

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.

CICESE@ 2023. Todos los derechos reservados

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Oceanografía Física**

---

**Variabilidad termohalina en la capa de mezcla de la región  
CalCOFI**

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

Presenta:

**Yuritzzy Pérez Corona**

Ensenada, Baja California, México  
2023

Tesis defendida por  
**Yuritzzy Pérez Corona**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. José Gómez Valdés**  
Director de tesis

**Dr. Modesto Ortiz Figueroa**

**Dr. Enrique Gómez Treviño**

**Dr. Héctor Salvador Torres Gutiérrez**



---

**Dra. María Tereza Cavazos Pérez**  
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

---

**Dr. Pedro Negrete Regagnon**  
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Yuritzky Pérez Corona** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

### **Variabilidad termohalina en la capa de mezcla de la región CalCOFI**

Resumen aprobado por:

---

Dr. José Gómez Valdés  
**Director de tesis**

El siguiente trabajo estudia la variabilidad termohalina en la capa de mezcla de la región CalCOFI. Con base en estudios de la circulación termohalina del océano, la relación entre los frentes horizontales de temperatura potencial y de salinidad se ha analizado con la razón de densidad ( $R$ ). Usando buques oceanográficos es posible realizar estudios en modo plataforma móvil con una resolución alta ( $\sim 100$  m), que puedan ayudar a conocer mejor cuál es la relación entre las fluctuaciones de temperatura potencial y de salinidad en la capa de mezcla del océano a diversas escalas. Para el estudio de los gradientes de temperatura y salinidad se calculó  $R$  y el ángulo de Turner ( $Tu$ ) y se realizó transformada de ondeletas, la última brinda la oportunidad de conocer las variaciones en las diferentes escalas a estudiar. Tomando las partes reales de los coeficientes de ondeleta obtenidos se realizaron análisis estadísticos para cuantificar su frecuencia, se calcularon diagramas de dispersión y funciones de densidad de probabilidad que mostraron cuatro formas características, a las que denominamos frente compensado ( $R = 1, Tu = \frac{\pi}{4}$ ), frente opuesto ( $R = -1, Tu = -\frac{\pi}{4}$ ), frente térmico ( $R = \pm \infty, Tu = \pm \frac{\pi}{2}$ ) y frente salino ( $R = 0, Tu = 0$ ), respectivamente; de ellos, se encontró su frecuencia en el área de estudio, su ubicación, su estacionalidad y su relación con las masas de agua, con la profundidad de la capa de mezcla y con la estratificación. La escala dominante de todos los frentes fue 10 kilómetros, menor al radio de deformación de Rossby, aunque de igual manera se advirtieron en otras escalas con menor frecuencia. En este trabajo, se encontró que cada uno de estos frentes está ligado a una física diferente que valdría la pena comprobar en futuras investigaciones.

**Palabras clave:** Variabilidad termohalina, Capa de mezcla, Frentes, Corriente de California

Abstract of the thesis presented by **Yuritzky Pérez Corona** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

### **Thermohaline variability in the mixed layer of the CalCOFI region**

Abstract approved by:

---

Dr. José Gómez Valdés  
**Thesis Director**

The following work studies the thermohaline variability in the mixed layer of the CalCOFI region. Based on studies of the thermohaline circulation of the ocean, the relationship between the horizontal fronts of potential temperature and salinity has been analyzed with the density ratio ( $R$ ). Using oceanographic ships, it is possible to conduct studies in mobile platform mode with a high resolution ( $\sim 100$  m), which can help to better understand the relationship between potential temperature and salinity fluctuations in the mixed layer of the ocean at various scales. For the study of the temperature and salinity gradients,  $R$  and the Turner angle ( $Tu$ ) were calculated and the wavelet transform was performed, the latter providing the opportunity to know the variations in the different scales to be studied. Taking the real parts of the wavelet coefficients obtained, statistical analyzes were performed to quantify their frequency, scatter diagrams and probability density functions were calculated that showed four characteristic shapes, which we call compensated front ( $R = 1$ ,  $Tu = \pi/4$ ), opposite front ( $R = -1$ ,  $Tu = -\pi/4$ ), thermal front ( $R = \pm\infty$ ,  $Tu = \pm\pi/2$ ) and saline front ( $R = 0$ ,  $Tu = 0$ ), respectively; of them, their frequency in the study area, their location, their seasonality and their relationship with the water masses, with the depth of the mixed layer and with the stratification were found. The dominant scale of all the fronts was ten kilometers, less than the Rossby deformation radius, although they were also noticed at other scales with less frequency. In this work, it was found that each of these fronts is linked to a different physics that would be worth checking in future research.

**Keywords: Thermohaline variability, Mixed Layer, Fronts, California Current**

## **Dedicatoria**

A mi mamá, a mi hijo y a Misael por estar siempre para mí y apoyarme en cada paso de este logro.

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California por brindarme la oportunidad de desarrollarme en mi camino como investigadora y en especial al Departamento de Oceanografía Física por todas sus enseñanzas y su apoyo económico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. De CVU: 995804.

Al Dr. José Gómez Valdés por creer en mí y aceptarme como su estudiante. Gracias por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y su paciencia, por ser un guía ejemplar y dedicado. Le agradezco que siempre haya estado presente, su entusiasmo y la motivación que siempre me dio para continuar.

A mis sinodales, el Dr. Héctor S. Torres, el Dr. Modesto Ortiz y el Dr. Enrique Gómez, por su tiempo, sus retroalimentaciones en este proceso y su apoyo para realizar mi investigación. Cada una de sus aportaciones fue de mucha ayuda para lograr mi objetivo.

A mi mamá, por todo su apoyo. Gracias por formarme y enseñarme a disfrutar de la vida, por demostrarme que podemos llegar tan lejos como queramos y que las limitaciones solamente nos las ponemos nosotros mismos. Gracias por darme la oportunidad de seguir desarrollándome en lo que me gusta y apoyar mis decisiones.

A mi hijo, por sus sonrisas, por su paciencia mientras trabajaba, por acompañarme a cada momento sin dudarle y disfrutar conmigo de lo que más me gusta.

A Misael, por todo su cariño, su apoyo y sus enseñanzas. Gracias por acompañarme siempre.

A mis compañeros de generación, por las noches en vela trabajando y platicando.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas .....	xvii
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Marco teórico.....	3
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos .....	8
1.4.1 Objetivo general .....	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>9</b>
2.1 Región de estudio .....	9
2.2 Datos y materiales .....	12
2.3 Métodos.....	17
2.3.1 Caracterización de la variabilidad termohalina.....	17
2.3.1.1 Oceanografía descriptiva.....	17
2.3.1.2 Ondeletas de los gradientes de temperatura potencial y salinidad .....	19
2.3.1.3 Diagramas de dispersión de los coeficientes de ondeletas .....	21
2.3.1.4 PDF de los coeficientes de ondeletas.....	21

2.3.1.5	Eje principal de la elipse y mediana de los coeficientes .....	22
2.3.1.6	Análisis de las series de distancia.....	22
2.3.2	Condiciones oceanográficas en la parte superior del océano de la región CalCOFI en relación con los frentes .....	22
2.3.3	Explicación física propuesta .....	24
<b>Capítulo 3. Resultados .....</b>		<b>25</b>
3.1	Caracterización de la variabilidad termohalina en la capa de mezcla de la región CalCOFI de cada uno de los cruceros.....	25
3.1.1	Oceanografía descriptiva.....	25
3.1.2	Análisis de ondeletas.....	38
3.1.2.1	Frente compensado .....	45
3.1.2.2	Frente opuesto .....	49
3.1.2.3	Frente térmico.....	54
3.1.2.4	Frente salino.....	58
3.1.2.5	Zonas no identificadas.....	63
3.1.3	El Niño 2015-2016 .....	64
3.2	Condiciones oceánicas en la parte superior del océano de la región CalCOFI en relación con los frentes.....	72
3.2.1	Masas de agua.....	73
3.2.2	Profundidad de la capa de mezcla .....	74
3.2.3	Radio de deformación de Rossby .....	78
3.2.4	Estratificación.....	80
3.2.5	Sumario .....	84
3.3	Explicación física .....	85
3.3.1	Viento térmico.....	85

