

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

***El Golfo de California visto a través del modelo numérico
Global HYCOM***

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Gonzalo Acosta Solís

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Gonzalo Acosta Solís

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de tesis

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera

Dr. Luis Zamudio López

Dr. David Alberto Rivas Camargo



Dra. María Teresa Cavazos Pérez
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Gonzalo Acosta Solís** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

El Golfo de California visto a través del modelo numérico global HYCOM

Resumen aprobado por:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de tesis

El presente trabajo analiza la circulación en el Golfo de California (GC) utilizando una simulación de un año (2011-2012) del modelo numérico global HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). La simulación tiene una resolución de $(1/12.5)^\circ$ e incluye forzamiento de mareas. La circulación en toda la columna de agua del GC se ve dominada por la presencia de varios remolinos que van alternando su sentido de rotación a lo largo del golfo. Los remolinos presentan variación estacional, siendo unos más energéticos en verano y otros en otoño-invierno. En el promedio anual del transporte de volumen en la boca del golfo se distinguieron 6 capas con agua entrando por arriba de los 65 m (0.134 Sv , $1 \text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), saliendo entre 65 y 174 m (0.212 Sv) y entrando entre 174 y 369 m (0.133 Sv). Los valores de transporte en las tres capas superficiales implican que dentro del golfo tiene que ocurrir subsidencia de la primera a la segunda capa, y surgencia de la tercera a la capa intermedia. El ciclo anual de la primera y la cuarta capa (370-800 m) están 180° fuera de fase, con máximo transporte entrando (saliendo) en la primera (cuarta) capa en julio. En noviembre el intercambio se invierte con agua saliendo (entrando) por la primera (cuarta) capa. Los valores extremos del ciclo anual de este intercambio oscilan entre 0.4 y 0.8 Sv. El agua entra al golfo por la mitad de la boca pegada al continente y sale en una región más confinada del lado de la península. El promedio anual del transporte neto barotrópico de salida (que es casi igual al transporte de entrada) a través de la boca del golfo fue de 1.02 Sv , lo cual nos permitió calcular una cota mínima del tiempo de residencia del golfo que fue de aproximadamente 4 años. En el promedio anual del transporte neto de calor el modelo no exportó calor, si no que importó una cantidad relativamente pequeña. Esto puede deberse a que el forzamiento superficial no captura bien la ganancia de calor en el golfo y/o a variaciones interanuales. El modelo captura bien el ciclo estacional del flujo de calor en la boca, coincidiendo con resultados publicados previamente: la entrada máxima de calor a finales de junio y la salida máxima de calor a finales de octubre.

Palabras clave: Golfo de California, HYCOM, corrientes subinerciales

Abstract of the thesis presented by **Gonzalo Acosta Solís** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

The Gulf of California circulation using a simulation of the global numerical model HYCOM

Abstract approved by:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Thesis Director

In the present work, the circulation of the Gulf of California (GC) is analyzed using a one-year simulation (2011-2012) of the global numerical model HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). The simulation has a resolution of $(1/12.5)^\circ$ and includes tidal forcing. The circulation in the entire GC water column is dominated by the presence of several eddies that alternate their sense of rotation throughout the gulf. The eddies have seasonal variation, some being more energetic in summer and others in autumn-winter. In the mouth of the gulf the annually averaged transport of volume shows six layers with inflow above 65 m ($0.134 \text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), outflow between 65 and 174 m (0.212 Sv) and inflow between 174 and 369 m (0.133 Sv). The transport values in these three surface layers imply that there must be a subsidence from the first to the second layer, and upwelling from the third to the intermediate layer, within the gulf. The annual cycle of the first and fourth (369-788 m) layers is 180° out of phase with maximum inflow (outflow) in the first (fourth) layer in July. In November the exchange reverses with outflow (inflow) in the first (fourth) layer. The maximum values of this exchange oscillate between 0.4 and 0.8 Sv. The water flows into the gulf through the half of the mouth section attached to the mainland and flows out in a more confined region on the side of the peninsula. The average annual net outflow barotropic transport (which is almost equal to inflow transport) across the mouth of the gulf was 1.02 Sv, which allowed us to calculate a minimum bound residence time of approximately 4 years. In the annual average of net heat transport, the model did not export heat, but rather imported a relatively small amount. This may be due to the model's surface forcing not capturing the heat gained by the gulf from the atmosphere and/or interannual variations. However, the model captures the seasonal cycle of heat flow at the mouth well, which is a result that coincides with what is reported in the literature: maximum heat input at the end of June and maximum heat output at the end of October.

Keywords: Gulf of California, HYCOM, subinertial currents

Dedicatoria

A mi padre Félix, a mi madre Marlene, a mi hermano Diego y a mi hermana Sofía.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por darme la oportunidad de estudiar un posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de CVU: 1068390.

Quiero agradecer también a mi director de tesis, Dr. Juan Manuel López Mariscal, por motivarme a realizar este trabajo, además de su confianza, de los consejos y el tiempo que ha dedicado en leer y revisar esta tesis.

A mis sinodales, Dr. Luis Zamudio, Dr. Cuauhtémoc Turrent, Dr. Luis Calderón y al Dr. David Rivas, por formar parte de mi comité de tesis, les agradezco su atención y las sugerencias realizadas para la culminación de este trabajo.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2. Metodología.....	7
2.1 Datos.....	7
2.2 Métodos	7
2.2.1 Análisis armónico	7
2.2.2 Cálculo del transporte de volumen con el modelo HYCOM.....	8
2.2.3 Balance de calor	9
Capítulo 3. Resultados	11
3.1 Promedios anuales	11
3.1.1 Promedios estacionales.....	14
3.1.2 Variación mensual de las corrientes	16

3.2	Sección vertical de dos remolinos	19
3.2.1	Variación estacional del remolino ciclónico	22
3.2.2	Variación estacional del remolino anticiclónico.....	23
3.3	Boca del Golfo de California	25
3.3.1	Variación estacional de la velocidad meridional, la temperatura y la salinidad.....	26
3.3.2	Transporte de volumen	29
3.3.3	Transporte de calor	34
Capítulo 4.	Discusión.....	38
Capítulo 5.	Conclusiones	42
Literatura citada	44
Anexos	48

Lista de figuras

Figura	Página
1. Batimetría del Golfo de California; en este trabajo el “Upper gulf” corresponde al Norte del GC, la “Archipelago region” a la Región de las Grandes Islas; y el “Lower gulf” a la región del Sur del GC (tomado de Hernández-Alcántara <i>et al.</i> , 2014).....	1
2. Promedio anual de las corrientes barotrópicas y la anomalía del nivel del mar. La anomalía del nivel del mar se obtuvo restando el promedio anual del nivel del mar de un polígono de 20° N a 32° N y de 117° O a 105° O.....	11
3. Promedio anual de (a) las corrientes de la capa superficial (0-61 metros) y (b) de una capa profunda (199-368 metros) junto con la anomalía del nivel del mar.....	12
4. Transecto latitudinal de profundidades máximas a lo largo del golfo (izquierda). Posición del centro de los remolinos sobre el transecto latitudinal de profundidades máximas en el GC (derecha).....	13
5. Promedio anual de la temperatura superficial (panel izquierdo) y la salinidad superficial (panel derecho).....	13
6. Variación estacional (promedios trimestrales) de los vectores de velocidad superficial y de la anomalía del nivel del mar. La anomalía del nivel del mar se obtuvo restando el promedio estacional del nivel del mar de un polígono de 20° N a 32° N y de 117° O a 105° O.....	14
7. Variación estacional (promedios trimestrales) de la temperatura superficial.....	15
8. Variación estacional (promedios trimestrales) de la salinidad superficial.....	16
9. Promedios mensuales de los vectores de velocidad barotrópica y su magnitud en color para la región del golfo norte.....	17
10. Promedios mensuales de los vectores de velocidad barotrópica y su magnitud en la región central del golfo.....	18
11. Promedios mensuales de los vectores de velocidad barotrópica y su magnitud en la región sur del golfo.....	19
12. Sección vertical del promedio anual de la velocidad meridional del remolino ciclónico y anticiclónico.....	20
13. Sección vertical del promedio anual de la temperatura del remolino ciclónico y anticiclónico de la región central del golfo.....	20
14. Promedio anual de la sección vertical de la salinidad del remolino ciclónico y anticiclónico.....	21
15. Promedio anual de la sección vertical del transporte de volumen del remolino ciclónico y anticiclónico. El intervalo de los contornos es de 0.01 Sv.....	21

16. Sección vertical de los promedios trimestrales de la velocidad meridional en la sección del remolino ciclónico.....	22
17. Diagrama Hovmöller de la velocidad barotrópica en la sección del remolino ciclónico. En el eje “x” se tiene el tiempo y en el eje “y” la longitud a lo largo de la latitud de 26.73°N. La península se encuentra a lo largo del eje inferior.	23
18. Sección vertical de los promedios trimestrales de la velocidad meridional de la sección del remolino anticiclónico.....	24
19. Diagrama Hofvmuller de la sección del remolino anticiclónico, en el eje “x” se tiene el tiempo y en el eje “y” la longitud a lo largo de la latitud de 27.37°. La península se encuentra a lo largo del eje inferior.....	24
20. Sección vertical del promedio anual de la velocidad meridional de la sección de la boca del golfo.	25
21. Promedio anual de la temperatura y la salinidad en la boca del golfo por arriba de los 700 metros.	26
22. Promedios trimestrales de la velocidad meridional por arriba de los 700 metros en la boca del golfo.....	27
23. Promedios trimestrales de la temperatura por arriba de los 700 metros en la boca del golfo.	28
24. Promedios trimestrales de la salinidad por arriba de los 700 metros en la boca del golfo.....	29
25. Promedio anual del transporte de volumen en la boca del golfo en el lado izquierdo y el perfil vertical promedio de dicha sección en el lado derecho.....	30
26. Promedio anual del transporte turbulento de volumen en la boca del golfo.	31
27. Ciclo estacional del transporte de volumen en la capa superficial (0-65 m) y en una capa intermedia (369-788 m) en la boca del golfo.....	32
28. Diagrama Hovmöller de la velocidad meridional barotrópica a lo largo de la boca del golfo. La parte inferior del eje vertical corresponde al lado de la península (las velocidades fueron filtradas para eliminar las mareas).....	33
29. Promedio anual del transporte total de volumen integrado verticalmente en la boca del golfo y la contribución de cada capa en diferente color.....	34
30. Promedio anual del transporte de calor en la boca del golfo en el lado izquierdo y el perfil vertical promedio de dicha sección en el lado derecho.....	35
31. Ciclo estacional del transporte de calor por arriba de los 800 m en la boca del golfo. Los puntos azules representan los promedios mensuales.	36
32. Promedios mensuales de los vectores de velocidad superficial y su magnitud en color para la región del golfo norte.	48

33. Promedios mensuales de los vectores de velocidad superficial y su magnitud en color para la región del golfo central.	48
34. Promedios mensuales de los vectores de velocidad superficial y su magnitud en color para la región del golfo sur.	49
35. Promedios trimestrales de la temperatura en la sección latitudinal del remolino ciclónico. .	49
36. Promedios trimestrales de la salinidad en la sección latitudinal del remolino ciclónico.	50
37. Promedios trimestrales de la temperatura en la sección latitudinal del remolino anticiclónico.	50
38. Promedios trimestrales de la salinidad en la sección latitudinal del remolino anticiclónico. .	51
39. Promedios trimestrales de la densidad potencial en la sección de la boca del GC.	51

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Capas promedio del transporte de volumen y sus rangos de profundidad. Valores positivos indican entrada al golfo.	31
2. Descomposición del transporte de volumen en la boca del golfo.....	31
3. Análisis armónico del transporte de volumen a través de 2 capas en la boca del golfo.	32
4. Capas promedio del transporte de calor en la boca del golfo y sus rangos de profundidad. Valores positivos indican entrada de calor al golfo.	36
5. Análisis armónico del transporte de calor por arriba de los 800 metros en la boca del golfo.	37

Capítulo 1. Introducción

El Golfo de California (GC), conocido también como Mar de Cortés, es un mar semi-cerrado ubicado al noroeste de México, entre la península de Baja California y los estados de Sonora y Sinaloa. El GC es de alto interés oceanográfico debido a que es la única cuenca de evaporación del Océano Pacífico (Roden, 1958); además, la combinación de las diferentes características hidrográficas, climáticas y topográficas proporcionan un hábitat tal que éste es considerado como una de las áreas biológicamente más productivas del mundo (Álvarez-Borrogo y Lara-Lara, 1991).

El golfo mide, aproximadamente, 1000 km de largo y 150 km de ancho; tiene una forma alargada con una sola conexión con el Océano Pacífico (OP). Su clima es influenciado principalmente por el clima árido de las tierras que lo rodean, la cadena montañosa del lado de la península aísla al golfo de la influencia directa del OP. Su batimetría está compuesta por una serie de cuencas profundas que disminuyen hacia el norte y están separadas a través de diversos umbrales (ver Figura 1). Las grandes islas, Tiburón y Ángel de la Guarda, dividen físicamente al golfo en tres regiones. Las propiedades hidrográficas a lo largo de estas tres regiones varían debido a los diversos factores físicos que las caracterizan:

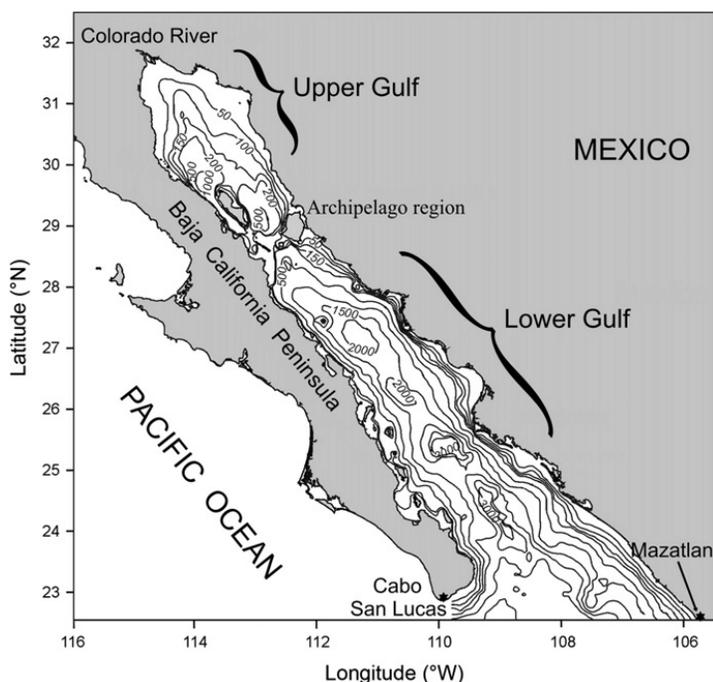


Figura 1. Batimetría del Golfo de California; en este trabajo el “Upper gulf” corresponde al Norte del GC, la “Archipelago region” a la Región de las Grandes Islas; y el “Lower gulf” a la región del Sur del GC (tomado de Hernández-Alcántara *et al.*, 2014).

a) Norte del Golfo de California (NGC)

En la región norte se presentan las salinidades superficiales y los rangos de temperatura más altos. La dinámica en esta zona está regulada por los flujos estacionales de calor y humedad, los amplios rangos de marea y por la mezcla convectiva que ocurre en invierno (Sverdrup, 1941; Lavín y Organista, 1988). La disminución de la temperatura junto con la evaporación en los meses de invierno produce una pérdida de la flotabilidad ocasionando la formación de una masa de agua relativamente caliente y de alta salinidad; y con altas concentraciones de oxígeno (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Lavín *et al.*, 1995; López, 1997).

b) Región de las Grandes Islas (RGI)

La región de las grandes islas, constituye una de las características topográficas más sobresalientes del golfo. En esta región se presentan los mínimos valores de temperatura superficial y las mayores concentraciones de nutrientes y CO₂ de todo el golfo (Álvarez-Borrego, 2007). Gran parte de la dinámica de la RGI se caracteriza por la intensa mezcla por mareas (Paden *et al.*, 1991; Argote *et al.*, 1995) y por la renovación continua de las aguas profundas en el Canal de Ballenas y cuenca Delfín, lo que provoca una surgencia y mezcla permanentes en gran parte de la columna de agua de estas dos cuencas (López *et al.*, 2006; López *et al.*, 2008).

c) Sur del Golfo de California (SGC)

La región sur está en comunicación directa con el Océano Pacífico Tropical a través de su "boca". La estructura hidrográfica en esta zona es complicada debido a la confluencia de distintas masas de agua. Esencialmente, la estructura termohalina de la región del SGC corresponde a la del Océano Pacífico Tropical Oriental, modificada en la superficie la llamada agua del Golfo de California y por la presencia de agua de la corriente de California (Roden, 1964; Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Castro *et al.*, 2000; Castro *et al.*, 2006; Bray, 1988; Lavín y Organista, 1988).

Otra característica importante en esta región es la presencia de remolinos de mesoescala, los cuales son generados por la interacción de la Corriente Costera Mexicana con la topografía cercana a Sinaloa (Zamudio *et al.*, 2008).

1.1 Antecedentes

El estudio de la dinámica del GC inició a partir de las exploraciones oceanográficas del crucero E. W. Scripps del instituto Scripps de Oceanografía en 1939. Sin embargo, las mayores aportaciones han ocurrido en los últimos 25 años con programas de observación más intensivos y específicos, y con la llegada de los modelos numéricos y de los sensores remotos (satélites). A partir de los fenómenos observados con estas dos herramientas fue que se reconoció la necesidad de aumentar la cantidad de observaciones para poder confirmar las hipótesis y describir los distintos fenómenos que ocurren dentro de esta cuenca (Lavín y Marinone, 2003).

Observaciones

Las primeras descripciones de la circulación superficial fueron a partir de datos hidrográficos del GC. En éstas se menciona al viento como el principal forzante de una circulación en donde hay: una intrusión de agua de baja salinidad del lado del continente y un flujo de salida de agua de alta salinidad de lado de la península (Roden, 1964; Roden y Groves, 1959). Posteriormente, Bray (1988) realizó un análisis de la señal estacional de las velocidades geostroficadas y el transporte de calor y volumen, identificando en la sección Guaymas-Santa Rosalía un flujo superficial hacia la boca del golfo entre los 50 y 250 m y un flujo inverso hacia la cabeza entre los 250-500 m. Además, Bray concluyó que, a diferencia de otras cuencas evaporativas como el mar Mediterráneo, el golfo anualmente gana calor por la superficie.

Beron-Vera y Ripa (2000) encontraron que en promedio entran 19 TW ($1 \text{ Tw} = 1 \times 10^{12} \text{ W}$) a través de la superficie y salen a través de la boca del GC. También encontraron que la amplitud del ciclo anual es de 34.8 TW , significativamente mayor que el promedio, y con máxima salida de calor a finales de octubre, tomando en cuenta también el ciclo semianual que tiene una amplitud de 7.3 TW .

En la boca del golfo, Mascarenhas *et al.* (2004) y Castro *et al.* (2006) analizaron la estacionalidad de las corrientes geostroficadas, la temperatura, la salinidad y el transporte de calor a partir de varios cruceros. En promedio encontraron un flujo de salida de agua de mayor salinidad cerca de la península y un flujo de entrada de agua de menor salinidad a lo largo del continente. La señal estacional de las velocidades geostroficadas presentó una variación anual de las corrientes con un flujo de entrada (salida) en la parte central y salida (entrada) principalmente en el lado peninsular durante mayo (septiembre). A su vez determinaron que el ciclo estacional del calor presenta una máxima entrada de calor en primavera-mediados de verano, y una salida en otoño-invierno.

Utilizando boyas de deriva Lavín *et al.* (1997) determinaron que la circulación en el NGC está dominada por la estacionalidad de un giro de mesoescala cuyo sentido de rotación es ciclónico de junio a septiembre y anticiclónico de noviembre a abril, con velocidades de hasta 0.3 m/s en ambas estaciones. Más recientemente Lavín *et al.* (2014) realizaron una descripción estadística de las corrientes superficiales en todo el golfo utilizando boyas de deriva y describieron por primera vez dos fenómenos importantes que ocurren en el GC durante el verano: (1) la recirculación del lado de la península ocasionada por una serie de remolinos de mesoescala; y (2) eventos de intensificación de una corriente costera del lado del continente que se puede extender hasta la región del NGC.

Anteriormente se había observado la presencia de remolinos dentro del GC a través de imágenes satelitales de infrarrojo y color del mar (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Pegau *et al.* 2002), con datos hidrográficos (ej. Figueroa *et al.*, 2003; Lavín *et al.*, 2013) y más recientemente por medio de imágenes de temperatura superficial y de clorofila (Farach-Espinoza *et al.*, 2021). En éste último artículo lograron identificar 283 remolinos ciclónicos y 229 anticiclónicos en un periodo de más de 20 años; además, observaron que los ciclónicos tienen dos periodos de alta ocurrencia: de junio-septiembre y en enero, y otro dos de baja ocurrencia: de febrero-mayo y de octubre-diciembre. Por otro lado, los anticiclónicos se presentaban a lo largo del año, excepto en junio-julio y con una alta ocurrencia de octubre-abril.

Analizando la elevación de la superficie del mar en el GC, Ripa (1990, 1997) propuso la idea de que el forzamiento del OP puede ser representado por medio de una onda baroclínica de Kelvin de periodo anual que entra por la boca y lo recorre ciclónicamente; además de este forzamiento analizó la importancia de otros dos forzamientos: el viento local y los flujos de calor presentados por Castro *et al.* (1994) y confirmados posteriormente por Beron-Vera y Ripa (2000). Concluyó que el OP es el modulador principal de la circulación y la termodinámica en el golfo.

Modelos Numéricos

Beier (1997) utilizó un modelo numérico lineal de dos capas con un forzamiento de una onda Kelvin en la boca del GC para simular la componente del transporte de calor. La componente anual del transporte de calor fue modelada con éxito con el modelo lineal, mientras que la componente media y el campo de temperatura tuvieron que ser simulados utilizando la versión no lineal (Beier, 1999).

Marinone (2003) desarrolló un modelo 3D no lineal con mezcla vertical, lateral y topografía real. Utilizó un viento parecido al de los modelos mencionados anteriormente, pero a diferencia de éstos representa la

elevación de la superficie en la boca del golfo usando siete componentes armónicas: anual, semianual y de marea.

