regímenes estratificado y bien mezclado.

La estructura vertical de la columna es el resultado de una competencia entre el empuje generado por el calentamiento y los flujos de agua dulce por un lado y los procesos de mezcla por mareas y vientos del otro. Por ahora nos restringiremos al caso de plataformas en latitudes medias donde el empuje dominante es debido a los flujos de calor. Mas adelante veremos el caso en el cual domina el flujo de agua dulce.

Durante el invierno el océano pierde calor y estos flujos ayudan a la mezcla vertical ya que la columna se vuelve inestable convectivamente. Por lo tanto, lejos de las áreas de influencia de los estuarios, las columnas están bien mezcladas durante el invierno. Este régimen bien mezclado continúa hasta el comienzo de la primavera cuando el flujo de calor se vuelve positivo y tiende a estabilizar a la columna. Dependiendo de la intensidad de la mezcla por mareas (en el fondo) y por el viento (en superficie) comparada con el calentamiento superficial la columna se estratificará o no.

En base a experimentos de laboratorio es posible demostrar que:

- la mezcla turbulenta a través de esfuerzos en una frontera producirá una capa homogénea asociado a esa frontera y su espesor dependerá de la intensidad de la turbulencia.
- La habilidad de la turbulencia para transferir fluido a través de una interfase de densidad se reduce significativamente a medida que la estabilidad aumenta.

Determinemos ahora el criterio para la estratificación de la columna. Formularemos la competición entre estratificación y mezcla en términos de un parámetro de estratificación Φ definido como

$$\Phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\hat{\rho} - \rho(z)) g z dz \quad (11.1)$$

$$\hat{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz$$

donde $\hat{\rho}$ es la densidad media de la columna. $\rho(z)$ es la densidad determinada por perfiles de T y S. El parámetro Φ se denomina anomalía de energía potencial y es una medida cuantitativa de la estratificación, representando el trabajo requerido por unidad de volumen para mezcla completamente la columna. Esto se puede ver dividiendo la integral en dos componentes

$$\Phi = \frac{1}{h} \left(\int_{-h}^0 \hat{\rho} g z dz - \int_{-h}^0 \rho g z dz \right) = \frac{1}{h} (PE(\text{mezclado}) - PE(\text{estratificado})) = \frac{\Delta PE}{h} \quad (11.2)$$

que son medidas de energía potencial (PE) por unidad de área antes y después de los procesos de mezcla. Φ es nulo para una columna totalmente mezclada y aumenta con la estratificación. Notar que $\frac{1}{h} PE(\text{mezclado}) = \frac{-h g \hat{\rho}}{2}$.

De ahora en más asumiremos que (I) el empuje es únicamente debido a flujos de calor, (II) la mezcla es únicamente debido a las mareas.

Consideremos que ΔQ es el calor entregado por unidad de área y que entra a la columna que se encuentra inicialmente mezclada. Como vimos en un capítulo anterior, este calor será absorbido cerca de la superficie en una capa muy fina que representaremos como una capa de espesor h_1 (figura 11.1). En esta capa la temperatura aumentará en

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c_p \rho_0 h_1} \quad (11.3)$$

Este aumento de temperatura reducirá la densidad en

$$\Delta \rho = \alpha \rho_0 \Delta T = \alpha \rho_0 \frac{\Delta Q}{c_p h_1 \rho_0} = \frac{\alpha \Delta Q}{c_p h_1} \quad (11.4)$$

por lo que la capa quedará “flotando” en la superficie con una fuerza de empuje asociada de

$$b = g \Delta \rho = \frac{g \alpha \Delta Q}{c_p h_1} \quad (11.5)$$

lo cual implica una fuerza total en la capa superior de (figura 11.1)

$$B = b h_1 = \frac{g \alpha \Delta Q}{c_p} \quad (11.6)$$

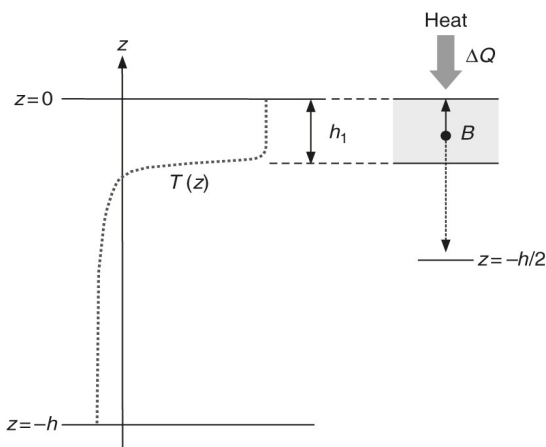


Figura 11.1 – Esquema mostrando estructura de columna por entrega de calor en superficie.