<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	<b>89</b>
4.1 Frentes .....	91
4.1.1 Frentes compensados .....	91
4.1.2 Frentes opuestos.....	93
4.1.3 Frentes térmicos.....	94
4.1.4 Frentes salinos.....	94
4.2 Frentes en relación con El Niño 2015-2016.....	95
4.3 Explicación física propuesta.....	96
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>97</b>
<b>Literatura citada .....</b>	<b>99</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Mapa del Sistema de Corrientes de California (Checkley y Barth, 2009). El círculo azul, rodea la zona de estudio encontrada entre la región central-sur del sistema. ....	9
2. Representación esquemática de la región Frontal de Ensenada y las aguas que contribuyen en él. La localización geográfica, orientación y tamaño del frente caría considerablemente (Venrick, 2000). ....	11
3. Región CalCOFI con estaciones y líneas hidrográficas. Se muestran las especificaciones en el recuadro dentro de la Figura. Los valores indican el número de estación (horizontales) y de línea (verticales) dándoles identidad. ....	12
4. Termosalinógrafo SBE 21 SEACAT. ....	13
5. SBE 911plus CTD utilizado en recolección de datos. ....	14
6. Cintillas del promedio de temperatura potencial estacional, para invierno y primavera en el norte de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. ....	27
7. Cintillas del promedio de salinidad estacional, para invierno y primavera en el norte de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. ....	27
8. Cintillas del promedio de densidad potencial estacional, para invierno y primavera en el norte de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. ....	28
9. Spiciness promedio para la parte norte de la región, estaciones de invierno y primavera. ....	28
10. Diagramas T-S para invierno y primavera del promedio de los cruceros, junto con su respectiva cintilla para la localización de las masas de agua en el mapa de la región. 1) Masa de agua Subártica (azul), 2) Masa de agua de Surgencias (verde), 3) Masa de agua Central del Pacífico Norte (magenta), 4) Agua mezclada o típica (negro). ....	29
11. Cintillas del promedio de temperatura potencial estacional, para invierno, primavera, verano y otoño en el sur de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. ....	30
12. Cintillas del promedio de salinidad estacional, para invierno, primavera, verano y otoño en la parte sur de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. ....	31
13. Cintillas del promedio de densidad potencial estacional, para invierno, primavera, verano y otoño en el sur de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. ....	32
14. Spiciness promedio para la parte sur de la región, estaciones de invierno, primavera, verano y otoño. ....	33
15. Diagramas T-S para invierno, primavera, verano y otoño del promedio de los cruceros, junto con su respectiva cintilla para la localización de las masas de agua en el mapa de la región. 1)	

- Masa de agua Subártica (azul), 2) Masa de agua de Surgencias (verde), 3) Masa de agua Central del Pacífico Norte (magenta), 4) Agua mezclada o típica (negro). ..... 34
16. Ángulo de Turner igual a  $\pi/4$  (naranja) para cada crucero de invierno a) 0401JD, b) 0602JD, c) 0901NH, d) 1001NH, e) 1101NH, f) 1202NH, g) 1402SH, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron..... 35
17. Ángulo de Turner igual a  $\pi/4$  (naranja) para cada crucero de primavera a) 0504NH, b) 0704NH, c) 0804JD, d) 0903JD, e) 1004MF, f) 1104SH, g) 1304SH, h) 1404OS, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron..... 36
18. Ángulo de Turner igual a  $\pi/4$  (naranja) para cada crucero de verano a) 0507NH, b) 0607NH, c) 0707NH, d) 0808NH, e) 1307NH, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron. .... 37
19. Ángulo de Turner igual a  $\pi/4$  (naranja) para cada crucero de otoño a) 0411RR, b) 0610RR, c) 0711NH, d) 0810NH, e) 0911NH, f) 1011NH, g) 1110NH, h) 1210NH, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron..... 38
20. PDF's característicos de a) Frente compensado: centrado en  $R = 1$ , en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del crucero de enero de 2004. b) Frente opuesto: centrado en  $R = -1$ , en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del crucero de enero de 2004. c) Frente térmico: a los lados en  $R = \pm\infty$ , en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del crucero de octubre de 2006. y d) Frente salino: centrado en cero, en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del crucero de noviembre de 2007. .... 40
21. Diagrama de pastel de los eventos, un total de 13863. La Figura muestra la suma acumulativa de todos los cruceros para cada uno de los frentes observados. El evento dominante es el térmico con 39 %, seguido del salino con el 35 %, el compensado tiene el 14 %, los no identificados el 10 % y los opuestos 1 %..... 41
22. Diagramas de pastel para los eventos de invierno, primavera, verano y otoño. La figura se tiene la suma acumulativa de los cruceros de cada estación del año para cada uno de los frentes observados Total de eventos en invierno: 2438; total de eventos en primavera: 4247.; total de eventos de verano: 2420; total de eventos en otoño: 4758..... 42
23. Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de enero de 2004, enero de 2009 y febrero de 2012. Frente compensado (azul), frente opuesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo)..... 43
24. Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de abril de 2007, abril de 2011 y abril de 2013. Frente compensado (azul), frente puesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo)..... 43
25. Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de julio de 2006, julio de 2007 y agosto de 2008 Frente compensado (azul), frente opuesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo)..... 44

26. Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de octubre de 2006, octubre de 2012 y octubre de 2013. Frente compensado (azul), frente opuesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo)..... 44
27. Recorrido del crucero CalCOFI de enero de 2004 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró compensación..... 45
28. Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km, la línea punteada indica la pendiente 1. Los puntos de la distribución se encuentran a lo largo de la línea punteada lo que indica la tendencia a la compensación para todas las escalas mostradas. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, a todas las escalas estudiadas la distribución de frecuencia se encuentra concentrada en  $R = 1$ ..... 46
29. Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $T_u$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). Tanto el eje principal, como la mediana de la razón de densidad se encuentran cercanas a 1 en todas las escalas estudiadas de 2 a 20 km. .... 47
30. Serie de distancia del crucero de enero de 2004 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró la compensación, dicha sección se amplifica en la Figura 31. .... 47
31. Recorte de zona donde se muestra compensación a diferentes distancias para el crucero de enero de 2004 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Cada fluctuación de temperatura potencial está reflejada por una fluctuación de salinidad de la misma amplitud que cancela su efecto en la densidad potencial, hasta las escalas más pequeñas ( $\sim 1$ km)..... 48
32. Recorrido del crucero CalCOFI de enero de 2004 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró el frente opuesto. .... 49
33. Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km, la línea punteada indica la pendiente -1. Los puntos de la distribución se encuentran a lo largo de la línea punteada lo que indica la tendencia a los frentes opuestos para todas las escalas mostradas. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, muestran distribuciones poco uniformes para las escalas de 5 km, 15 y 20 km, siendo la de 10 km en la que se muestra mayor frecuencia en  $R = -1$ . .... 51

34. Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $T_u$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). La mediana de la razón de densidad se muestra alrededor de  $R = -1$  a partir de 3 km y hasta 20 km, en escalas menores se aleja de  $R = -1$ . La pendiente de la elipse se muestra más cercana a  $R = -1$  en las escalas de 3 km y de 10 a 20 km. Entre 3 y 9 Km, se mantiene alejada de  $R = -1$ . ..... 52
35. Serie de distancia del crucero de enero de 2004 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró el frente opuesto, dicha sección se amplifica en la Figura 36. .... 52
36. Recorte de zona donde se muestra el frente opuesto a diferentes distancias para el crucero de enero de 2004 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Cada fluctuación de temperatura potencial está correlacionada negativamente con cada fluctuación de salinidad generando un frente opuesto hasta la escala más pequeña observada ( $\sim 1$ km)..... 53
37. Recorrido del crucero CalCOFI de octubre de 2006 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró el frente térmico. .... 54
38. Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km. Los puntos se localizan a lo largo de la vertical indicando frente compensado a todas las escalas observadas. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, a todas las escalas observadas se muestran los frentes térmicos, siendo en 10 km en la que se muestra mayor frecuencia en  $T_u = \pm\pi/2$ . .... 55
39. Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $T_u$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). Tanto el eje principal, como la mediana de la razón de densidad se encuentran cercanas a 0 en todas las escalas estudiadas de 2 a 20 km. .... 56
40. Serie de distancia del crucero de octubre de 2006 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró el frente térmico, dicha sección se amplifica en la Figura 41. .... 56

41. Recorte de zona donde se muestra el frente de temperatura a diferentes distancias para el crucero de octubre de 2006 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. La salinidad se mantiene casi constante o con variaciones despreciables, mientras que la temperatura potencial varía; se observa que la densidad potencial sigue a la temperatura potencial con una correlación negativa..... 57
42. Recorrido del crucero CalCOFI de noviembre de 2007 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró el frente salino. .... 58
43. Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km. En las escalas mostradas, los puntos siguen a la pendiente 0 en todas las escalas mostradas, principalmente en 5 y 10 kilómetros. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, en las escalas mostradas se observa que el histograma con mayor frecuencia cercana a 0 es el de 10 km. .... 60
44. Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $T_u$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). El eje principal se mantiene en 0 desde 3 hasta 8 km, donde se muestra mayor variación, la mediana se mantiene en  $-\pi/2$ , con solo un pico a  $\pi/2$  entre 7 y 8 km. .... 61
45. Serie de distancia del crucero de noviembre de 2007 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica hay contracción termohalina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró el frente salinidad, dicha sección se amplifica en la Figura 44. .... 61
46. Recorte de zona donde se muestra el frente salino a diferentes distancias para el crucero de noviembre de 2007 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. La variación de temperatura potencial es pequeña en comparación a la variación de la salinidad, por lo que la salinidad controla el gradiente de salinidad teniendo una correlación positiva. .... 62
47. PDF's características de las zonas no identificadas, los ejemplos que se muestran son de los cruceros de a) abril de 2005, b) enero de 2004, c) enero de 2004, d) julio de 2006..... 63
48. Cintillas de temperatura potencial para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. .... 64

49. Cintillas de salinidad para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. . 65
50. Cintillas de densidad potencial para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos..... 66
51. Spiciness para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos. .... 67
52. Diagramas T-S para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentra la masa de agua Ecuatorial producto de El Niño, en magenta se encuentra la masa de agua Central del Pacífico Norte, en verde la masa de agua de Surgencias y en azul la masa de agua Subártica. .... 68
53. Ángulo de Turner igual a  $\pi/4$  (naranja) para cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron. .... 69
54. Cintillas de ubicación de los frentes para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En azul se muestra el frente compensado, en rojo el frente opuesto, en magenta el frente térmico, en verde el frente salino y en amarillo el frente no identificado. .... 70
55. Gráficos de pastel de frecuencia de frentes para cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En azul se muestra el frente compensado, en rojo el frente opuesto, en magenta el frente térmico, en verde el frente salino y en amarillo el frente no identificado. .... 71
56. Diagramas de pastel de las masas de agua existentes para cada uno de los frentes encontrados. En total de frentes compensados es de 2092, el total de frentes opuestos es de 208, el total de frentes térmicos es de 5588, el total de frentes salinos es de 5061 y el total de no identificado es de 1475. .... 73
57. Profundidad de la capa de mezcla en invierno para los cruceros 0401JD, 0602JD y 1001NH. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores..... 75
58. Profundidad de la capa de mezcla en primavera para los cruceros 0704JD, 1004SH y 1104JD. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores..... 75
59. Profundidad de la capa de mezcla en verano para los cruceros 0507NH, 0707NH y 1307NH. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores..... 76
60. Profundidad de la capa de mezcla en otoño para los cruceros 0610RR, 1110NH y 1210NH. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores..... 76

61. Profundidad de la capa de mezcla y sus frentes para los cruceros de febrero de 2012, abril de 2013, julio de 2007 y octubre de 2006. Frente compensado (azul), frente opuesto(rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde); los colores rojos de PCM indican profundidades máximas estacionales y azules someras. En las figuras se muestra que la compensación en la capa de mezcla se encuentra condensada en las zonas donde la profundidad de la capa de mezcla es mayor en cada una de las estaciones del año; los frentes de temperatura potencial en profundidades someras; los frentes salinos zonas profundas; los frentes opuestos ni el evento no identificado fueron localizados en estas figuras..... 77
62. Radio de deformación de Rossby en invierno para los cruceros de enero de 2004, febrero de 2006 y febrero de 2012. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores. .... 79
63. Radio de deformación de Rossby para los cruceros de abril de 2007, marzo del 2009 y abril de 2011. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores. .... 79
64. Radio de deformación de Rossby para los cruceros de julio de 2006, julio de 2007 y agosto de 2011. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores. .... 80
65. Radio de deformación de Rossby para noviembre de 2004, noviembre de 2007 y noviembre de 2010. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores. .... 80
66. Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de enero de 2004, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 0401NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico(magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas. .... 81
67. Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de abril de 2011, , los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 1104NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico(magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas..... 82
68. Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de julio de 2007, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 0707NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico(magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas..... 83
69. Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de octubre de 2012, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 1210NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico(magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas..... 84
70. Flotabilidad y derivada de la flotabilidad en el crucero de enero de 2004, la zona sombreada en azul es donde se encuentra la compensación, la zona sombreada en rojo es donde se encuentra el frente opuesto. .... 86

71. Flotabilidad y derivada de la flotabilidad en el crucero de octubre de 2006, la zona sombreada en magenta es donde se encuentra el frente térmico..... 87
72. Flotabilidad y derivada de la flotabilidad en el crucero de noviembre de 2007, la zona sombreada en verde donde se encuentra el frente salino. .... 88
73. Estimaciones de transporte climatológico graficados con respecto a la latitud y los meses. (f) Índice de surgencias revisado (Costal Upwelling Transport Index) (Jacox et al., 2018). .... 94

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Masas de agua del SCC tomada de Lynn y Simpson (1984), tomando en cuenta los valores bajos (B) y altos (A) de temperatura potencial ( $\theta$ ), salinidad (S), oxígeno disuelto (O <sub>2</sub> ) y Nutrientes. ....	11
2. Especificaciones del termosalinógrafo SBE 21 SEACAT.....	14
3. Especificaciones del CTD SBE 911plus.....	15
4. Lista final de cruceros de CalCOFI utilizada en este trabajo. ....	15
5. Cruceros de la región CalCOFI por estaciones que fueron tomados en cuenta (x) para la investigación.....	16
6. Caracterización de la variabilidad estacional de la zona de estudio. Valores máximos, mínimos, media y desviación estándar de salinidad (S), temperatura potencial ( $\theta$ ) y densidad potencial ( $\sigma\theta$ ) de la zona de estudio. Los valores de densidad potencial están dados por $\sigma\theta-1000$ . ....	26
7. Compendio de frentes, escala dominante 10 km. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Antecedentes