En los modelos mencionados anteriormente se lograron reproducir con éxito la variación estacional del transporte de calor y varios elementos de la circulación del GC como fueron: la corriente de entrada del lado del continente y de salida del lado de la península, la estacionalidad del giro del NGC y la intensificación de las corrientes en la RGI. Sin embargo, una de las características que no ésta presente en esos estudios son los remolinos de mesoescala en la región del SGC.

Posteriormente, Zamudio *et al.* (2008) estudiaron la formación de remolinos de mesoescala en el sur del GC utilizando una anidación de un modelo regional dentro del modelo global HYCOM. En ese trabajo concluyeron que los remolinos se forman a partir de la interacción de la corriente con la costa, y que el proceso se ve potenciado por el paso de ondas atrapadas a la costa de origen ecuatorial. En la entrada del golfo, Pantoja *et al.* (2012) estudiaron la formación de remolinos en las afueras del GC utilizando el modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System), proponiendo que el corte lateral entre la Corriente costera Mexicana y la corriente de California que fluye hacia el sur es otro mecanismo importante para la generación de remolinos cercanos a esta zona.

Tenreiro (2011) investigó los efectos de diversas topografías en la circulación del Golfo de California por medio de experimentos de laboratorio y simulaciones numéricas del modelo ROMS. Encontró que con diferentes topografías se observa la formación de remolinos de mesoescala, ciclónicos y anticiclónicos distribuidos de manera alternada durante el periodo de verano. Y su proceso de formación depende de la intensa corriente costera, del lado continental, que entra en el golfo al inicio de esta temporada. Además, observó que la evolución y la posición final de los remolinos durante un periodo de relajamiento del viento (al final del verano) están directamente relacionados con la topografía.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la circulación general del Golfo de California de una simulación del modelo numérico global HYCOM y cuantificar los flujos de calor y volumen en su boca.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el intercambio de agua entre el Océano Pacífico y el golfo.
- Determinar el ciclo anual y semianual del transporte de volumen en la boca.
- Determinar la circulación profunda en la boca del golfo y determinar una cota inferior del tiempo de residencia del agua que entra por la boca del golfo en toda la columna de agua.
- Calcular el ciclo anual y semianual del transporte de calor a través de la boca y comparar con estudios previos basados en observaciones.
- Analizar la estacionalidad de los remolinos presentes en la simulación.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Datos

La simulación examinada en este trabajo (denominada expt_6.01) utiliza un forzamiento atmosférico proveniente del Modelo Global Ambiental de la Marina estadounidense (NAVGEM, por sus siglas en inglés), y un forzamiento por mareas compuesto por las tres constituyentes semidiurnas (M2, S2 y N2) y las dos constituyentes diurnas (K1 y O1) más importantes. La simulación utiliza 41 capas en la dirección vertical y una resolución horizontal de $(1/12.5)^\circ$ en el ecuador (Buijsman *et al.*, 2017).

La simulación se inició el 1º de julio de 2011 utilizando como condiciones iniciales los campos de otra simulación sin forzamiento por mareas (ver Buijsman *et al.*, 2017 para mayores detalles). El año de la simulación utilizada en este trabajo empieza desde el 1º de octubre de 2011 y termina el 30 de septiembre de 2012. Los datos de salida del modelo tienen una resolución temporal de 1 hora y las variables analizadas son la temperatura, la salinidad, el espesor de las capas y la velocidad de las corrientes a distintas profundidades.

2.2 Métodos

2.2.1 Análisis armónico

Las componentes anual y semianual de los diferentes campos del modelo se obtuvieron utilizando análisis armónico convencional de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$u(t) = u_0 + \sum_{i=1}^N [b_i \cos(\omega_i t) + c_i \text{sen}(\omega_i t)]. \quad (1)$$

Donde:

$$a_i = (b_i^2 + c_i^2)^{1/2},$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{c_i}{b_i}\right),$$

$u(t)$ es la serie de tiempo de cualquier variable obtenida a partir del modelo en un determinado punto en el espacio, u_0 es el promedio del campo considerado a lo largo de un intervalo de tiempo, ω_i , a_i y θ_i son la frecuencia, la amplitud, y la fase, respectivamente, de las componentes que se vayan a considerar, en este caso, las frecuencias anual $\omega_1 = 2\pi/(365.25 \text{ días})$ y semianual $\omega_2 = 2\omega_1$ y, por lo tanto, $N=2$. Para la obtención de los ciclos anuales se utilizaron promedios mensuales de las series de tiempo del modelo.

2.2.2 Cálculo del transporte de volumen con el modelo HYCOM

El transporte instantáneo neto de volumen a través de una sección del golfo está dado por:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ij}(t) h_{ij}(t) (\Delta x)_i. \quad (2)$$

Donde:

$v_{ij}(t) = \text{velocidad a través de la sección,}$

$h_{ij}(t) = \text{espesor de la capa,}$

$(\Delta x)_i = \text{incremento meridional en la boca.}$

El índice i corresponde a la coordenada horizontal a través de la sección y el índice j a la coordenada vertical. El promedio temporal del transporte está dado por:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \overline{v_{ij}(t) h_{ij}(t)} (\Delta x)_i. \quad (3)$$

$v_{ij}(t)$ y $h_{ij}(t)$, se pueden descomponer en un promedio temporal y una fluctuación:

$$v_{ij}(t) = \bar{v}_{ij} + v'_{ij}(t) \quad \text{y} \quad h_{ij}(t) = \bar{h}_{ij} + h'_{ij}(t),$$

en donde el promedio temporal de las fluctuaciones es cero ($\overline{v'_{ij}(t)} = \overline{h'_{ij}(t)} = 0$). Usando esta descomposición se obtiene

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\bar{v}_{ij} \bar{h}_{ij} + \overline{v'_{ij}(t) h'_{ij}(t)}] (\Delta x)_i = Q_m + Q_f, \quad (4)$$

donde Q_m es el transporte debido al flujo y espesores medios, y Q_f es el transporte debido a las fluctuaciones turbulentas del flujo horizontal. Para obtener (4) se hizo uso de

$$\overline{\bar{v}_{ij} \bar{h}_{ij}} = \bar{v}_{ij} \bar{h}_{ij}$$

y de

$$\overline{\bar{v}_{ij} h'_{ij}(t)} = \bar{v}_{ij} \overline{h'_{ij}(t)} = 0, \quad \text{y} \quad \overline{v'_{ij}(t) \bar{h}_{ij}} = \overline{v'_{ij}(t)} \bar{h}_{ij} = 0.$$

El resultado final del transporte promedio puede ser positivo, negativo o cero. Si se considera la velocidad positiva entrando al golfo, entonces si $\bar{Q} > 0$, entra más agua al golfo de la que sale y, por conservación de masa, el excedente de lo que entra menos lo que sale, debe ser el agua que se evapora en el golfo.

2.2.3 Balance de calor

El balance de calor se obtiene a partir de la diferencia de temperatura y la velocidad de las corrientes. Siguiendo a Beron-Vera *et al.* (2000) el transporte de calor para una sección vertical está dado por:

$$G_c(x, z, t) = \rho C_p v_{ij} (T_{ij} - \langle T \rangle) h_{ij}$$

donde:

$\rho =$ densidad potencial promedio,

$C_p =$ calor específico promedio,

$v_{ij} =$ velocidad de las corrientes,

$T_{ij} =$ temperatura,

$\langle T \rangle =$ temperatura promedio de todo el golfo,

$h_{ij} =$ espesor de capas.

Para calcular la serie de tiempo del transporte de calor se realiza una integral de área de la sección:

$$Fc(t) = \rho C_p \int v(T - \langle T \rangle) dA .$$

Capítulo 3. Resultados

3.1 Promedios anuales

En esta sección se describen, a grandes rasgos, los aspectos sobresalientes de la circulación del Golfo de California obtenida de la simulación global de HYCOM. El promedio anual de las corrientes barotrópicas, superficiales y a profundidad, junto con la anomalía del nivel del mar (Figura 2 y 3) muestran la presencia de 8 remolinos cuyo sentido de rotación se va alternando a lo largo del golfo (empezando en el interior de la boca del golfo con un remolino anticiclónico y finalizando con uno ciclónico en el norte del golfo). En su única conexión con el Océano Pacífico es apreciable un flujo intenso de entrada del lado del continente que podría estar relacionado con la Corriente Costera Mexicana (ej. Lavín *et al.*, 2006). A su vez también se observa un flujo más débil de salida del lado de la península. Éste último no parece fluir propiamente del interior del golfo y es más bien parte del flujo ciclónico justo en la boca del golfo.

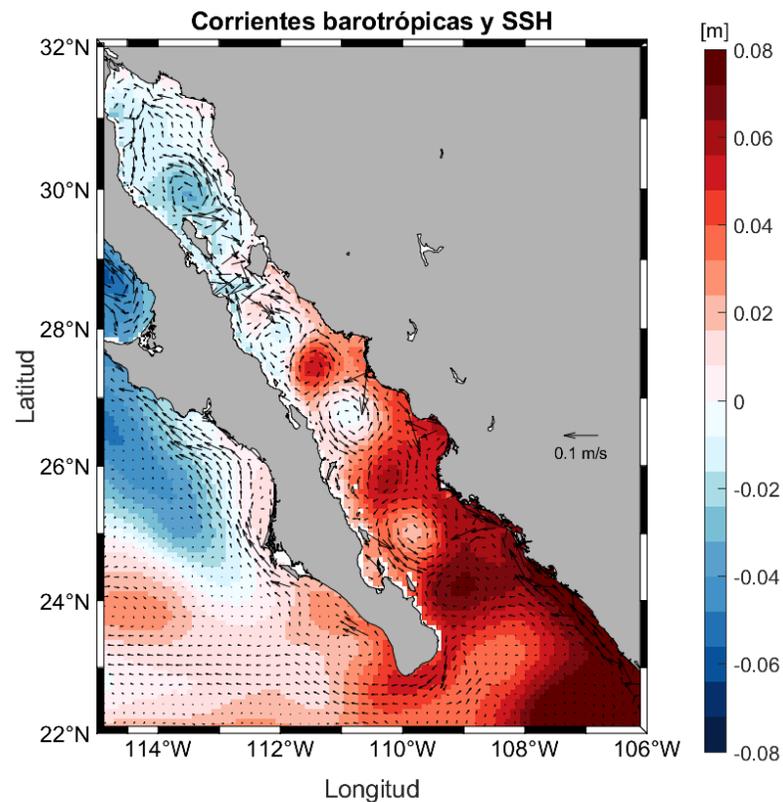


Figura 2. Promedio anual de las corrientes barotrópicas y la anomalía del nivel del mar. La anomalía del nivel del mar se obtuvo restando el promedio anual del nivel del mar de un polígono de 20° N a 32° N y de 117° O a 105° O.

Los remolinos mencionados tienen un efecto sobre gran parte de la columna de agua, al estar presentes tanto en el promedio de las corrientes barotrópicas, como en los promedios de la capa superficial (primeros 61 metros) y la profunda (entre 199 y 368 m). Éste resultado también sugiere que son estructuras permanentes o semipermanentes. Al comparar el promedio de las corrientes en la capa superficial y la profunda (Figura 3), una diferencia notable es la Corriente Costera Mexicana la cual se observa como entra al golfo del lado del continente en la capa superficial; sin embargo en la capa profunda (Figura 3b) no está presente. Las velocidades, como era de esperarse, disminuyen con la profundidad presentando en superficie valores promedio de hasta ~ 0.2 m/s. A su vez, también es posible notar que algunos remolinos pierden más intensidad que otros en la capa profunda. El remolino ciclónico centrado alrededor de 25°N , poco al norte de la Bahía de La Paz, parece debilitarse menos con la profundidad que el resto de los remolinos presentes en el golfo.

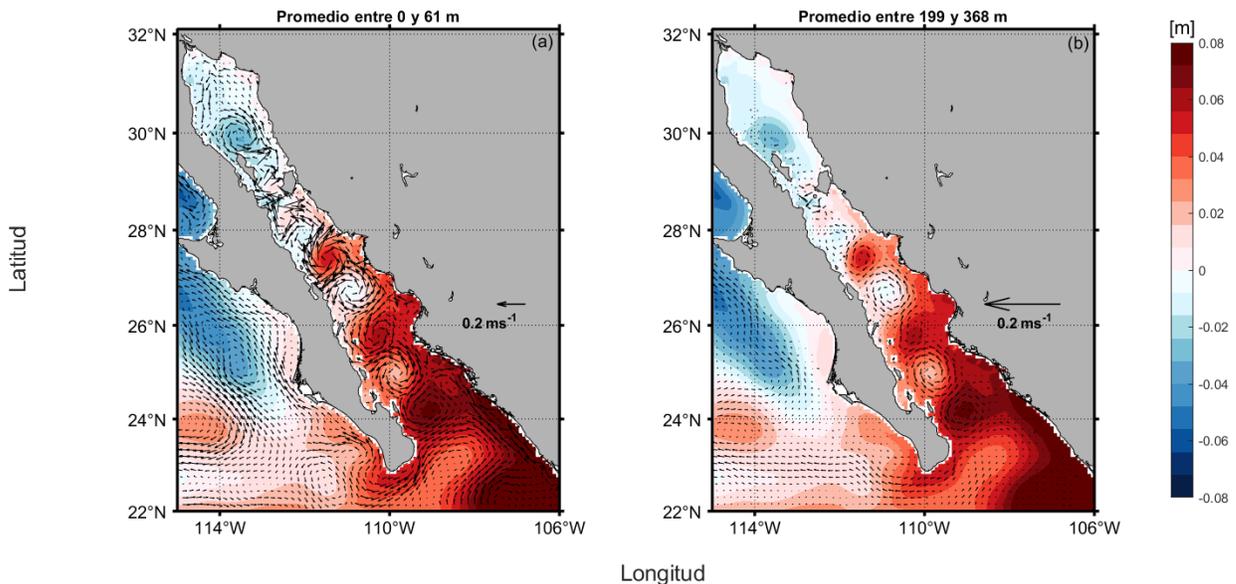


Figura 3. Promedio anual de (a) las corrientes de la capa superficial (0-61 metros) y (b) de una capa profunda (199-368 metros) junto con la anomalía del nivel del mar.

La posición de los remolinos es un tema del que se ha estudiado poco. Zamudio et al. (2008) mencionan que los remolinos resultan de la interacción de las corrientes costeras con los cabos de la región. Tenreiro (2011) menciona que la topografía también es importante y que las cuencas (depresiones flanqueadas por profundidades menores) tienden a favorecer la formación de anticiclones. Como contribución a estas hipótesis se ubicó el centro de los remolinos observados en el promedio anual (ver Figura 4). Para esto se obtuvo un transecto sobre los puntos de máxima profundidad de cada latitud y se graficó sobre el transecto longitudinal la posición de los remolinos. Se encontró que la mayoría de estos remolinos (con

excepción de los anticiclónicos en las cuencas de Pescadero y Guaymas) se encuentran sobre montañas submarinas.

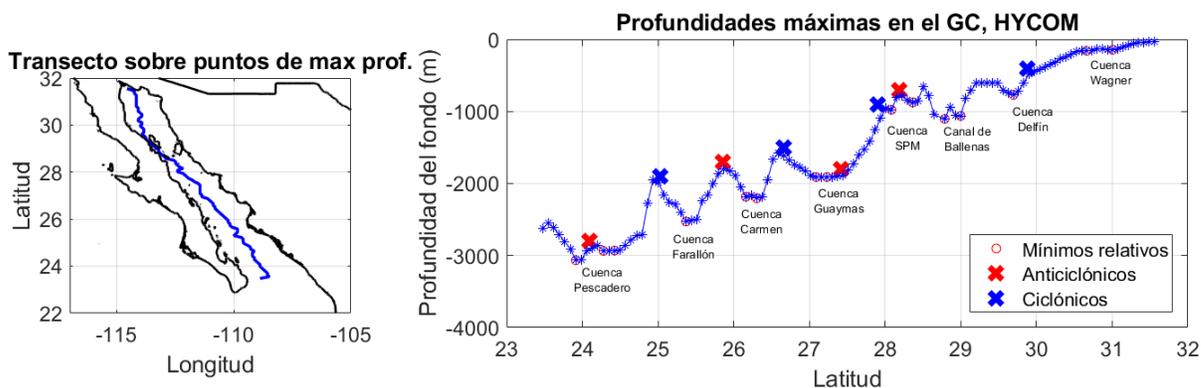


Figura 4. Transecto latitudinal de profundidades máximas a lo largo del golfo (izquierda). Posición del centro de los remolinos sobre el transecto latitudinal de profundidades máximas en el GC (derecha).

El promedio de la temperatura (Figura 5a) presenta un comportamiento en donde los valores más bajos de temperatura (22°C) se observan en la región de las grandes islas y en una parte de la región norte; mientras que los valores más altos alcanzan casi los 26°C en la región de la boca del golfo. Un rasgo interesante es el área de agua cálida (23°C) en la parte oriental del NGC, una característica que no parece estar presente en los promedios de largo periodo (Soto *et al.*, 1999; Lavín *et al.*, 2003). La salinidad superficial (Figura 5b) disminuye de la cabeza a la boca del golfo y presenta valores máximos de 36 en la cabeza del golfo y mínimos menores a 35 en las inmediaciones de la boca.

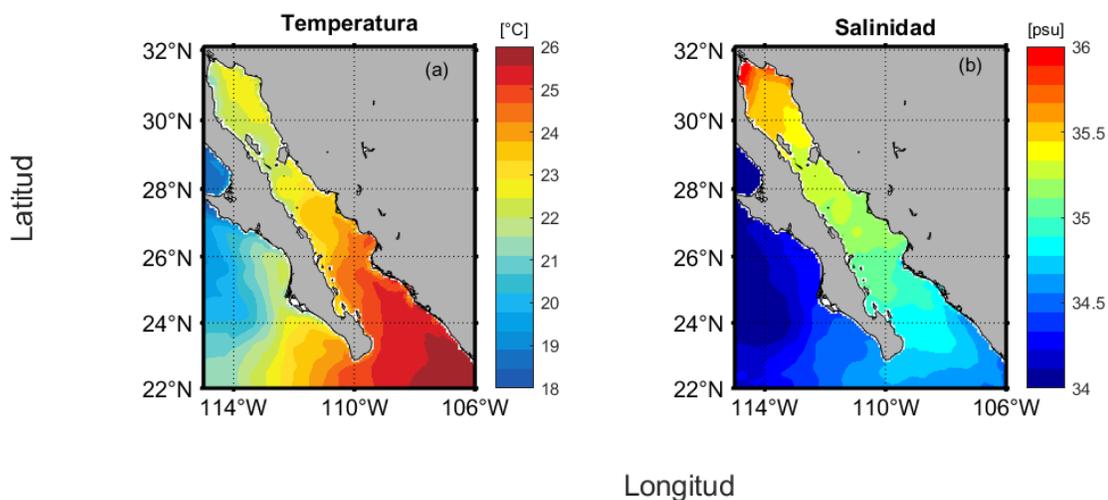


Figura 5. Promedio anual de la temperatura superficial (panel izquierdo) y la salinidad superficial (panel derecho).

Las características más importantes que se observan son: el mínimo de temperatura en la RGI y la lengüeta de agua cálida y de baja salinidad que penetra al golfo del lado del continente tal vez asociada a agua superficial tropical (Castro *et al.*, 2006) que es transportada por la Corriente Costera Mexicana (Portela *et al.*, 2016).

3.1.1 Promedios estacionales

Al analizar los promedios trimestrales de las corrientes y la anomalía del nivel del mar (Figura 6) identificamos una alta riqueza de procesos y de cambios a lo largo del año. De manera general se observa que la intensidad de las corrientes parece disminuir hacia el invierno y aumentar hacia el verano. Algunos remolinos parecen ser más energéticos en verano-otoño y otros en otoño-invierno.

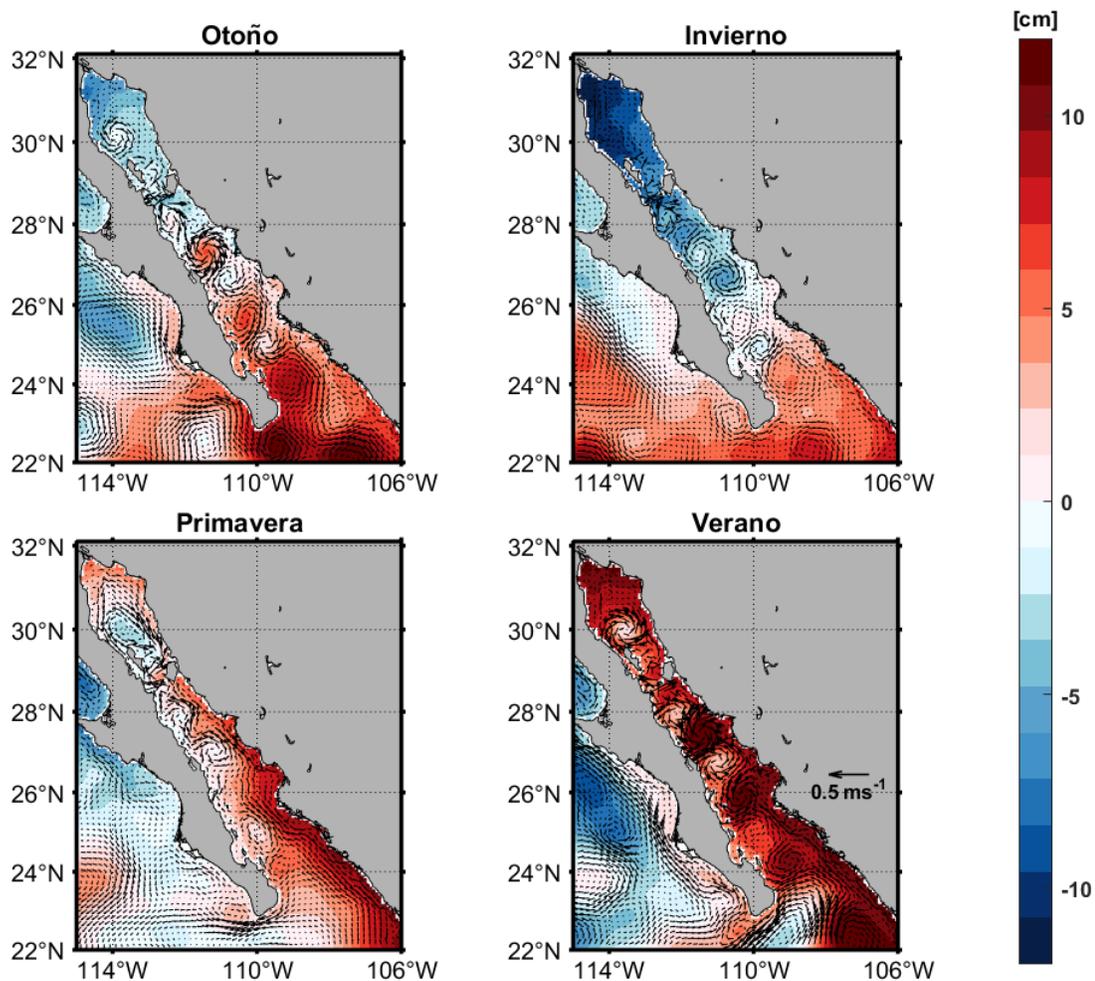


Figura 6. Variación estacional (promedios trimestrales) de los vectores de velocidad superficial y de la anomalía del nivel del mar. La anomalía del nivel del mar se obtuvo restando el promedio estacional del nivel del mar de un polígono de 20° N a 32° N y de 117° O a 105° O.