Supongamos ahora que las mareas están mezclando la columna. ¿Cuánto trabajo deben realizar contra la fuerza de empuje para mezclar completamente la estratificación? A medida que la densidad se uniformiza, el déficit de densidad se distribuye en toda la capa h . Esto es lo mismo a mover la fuerza de empuje hacia abajo una distancia $h/2$ en promedio, por lo que el trabajo que debe realizarse es $Bh/2$ o

$$\Delta PE = h \Delta \Phi = \frac{\alpha g \Delta Q h}{2 c_p} \quad (11.7)$$

Si el calor se entrega en un intervalo de tiempo corto Δt a una razón Q_i entonces vale

$$h \Delta \Phi = \frac{\alpha g h}{2 c_p} Q_i \Delta t \quad (11.8)$$

o, a medida que $\Delta t \rightarrow 0$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\alpha g}{2 c_p} Q_i \quad (11.9)$$

Esta es la razón a la cual aumenta Φ debido a la entrega de calor en la ausencia de mezcla. El flujo de calor Q_i es el flujo neto de calor a través de la superficie del mar. Para mantener la columna mezclada ($\Phi=0$) los procesos de mezcla deben entregar al menos esta cantidad de energía.

De acuerdo a nuestras suposiciones, esta energía deberá venir de las mareas. Se puede mostrar que la potencia entregada por las mareas para el desarrollo de turbulencia tiene la forma

$$P_T = k_b \rho_0 |\hat{u}|^3 \quad (11.10)$$

donde \hat{u} es la velocidad media en la columna. La mayor parte de la energía turbulenta es disipada en forma de calor en la capa límite, pero parte de ella es convertida en energía potencial durante los procesos de mezcla. Asumiremos que una fracción fija e de P_T es usada para los procesos de mezcla en la columna (e es una especie de “eficiencia” de mezcla y valores típicos son del 1%). Por lo tanto la potencia disponible para cambiar la energía potencial de la columna es

$$\frac{\partial (PE)}{\partial t} = e P_T = e k_b \rho_0 |\hat{u}|^3 = h \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \quad (11.11)$$

Combinando ecuaciones 11.9 y 11.11 se encuentra una ecuación para el cambio neto en el

parámetro de estabilidad debido al calentamiento en superficie y la mezcla debido a las mareas:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\alpha g Q_i}{2 c_p} - \frac{e k_b \rho_0 |\hat{u}|^3}{h} \quad (11.12)$$

La ecuación 11.12 representa la competencia entre la tendencia a la estratificación por calentamiento en superficie y su erosión por mezcla inducida por mareas. Notemos que el primer término dado por el flujo de calor puede ser positivo (verano) o negativo (invierno) o sea que puede crear o destruir estratificación. El término de mezcla es siempre negativo o sea que la turbulencia siempre actúa para destruir la estratificación. Entonces, si se conoce Q_i y \hat{u} la ecuación se puede integrar en el tiempo y determinar la evolución de la estratificación.

El término de mezcla por mareas puede simplificarse si se asume que el flujo de mareas está dominado por la marea M2 de la forma $\hat{u} = u_{M2} \sin \omega_{M2} t$ donde u_{M2} es la amplitud de la marea M2 promediada en la columna y ω_{M2} la frecuencia M2. Se puede mostrar que promediando en varios ciclos

$$|\hat{u}|^3 = \frac{4}{3\pi} u_{M2}^3 \quad (11.13)$$

o sea que la ecuación 11.12 queda de la forma

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\alpha g Q_i}{2 c_p} - \frac{4 e k_b \rho_0 u_{M2}^3}{3\pi h} \quad (11.14)$$

La estratificación se desarrollará solo si la estabilidad crece con el tiempo, o sea

$$\frac{\alpha g Q_i}{2 c_p} > \frac{4 e k_b \rho_0 u_{M2}^3}{3\pi h} \quad (11.15)$$

lo cual puede re-escribirse como

$$\frac{3\pi \alpha g}{8 c_p e k_b \rho_0} \left(\frac{h Q_i}{u_{M2}^3} \right) > 1 \quad (11.16)$$

Esta es la condición para la estratificación estacional. Si no se cumple la columna permanecerá mezclada. Cuando (11.16) es = 1 existe un balance exacto entre el calentamiento y la mezcla y marca la posición de los **frentes de marea**, que son zonas de transición entre regiones que desarrollan estratificación vertical y otras que permanecen mezcladas. Notar que el control de

la estratificación está dado por el término $\left(\frac{h Q_i}{u_{M2}^3} \right)$ ya que el resto son parámetros constantes.