La relación entre los gradientes horizontales de temperatura potencial y salinidad se ha estudiado utilizando la razón de densidad ( $R$ ) que es una medida del efecto relativo que tienen estas propiedades en la densidad potencial. Trabajos como el de Stommel (1993) sugieren que la relación temperatura potencial-salinidad está regulada por  $R = 2$  en escala grande y en el agua superficial de todos los océanos entre  $20^\circ$  y  $50^\circ$  de latitud. Por su parte, Chen (1995) usó la base de datos Levitus, la cual contiene datos de salinidad y temperatura potencial desde 1982 con resolución horizontal de  $1 \times 1$  grados de latitud y hasta 5500 metros de profundidad en la vertical, y encontró valores de  $R$  entre 1.7 y 2 en el océano. Jerónimo (2007), con datos obtenidos de CTD de varias campañas del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California), muestra que, al sur de la corriente de California,  $R$  presenta variabilidad estacional. Igualmente, Rudnick y Ferrari (1999), Ferrari y Rudnick (2000) señalan que  $R$  puede depender de la escala de correlación; hipótesis determinada gracias a las mediciones en el giro subtropical del Pacífico Norte con un SeaSoar equipado con sensores para conductividad, temperatura y presión. En esta misma investigación encontraron que  $R$  se aproxima a 1 en la capa de mezcla para diferentes escalas. Spiro y Mahadevan (2018) muestran que  $R = 0$ , la densidad varía por la salinidad mientras la temperatura potencial se mantiene cercana a uniforme, utilizando datos continuos medidos con termosalinógrafo a 5 m de profundidad resolviendo escalas mayores a 10 km en el Océano Índico Norte. Debido a que el SeaSoar y el termosalinógrafo montado en buque miden los datos de manera continua y no por estaciones como las investigaciones anteriores mencionadas, esos investigadores pudieron obtener mejores resoluciones horizontales (1 km) para la capa de mezcla. Luego de este breve repaso, podemos concluir que  $R$  no es homogénea, pues depende de las características termohalinas, de las escalas de movimiento y de la estacionalidad. Se sigue, entonces, que es necesario analizar  $R$  en cada región, si es posible, con mediciones continuas en el espacio. Esto, como se demuestra en la investigación de Rudnick y Ferrari (1999), permitirá mejor entendimiento del impacto de los gradientes de densidad potencial en la dinámica oceánica.

La capa de mezcla, materia de este estudio, se conoce como una capa cálida, poco densa, con una temperatura constante en función de la profundidad (Gill, 1982), misma que varía dependiendo de las estaciones del año, el viento y la dinámica interna. En esta zona, a lo largo de los océanos del mundo se

sabe que las variaciones de temperatura suelen gobernar los gradientes espaciales y las variaciones de densidad, mientras que la salinidad juega un rol secundario [Stommel, 1993; Chen, 1995; Spiro y Mahadevan, 2018].

La compensación se da cuando los gradientes de temperatura y salinidad tienden a ser paralelos y cancelarse en su efecto en la densidad (Ferrari y Rudnick, 2000), esto es cuando  $R = 1$ . La compensación T-S en la capa de mezcla se ha tratado de explicar de distintas maneras, una de las más interesantes por Ferrari y Rudnick (2000). Una primera de sus explicaciones lo atribuye a distribuciones climatológicas de precipitación, evaporación, intercambio de calor aire-mar que conspiran con el agua de la termoclina para crear patrones que se yuxtaponen con la razón de densidad. Una segunda, explica que los mecanismos de regulación en la capa de mezcla crean correlaciones entre la temperatura potencial y la salinidad producto del forzamiento atmosférico a gran escala (Ferrari y Rudnick, 2000). En invierno, explican, la capa de mezcla del giro subtropical del hemisferio norte del Océano Pacífico es una capa bien mezclada, de  $\sim 100$  m de profundidad. Dicha condición genera efectos de calor solar reducidos, a su vez causa de la subducción en la termoclina del agua encontrada en la capa de mezcla subtropical. Ambos efectos juegan un papel importante en la formación de masas de agua y contribuyen a los resultados del trabajo de Rudnick y Ferrari (1999) para que  $R = 1$ . Además, Spiro y Mahadevan (2018) señalan que la salinidad tiene un rol importante debido a que hay frentes donde la densidad está controlada por la salinidad y en estas regiones “el enfriamiento de la superficie conduce el debilitamiento selectivo de los frentes de densidad submesoescalares por compensación de la temperatura y salinidad y en forma de filamentos fríos en los límites de los frentes submesoescalares más estratificados” (Spiro y Mahadevan, 2018). Sin embargo, estas conclusiones no son de interés mayor para este trabajo tanto como el método utilizado por los investigadores, especialmente la resolución de los datos. Para este estudio es de importancia fundamental que los datos tengan resoluciones aproximadas a 1 km y la zona frente a California brinda la oportunidad de mostrar el comportamiento de las fluctuaciones de salinidad y temperatura potencial por medio de datos provenientes del programa CalCOFI muestreados a lo largo de sus líneas hidrográficas con termosalinógrafo y en sus estaciones hidrográficas por CTD. La buena resolución se logrará con el termosalinógrafo montado en buque, cuyas mediciones de temperatura y conductividad son continuas en la horizontal.

La región de estudio es la zona frente a las costas de California, región con gran impacto económico y gran productividad biológica. Se cuenta con doce años de datos de temperatura y salinidad superficiales (de enero de 2004 a diciembre de 2016) medidos por un termosalinógrafo montado en un buque; se cotejaron con datos de temperatura potencial y salinidad de CTD del programa CalCOFI. En este marco, plantea la

siguiente pregunta: *¿Cuál es la relación entre las fluctuaciones de temperatura potencial y de salinidad en la capa de mezcla a diferentes escalas en la región CalCOFI?*

## 1.2 Marco teórico

Las propiedades más importantes que se analizarán en este estudio son la salinidad, la temperatura potencial, la presión y la densidad potencial. La *salinidad* es la cantidad relativa de sales disueltas que hay en el agua de mar. En nuestra área de estudio las unidades de concentración varían entre 32 y 34 PSU (unidades prácticas de salinidad, PSU por sus siglas en inglés), dependiendo de la ubicación y la estación del año. La *temperatura* es la cantidad que indica qué tan caliente o frío se encuentra algo en relación con un estándar y es proporcional al promedio de la energía cinética asociada al movimiento de los átomos y moléculas en una sustancia. Se mide generalmente en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), la *temperatura potencial* ( $\theta$ ) es la temperatura de una parcela de agua transportada adiabáticamente a la superficie (Gil, 1987). En nuestra zona de estudio la temperatura potencial encuentra valores de entre  $9.6$  y  $24.5^{\circ}\text{C}$ , que varían con la ubicación y las estaciones del año. La *presión* es la fuerza por unidad de área en dirección perpendicular al área y varía de manera lineal en el océano aumentando hacia la profundidad. Sus unidades son los bares. La *densidad* es una propiedad fundamental de la materia y es una medida de compactación de un material, es decir, cuánta masa está en un determinado espacio, la *densidad potencial*, se describe de manera similar a la temperatura potencial. Es medida en kilogramos metro cúbico. Numerosos procesos se encuentran determinados por la densidad potencial y las diferencias de densidad potencial que hay en el agua del océano. Los frentes oceánicos son franjas que separan aguas de diferentes características y se pueden identificar al buscar gradientes de las propiedades termohalinas (Mauzole et al., 2020).