El remolino anticiclónico a la mitad del golfo es más energético durante el verano-otoño y desaparece en primavera. Las diversas regiones del GC se ven afectadas por la estacionalidad de estas corrientes. Para analizar esta variabilidad se realizó un acercamiento en tres regiones: al norte de las islas, en la región central y en la región de la boca; este análisis se presenta en la sección 3.1.2.

Analizando las temperaturas estacionales en superficie (Figura 7), vemos que se presentan los valores mínimos en invierno ($<20^{\circ}\text{C}$) y los máximos en verano, alcanzando en algunas regiones los 30°C . La región de las islas y la parte occidental del golfo norte son las más frías en invierno y en primavera. Una característica interesante es la señal de los remolinos que se observa especialmente en el verano. Esto es más notorio en el remolino anticiclónico centrado cerca de 27°N . Otra característica sobresaliente es la intrusión de aguas cálidas pegadas al continente durante primavera y verano alcanzando valores.

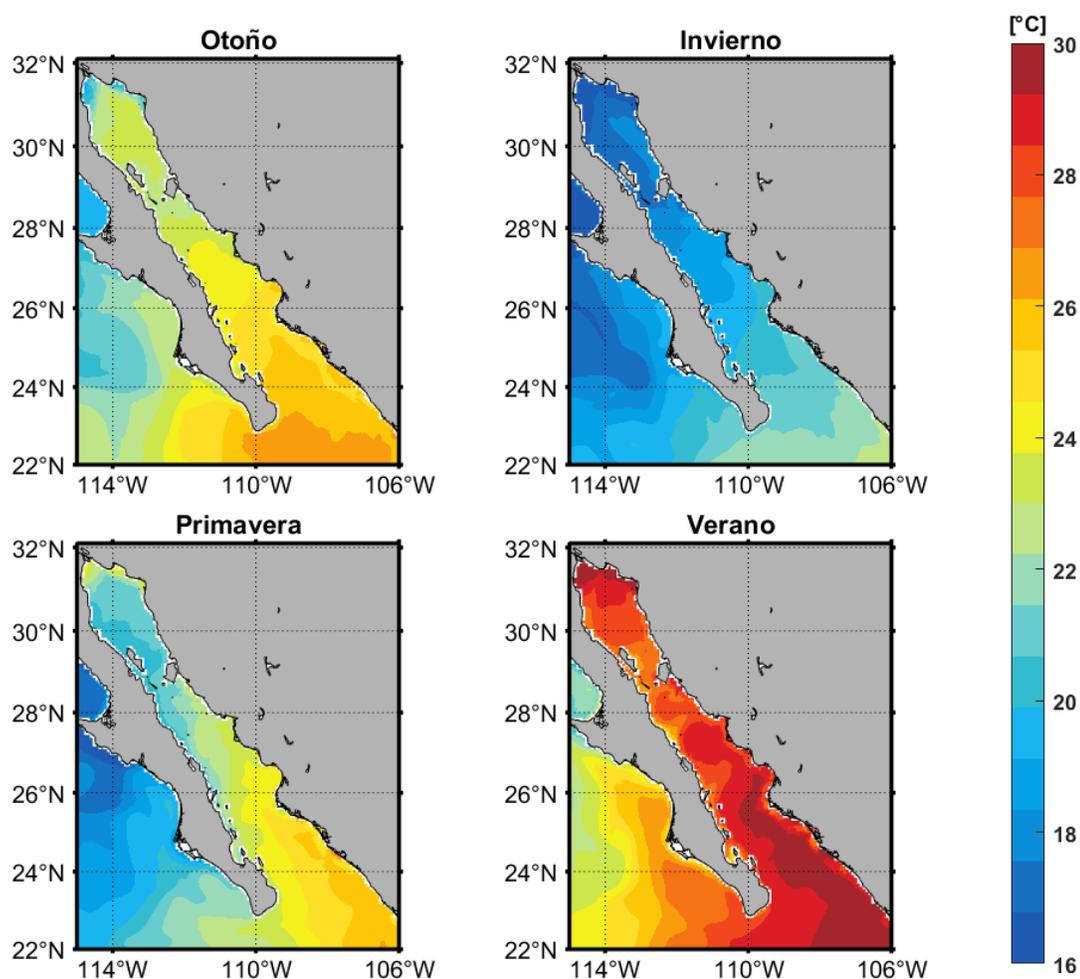


Figura 7. Variación estacional (promedios trimestrales) de la temperatura superficial.

La salinidad en superficie (Figura 8) presenta valores menores hacia la boca durante todo el año. Los máximos de salinidad (>35.4) que se presentan en la región más al norte del golfo cubren una mayor parte del NGC durante el otoño-invierno. El rastro de los remolinos también es apreciable, especialmente durante el verano, tanto en la región central del golfo como en el NGC.

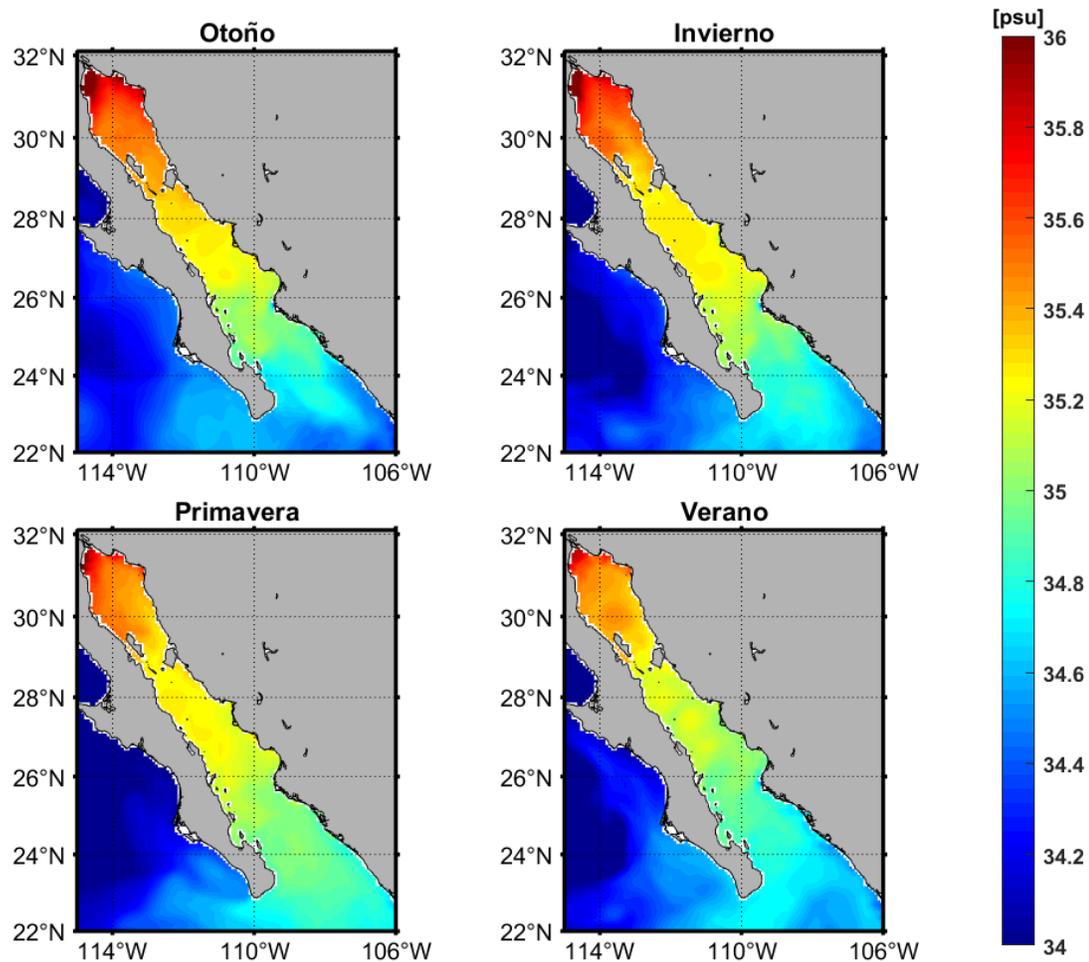


Figura 8. Variación estacional (promedios trimestrales) de la salinidad superficial.

3.1.2 Variación mensual de las corrientes

Al observar la alta variabilidad de algunos patrones observados en las corrientes estacionales presentadas en la sección anterior, realizamos promedios mensuales de las corrientes barotrópicas (Figura 9-11) y superficiales (Figura 32-34 del anexo) para analizar más detenidamente su variación a lo largo del año. Iniciando en la región del Golfo Norte (Figura 9) la dinámica se ve afectada principalmente por el flujo de entrada entre las islas, durante el mes de mayo este flujo se intensifica y se extiende en todo el golfo norte,

con circulación ciclónica alrededor de la cuenca. En junio la corriente sigue intensificándose y abarca casi por completo al golfo norte, apreciándose en el promedio mensual un giro ciclónico intenso. El remolino ciclónico persiste en los meses de verano (julio, agosto y septiembre), disminuyendo de tamaño e intensidad conforme progresa el verano. En octubre hay un cambio abrupto en la polaridad del giro, estableciéndose como anticiclónico durante el otoño (octubre, noviembre y diciembre), siendo de mayor intensidad en noviembre. El giro anticiclónico parece desaparecer en enero y en febrero se observa un débil giro ciclónico que disminuye sus velocidades durante marzo. Por último, en abril se observa el inicio el ingreso de agua de la región de las islas del lado continental.

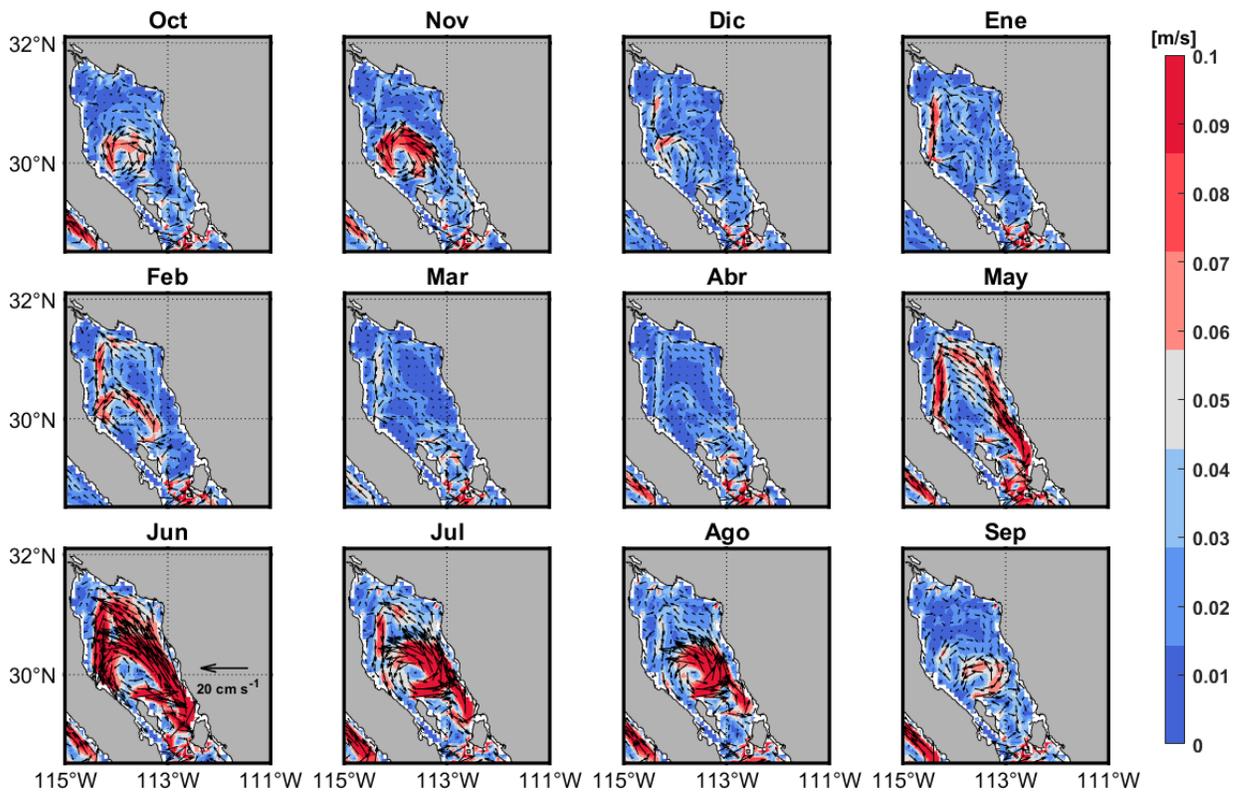


Figura 9. Promedios mensuales de los vectores de velocidad barotrópica y su magnitud en color para la región del golfo norte.

La región central del golfo (Figura 10) presenta una dinámica más compleja que se debe, en parte, a la presencia de hasta 4 distintos remolinos: dos ciclónicos y dos anticiclónicos. El remolino anticiclónico frente a Santa Rosalía (centrado cerca de los 27.3° N) presenta las mayores velocidades y está presente durante la mayor parte del año, con la excepción del mes de mayo. Otro remolino bastante notorio es el ciclónico ubicado cerca de los 26.7° N. Éste remolino es más intenso de octubre a enero.

Durante casi todo el año, parece haber una relación inversa entre la intensidad o presencia del remolino anticiclónico de Sta. Rosalía y el remolino ciclónico al sur de éste. A su vez, se observa que en la capa superficial el anticiclónico (Figura 33 del anexo) es el remolino más energético de la región mientras que en el promedio barotrópico el ciclónico parece tener una intensidad tan importante como la del anticiclónico. Durante los meses de julio a septiembre los 4 remolinos parecen dominar la circulación superficial (Figura 33 del anexo) y barotrópica en esta región.

Otra característica sobresaliente es la intensificación de una corriente costera del lado del continente en el mes de mayo (es más evidente en promedio de la capa superficial, ver anexo). En junio también hay una corriente hacia la cabeza que viene desde la boca (ver Figura 11) que abarca toda esta región, pero es más intensa y presenta varios meandros debido a la presencia de dos remolinos ciclónicos contiguos. La presencia de esta corriente coincide con la desaparición del remolino anticiclónico de Sta. Rosalía, posiblemente a través de la intensificación de los remolinos ciclónicos.

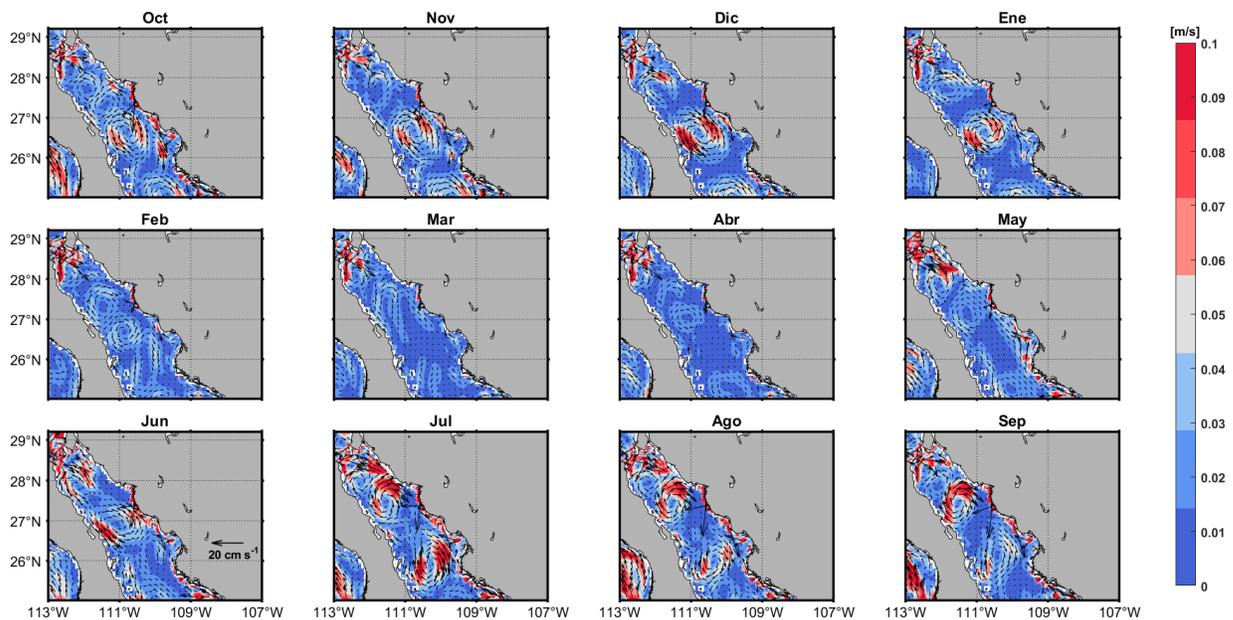


Figura 10. Promedios mensuales de los vectores de velocidad barotrópica y su magnitud en la región central del golfo.

En la entrada del GC existen dos aspectos importantes: (1) la influencia de la Corriente Costera Mexicana la cual se intensifica en los meses de mayo y junio. (2) La presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos; en casi todos los meses (a excepción de junio) es posible observar al menos un remolino. En algunos casos

los remolinos son pequeños (ej. febrero y marzo) y no abarcan todo el ancho del golfo. Su comportamiento no es claro, a grandes rasgos podríamos hacer la hipótesis de que existen 3 escenarios: (1) en verano cuando el evento de intensificación de la corriente costera mexicana llega a su máxima intensidad en junio, y luego en julio inicia un periodo de formación de remolinos y el remolino más intenso es un anticiclónico en el interior de la boca del golfo. (2) En otoño y parte del invierno cuando se observa la intensificación de un remolino en las afueras de la boca del golfo en octubre y otro cerca de la Bahía de la Paz, el cual se mantiene hasta febrero; y (3) en primavera cuando ocurre una disminución de la actividad de remolinos de gran tamaño. Los detalles observados en esta sección es un tema que necesita de una investigación más profunda, para determinar la existencia de un patrón estacional. En la siguiente sección, con el fin de analizar brevemente el comportamiento de los remolinos observados en la Figura 10, se presentan dos secciones latitudinales de dos remolinos: uno ciclónico y uno anticiclónico.

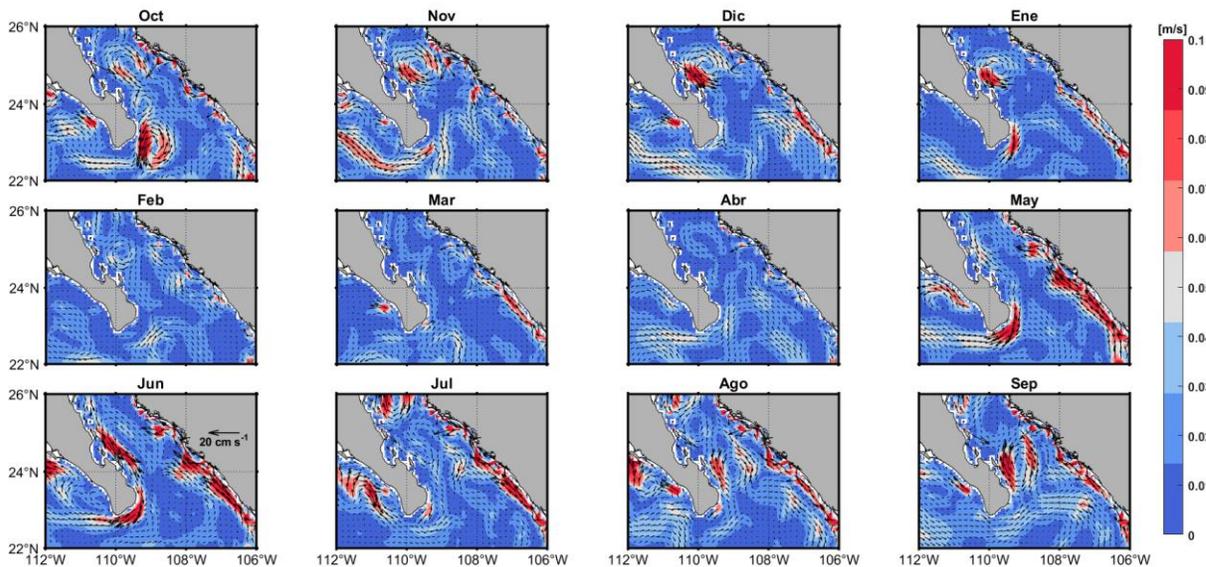


Figura 11. Promedios mensuales de los vectores de velocidad barotrópica y su magnitud en la región sur del golfo.

3.2 Sección vertical de dos remolinos

Se han descrito con cierto detalle algunos remolinos dentro del golfo tanto con observaciones (Lavín *et al.*, 1997; Pegau *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2003; Lavín *et al.*, 2013) como con modelos numéricos (Mateos *et al.*, 2006; Zamudio *et al.*, 2008; Tenreiro, 2011). Existen algunos trabajos del remolino en el golfo norte (ej. Lavín *et al.*, 1997) y algunos otros, tanto en la región de las islas (Mateos *et al.*, 2006), como en el sur del golfo (Zamudio *et al.*, 2008; Lavín *et al.*, 2013). Escogimos dos remolinos de la región central: uno ciclónico centrado en la latitud 26.7° N y otro anticiclónico en los 27.3° N. Comparando el promedio anual

de sus velocidades (Figura 12), se puede observar que ambos remolinos tienen magnitudes similares, siendo el anticiclónico ligeramente más intenso. Un núcleo superficial y otro subsuperficial de salida se observan del lado del continente en el remolino ciclónico; mientras que en el anticiclónico se observa que el remolino está más confinado al centro del golfo debido a un flujo de salida del lado de la península y otro de entrada del lado del continente.