Para una región dada de la plataforma Q_i se puede considerar espacialmente constante por lo

que la posición de los frentes de mareas estará dada por el parámetro $\left(\frac{h}{\hat{u}_{M2}^3}\right)$, que se denomina **parámetro de Simpson**. En general los mapas de este parámetro son presentados en la forma de $\log_{10}(h/u^3)$ donde u es una medida de intensidad de las corrientes de marea.

Medidas de temperatura y salinidad en verano a lo largo de secciones entre áreas de mezcla fuerte y débil revelan una transición entre una columna bien mezclada a una columna con una estructura de dos capas como se ilustra en la figura 11.2. Esta transición ocurre en una escala horizontal característica cercana a los 10 km, el cual constituye el frente de marea. En general, los frentes ocurren para valores de $\log_{10}(h/u^3) \approx 1.9$ (valores mayores indican una zona estratificada, mientras que valores menores indican una zona bien mezclada) aunque existe cierta variación geográfica.

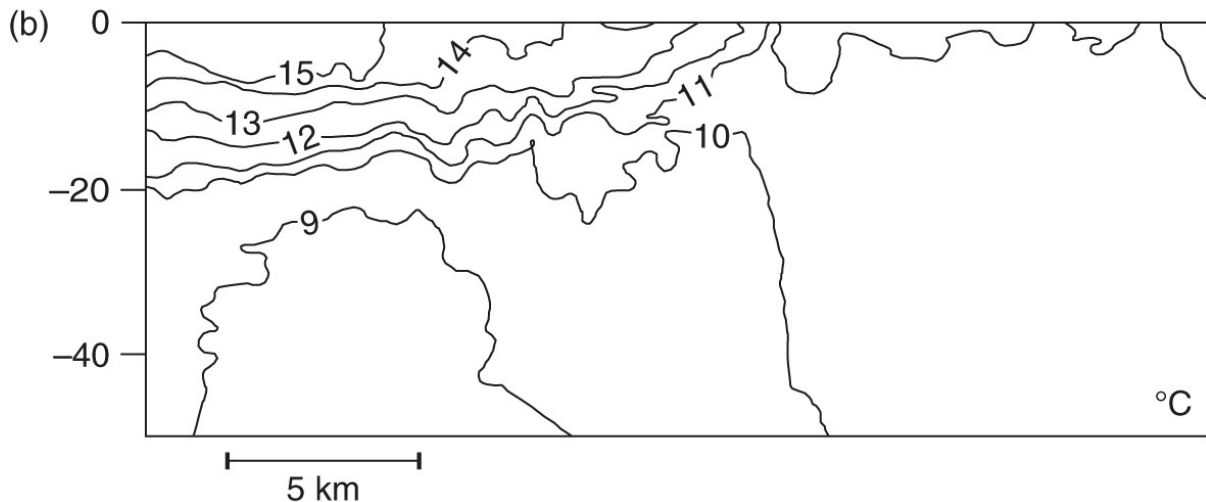
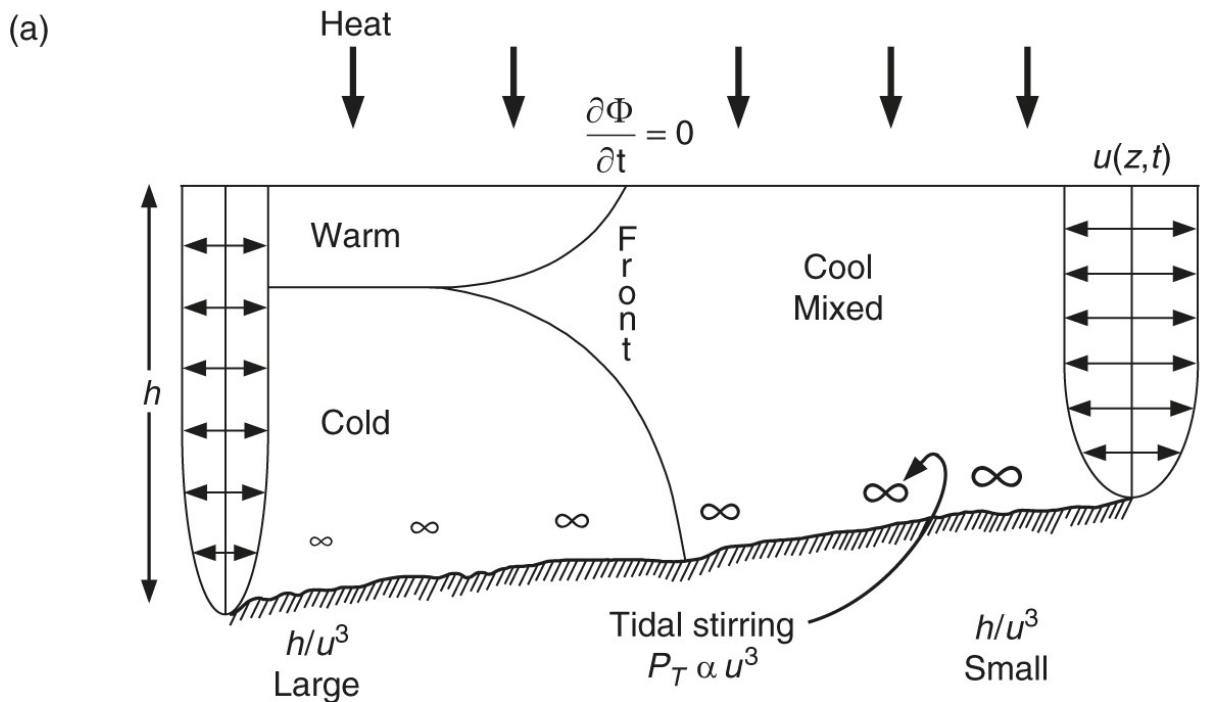