Para comprender los procesos que gobiernan al océano como un fluido, es necesario revisar la ecuación de estado, definida por la UNESCO en 1981. Esta expresa a la densidad potencial  $\sigma_{\theta}$  (en kilogramos metro cúbico) en función de la presión  $p$  (en bares), temperatura potencial  $\theta$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ) y la salinidad  $S$  (en PSU). Detalles de la ecuación de estado, así como los valores típicos de coeficientes, pueden ser encontrados en Gill (1982-Apendix 3). En general, la variación de la densidad potencial se refleja por cambios en la temperatura potencial, en la salinidad y en la presión. Para deducir la relación entre la tasa de variación de la densidad potencial y los gradientes de salinidad y temperatura potencial, se considera en este trabajo una ecuación simplificada de la ecuación de estado; dado que las mediciones de las propiedades termodinámicas se realizan aproximadamente a una sola profundidad, se acepta la densidad potencial del océano como independiente de la presión (tomando en cuenta incompresibilidad) y una relación lineal

entre las propiedades. Si consideramos la presión constante, cuando cambia la salinidad hay un cambio de masa en un volumen determinado de agua y al cambiar la temperatura potencial, hay un cambio de volumen. De acuerdo con Cushman-Roisin (2009), se simboliza:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta_0} [1 - \alpha(\theta - \theta_0) + \beta(S - S_0)], \quad (1)$$

donde  $\theta$  es la temperatura potencial,  $S$  es la salinidad, las constantes  $\sigma_{\theta_0}, \theta_0, S_0$  son valores característicos de densidad potencial, temperatura potencial y salinidad del agua del océano,  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica y  $\beta$  es el coeficiente de contracción salina, que pueden ser escritos en términos de la temperatura y densidad potenciales ( $\sigma_{\theta}$ ) como:

$$\alpha = -\frac{1}{\sigma_{\theta}} \left( \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} \right)_{p,S}, \beta = \frac{1}{\sigma_{\theta}} \left( \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial S} \right)_{p,\theta}, \quad (2)$$

donde sus unidades son  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  y  $(\text{PSU})^{-1}$ , respectivamente, y representan los cambios en la densidad potencial en función de la temperatura potencial y de la salinidad. Los subíndices indican que las derivadas parciales son tomadas a presión, temperatura potencial o salinidad constantes.

Al desarrollar la ecuación (1) obtenemos

$$\frac{\Delta \sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta_0}} = -\alpha \Delta \theta + \beta \Delta S. \quad (3)$$

De (1.3) podemos deducir que la tasa de variación de la densidad potencial depende de la variación de la temperatura potencial y de la variación de la salinidad de manera adimensional. En este contexto, una medida del efecto relativo de la temperatura potencial y salinidad es la *razón de densidad*, denotada por la razón de los componentes de la suma algebraica de la ecuación (3).

$$R \equiv \frac{\alpha \Delta \theta}{\beta \Delta S}, \quad (4)$$

donde las diferencias de temperatura potencial y salinidad  $\Delta\theta$  y  $\Delta S$  son tomadas a lo largo de un intervalo espacial. Por simplicidad matemática, se acostumbra derivar de aquí el arco tangente de  $R$ , conocido como ángulo de Turner, definido como:

$$Tu = \arctan(R). \quad (5)$$

De las ecuaciones (4) y (5) se colige lo siguiente: si la razón de densidad  $R > 1$  indica que el gradiente de temperatura potencial tiene un efecto dominante en el gradiente de densidad potencial, por su parte,  $R < 1$  significa que el gradiente de salinidad es el que tiene el efecto dominante (Kolodziejczyk et al., 2015).

Por otra parte, como se sabe el océano es sumamente variable, y algunas de estas variaciones vienen relacionadas a la submesoescala definida en escalas horizontales de diez metros a 10 km, verticales de diez a cientos de metros y evolucionan en horas o días, cuya mayoría de energía proviene de los remolinos de mesoescala por la cascada de energía (McWilliams, 2019). La submesoescala evoluciona principalmente por la advección, lo que la diferencia de las ondas internas de gravedad que ocupan escalas similares en el océano (McWilliams, 2019). Los principales mecanismos de generación de submesoescala son 1) la extracción de energía potencial disponible (de gradientes horizontales de flotabilidad) en la capa superficial débilmente estratificada, ya sea a través de inestabilidad baroclínica o frontogénesis, y 2) generación de vorticidad por arrastre topográfico en los flujos a lo largo de un fondo inclinado, seguida de la separación del corriente límite y la inestabilidad de la estela (McWilliams, 2019). En este trabajo, solo se considera el primer mecanismo de generación debido a la ubicación de nuestros frentes, en la capa de mezcla.

El Sistema de Corrientes de California (SCC) tiene remolinos de mesoescala, frentes, filamentos, inestabilidades y vórtices asociados a la submesoescala (Mauzole et al., 2020). Un filamento es similar, excepto que es un extremo horizontal estrecho en densidad potencial que nace cerca de la costa y se desplaza mar adentro presentando temperatura potencial más frías que su entorno, existen filamentos densos y ligeros, sin embargo, los densos tienen una circulación ageostrófica más fuerte y frontogénesis más rápida, por ello son más comunes en el océano (McWilliams, 2019). En este trabajo se asoció el parámetro  $R$  a los frentes observados en la investigación, por lo cual se tienen los siguientes valores característicos de  $R$  y  $Tu$  utilizados en esta investigación:

- Evento 1:  $R = 1$ ,  $Tu = \frac{\pi}{4}$ . Denominado frente compensado. Los gradientes de temperatura potencial y salinidad son iguales, es decir,  $\alpha\Delta\theta = \beta\Delta S$ . Para este caso, la pendiente de la recta que se obtiene a partir del arco tangente es aproximadamente 1, lo que significa que es una pendiente positiva viajando de izquierda a derecha en el eje x.
- Evento 2:  $R = -1$ ,  $Tu = -\frac{\pi}{4}$ . Denominado frente opuesto. Los gradientes de temperatura potencial y salinidad son opuestos, es decir,  $\alpha\Delta\theta = -\beta\Delta S$ . Para este caso, la pendiente de la recta que se obtiene a partir del arco tangente es aproximadamente -1, lo que significa que es una pendiente negativa viajando de izquierda a derecha en el eje x.
- Evento 3:  $R = \pm\infty$ ,  $Tu = \pm\frac{\pi}{2}$ . Denominado frente térmico. Ocurre cuando domina el gradiente de temperatura potencial y las variaciones de salinidad son muy pequeñas, es decir,  $\beta\Delta S \approx 0$ . Para este caso, la pendiente de la recta que se obtiene a partir del arco tangente es infinita, lo que significa que es paralela al eje y.
- Evento 4:  $R = 0$ ,  $Tu = 0$ . Denominado frente salino. Ocurre cuando domina el gradiente de salinidad y las variaciones de temperatura potencial son muy pequeñas, es decir,  $\alpha\Delta\theta \approx 0$ . Para este caso, la pendiente de la recta que se obtiene a partir del arco tangente es cero, lo que significa que es paralela al eje x.