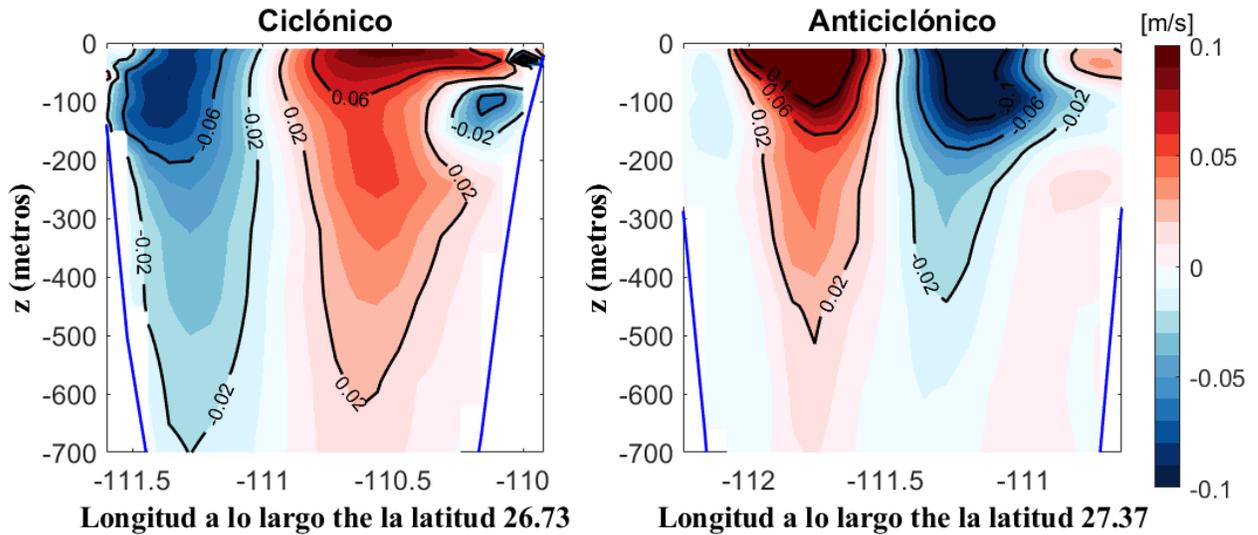


Figura 12. Sección vertical del promedio anual de la velocidad meridional del remolino ciclónico y anticiclónico.

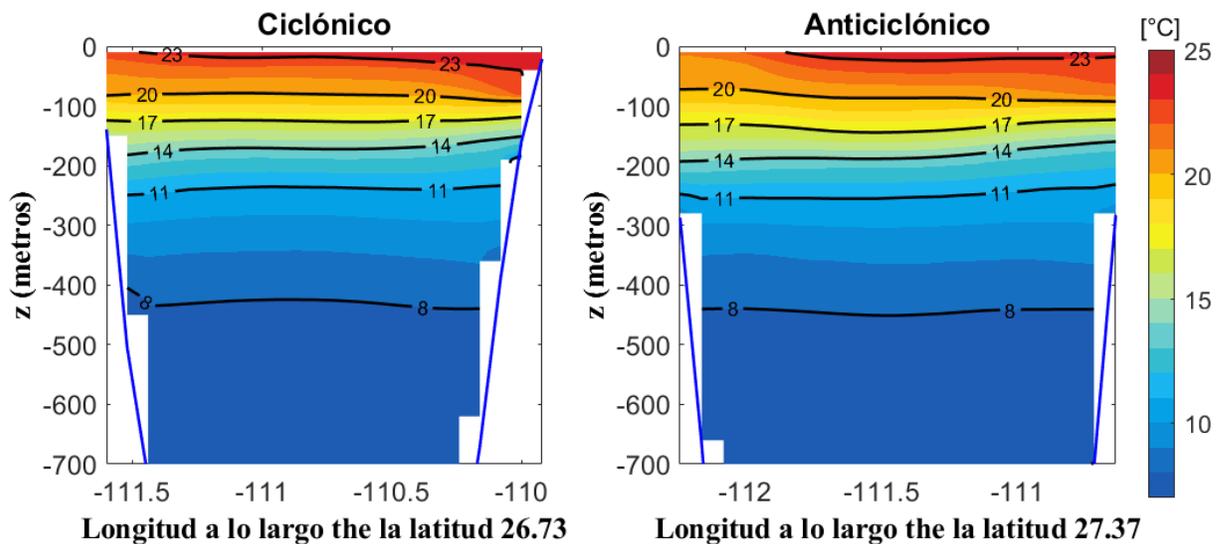


Figura 13. Sección vertical del promedio anual de la temperatura del remolino ciclónico y anticiclónico de la región central del golfo.

Analizando la sección vertical del promedio anual de la temperatura de estos remolinos, es posible observar un ligero hundimiento (levantamiento) de las isotermas en el remolino anticiclónico (cyclónico). Por otro lado, en el promedio de la salinidad, la característica más sobresaliente es el núcleo de alta (baja) salinidad del lado de la península (continente) en los primeros 100 metros que se observa en el remolino ciclónico. El remolino anticiclónico nada más presenta altas salinidades del lado de la península y cerca de la superficie en la región central.

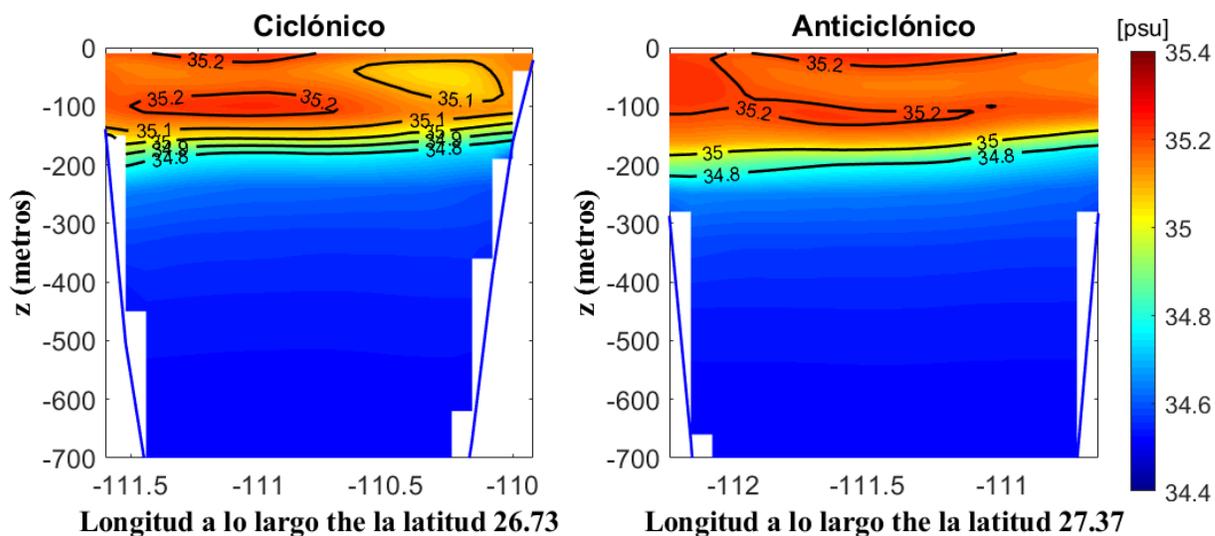


Figura 14. Promedio anual de la sección vertical de la salinidad del remolino ciclónico y anticiclónico.

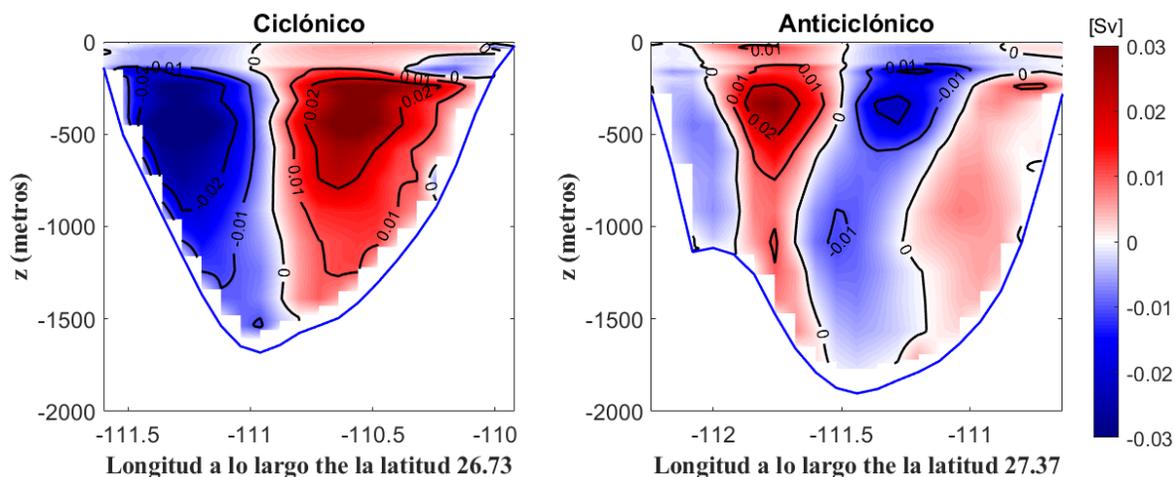


Figura 15. Promedio anual de la sección vertical del transporte de volumen del remolino ciclónico y anticiclónico. El intervalo de los contornos es de 0.01 Sv.

Con respecto al transporte de volumen que se presenta en ambos remolinos es posible observar que estos tienen un efecto que alcanza hasta las más grandes profundidades. Sin embargo, el remolino ciclónico abarca toda la sección del golfo, mientras que el remolino anticiclónico se encuentra confinado a la región central de la sección. Es interesante notar que el mayor transporte de los remolinos no se da en superficie, sino entre 300 y 500 m de profundidad.

3.2.1 Variación estacional del remolino ciclónico

El remolino ciclónico presenta su mayor intensidad en otoño e invierno abarcando una gran parte de la sección, con excepción de una región confinada al continente donde se presenta un núcleo de salida importante. En primavera se observa un patrón más complejo con velocidades entrando en toda la sección cerca de la superficie y con un pequeño núcleo de salida del lado continental. Este patrón menos organizado es consistente con la Figura 10 que muestra a un remolino débil o inexistente durante la primavera. En verano se observa el inicio de la formación del remolino. Sin embargo éste se encuentra desplazado por un núcleo intenso de salida del lado del continente.

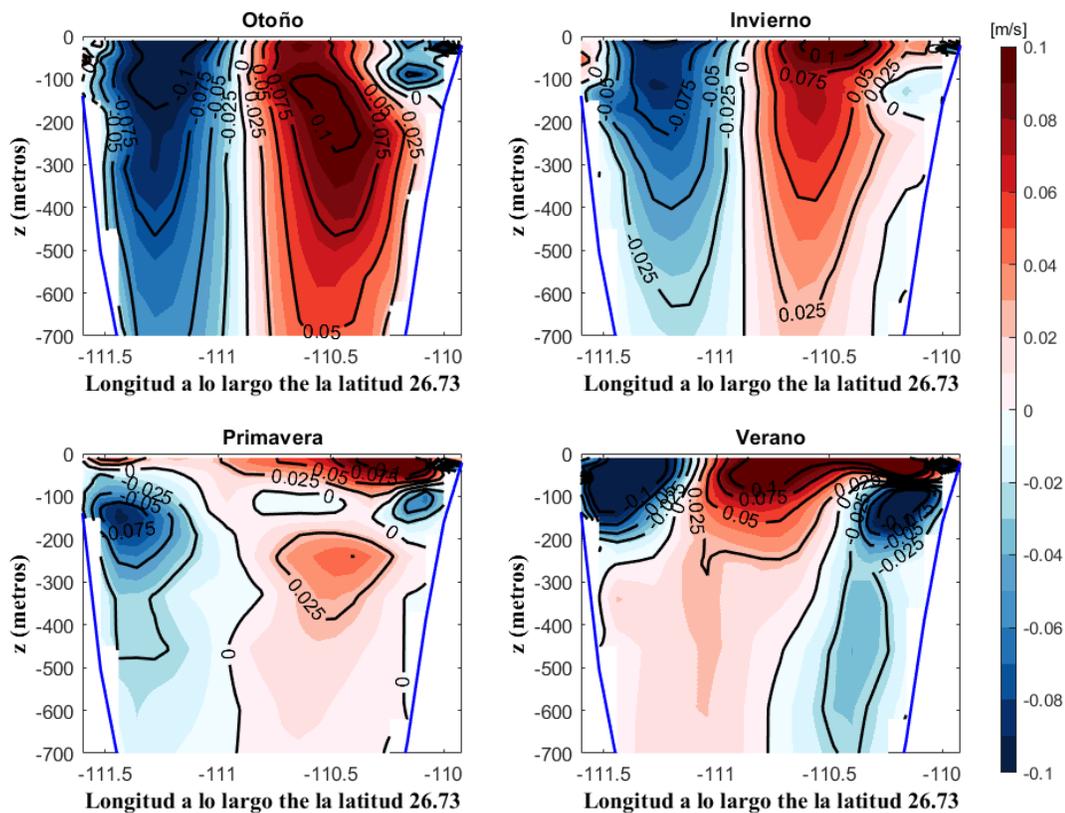


Figura 16. Sección vertical de los promedios trimestrales de la velocidad meridional en la sección del remolino ciclónico.

La evolución temporal de la sección del remolino ciclónico (Figura 17) muestra un panorama más completo de los meses en el que este remolino está activo. Se utilizó la velocidad barotrópica porque muestra más claramente la estructura de los remolinos. En esta figura se observa que el remolino ciclónico es más intenso de octubre a febrero. Posteriormente, en los meses de primavera se presenta un flujo de entrada más débil que abarca la mitad de la sección desde la costa del lado continental. Posteriormente, en junio se forma el remolino nuevamente, sin embargo éste se ve desplazado hacia la península por un flujo de salida del lado del continente y que continúa hasta septiembre.

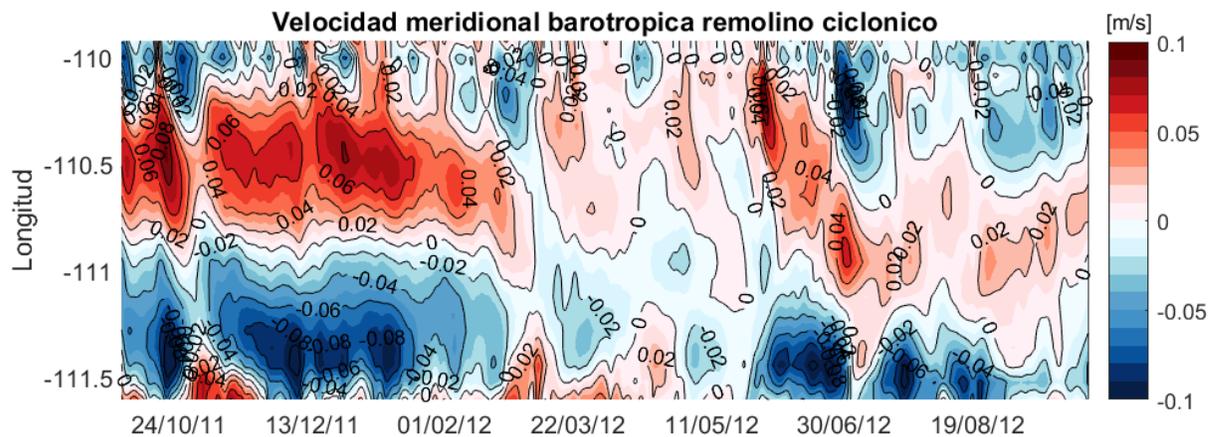


Figura 17. Diagrama Hovmöller de la velocidad barotrópica en la sección del remolino ciclónico. En el eje "x" se tiene el tiempo y en el eje "y" la longitud a lo largo de la latitud de 26.73°N. La península se encuentra a lo largo del eje inferior.

3.2.2 Variación estacional del remolino anticiclónico

Por otro lado, el remolino anticiclónico presenta sus mayores velocidades e intensidad durante el verano alcanzando profundidades hasta de 700 metros. Se puede observar también que en verano hay un pequeño núcleo de salida en superficie del lado de la península. En otoño el remolino mantiene altas velocidades (0.1 m/s) por arriba de los 200 metros y un flujo de salida de menor intensidad se presenta de lado de la península alcanzado profundidades mayores a 700 metros. En invierno el remolino se ve afectado por un flujo de salida subsuperficial del lado de la península y un flujo superficial de entrada del lado del continente. Y, por último, en primavera se vuelve a observar que el remolino se ve afectado por una corriente intensa costera de entrada del lado del continente. En el diagrama Hovmöller de la velocidad meridional barotrópica (Figura 19) es posible observar que el remolino anticiclónico es más intenso en verano y a principios de otoño. El resto del año el remolino es más débil, sobre todo en mayo y junio, cuando desaparece.

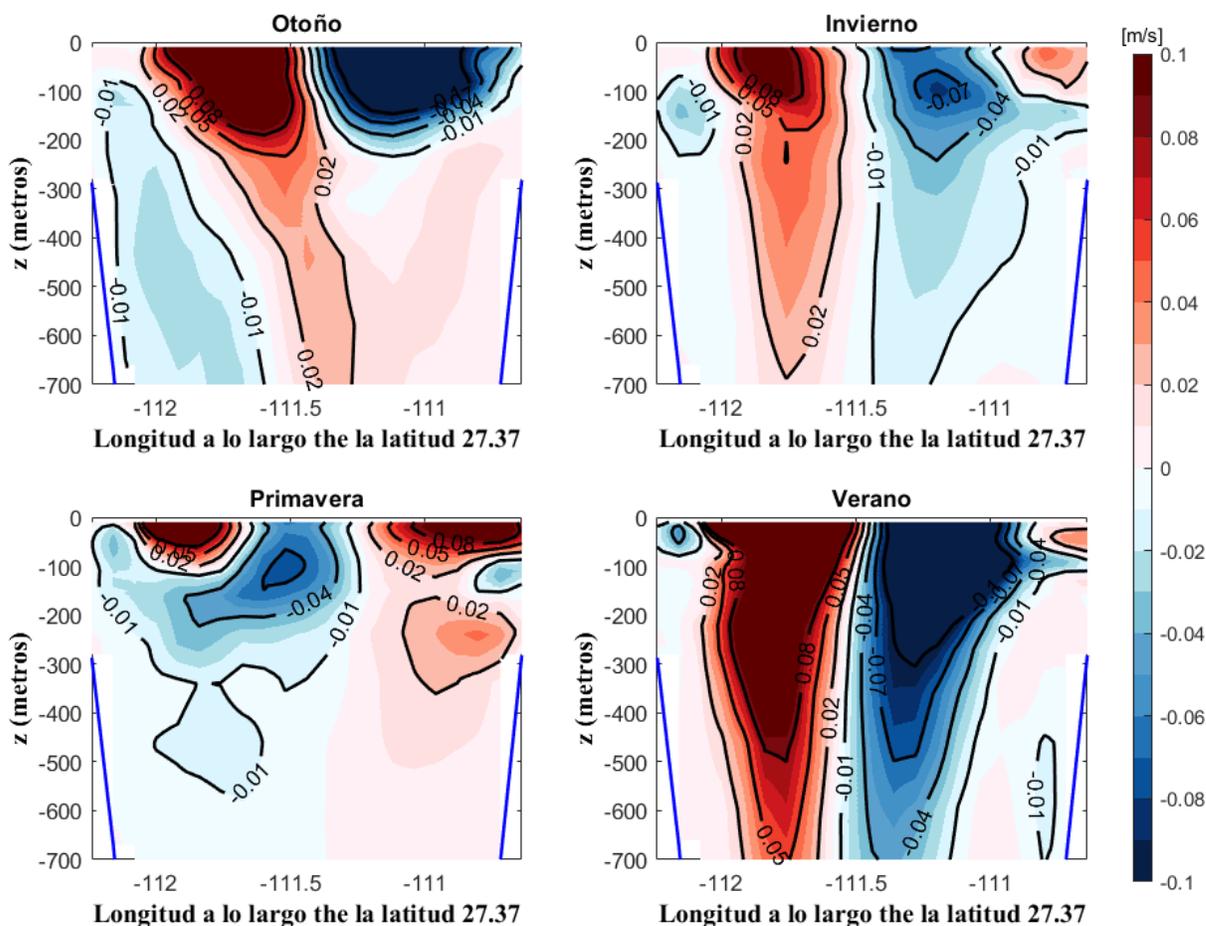


Figura 18. Sección vertical de los promedios trimestrales de la velocidad meridional de la sección del remolino anticiclónico.

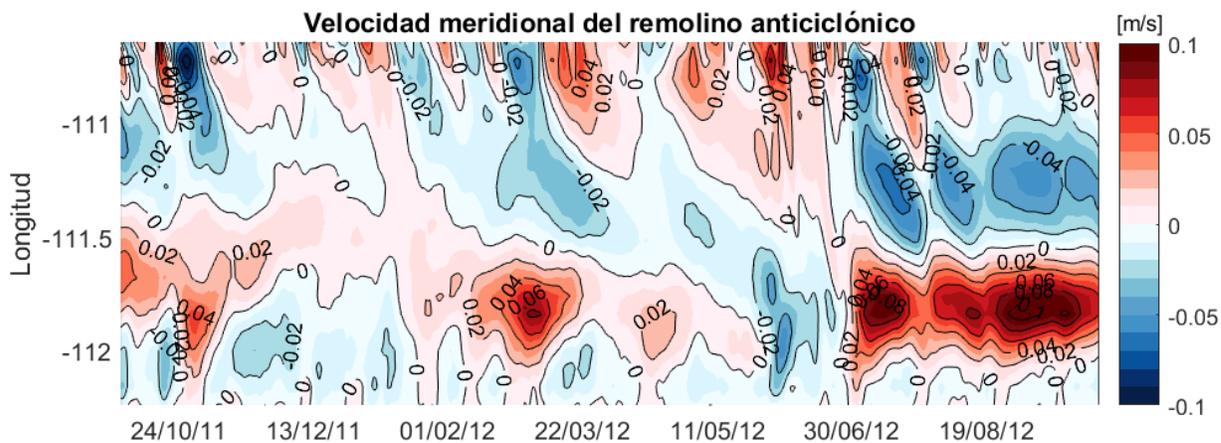


Figura 19. Diagrama Hofvuller de la sección del remolino anticiclónico, en el eje "x" se tiene el tiempo y en el eje "y" la longitud a lo largo de la latitud de 27.37°. La península se encuentra a lo largo del eje inferior.