Figura 11.2 – Frentes de marea.

En regiones con mareas de gran amplitud la mezcla generada por las mareas será generalmente mucho mayor que la inducida por el viento en superficie. No obstante, en regiones con mareas pequeñas uno esperaría que el impacto de los vientos en los procesos de mezcla no se puede despreciar, especialmente en plataformas someras (<30m) donde el efecto de los vientos por si solo puede mezclar completamente la columna. Para incluir el efecto de los vientos en el parámetro de estabilidad es posible seguir el mismo razonamiento que para las mareas en el fondo. Si W es la magnitud de los vientos en superficie, la potencia entregada por el viento será (para una eficiencia e_s)

$$P_w = e_s k_s \rho_a W^3 \quad (11.17)$$

por lo que ahora el balance quedará de la forma

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\alpha g Q_i}{2 c_p} - \frac{e k_b \rho_0 |\hat{u}|^3}{h} - \frac{e_s k_s \rho_a W^3}{h} \quad (11.18)$$

En general la consideración del efecto de los vientos sobre la columna permite identificar la posición de los frentes de marea con mayor certeza, aunque la posición dada considerando solamente el efecto de las mareas es ya correcta. La eficiencia de los vientos en generar mezcla es generalmente mayor que la de las mareas debido a su proximidad con la termoclina.

De acuerdo a lo anterior los frentes de marea marcan la frontera entre regiones mezcladas por la turbulencia de mareas y las que se se estratifican durante el verano, y se pueden observar claramente en los mapas de TSM de la estacional estival. La figura 11.3 muestra un mapa de gradientes climatológicos de TSM en enero para el Atlántico sudoccidental, así como un mapa del parámetro de Simpson que define los frentes de marea.

La figura 11.4 muestra los frentes de marea en el Atlántico sudoccidental junto con otros tipos de frentes.