### 1.3 Justificación

Las diferencias de densidad potencial producidas por la temperatura potencial y la salinidad generan procesos de mezcla y agitación al crear flotabilidad, jugando un papel muy importante en la dinámica de la superficie del océano (Young, 1994). Además, inducen gradientes que generan la circulación termohalina (Gill, 1982). Los frentes y las variaciones laterales de la densidad aumentan las inestabilidades baroclínicas y los remolinos que convierten energía potencial en energía cinética en el océano, resultando en la conversión de gradientes horizontales de densidad en estratificación (Spiro y Mahadevan, 2018). El estudio de los procesos termodinámicos en la capa superior ha sido vital para comprender su dinámica, por lo que varios investigadores como Stommel (1993), Chen (1995), Rudnick y Ferrari (1999) y Jerónimo (2007) han tratado de explicar las variaciones de los gradientes de temperatura potencial y salinidad en diferentes regiones mediante  $R$ . En la actualidad, es importante conocer el papel de los gradientes

horizontales de densidad potencial en los procesos de frentes puesto que, cuando están compensados, las velocidades verticales son débiles y resultan en reducidos flujos verticales de calor, haciendo que se disminuya el transporte de nutrientes a la superficie del océano (Mauzole *et al.*, 2020). En general, los gradientes de temperatura potencial superficial del océano son muestras de gradientes superficiales de densidad potencial, y consecuentemente muestran frentes de temperatura potencial, salinidad y de densidad potencial en los lugares donde son observados, esto solo ocurre cuando los frentes no están compensados. En algunas regiones, donde la entrada de agua dulce al océano es grande, la salinidad puede dominar a la densidad potencial, lo cual genera frentes sin cambios en la temperatura potencial superficial [Spiro y Mahadevan, 2018; Mauzole *et al.*, 2020]. Las consecuencias más evidentes de los frentes las vemos en las costas de California, región costera de principal importancia económica para los Estados Unidos de América que representa el 20 % de la pesca global en la temporada de surgencias, esto en relación lo que sugieren Siegelman *et al.* (2019), además de que investigaciones previas como las mencionadas en el artículo de Belkin (2021) confirman que en los frentes y cerca de ellos hay elevada biomasa y biodiversidad. Lo anterior abona la conveniencia de conocer la dinámica de surgencias costeras y la variabilidad termohalina en la región.

El fin de este estudio es averiguar la relación entre los gradientes de temperatura potencial y salinidad en la capa de mezcla por medio del análisis de la razón de densidad y la variabilidad termohalina en la región CalCOFI, además de darle una explicación física con los hallazgos recientes de Gómez-Valdés *et al.* (2023) sobre un experimento con un Saildrone en el SCC. Los resultados se difundirán por medio de artículos que esperan beneficiar a futuros investigadores que estudien esta región u otras con variabilidad termohalina de interés.

Los océanos son, en suma, fundamentales para la vida del planeta Tierra. Entre sus más significativos aportes podemos destacar la generación de oxígeno, la provisión de alimento o la regulación del clima. Sin embargo, en los últimos años se han visto afectados por la acción humana mostrando cambios en sus aguas que han generado alteraciones en los ecosistemas marinos al crear anomalías en la temperatura potencial y la salinidad. Por ejemplo, las consecuencias negativas de la acidificación y la elevación del nivel del mar asociados al calentamiento global y la contaminación afectan particularmente a los ecosistemas de la capa de mezcla (Ren y Rudnick, 2021). La relación entre temperatura potencial y salinidad tiene gran importancia en esta capa por su influjo en las concentraciones de biomasa en la superficie, donde hay suficiente luz solar para la fotosíntesis. Es por ello por lo que la investigación y el conocimiento de los procesos oceánicos es imperativo; es momento de hacer conciencia de su cuidado y su protección. El presente trabajo, con todas las líneas de estudio previas, espera aportar ideas para la solución del

problema de la circulación termohalina y, asimismo, contribuirá a las reflexiones sobre la relevancia del cuidado ambiental y de ecosistemas.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar la variabilidad espaciotemporal de la relación entre las fluctuaciones de temperatura potencial y salinidad en la capa de mezcla de la región CalCOFI.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

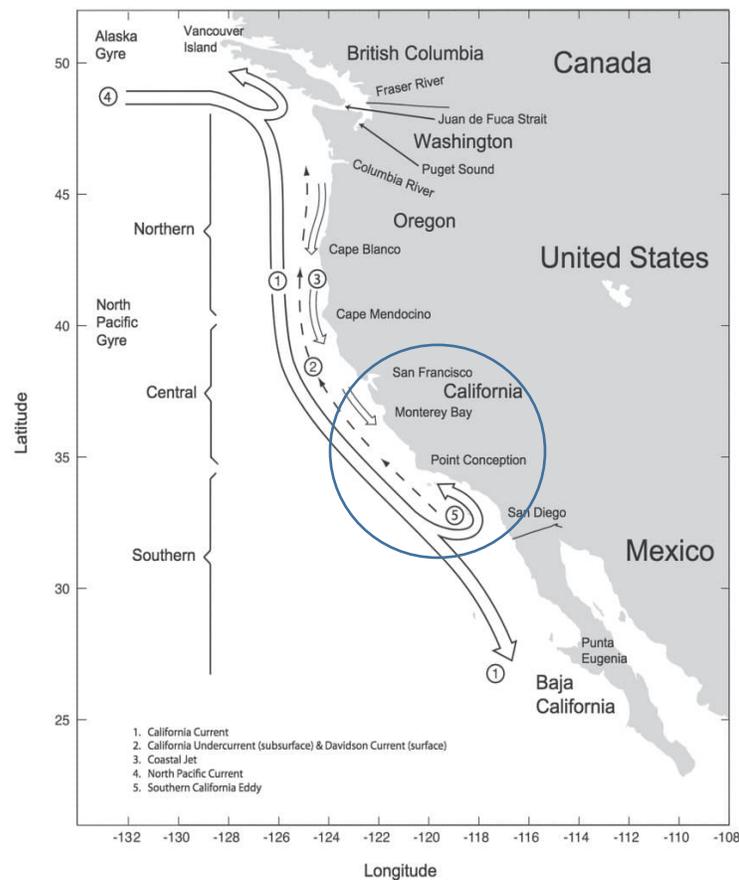
Caracterizar la variabilidad termohalina en la parte superior del océano de la región CalCOFI de cada uno de los cruceros.

1. Proporcionar elementos para la explicación de las causas físicas de la variabilidad termohalina en la parte superior del océano de la región CalCOFI.

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Región de estudio

El estudio se realizó en el SCC. Este sistema consiste en un flujo hacia el Ecuador (corriente de California) que es una de las cuatro mayores corrientes limítrofes orientales, donde se observan surgencias costeras intensas a lo largo de la costa; una corriente de superficie intensificada cerca de la costa, asociada a surgencias costeras; un flujo costero superficial hacia el polo (la corriente de Davidson); la contracorriente subsuperficial de California y el giro del sur de California. La geografía de la zona de estudio se muestra en la Figura 2. Específicamente la zona de estudio es el área frente al estado de California, Estados Unidos de América, ubicada en las costas entre San Francisco y San Diego, entre la zona central y sur del SCC.



**Figura 1:** Mapa del Sistema de Corrientes de California (Checkley y Barth, 2009). El círculo azul, rodea la zona de estudio encontrada entre la región central-sur del sistema.

Algunas teorías y fenómenos importantes para considerar en la región son: las surgencias costeras que se explican físicamente con el transporte de Ekman, donde los vientos hacia el ecuador paralelos a la costa en combinación con la rotación de la Tierra producen transportes de masa en la superficie del océano que alejan el agua de la costa conduciéndola océano adentro, al generar divergencia, se produce afloramiento de aguas de abajo. El agua desplazada es remplazada por agua rica en nutrientes que estimula el crecimiento de fitoplancton microscópico que forma base de la red alimentaria marina (Jacox et al., 2018). Además, la circulación de la corriente de California también es explicada por la teoría del transporte de Sverdrup (Sverdrup, 1947), que relaciona al rotacional negativo del viento y las corrientes oceánicas hacia el ecuador. En el Pacífico encontramos al fenómeno El Niño que de acuerdo con Philander (1998) ocurre cuando aparecen aguas cálidas superficiales sobre el Pacífico ecuatorial oeste, debido a la relajación de los vientos alisios. En nuestros datos se observa el fenómeno El Niño 2015-2016.