3.3 Boca del Golfo de California

En esta sección se describen las secciones verticales de la velocidad y el transporte meridionales, así como de las variables hidrográficas en la boca del golfo (delimitada por un transecto latitudinal a lo largo de la latitud de 23.47°N). También se analiza el intercambio de volumen y de calor con el Océano Pacífico. La estructura vertical promedio de las corrientes meridionales en la boca del golfo se presenta en la Figura 20. El comportamiento de las corrientes en la boca ha sido estudiado en diversas investigaciones a lo largo de los años (ej. Collins *et al.*, 1997; Mascarenhas *et al.*, 2004, y Castro, 2006). En estos trabajos los autores resaltan que, en promedio, existe un flujo hacia dentro del golfo del lado continental y un flujo de salida del lado de la península; este comportamiento también es observado en la gráfica presentada en este trabajo. La velocidad presenta valores promedio de -0.1 a 0.08 m/s con los valores máximos por arriba de los 200 metros, aunque las velocidades se extienden por toda la columna de agua. Nótese que el núcleo de velocidad de salida del lado de la península está centrado alrededor de los 100 m y, de hecho, justo arriba del núcleo la velocidad es de entrada en los 25 m superiores aproximadamente.

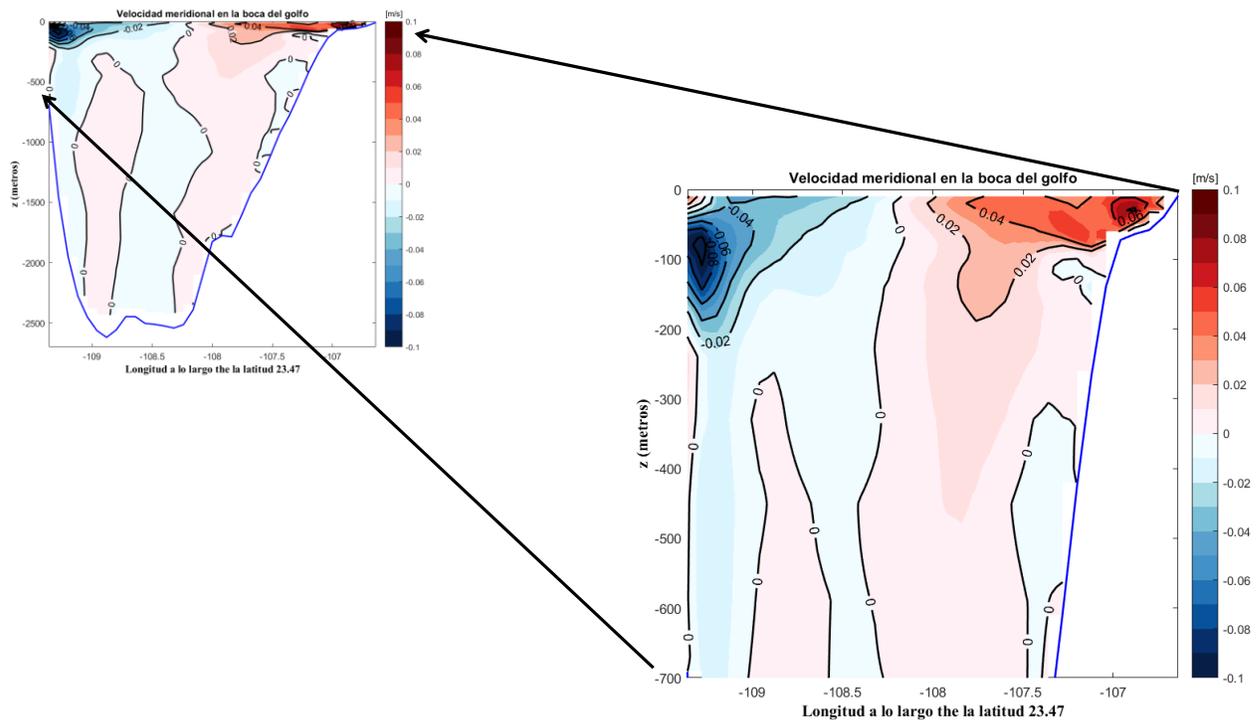


Figura 20. Sección vertical del promedio anual de la velocidad meridional de la sección de la boca del golfo.

En la Figura 21 se presenta el promedio anual de la temperatura y de la salinidad en la sección de la boca. El cambio más abrupto, tanto de temperatura como de salinidad, se presenta por arriba de los 150 m. Los valores promedio de temperatura abarcan un rango desde los 25 °C en superficie hasta 7 °C a profundidad. Mientras que la salinidad presenta un rango pequeño desde 34.55 hasta 34.75 con los menores valores del lado continental (este). Un rasgo interesante es el núcleo de baja salinidad (34.45) alrededor de los 150 m del lado continental y que está asociado a un flujo de entrada (ver Figura 20), posiblemente de origen tropical.

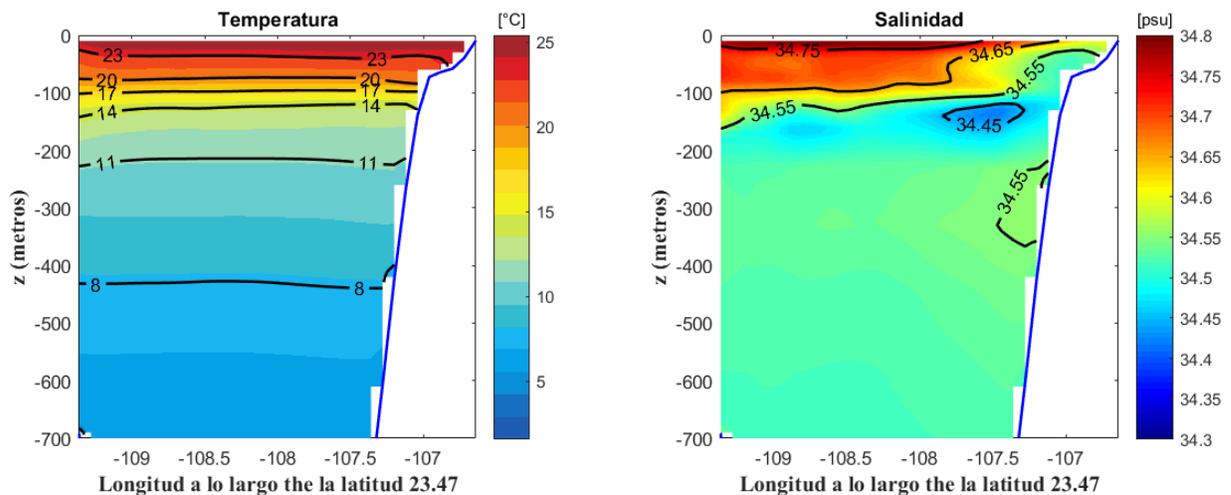


Figura 21. Promedio anual de la temperatura y la salinidad en la boca del golfo por arriba de los 700 metros.

3.3.1 Variación estacional de la velocidad meridional, la temperatura y la salinidad

Al analizar la variabilidad estacional de la velocidad meridional (Figura 22) es posible observar que durante primavera se presenta el patrón más similar al promedio anual de las velocidades. Con velocidades positivas (entrando al golfo) del lado del continente y velocidades negativas (saliendo del golfo) del lado de la península. Posteriormente, en verano se observan velocidades entrando del lado del continente de manera superficial y subsuperficial del lado de la península y un patrón contrario para las velocidades saliendo del golfo. Sin embargo, el fuerte núcleo de salida pegado a la península no se observa en las otras estaciones del año.

En otoño la sección se divide en 4 regiones, entrando del lado del continente, luego saliendo en la parte central pero extendiéndose hasta la península cerca de la superficie. Posteriormente, más hacia el oeste hay un flujo de entrada subsuperficial por debajo de los 200 metros y, finalmente, hay un flujo saliendo pegado a la península. En invierno se presentan los valores más bajos de velocidad y se logran observar

dos núcleos positivos superficiales en ambos extremos de la sección, alternados por bandas de salida y entrada.

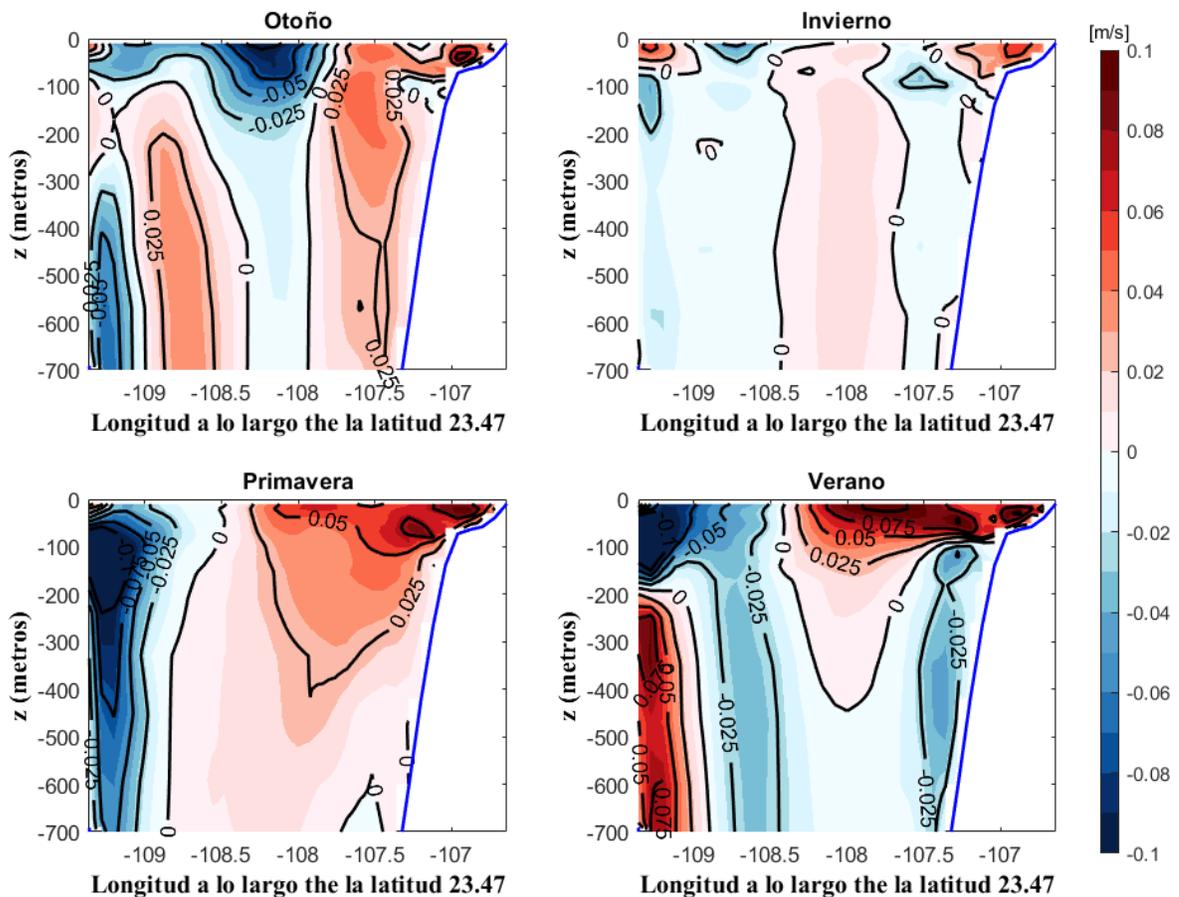


Figura 22. Promedios trimestrales de la velocidad meridional por arriba de los 700 metros en la boca del golfo.

La variación estacional de la temperatura (Figura 23) muestra que, durante el invierno el mayor gradiente vertical de la temperatura se presenta alrededor de los 100 metros de profundidad con una capa de mezcla por arriba de esta profundidad. Posteriormente, se observa un aumento en la estratificación en primavera con una ligera inclinación de las isotermas del lado de la península.

En verano se presenta la mayor estratificación de la columna de agua, presentando el mayor gradiente de temperatura por arriba de los 50 metros. En superficie los máximos valores ocurren en verano con 26°C. En primavera se observa como las isotermas al igual que las isopícnas (Figura 39 del anexo) se inclinan hacia arriba (abajo) por arriba (abajo) de los 100 m, lo cual es la señal del máximo subsuperficial en el flujo

de salida que se observa durante en este mes (Figura 22), a través del balance de viento térmico $\left(\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{f\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x}\right)$.

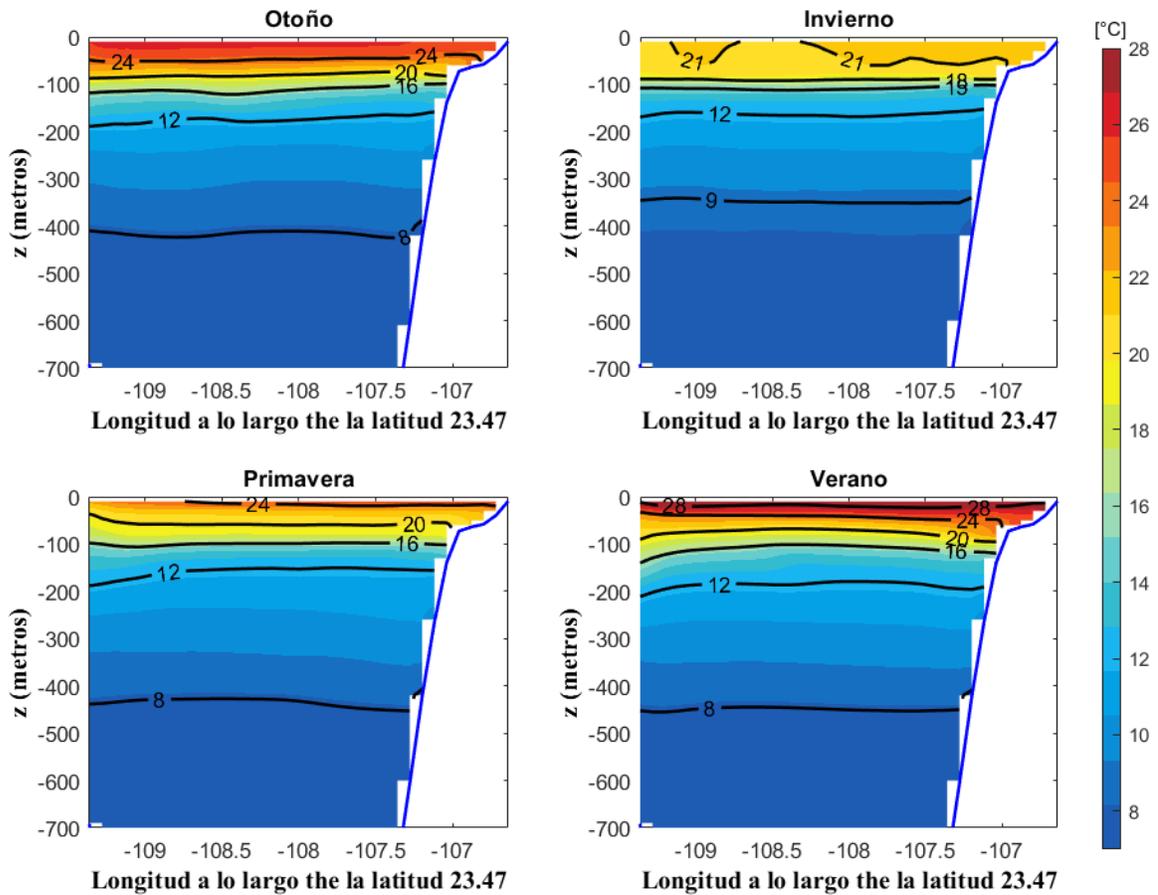


Figura 23. Promedios trimestrales de la temperatura por arriba de los 700 metros en la boca del golfo.

La estacionalidad de la salinidad (Figura 24) presenta un rango más pequeño entre 34.3-34.8 y nos muestra un patrón interesante. En invierno es posible observar que se presentan tres capas bien definidas de diferente salinidad, por arriba de los 100 metros se presentan salinidades de 34.8. Entre los 100-200 metros se presenta un mínimo de salinidad subsuperficial con valores menores a 34.5. Por debajo de esta capa se presenta una salinidad de 34.55. En primavera se observa que la capa de agua de baja salinidad se despega de la península y en verano se observa un aumento considerable del núcleo de baja salinidad. Nótese que el núcleo de baja salinidad en verano está asociado fundamentalmente a flujo de entrada (Figura 22). En otoño, el núcleo de 34.7 se vuelve a extender hacia el centro de la sección y está asociado fundamentalmente a un flujo de salida (ver Figura 22).

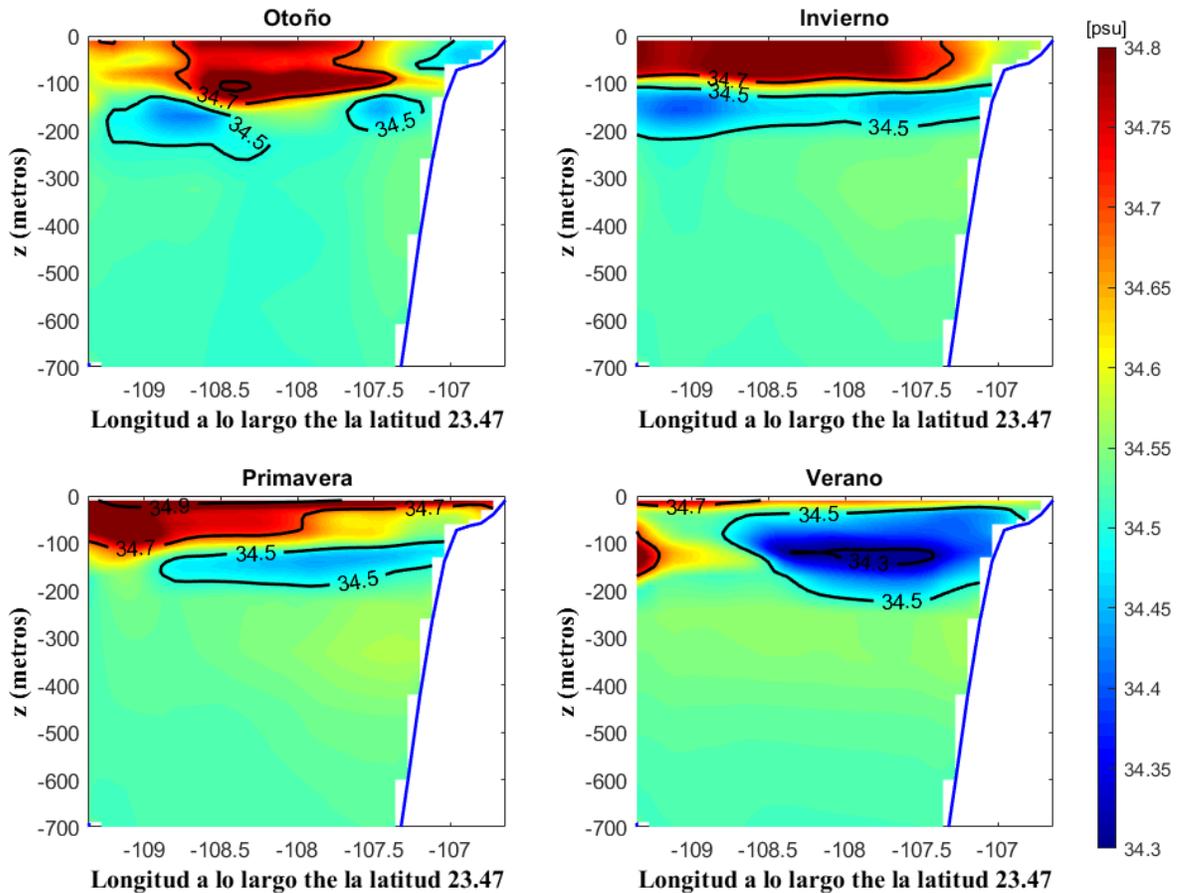


Figura 24. Promedios trimestrales de la salinidad por arriba de los 700 metros en la boca del golfo.

3.3.2 Transporte de volumen

En promedio el transporte neto de volumen en la sección de la boca del golfo presenta un rango de -0.01 a 0.01 Sv con varios núcleos positivos y negativos a distintas profundidades (ver Figura 25a). Nótese que existen núcleos significativos de transporte a profundidades grandes de 500, 1000 y 2000 m. A partir del perfil vertical (suma horizontal) de dicha sección se identificaron 6 capas promedio de entrada y salida de agua (ver Figura 25b y Tabla 1). En esta tabla se observa que el mayor transporte de entrada ocurre en dos zonas en la capa superficial de los 0-65 metros con un transporte positivo de 0.13 Sv y en la capa entre los 174-369 m que también alcanza los 0.13 Sv. Dichas capas compensan el transporte subsuperficial de salida (entre los 65-174 m) de -0.20 Sv. Esto nos sugiere que la tercera capa (entre 174-369 m.) debería presentar una surgencia hacia la segunda, mientras que la capa superficial presentaría una subsidencia. Por debajo de estas 3 capas se presenta el menor transporte de volumen de -0.007 Sv entre los 369-788 m seguido de un transporte de entrada de 0.03 Sv y nuevamente uno de salida en la capa más profunda >1245 m con

-0.07 Sv. Es importante hacer notar que en la Figura 25b, el transporte no está dado por el área entre la curva y el eje vertical cero, sino simplemente por la suma de los valores positivos o negativos en cada capa con transportes del mismo signo.