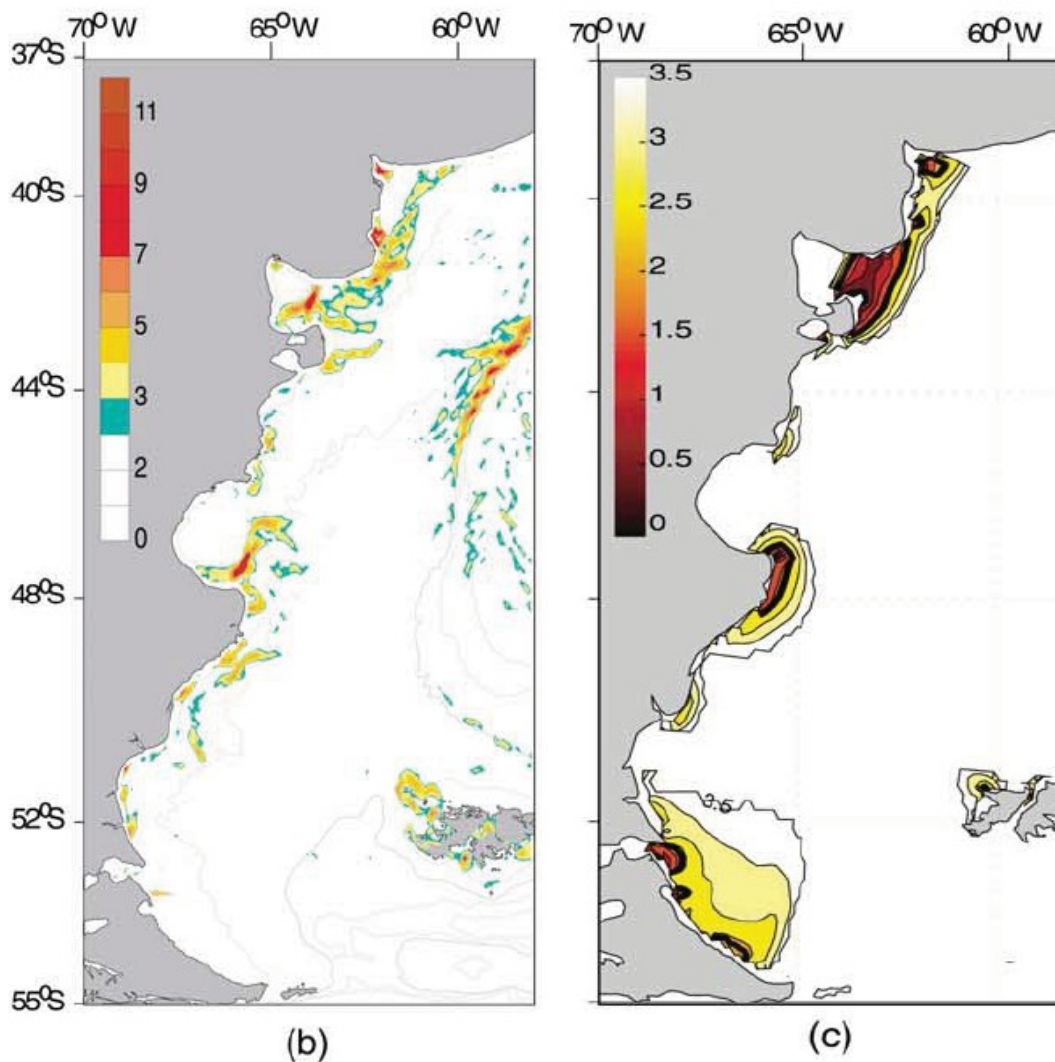


Figura 11.3 – Gradiente de TSM en enero (panel izquierdo) y parámetro de Simpson (panel derecho) (Palma et al 2004).