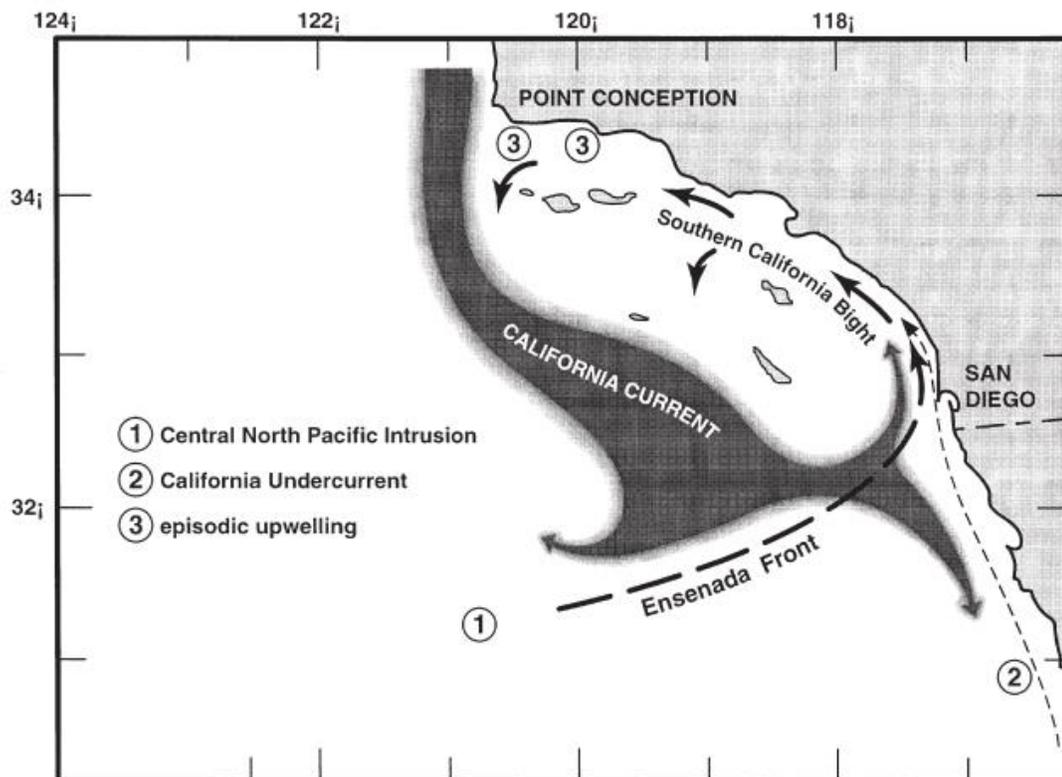
La región de estudio se encuentra entre la zona central y sur del SCC, donde las principales masas de agua son cuatro, cada una con su propia hidrografía (Lynn y Simpson, 1987). 1) Agua Subártica del Pacífico: esta se forma en latitudes altas, hay exceso de precipitación y pérdida de calor a los 48°N y sale del SCC a los 25°N; se caracteriza principalmente por su baja temperatura potencial (entre 10-21°C) y baja salinidad (< 33 PSU), además de su alta concentración de oxígeno disuelto y alta concentración de nutrientes. 2) Agua Central del Pacífico Nororiental: es agua caliente y salada, con poco oxígeno disuelto y pocos nutrientes (relativamente); también es conocida por Durazo (2015) como Agua Subtropical superficial con temperatura potencial > 20°C y salinidad > 34.4 PSU. 3) Agua del Pacífico Ecuatorial: esta se forma en el Pacífico oriental tropical y tiene alta temperatura potencial (> 21°C) y alta salinidad, altas concentraciones de nutrientes y por oxígeno disuelto, esta masa de agua ingresa por el sur en la subsuperficie. 4) Agua de surgencias: esta masa de agua se encuentra generalmente a 50 km de la costa de California; es agua fría, salada, rica en nutrientes y deficiente en oxígeno; además, tiene la característica de provenir desde la profundidad de la plataforma hacia la superficie. Concentración de las propiedades de estas masas de agua se encuentran en la Tabla 6. Los patrones que tienen estas masas de agua a lo largo de la corriente de California se conocen a través de los cruceros de CalCOFI (Venrick, 2000).

En la Figura 3 se muestra la representación esquemática de la convergencia de las aguas que fluyen hacia el sur con una intrusión del agua Central del Pacífico Norte y gira hacia la costa (Venrick, 2000). Venrick (2000) menciona que algunas aguas se incorporan a la Corriente de California nuevamente y parte de esas aguas se mezcla con aguas lejanas a la costa y se mueve al norte convirtiéndose en el remolino del sur de California, esta agua se puede combinar con agua de surgencias y regresar en camino al sur (Jackson, 1986). El frente de Ensenada se compone de cuatro tipos de aguas; es perpendicular a la costa y se

extiende por aproximadamente de 150 km a 500 km fuera de la costa hasta profundidades de 2000 a 4000 m mostrando gradientes pronunciados en primavera y volviéndose difusa en el verano, cuando se mueve de 100 a 200 km al sur (Venrick, 2000).

**Tabla 1:** Masas de agua del SCC tomada de Lynn y Simpson (1984), tomando en cuenta los valores bajos (B) y altos (A) de temperatura potencial ( $\theta$ ), salinidad (S), oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>) y Nutrientes.

	$\theta$	S	O <sub>2</sub>	Nutrientes
Masas de agua superficiales (0-200 m)				
Subártica del Pacífico	< 16 °C	< 33 PSU	A	A
Central del Pacífico Norte	> 16 °C	> 33.2 PSU	B	B
Agua de surgencias	< 15 °C	> 33.2 PSU	B	A
Masas de agua subsuperficiales (200-500 m)				
Pacífico Ecuatorial	> 16 °C	> 33.2 PSU	B	A

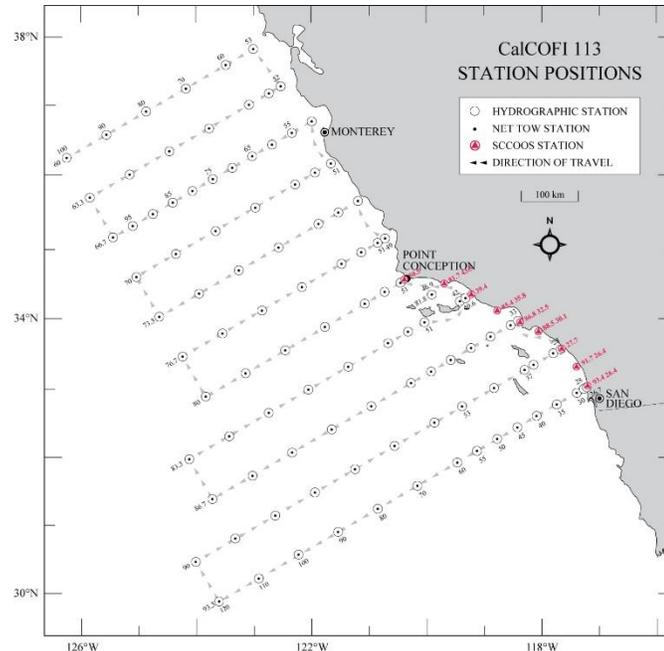


**Figura 2:** Representación esquemática de la región Frontal de Ensenada y las aguas que contribuyen en él. La localización geográfica, orientación y tamaño del frente varía considerablemente (Venrick, 2000).