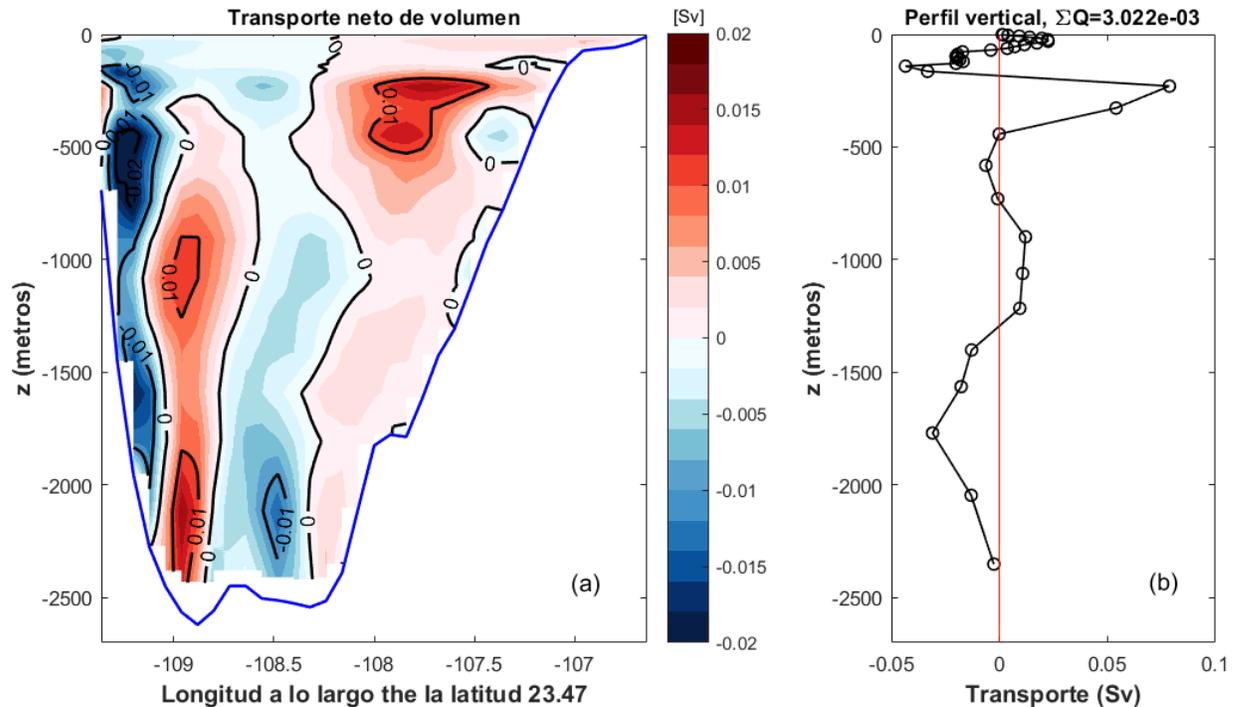


Figura 25. Promedio anual del transporte de volumen en la boca del golfo en el lado izquierdo y el perfil vertical promedio de dicha sección en el lado derecho.

La suma del perfil vertical nos da un promedio anual del transporte neto de entrada de 0.003 Sv que corresponde a una evaporación anual de 0.55 m/año que es un resultado cercano a lo descrito en la literatura por Castro *et al.* (1994). El transporte turbulento de volumen (Figura 26), dado por el segundo término de la Ec. (4), en cambio da un promedio anual de -0.01 Sv, más de tres veces más grande y de signo contrario al transporte neto. Esto quiere decir que el transporte turbulento (debido a la correlación de las fluctuaciones de la velocidad y espesor de las capas) es compensado por el transporte debido al producto de la velocidad media por el espesor medio de las capas (primer término en la Ec. (4) y Tabla 2). Si bien el transporte turbulento es de menor magnitud que el transporte total (comparar Figuras 25a y 26) claramente tiene un valor neto significativo y resalta la importancia que pueden tener las fluctuaciones para el transporte neto en la boca del golfo.

Tabla 1. Capas promedio del transporte de volumen y sus rangos de profundidad. Valores positivos indican entrada al golfo.

Capa	Profundidad [m]	Transporte de volumen [Sv]
1-12	0-65	0.13
13-22	65-174	-0.21
23-24	174-369	0.13
25-27	369-788	-0.007
28-30	788-1245	0.03
31-fondo	1245-2205	-0.07

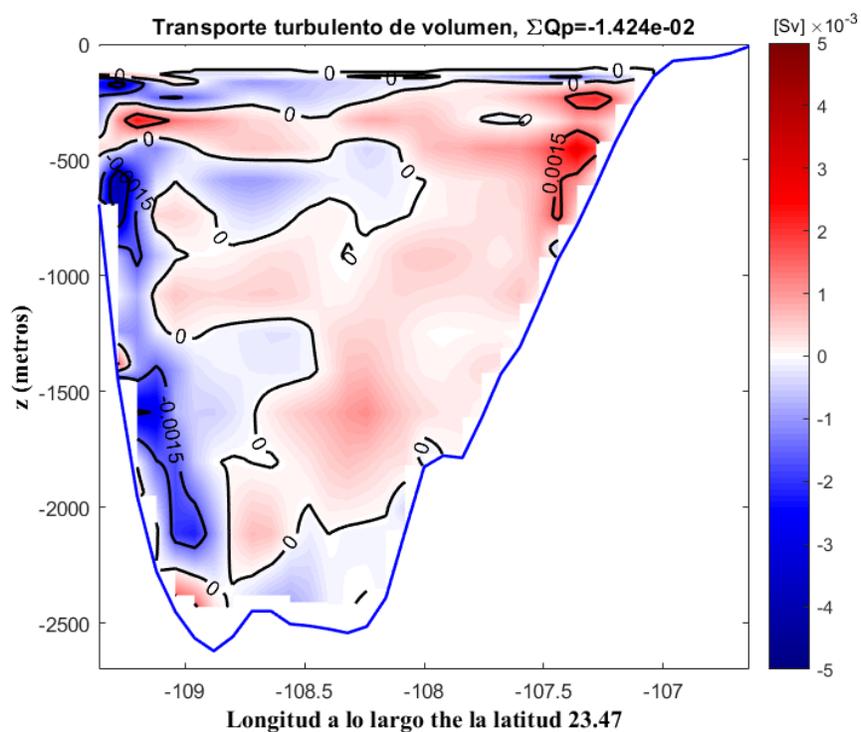


Figura 26. Promedio anual del transporte turbulento de volumen en la boca del golfo.

Tabla 2. Descomposición del transporte de volumen en la boca del golfo.

Transporte	Medio [Sv]	Turbulento [Sv]	Neto [Sv]	Evaporación [m/año]
entrada	1.28	0.32	5.39	-
salida	-1.26	-0.33	-5.39	-
neto	0.017	-0.014	0.003	0.55

A partir de las capas promedio obtenidas en el transporte neto de volumen se realizó un análisis armónico para determinar la amplitud y la fase de la señal anual y semianual y así analizar qué tanta de la señal estacional se resuelve con estos dos armónicos. Se encontró que las capas con las varianzas explicadas más altas fueron la capa superficial y la cuarta capa ubicada entre los 369-788 metros de profundidad. A su vez estas dos capas presentaron un desfase 180° lo cual sugiere que el intercambio estacional a través de la boca del golfo se está dando fundamentalmente a través de estas dos capas (Figura 27 y Tabla 3). Esto es a pesar de que la cuarta capa prácticamente no contribuye al transporte promedio.

Tabla 3. Análisis armónico del transporte de volumen a través de 2 capas en la boca del golfo.

Capa	Profundidad [m]	Amplitud anual [Sv]	Fase anual	Amplitud Semi-anual [Sv]	Fase semi-anual	Varianza explicada
1	0-65	0.43	9 junio	0.28	14 julio	0.91
4	369-788	0.36	3 diciembre	0.41	12 octubre	0.84

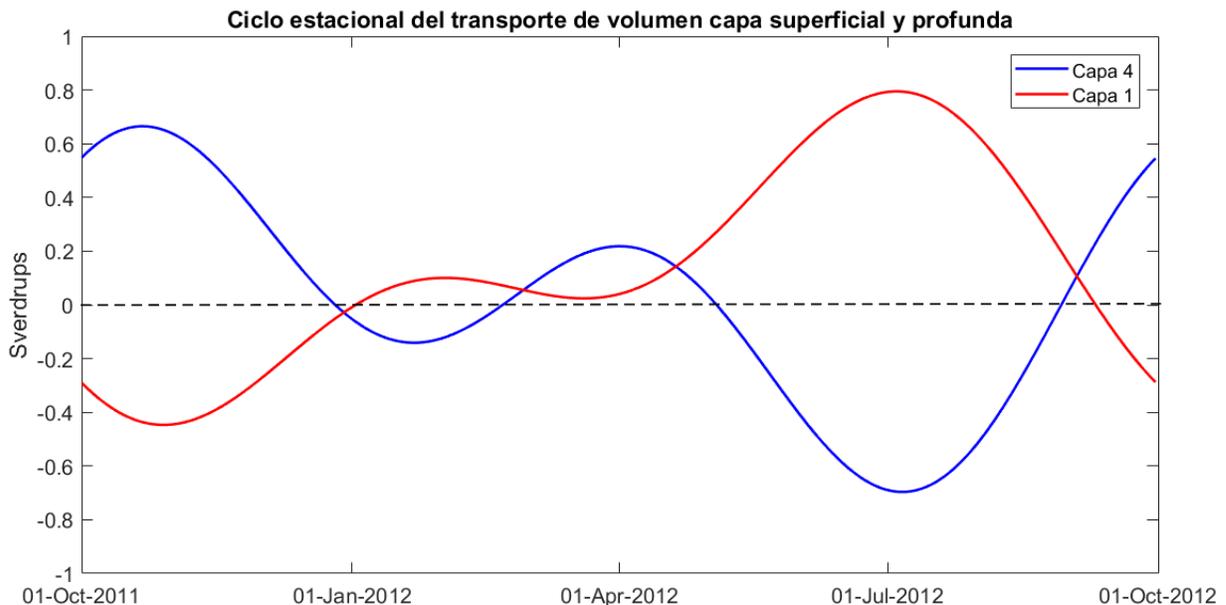


Figura 27. Ciclo estacional del transporte de volumen en la capa superficial (0-65 m) y en una capa intermedia (369-788 m) en la boca del golfo.

A partir de la señal anual y semianual del transporte en ambas capas es posible observar que a lo largo del año analizado, ocurren dos periodos donde el intercambio de volumen en estas dos capas es máximo. El

periodo con mayor transporte de entrada por superficie (0-65m) y salida por la capa profunda es durante los meses de verano, alcanzando un máximo a principios de julio. Mientras que la mayor salida en superficie y entrada en la capa profunda ocurre en los meses de otoño, con un máximo a mediados de octubre. El menor intercambio en estas dos capas ocurre desde enero hasta mediados de abril.

En la Figura 28 se muestra un diagrama Hovmöller de la velocidad barotrópica en la boca del golfo a lo largo del año. El diagrama muestra claramente que el transporte neto de entrada está localizado cerca del continente (el signo del transporte depende únicamente de la velocidad), pero la variación de la velocidad muestra una serie de eventos intensos que se dan a lo largo de todo el año, aunque tal vez con mayor intensidad en verano. Dichos eventos podrían deberse a ondas atrapadas a la costa que se propagan hacia el golfo. Por otro lado, también se observa que unas 3 o 4 veces en el año los eventos de entrada de agua se separan del continente y parecen propagarse hacia el oeste. El más claro es el evento que empieza a finales de marzo. De hecho, también algunos de los pocos eventos de salida de agua que se dan cerca del continente parecen propagarse hacia el oeste. Estos eventos podrían deberse a ondas de Rossby intraestacionales. La presencia de ondas de Rossby a la frecuencia anual ya ha sido documentada en la boca del golfo (Godínez *et al.*, 2010). La línea roja trazada en el evento más claro que empieza en la costa continental a finales de marzo tiene una pendiente de 3.6 cm/s, consistente con la rapidez de fase de la onda de Rossby utilizada por Godínez *et al.* (2010) de 2.3 cm/s.

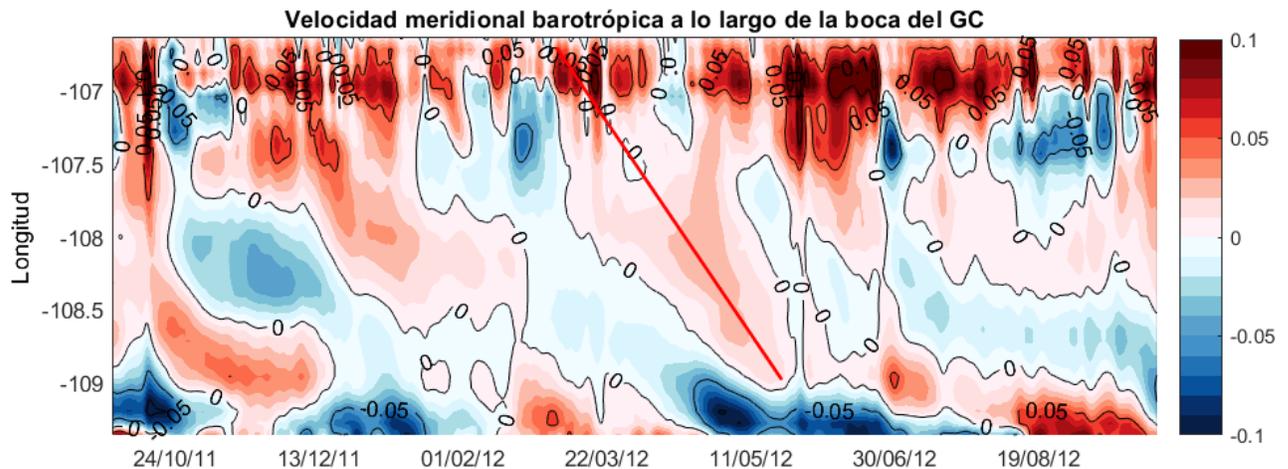


Figura 28. Diagrama Hovmöller de la velocidad meridional barotrópica a lo largo de la boca del golfo. La parte inferior del eje vertical corresponde al lado de la península (las velocidades fueron filtradas para eliminar las mareas).

En el transporte integrado verticalmente como función de la longitud y de la profundidad en la boca del golfo (Figura 29) se observan de manera más clara las 4 regiones de entrada y salida de agua en la boca

del golfo. Otra característica importante es el carácter barotrópico de las diversas regiones con excepción de la segunda del lado de la península. Utilizando el transporte integrado verticalmente de entrada (o salida, ya que es casi el mismo) total se puede realizar una estimación de la cota inferior del tiempo de residencia. El transporte total de entrada (suma de los valores positivos de la curva negra de la Figura 29) da 1.024 Sv. A partir de este valor se calculó una cota mínima del tiempo de residencia del agua en el Golfo de California de aproximadamente 4 años. Esto quiere decir que el golfo tarda por lo menos 4 años aproximadamente en renovar todo su volumen.

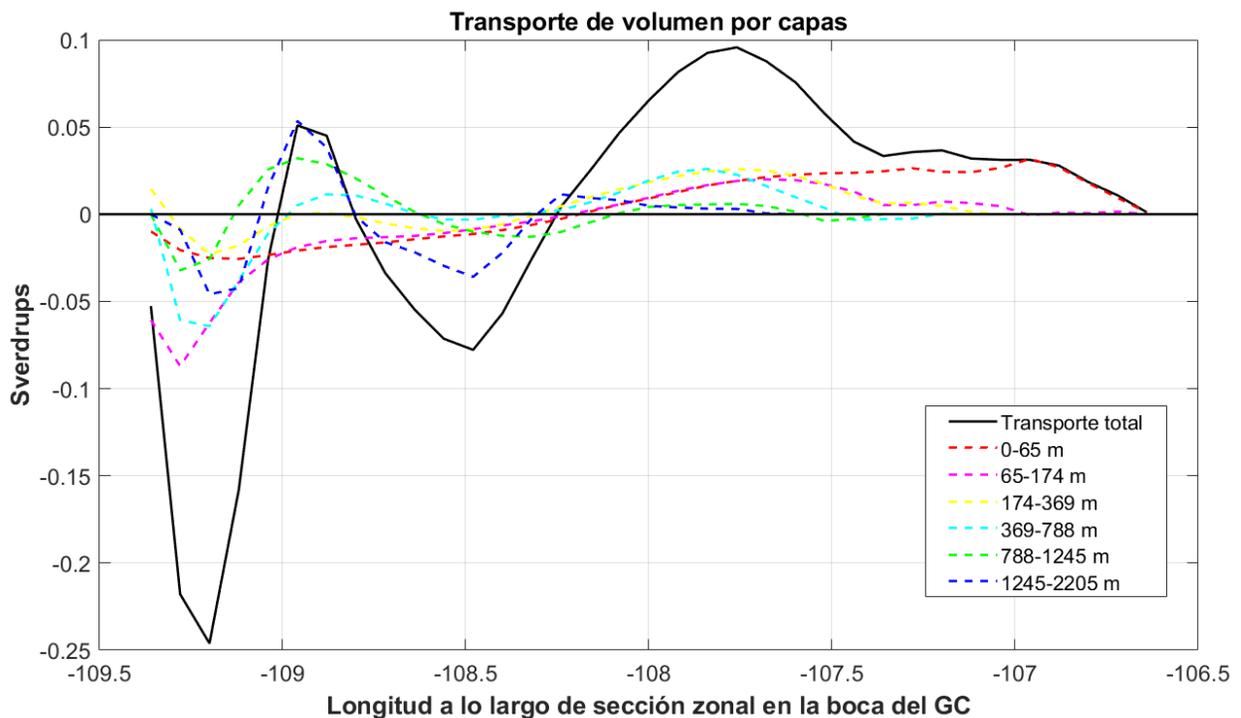


Figura 29. Promedio anual del transporte total de volumen integrado verticalmente en la boca del golfo y la contribución de cada capa en diferente color.

3.3.3 Transporte de calor

El transporte de calor en la boca del golfo (Figura 30) muestra dos patrones: por arriba de los 500 metros se observa que la sección se encuentra básicamente dividida en dos regiones: una del lado del continente donde el transporte de calor es positivo y la segunda del lado de la península donde el transporte de calor es negativo. Por debajo de los 500 metros se observan 4 regiones, entrando pegado a la península, y después, conforme nos movemos hacia el continente, encontramos tres regiones con transporte de calor saliendo, entrando y, finalmente, saliendo pegado al continente. Esta última región presenta valores más

pequeños que las otras tres. A partir de la sección promedio del transporte de calor se obtuvo el perfil vertical promedio (Figura 30b) y así se determinaron, en este caso, 5 capas de transporte de calor promedio (Ver Tabla 4).

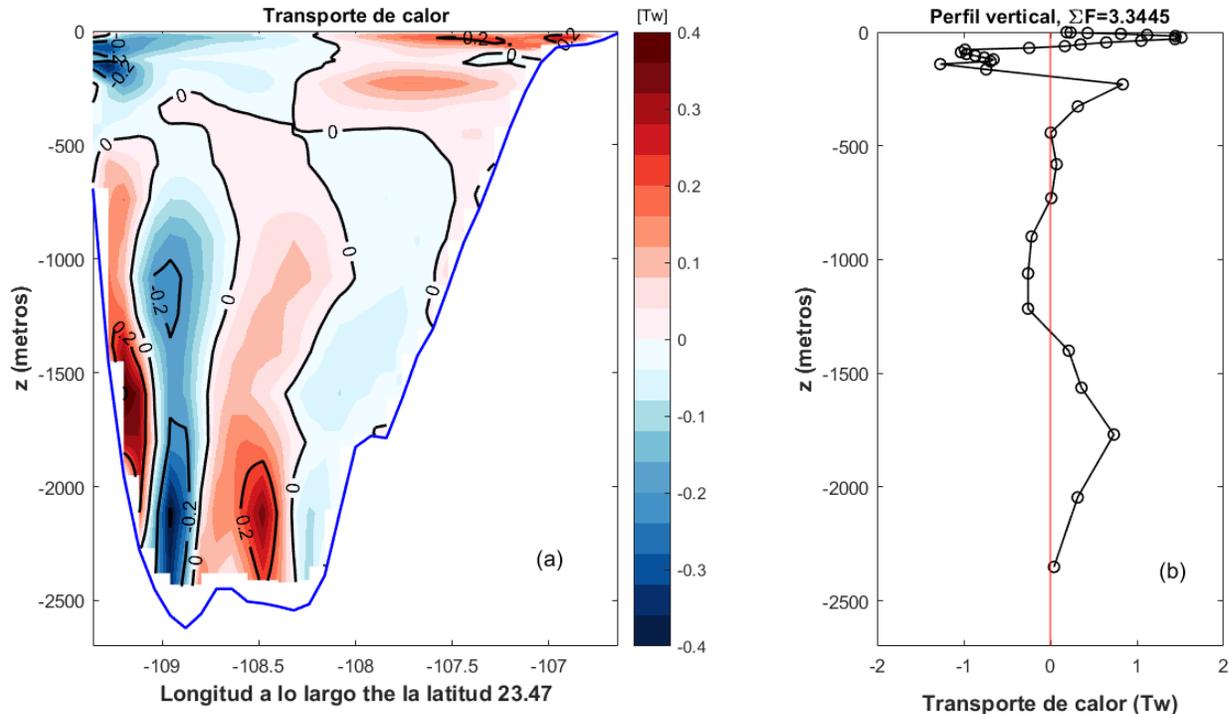


Figura 30. Promedio anual del transporte de calor en la boca del golfo en el lado izquierdo y el perfil vertical promedio de dicha sección en el lado derecho.

El mayor transporte ocurre a través de las primeras dos capas, con un intercambio que alcanza hasta los 9 TW. Por debajo de estas dos capas el mayor transporte de calor ocurre en la capa más profunda con un valor de 1.6 TW. Comparando con la Figura 25a, se observa que el transporte de calor tiene el mismo signo que el transporte de volumen en las tres primeras capas. Sin embargo, el transporte de volumen tiene signo contrario al transporte de calor en las 2 capas más profundas. Esto quiere decir que: en la quinta capa (788-1245 m) está entrando agua más fría que el promedio del agua en el golfo; y en la capa más profunda está saliendo agua más fría que el promedio.