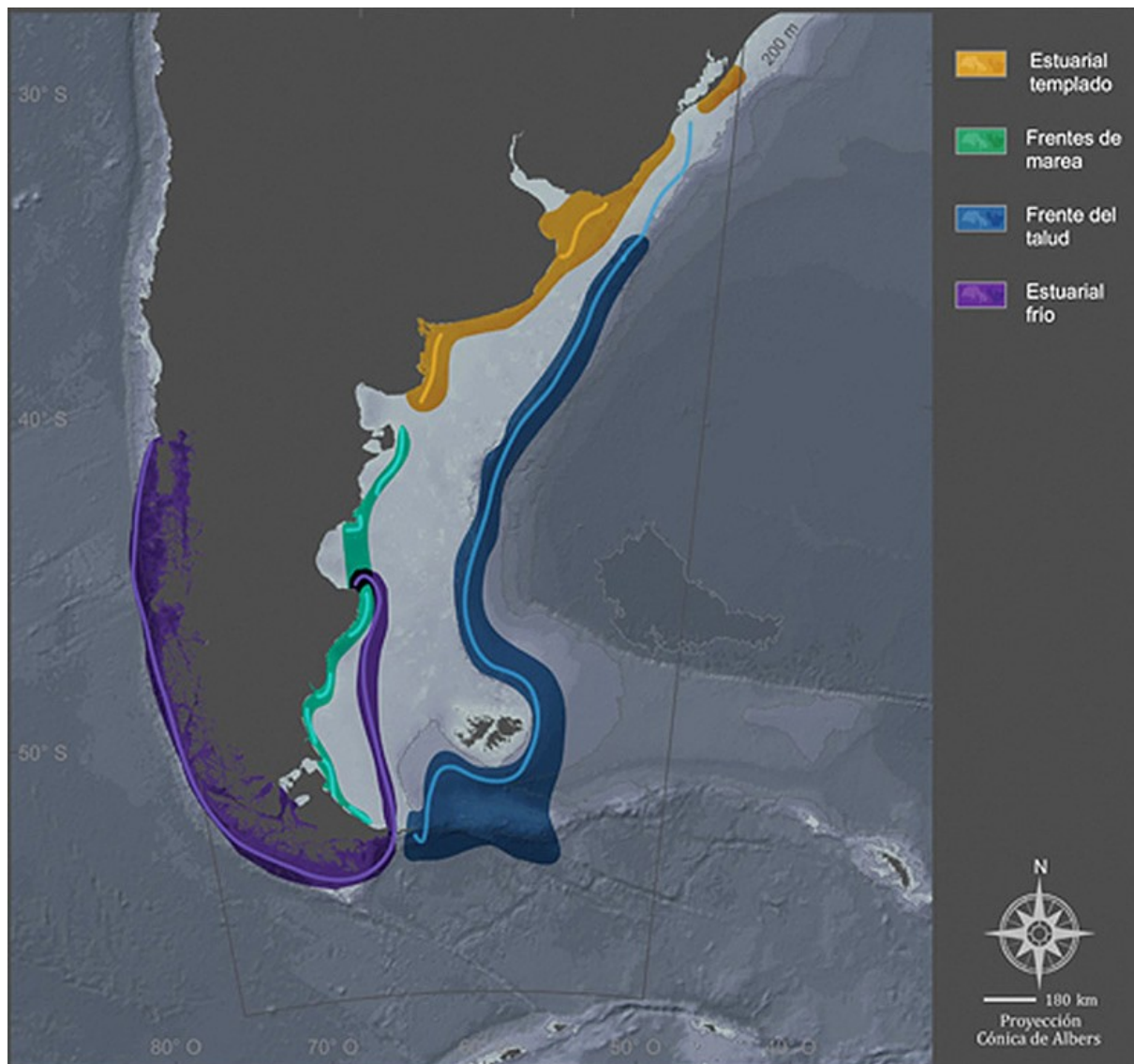


Figure 11.4 – Frentes en el Atlántico sudoccidental.

Como se ve en la figura 11.2 los frentes de marea estan asociados a gradiente horizontales de temperatura no solo en superficie sino tambien en profundidad. Si las variaciones de salinidad son pequeñas la densidad estará controlada por la temperatura y los frentes tendran asociados gradientes horizontales de densidad. Notar que los cambios horizontales de densidad seran opuestos en las capas de arriba y abajo (figura 11.5). Estos cambios de densidad causaran gradientes de presión, lo cual dará lugar a un flujo geostrófico paralelo al frente. Asumiendo que las condiciones son uniformes en la dirección del frente (supongamos a lo largo de la dirección y), el gradiente vertical de velocidad a lo largo del frente estará dado por la relación de viento térmico

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{\rho f} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

donde x es la componente perpendicular al frente y v la velocidad paralela al frente. Esa ecuación puede integrarse desde el fondo donde $v=0$ para determinar la velocidad en toda la columna a partir de observaciones de densidad. Por lo tanto, la estructura de un frente de mareas está caracterizado por un flujo medio intenso a lo largo del frente (jet frontal) siendo máximo a la profundidad donde el gradiente de densidad cambia de signo (figura 11.5).