El promedio anual del transporte neto de calor fue obtenido a partir de la suma vertical del perfil promedio. El resultado obtenido fue que, en el año de la simulación analizada, el golfo ganó 3.3 TW de calor a través de la boca. Autores como Beron-Vera y Ripa (2000) y Castro *et al.* (1994), mencionan que

anualmente en promedio el golfo gana calor por superficie y lo exporta por la boca. En esta simulación, el golfo pierde una cantidad muy pequeña de calor de 0.7 Tw por superficie (Zamudio, comunicación personal) y el resto calienta ligeramente al golfo. Los detalles se discutirán en el siguiente capítulo.

Tabla 4. Capas promedio del transporte de calor en la boca del golfo y sus rangos de profundidad. Valores positivos indican entrada de calor al golfo.

Capa	Profundidad (m)	Transporte de calor (TW)
1-12	0-65	9.39
13-22	65-174	-8.21
23-27	174-788	1.23
28-30	788-1245	-0.72
31-fondo	1245-2205	1.66

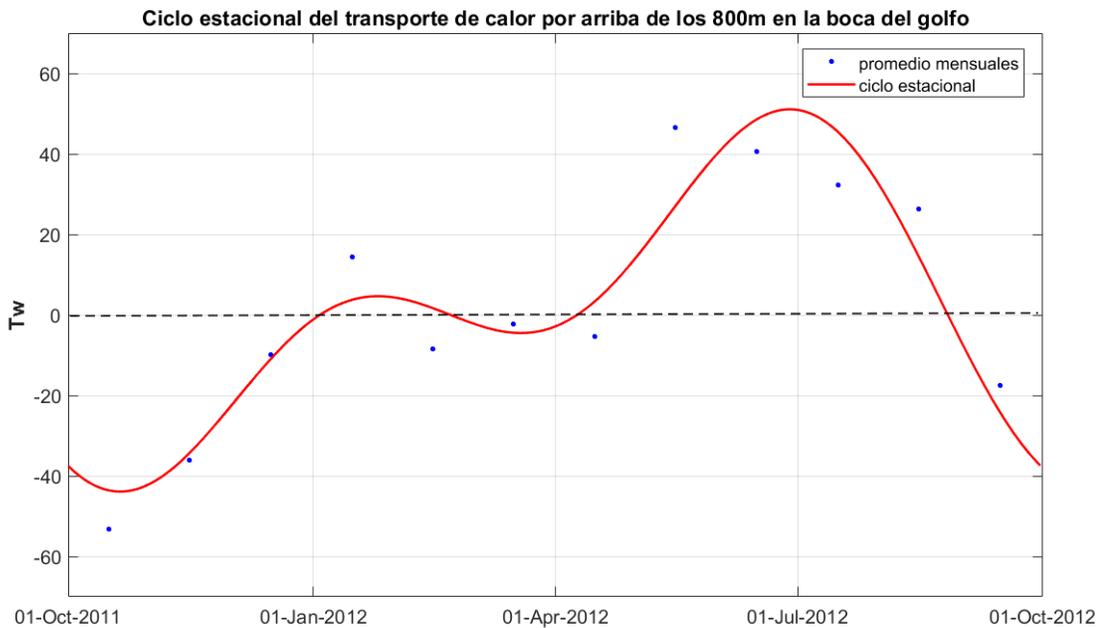


Figura 31. Ciclo estacional del transporte de calor por arriba de los 800 m en la boca del golfo. Los puntos azules representan los promedios mensuales.

Beron-Vera y Ripa (2000) obtuvieron el ciclo estacional del transporte de calor por arriba de los 800 metros en todo el golfo. Para poder comparar con ese trabajo, se decidió realizar ese mismo análisis hasta una profundidad cercana a los 800 metros. En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis armónico y en la Figura 31 el ciclo estacional reconstruido a partir de los dos armónicos calculados. Los resultados muestran una buena concordancia con lo expuesto en la literatura. La máxima entrada de calor se da a finales de junio y la máxima salida de calor a finales de octubre, lo cual está bastante de acuerdo con Berón-Vera y Ripa (2000) que encontraron la máxima entrada de calor aproximadamente a finales de mayo y la máxima salida a mediados de noviembre.

Tabla 5. Análisis armónico del transporte de calor por arriba de los 800 metros en la boca del golfo.

Señal	Beron-Vera <i>et al.</i> (2000)		Este trabajo		Varianza explicada
	Amplitud (TW)	Fase	Amplitud (TW)	Fase	
Promedio	-18.4	-	2.2		
Anual	34.8	28 mayo	31.3	15 noviembre	0.89
Semi-anual	7.3	7 agosto	23.1	27 marzo	

Capítulo 4. Discusión

Resumiendo lo observado en los resultados tenemos que la simulación examinada del Golfo de California presenta una circulación dominada por la presencia de remolinos de mesoescala. A su vez se observa la intensificación de una corriente costera superficial en la boca del golfo en los meses de primavera (Figura 11) que podría ser responsable del máximo en el promedio anual del transporte de volumen en las capas superficiales del lado del continente (Figura 25). El promedio anual de la estructura vertical del transporte de volumen presenta 6 capas de transporte que entran o salen del golfo. Los valores de las primeras tres capas sugieren que debe ocurrir subsidencia de la primera a la segunda capa, y surgencia de la tercera a la capa intermedia. En la boca del golfo se observaron una serie de eventos en la velocidad barotrópica del lado del continente que parecen sugerir la entrada de ondas atrapadas a la costa durante todo el año. También se observaron ciertos eventos de propagación hacia el oeste a partir de la costa continental que podrían deberse a ondas de Rossby. A continuación se discuten algunos de estos temas con cierto detalle.

Remolinos en el golfo

Los remolinos en el golfo han sido estudiados principalmente en el norte del golfo (ej. Lavín *et al.*, 1997) y se han simulado en los modelos de Beier (1997) y Marinone (2003). En la simulación analizada en este trabajo se encontró dicho remolino con una estacionalidad muy semejante a la expresada por la literatura, girando ciclónicamente de junio a septiembre y anticiclónicamente de octubre a diciembre (Figura 9). Los remolinos al sur de las islas se han descrito con base a imágenes satelitales a color e infrarrojo en Badan-Dangon *et al.* (1985) y Pegau *et al.* (2002) y a partir de datos hidrográficos en Figueroa *et al.* (2003) y Lavín *et al.* (2013); sin embargo la estacionalidad de estos remolinos no ha sido resuelta. Lavín *et al.* (2014) muestran a partir de boyas e imágenes de satélite, la formación de remolinos a partir de la intensificación de una corriente costera en mayo, la cual disminuye en intensidad para julio. En dicho trabajo se observó una circulación dominada por remolinos que giran en ambos sentidos, un comportamiento semejante al expresado por Tenreiro (2011).

Sobre la estacionalidad de los remolinos, Farach-Espinoza *et al.* (2021) mencionan que los ciclónicos tienen dos periodos de alta ocurrencia: uno de junio a septiembre y otro en enero; los periodos de baja ocurrencia ocurren de febrero-mayo y de octubre-diciembre. Por otro lado, los remolinos anticiclónicos se presentan a lo largo del año, excepto durante los meses de junio-julio. Su periodo de alta ocurrencia es entre octubre y abril. En este trabajo se analizan dos remolinos con cierto detalle: uno ciclónico y otro anticiclónico

centrado alrededor de 27.5°N y ubicado justo al norte del ciclónico. Estos remolinos parecen ser los más energéticos en toda la parte central y sur del golfo. En este trabajo se encontró que el remolino ciclónico está presente de noviembre a febrero y después también de junio a agosto. Mientras que el anticiclónico está presente de julio a diciembre y también, más débil, de febrero a abril. En general, parece haber cierta concordancia con los resultados de Farach-Espinoza *et al.* (2021) aunque en esta simulación el remolino ciclónico está presente buena parte del otoño e invierno y menos durante el verano. Mientras que el anticiclónico sí es muy intenso de julio a octubre. En julio y agosto los dos remolinos son bastante energéticos a pesar de ser contiguos. En otras épocas del año en que ambos están presentes uno de los dos parece ser dominante (ver Figura 10).

En la boca del golfo, la corriente costera entrando al golfo del lado del continente se presentó más intensa durante los meses de mayo y junio. Durante julio la corriente se bifurca, pero una rama sigue relativamente fuerte pegada a la costa (Figura 11). Durante agosto y septiembre se forma un remolino anticiclónico pegado a la península, y aunque sigue habiendo un flujo débil de entrada a lo largo del continente, no es claro cuánto penetra hacia adentro del golfo, por la presencia del remolino y la complejidad de la circulación durante esos meses. El resto del año la circulación es bastante compleja y variable con la aparición de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en la boca durante algunos meses.

Transporte de volumen

Bray (1988) estudió por primera vez el comportamiento vertical del transporte de volumen e identificó en la sección Guaymas-Santa Rosalía un flujo superficial (>50 m) que se invierte estacionalmente con los vientos, un flujo sub-superficial hacia la boca del golfo entre los 50 y 250 m y un flujo inverso hacia la cabeza entre los 250-500 m. Un comportamiento parecido se observa en el transporte de volumen en la boca del GC, con agua entrando por arriba de los 65 m (0.134 Sv), saliendo entre 65 y 174 m (0.212 Sv) y entrando entre 174 y 369 m (0.133 Sv, Figura 25). Los valores de transporte en las tres capas superficiales implican que dentro del golfo tiene que ocurrir subsidencia de la primera a la segunda capa, y surgencia de la tercera a la capa intermedia. En qué parte específica del golfo ocurren estos transportes verticales es algo que no se ha determinado. Sin embargo, la constante renovación de agua profunda en el canal de Ballenas a partir de agua a profundidades entre 200 y 400 m, implican que debe haber una surgencia intensa en dicho canal (López *et al.*, 2006; López *et al.*, 2008), y que bien puede estar contribuyendo a la surgencia de la tercera a la segunda capa que se infieren en el trabajo presente. La surgencia de la tercera a la segunda capa podría ser uno de los factores que determinen la riqueza biológica del golfo. Si bien esa surgencia no llega hasta la superficie, sí transporta aguas ricas en nutrientes a profundidades donde otros

procesos como surgencias debidas al viento o el transporte dentro de remolinos, los pongan más cerca de la superficie.

El ciclo estacional del transporte de volumen en la zona de las islas fue estudiado por Navarro *et al.* (2016), los cuales describieron un flujo de entrada profundo (200-400 m), con el flujo de salida cerca de la superficie; reportaron el máximo intercambio, con flujo de entrada, en octubre y el mínimo con flujo de salida en junio. A su vez, mencionan que estos flujos (superficial y subsuperficial) presentan un desfase de 180°. En este trabajo se muestra un desfase semejante entre una capa superficial (0-65 m) y una profunda (369-788 m); y además el ciclo estacional presentado es semejante al expresado por Navarro *et al.* (2016) en la región de las islas.

El transporte verticalmente integrado en la boca también reveló que el transporte de entrada se da esencialmente en la mitad de la sección del lado del continente (con una extensión de aproximadamente 170 km), mientras que el transporte de salida se da de manera más intensa (máximo de 0.25 Sv) en una región muy localizada pegada a la península y de apenas unos 40 km de extensión. Además, el transporte de salida pegado a la península se da principalmente en la segunda capa, mientras que el transporte de entrada en las capas 1 y 3 se da más bien en la mitad de la sección del lado del continente (ver Figura 29). Es también interesante notar que hay núcleos de transporte profundo significativos a 500, 1000, 1500 y 2000 m (ver Figura 25). No se puede decir hasta qué punto esos transportes sean recirculaciones (p. ej. remolinos) cerca de la boca. Sin embargo, en algunos casos los núcleos de entrada o salida no tienen una contraparte de signo contrario (p. ej. a 1000 y 1500 m) y por lo tanto sí podrían estar indicando la entrada (salida) de agua hasta (desde) regiones interiores del golfo.

Balance y transporte de calor

Bray (1988) es la primera en mencionar que el golfo, a diferencia de otras cuencas evaporativas como el mar Mediterráneo, gana calor anualmente por la superficie. Posteriormente, Castro *et al.* (1994) y Berón-Vera y Ripa (2000) confirmaron que el golfo gana calor por la superficie y que, por lo tanto, en el promedio anual, el golfo debe exportar ese calor por la boca. En la presente simulación, para un año específico, el golfo pierde 0.66 TW por la superficie (Zamudio, comunicación personal), que es una cantidad muy pequeña. Sin embargo, la presente simulación no contiene ningún tipo de asimilación de datos, ni relajación a una climatología de la temperatura. En el promedio anual de ese año, en la simulación numérica el golfo se calentó 0.16°C por entrada de calor a través boca. Y el calor se conserva, ya que el flujo de entrada de 3.4 TW menos el flujo de salida por la superficie es igual a la ganancia de calor a largo

de todo ese año (2.67 TW). Es importante notar que los artículos mencionados anteriormente fueron realizados a partir de una base de datos históricos de 33 campañas hidrográficas (realizadas en el golfo durante 1939-1985). Y para los datos atmosféricos se utilizaron promedios mensuales de estaciones meteorológicas a lo largo de la costa del golfo durante el periodo 1977-1986.

Capítulo 5. Conclusiones

El análisis de algunos aspectos de la corrida global HYCOM dentro del golfo de California ha revelado resultados nuevos e interesantes que tendrán que ser verificados por observaciones y respaldados por otros modelos. Uno de los aspectos más sobresalientes revelados por este trabajo es la riqueza de remolinos existentes en el golfo y su variabilidad a lo largo del año. Si bien los remolinos han sido estudiados en múltiples trabajos (ej. Pegau, 2002; Zamudio *et al.*, 2008; Tenreiro 2011, Lavín *et al.*, 2013), no existe ninguno que haya analizado la variabilidad temporal durante todo un año. Ciertamente resaltan el par de remolinos anticiclónico-ciclónico en el centro del golfo, que parecen ser los remolinos más energéticos y permanentes que se presentan en el modelo al sur de las grandes islas. El remolino anticiclónico en la zona de Santa Rosalía (27.5°N) es el más persistente, presentándose 8 meses del año. Ambos remolinos son muy energéticos de manera simultánea en julio y agosto. El resto del año parece que alguno de los dos domina y la presencia del otro es débil o inexistente. El remolino anticiclónico es más energético durante verano y otoño, mientras que el ciclónico lo es durante otoño e invierno. Si bien la velocidad de los remolinos es más alta en superficie, el transporte más intenso se da entre 250 (en el caso anticiclónico) y casi 500 m (en el caso ciclónico). Ambos remolinos parecen extenderse en casi la totalidad de la columna de agua pero el ciclónico presenta transportes más grandes cerca del fondo.

Las corrientes y transporte promedios en la boca del golfo confirman que existe un flujo de entrada del lado del continente y uno de salida del lado de la península, algo que se ha encontrado en otros trabajos para períodos más cortos. La corriente de entrada es más fuerte en verano, pero está confinada a las capas superficiales (menores a 200 m). En primavera y otoño el flujo de entrada se extiende por lo menos hasta los 700 m. En invierno el flujo de entrada es más débil y está confinado a un núcleo sobre la plataforma continental. El flujo de salida es más variable, pero es más intenso del lado de la península en primavera, cuando se extiende por lo menos hasta los 700 m, y en verano, cuando se presenta por arriba de los 200 m. En otoño el flujo de salida se da por el centro de la sección y durante invierno es débil, al igual que el flujo de entrada.

El análisis del transporte en la boca del golfo reveló que existen 6 capas con transportes alternantes de entrada y salida, siendo la primera capa (hasta 65 m) una capa donde está entrando agua al golfo. Las tres capas superficiales (hasta 369 m de profundidad) son las que mayor transporte tienen, siendo la segunda capa la principal. El transporte en las primeras tres capas implica que dentro del golfo tiene que haber subsidencia (surgencia) de la primera (tercera) capa a la segunda. La surgencia de la tercera a la segunda

capa podría tener implicaciones biológicas. La variación estacional del transporte reveló que el mayor intercambio estacional del golfo con el Pacífico se da en las primera y cuarta capas (369-788 m) a pesar de que la cuarta capa es la que menor transporte promedio tiene (más de un orden de magnitud menor que el de las 3 capas superiores). La variación estacional reveló que el mayor intercambio se da en otoño (octubre-noviembre) y verano (junio-agosto), con el mayor transporte de entrada (salida) en julio por la primera (cuarta) capa; y la mayor salida (entrada) en noviembre por la primera (cuarta) capa.

A diferencia de resultados basados en varios años de datos, el modelo no exportó calor durante el año, sino que importó una cantidad relativamente pequeña. Esto puede deberse a que el forzamiento superficial no captura bien la ganancia de calor en el golfo y/o a variaciones interanuales. Sin embargo, el modelo captura bastante bien el ciclo estacional del flujo de calor en la boca, que coincide razonablemente bien con el obtenido por Berón-Vera y Ripa (2000).

La simulación global del HYCOM analizada dentro del Golfo de California en este trabajo, ha arrojado algunos resultados muy interesantes donde por el momento no existen observaciones que nos permitan validarlos. Sin embargo, esperamos que en un futuro se analicen observaciones que permitan validar o refutar estos resultados. Otros modelos también pueden respaldar o contradecir estos resultados. La simulación ofrece posibilidades de análisis cuantitativos más profundos, en otras regiones del golfo a las abordadas en el presente trabajo, que se pueden realizar en el futuro.

Literatura citada

- Álvarez-Borrego S., Lara-Lara, J.R. (1991). The physical environment and primary productivity on the Gulf of California. En: Dauphin J. P., Simoneit B. (Eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 555–567, doi:10.1306/M47542C26.
- Álvarez-Borrego, S. (2007). Oceanografía de la región de las grandes islas. Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad. Línea base, 45-65.
- Álvarez-Borrego, S., Schwartzlose R. (1979). Masas de agua en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 6, 43-63, doi:10.7773/cm.v6i1.350.
- Argote, M. L., Hunter, J., Amador, A., Lavín, M.F. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 100(C8), 16103-16118, doi:10.1029/95JC01500.
- Badan-Dangon, A., Koblinsky, C. J., Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California, observations of surface thermal patterns, *Oceanologica Acta*. 8, 13 – 22.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of physical oceanography*. 27(5), 615-632.
- Beier E. (1999). Estudio de la marea y la circulación estacional en el Golfo de California mediante un modelo de dos capas heterogéneas. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 64 pp.
- Beron-Vera, F. J., Ripa, P. (2000). Three-dimensional aspects of the seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 105(C5), 11441-11457, doi:10.1029/2000JC900038.
- Bray, N. A. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 93(C5), 4993-5020, doi:10.1029/JC093iC05p04993.
- Buijsman, M. C., Arbic, B. K., Richman, J. G., Shriver, J. F., Wallcraft, A. J., Zamudio, L. (2017). Semidiurnal internal tide incoherence in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 122(7), 5286-5305, doi:10.1002/2016JC012590.
- Castro, R., Mascarenhas, A. S., Durazo, R., Collins, C. A. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*. 26(4), 561-583, doi:10.7773/cm.v26i4.621.
- Castro, R., Lavín, M. F., Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 99(C2), 3249-3261, doi:10.1029/93JC02861.
- Castro, R., Durazo, R., Mascarenhas, A., Collins, C. A., Trasviña, A. (2006). Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 53(1), 188-200, doi: 10.1016/j.dsr.2005.09.010.

- Collins, C. A., Garfield, N., Mascarenhas Jr, A. S., Spearman, M. G., Rago, T. A. (1997). Ocean currents across the entrance to the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 102(C9), 20927-20936, doi:10.1029/97JC01302.
- Costa de Almeida Tenreiro, M. J. (2011). Efectos topográficos en la formación, evolución y organización de estructuras coherentes en flujos turbulentos. El caso del Golfo de California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 118 pp.
- Farach-Espinoza, E. B., López-Martínez, J., García-Morales, R., Nevárez-Martínez, M. O., Lluch-Cota, D. B., Ortega-García, S. (2021). Temporal variability of oceanic mesoscale events in the Gulf of California. *Remote sensing*. 13(9), 1774, doi:10.3390/rs13091774.
- Figueroa, J. M., Marinone, S. G., Lavín, M. F. (2003). A description of geostrophic gyres in the southern Gulf of California. En *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics* Springer, Dordrecht. pp. 237-255, doi:10.1007/978-94-010-0074-1_14.
- Godínez, V. M., Beier, E., Lavín, M. F., Kurczyn, J. A. (2010). Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 115(C4), doi:10.1029/2009JC005705.
- Hernández-Alcántara, P., Salas-de León, D. A., Solís-Weiss, V., Monreal-Gómez, M. A. (2014). Bathymetric patterns of polychaete (Annelida) species richness in the continental shelf of the Gulf of California, Eastern Pacific. *Journal of sea research*. 91, 79-87, doi:10.1016/j.seares.2014.04.012.
- Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Godínez, V. M. (2013). Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 118(3), 1367-1381, doi:10.1002/jgrc.20132.
- Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Cabrera, C., Godínez, V. M., Amador-Buenrostro, A. (2014). Surface circulation in the Gulf of California in summer from surface drifters and satellite images (2004–2006). *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 119(7), 4278-4290, doi:10.1002/2013JC009345.
- Lavín, M. F., Fiedler, P. C., Amador, J. A., Ballance, L. T., Färber-Lorda, J., Mestas-Nuñez, A. M. (2006). A review of eastern tropical Pacific oceanography: Summary. *Progress in Oceanography*. 69(2-4), 391-398, doi:10.1016/j.pocean.2006.03.005.
- Lavín, M. F., Palacios-Hernández, E., Cabrera, C. (2003). Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofísica internacional*. 42(3), 363-375.
- Lavín, M. F., Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*, 173-204.
- Lavín, M. F., Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 93(C11), 14033-14038, doi:10.1029/JC093iC11p14033.
- Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L., Carrillo, L. (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*. 27(10), 2298-2305, doi:10.1175/1520-0485(1997)027<2298:LOOTCI>2.0.CO;2.