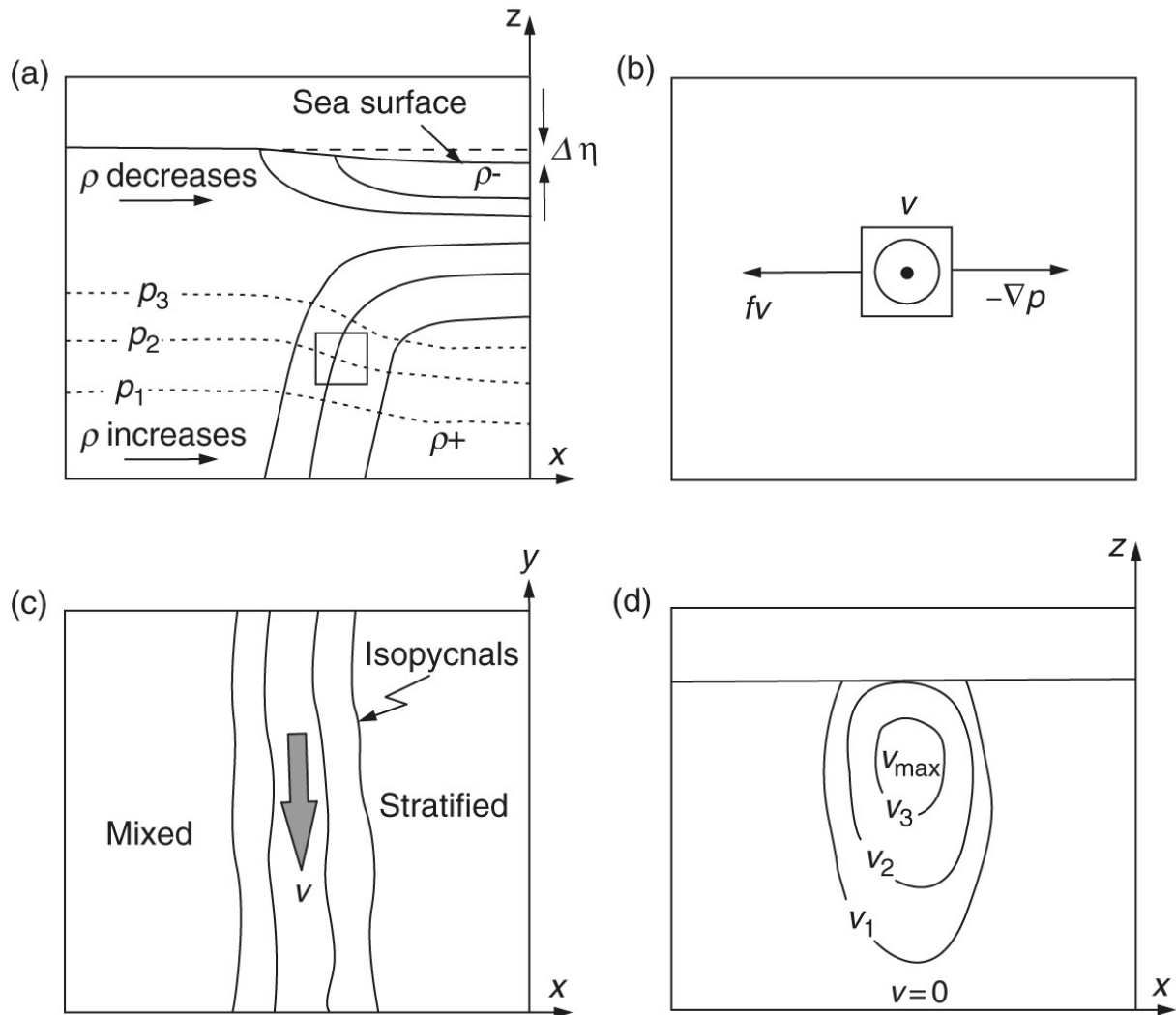


Figura 11.5 – Esquema de un frente de marea.

Una sección transversal del frente de mareas es mostrada en la figura 11.6. Estos frentes de marea son regiones de mayor producción primaria y biomasa comparado con aguas bien mezcladas (limitadas por la luz) y estratificadas (limitadas por nutrientes) a ambos lados del frente.