- Lavín, M.F., Gaxiola-Castro, G., Robles, J. M. (1995). Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 100, 8587-8605, doi:10.1029/95JC00138.
- López, M. (1997). A numerical simulation of water mass formation in the northern Gulf of California during winter. *Continental Shelf Research*. 17(13), 1581-1607, doi:10.1016/S0278-4343(97)00027-7.
- López, M., Candela, J., Argote, M. L. (2006). Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?. *Geophysical Research Letters*. 33(11), doi:10.1029/2006GL025908.
- López, M., Candela, J., García, J. (2008). Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 113(C8), doi:10.1029/2007JC004575.
- Marinone, S. G. (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 108(C10), doi:10.1029/2002JC001720.
- Mateos, E., Marinone, S. G., Lavín, M. F. (2006). Role of tides and mixing in the formation of an anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 53(1-2), 60-76, doi:10.1016/j.dsr2.2005.07.010.
- Mascarenhas Jr., A. S., Castro, R., Collins, C. A., Durazo, R. (2004). Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research* 109 (7), doi:10.1029/2003JC002124.
- Navarro, R., López, M., Candela, J. (2016). Seasonal cycle of near-bottom transport and currents in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 121(12), 8621-8634, doi:10.1002/2016JC012063.
- Paden, C. A., Abbott, M. R., Winant, C. D. (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California: 1. Sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 96(C10), 18337-18359, doi:10.1029/91JC01597.
- Pantoja, D. A., Marinone, S. G., Parés-Sierra, A., Gómez-Valdivia, F. (2012). Modelación numérica de la hidrografía y circulación estacional y de mesoescala en el Pacífico central mexicano. *Ciencias Marinas*. 38(2), 363-379.
- Pegau, W. S., Boss, E., Martínez, A. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*. 29(9), 6-1, doi:10.1029/2001GL014076.
- Portela, E., Beier, E., Barton, E. D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Trasviña, A. (2016). Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. *Journal of Physical Oceanography*, 46(10), 3069-3081, doi:10.1175/JPO-D-16-0068.1.
- Ripa, P. (1990). Seasonal circulation in the Gulf of California. En *Annales geophysicae. Atmospheres, hydrospheres and space sciences* 8(7-8), pp. 559-563.
- Ripa, P. (1997). Toward a Physical Explanation of the Seasonal Dynamics and Thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of physical oceanography*. 27(5), 597-614, doi:10.1175/1520-0485(1997)027<0597:TAPEOT>2.0.CO;2.
- Roden, G.I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, XII, 21-45.

- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California, in *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*, edited by T.H. van Andel and G.G. Shor, Jr., *Mem. American Association of Petroleum Geologists*. 3, 30-58.
- Roden, G.I., Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic observations in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*. 18, 10-35.
- Soto-Mardones, L., Marinone, S. G., Pares-Sierra, A. (1999). Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 25(1), 1-30.
- Sverdrup, H.U. (1941). The Gulf of California: Preliminary discussion of the cruise of the E.W. Scripps in February and March of 1939. *Proceedings Pacific Science Congress*, 6, 161-166.
- Zamudio, L., Hogan, P., Metzger, E. J. (2008). Summer generation of the Southern Gulf of California eddy train. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 113(C6), doi:10.1029/2007JC004467.

Anexos

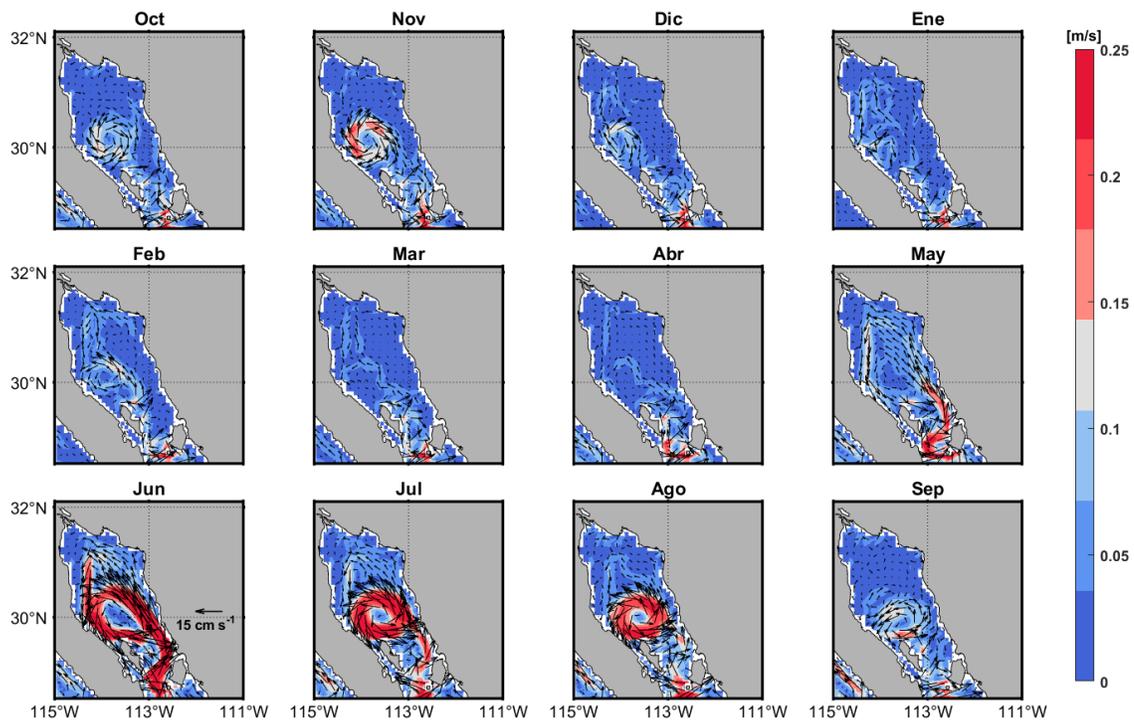


Figura 32. Promedios mensuales de los vectores de velocidad superficial y su magnitud en color para la región del golfo norte.

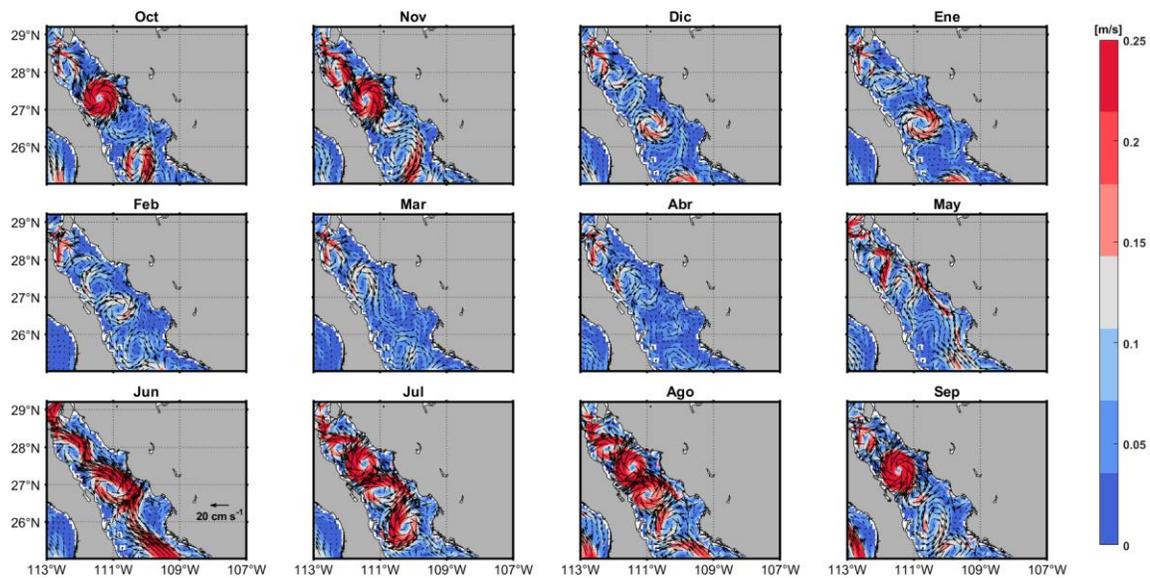


Figura 33. Promedios mensuales de los vectores de velocidad superficial y su magnitud en color para la región del golfo central.

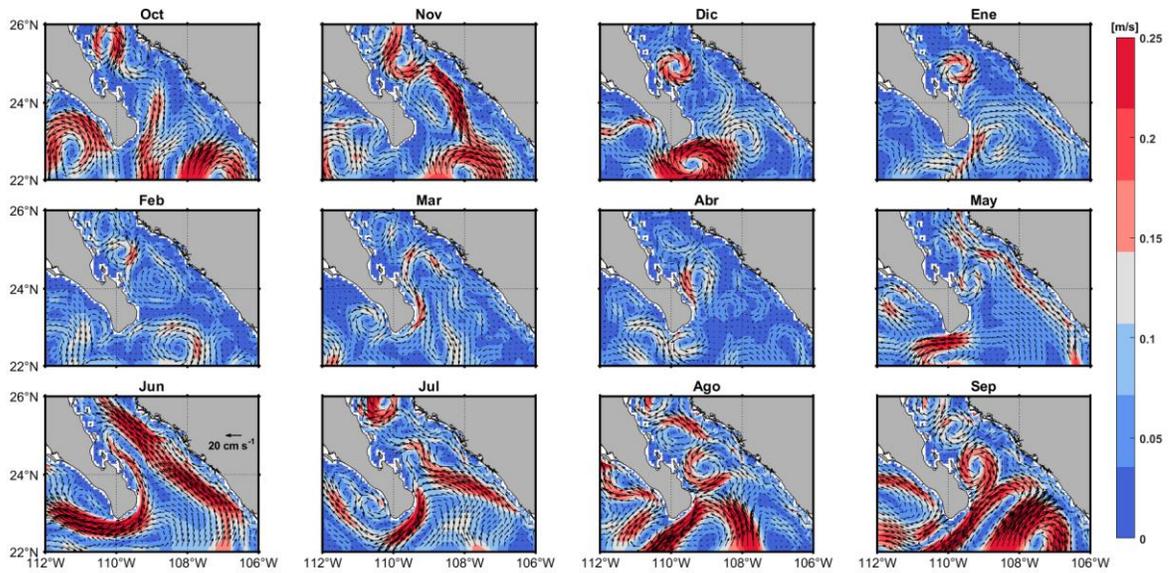


Figura 34. Promedios mensuales de los vectores de velocidad superficial y su magnitud en color para la región del golfo sur.

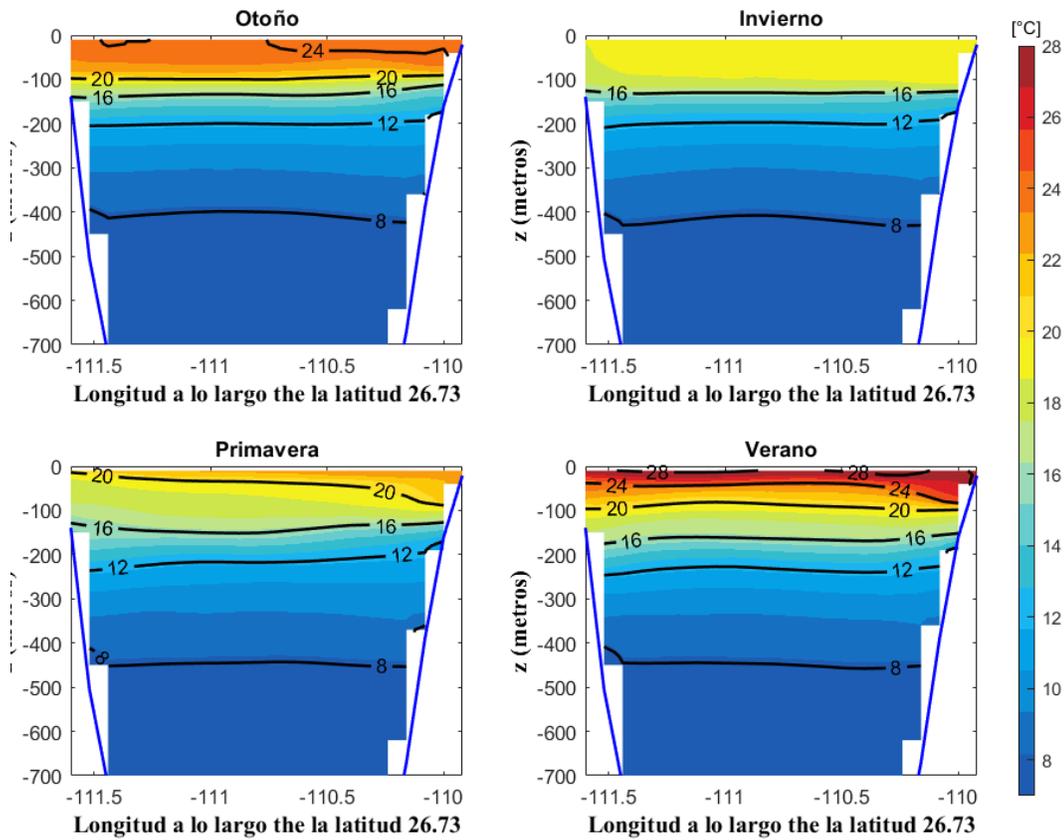


Figura 35. Promedios trimestrales de la temperatura en la sección latitudinal del remolino ciclónico.

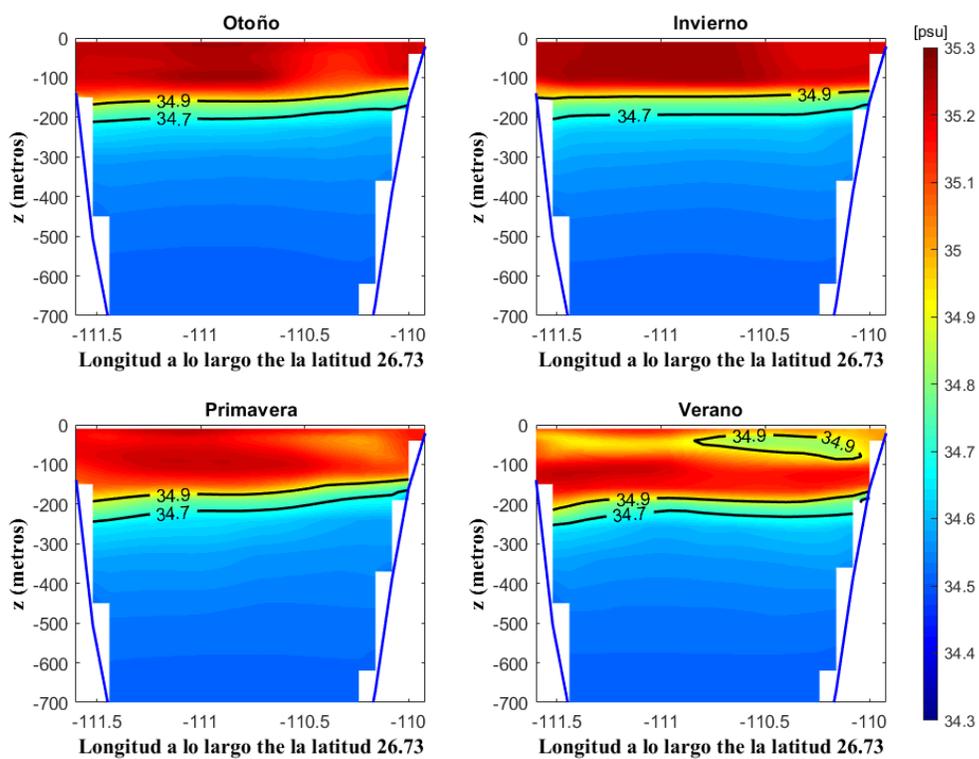


Figura 36. Promedios trimestrales de la salinidad en la sección latitudinal del remolino ciclónico.

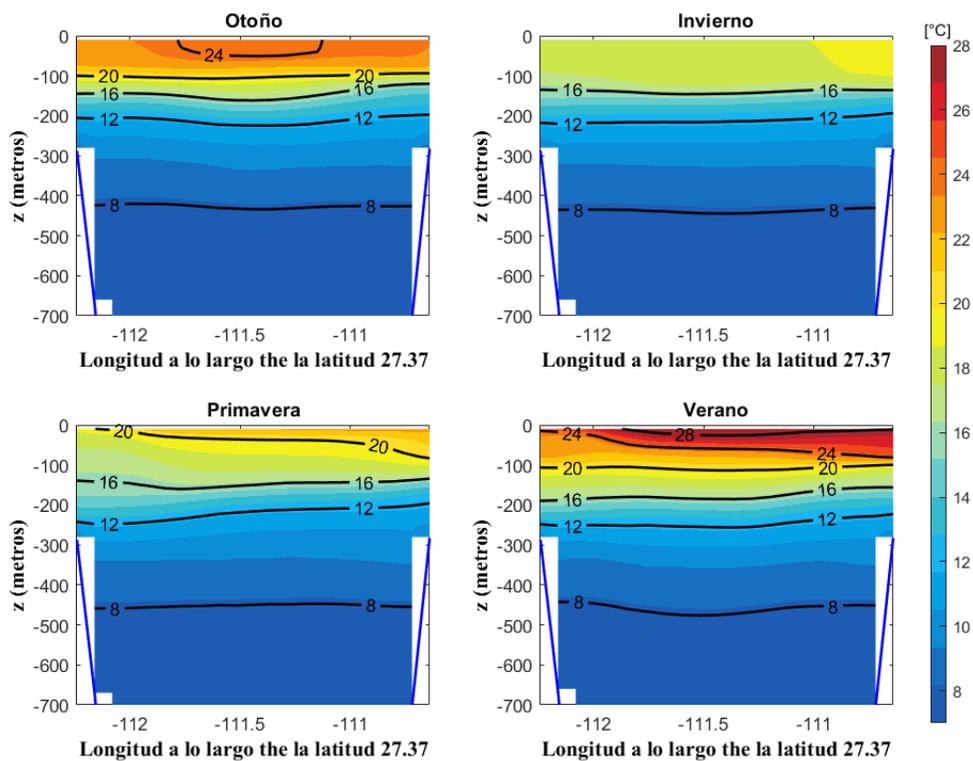


Figura 37. Promedios trimestrales de la temperatura en la sección latitudinal del remolino anticiclónico.

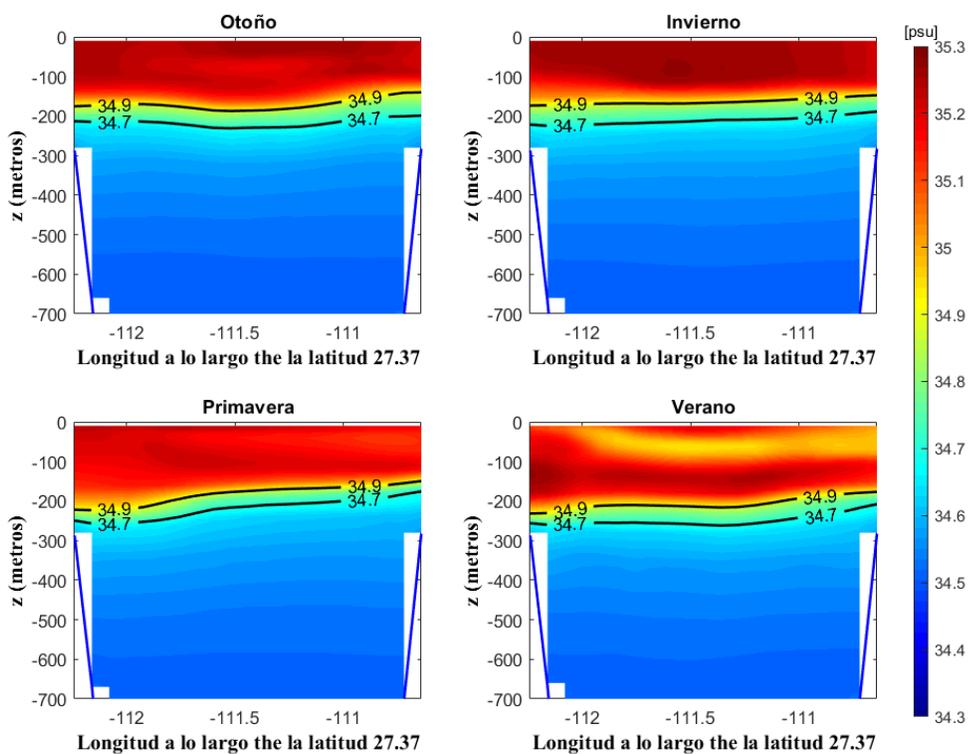


Figura 38. Promedios trimestrales de la salinidad en la sección latitudinal del remolino anticiclónico.

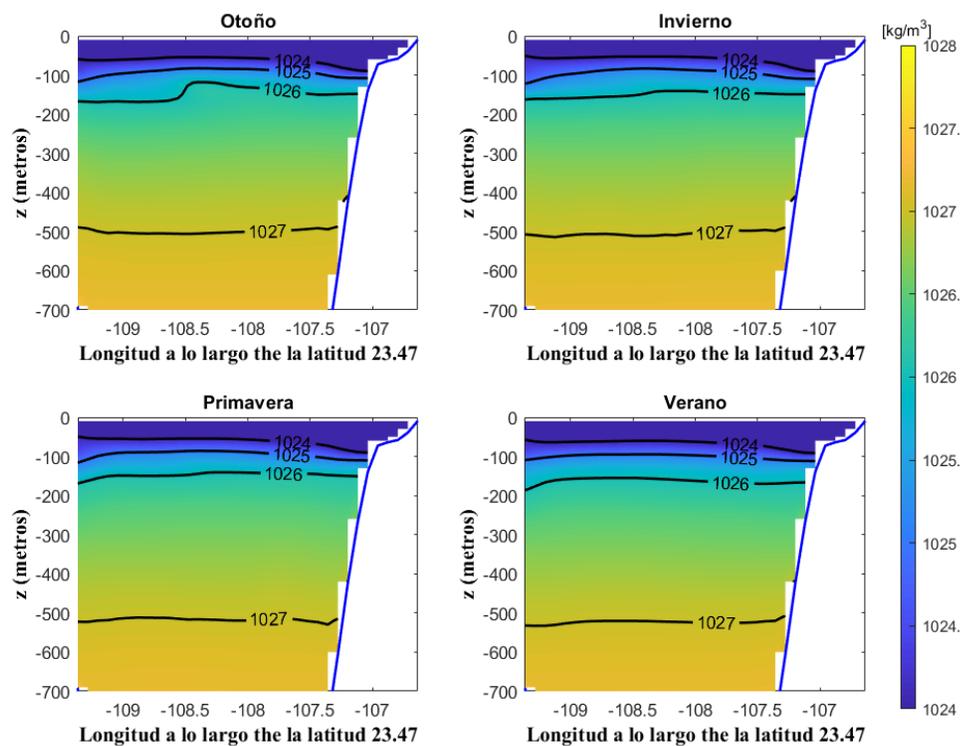


Figura 39. Promedios trimestrales de la densidad potencial en la sección de la boca del GC.