La intensidad de las corrientes varía en un mes lunar (28 días) entre mareas muertas y vivas. Al aumentar la velocidad aumenta la energía disponible para la mezcla vertical, lo que aumenta la profundidad a la cual la turbulencia es suficientemente fuerte para romper la estratificación. Por lo tanto la frontera entre agua bien mezclada y estratificada se moverá hacia aguas mas profundas disminuyendo el área de aguas estratificadas. Cuando las corrientes de marea disminuyen la turbulencia también lo hace y el frente se mueve hacia aguas mas someras. El agua estratificada detrás del frente contendrá niveles de nutrientes característicos de aguas bien mezcladas. Así, la periodicidad de las mareas genera pulsos de producción de fitoplancton cada dos semanas. Esto contrasta con el incremento diario de nutrientes en frentes de talud que provee un incremento continuo de fitoplancton al cual puede responder el zooplancton. De esta forma la población de zooplancton aumenta al mismo tiempo que el fitoplancton en frentes de talud; esto no ocurre en frentes de marea.

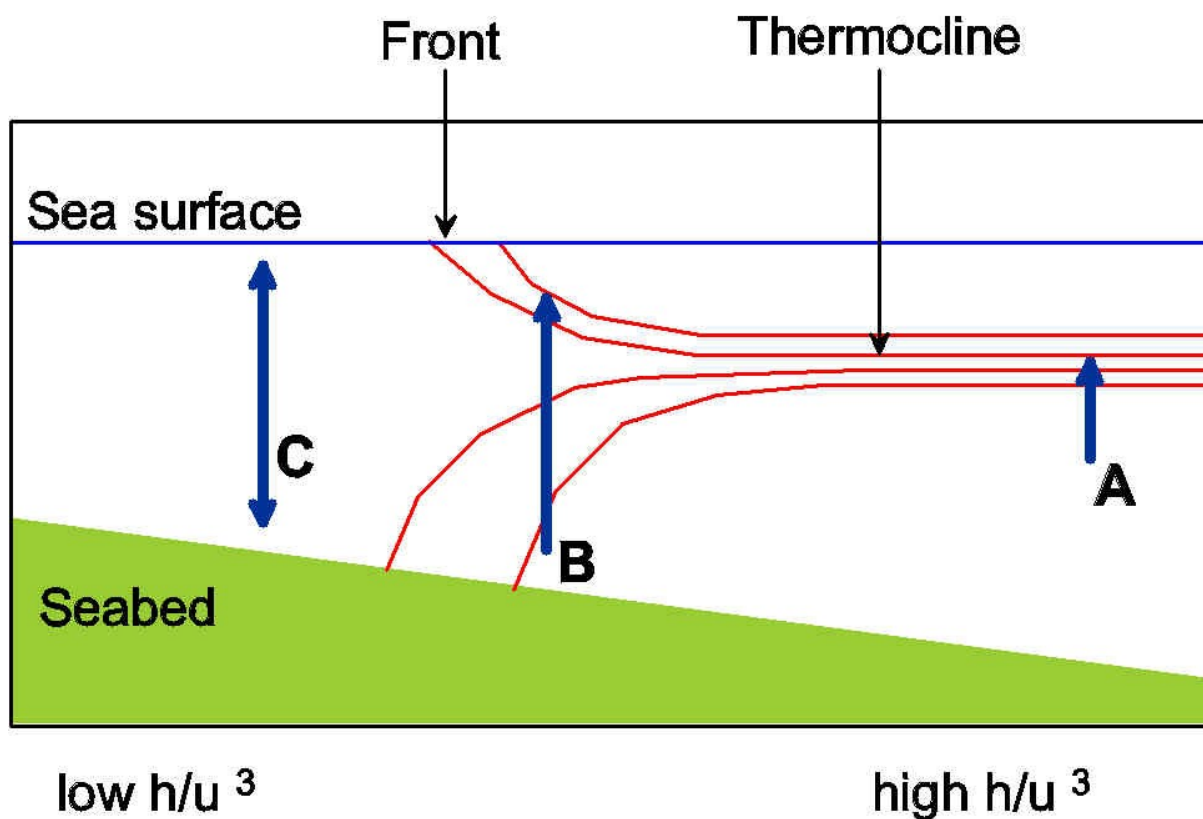


Figura 11.6 – Corte transversal de un frente de marea. La flecha A representa un flujo débil de nutrientes en la base de la termoclina. La flecha B representa el flujo de nutrientes a través de la estratificación débil del frente que mantiene la productividad en la ubicación del frente. La flecha C representa el intercambio en la columna de agua bien mezclada. En esta zona hay alta concentración de nutrientes en superficie pero la producción primaria esta limitada por la luz.

Referencias principales

- Introduction to physical and biological oceanography of the shelf seas. J. Simpson & J. Sharples.