## 2.2 Datos y materiales

El programa CalCOFI, fue creado en 1949 para estudiar distintos aspectos del colapso de la población de sardinias frente a California. Desde entonces, el enfoque de CalCOFI se ha ampliado para abarcar el centro-sur del SCC y ha capitalizado los métodos de observación de última generación. CalCOFI tiene como propósito entender los cambios a largo plazo de los ecosistemas oceánicos obteniendo datos para estudios físicos, químicos y biológicos del SCC teniendo colaboración entre el estado, la industria y la academia (Ohman y Venrick, 2003). Hoy se enfoca en el estudio del ambiente marino frente a las costas de California, el manejo de recursos vivos y el monitoreo de indicadores de El Niño y del cambio climático.

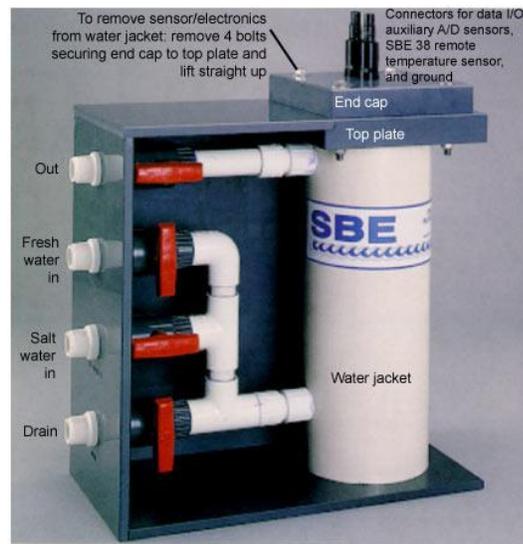
Debido a la duración de la serie temporal, el programa es de gran importancia para entender los cambios a largo plazo en los ecosistemas marinos y las comunidades humanas que dependen de ellos en el SCC, el Pacifico Norte e internacionalmente.<sup>1</sup> En múltiples artículos [Lynn y Simpson, 1987; Reid, 1988; Ohman y Venrick, 2003] se han estudiado diversas variables obtenidas con el programa CalCOFI, sin embargo, nuestra investigación es pionera en el estudio de la compensación en esta zona. Actualmente, el programa realiza cruceros trimestrales para recopilar datos hidrográficos y biológicos.



**Figura 3:** Región CalCOFI con estaciones y líneas hidrográficas. Se muestran las especificaciones en el recuadro dentro de la Figura. Los valores indican el número de estación (horizontales) y de línea (verticales) dándoles identidad.

<sup>1</sup> CalCOFI, 22 de mayo de 2018. About CalCOFI. Consultado el 29 de mayo de 2021, de <https://calcofi.org/about-calcofi.html>

En la Figura 3 se puede ver el plan de estaciones básico actual con la posición de 113 estaciones hidrográficas distribuidas en 11 líneas hidrográficas a lo largo de la región CalCOFI, situada en el centro-sur de la corriente de California. En la misma Figura se muestra que el recorrido de los cruceros comienza en las costas de San Diego y se desplaza siguiendo el recorrido macado hasta llegar a la línea 60, donde cruzara el trayecto para regresar a las costas de San Diego. Es importante mencionar que los cruceros de invierno y primavera generalmente cubren completo este plan de estaciones básico, sin embargo, los cruceros de verano y otoño solamente cubren hasta la línea 73.3.



**Figura 4:** Termosalinógrafo SBE 21 SEACAT.

Los datos de termosalinógrafo o termosal para este estudio, fueron tomados durante el recorrido por las líneas hidrográficas de la región CalCOFI por los buques, para las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno para los años 2004 a 2020. Inicialmente se obtuvo un total de 61 cruceros con datos que se registraron a profundidades entre 5 y 6 metros dependiendo del calado del buque con el que fueron tomados. El modelo de termosal que fue utilizado es el SBE 21 SEACAT que se muestra en la Figura 4, este instrumento graba la conductividad y la temperatura en la superficie del océano, transmitiendo datos simultáneamente a una computadora que los guarda en tiempo real, este modelo de termosal tiene las siguientes especificaciones<sup>2</sup> mostradas en la Tabla 1.

<sup>2</sup> Sea-bird Electronics, Inc., 2021. SBE 21 SEACAT Thermosalinograph. Consultado el 19 de julio de 2021 de [https://epic.awi.de/id/eprint/37607/1/SBE21\\_SEACAT\\_UserManual.pdf](https://epic.awi.de/id/eprint/37607/1/SBE21_SEACAT_UserManual.pdf).

**Tabla 2:** Especificaciones del termosalinógrafo SBE 21 SEACAT.

	Conductividad (S/m)	Temperatura primaria (°C)	Temperatura secundaria(°C)
Rango de mediciones	0 a 7	-5 a +35	-5 a +35
Precisión inicial	0.001	0.01	0.001
Resolución	0.0001	0.001	0.0003
Calibración del sensor	2.6 a 6 S/m	+1 a +32	-1 a +32

**Figura 5:** SBE 911plus CTD utilizado en recolección de datos.

Los datos de CTD que se utilizaron fueron los de conductividad, presión y temperatura tomados en cada una de las estaciones hidrográficas, al igual que el termosal, se toman para cada una de las estaciones del año. Los datos base se tienen de 1998 a 2017, con un total de 54 cruceros disponibles. El modelo de CTD que se utilizó para recolectar los datos fue el SBE 911plus, se puede ver en la Figura 5, este CTD es utilizado por las principales instituciones oceanográficas del mundo, proporciona un muestreo continuo de conductividad, temperatura y presión en profundidades de hasta 10,500 metros con 24 escaneos por

segundo (24 Hz), se puede utilizar con ocho diferentes sensores adicionales.<sup>3</sup> Algunas de las especificaciones importantes son las que se muestran en la Tabla 2

**Tabla 3:** Especificaciones del CTD SBE 911plus.

	Temperatura (°C)	Conductividad (S/m)	Presión
Rango de mediciones	-5 a +35	0 a 7	0 a rango de escala completa (en metros de capacidad de despliegue): 1400/ 2000/4200/6800/10500 metros.
Precisión inicial	±0.001	±0.0003	±0.015 % del rango de escala completa.
Resolución a 24 HZ	0.0002	0.00004	0.001 % del rango de escala completa
Calibración del sensor	-1.4 a +32.5	2.6 a 6 S/m	Calibración parocientífica
Contribución del error del reloj maestro	0.00016 °C	0.00005 S/m	0.3 dbar con 6800 m

**Tabla 4:** Lista final de cruceros de CalCOFI utilizada en este trabajo.

0401JD	0810NH	1304SH
0411RR	0901NH	1307NH
0504NH	0903JD	1402SH
0507NH	0911NH	1404OS
0602JD	1001NH	1411NH
0607NH	1004MF	1504NH
0610RR	1011NH	1507OC
0704JD	1101NH	1511OC
0707NH	1104SH	1604SH
0711NH	1110NH	1607OS
0804JD	1202NH	1611SR
0808NH	1210NH	

<sup>3</sup> Sea-bird scientific, 2021. SBE 911plus CTD. Consultado el 13 de junio de 2021 de <https://www.seabird.com/profiling/sbe-911plus-ctd/family?productCategoryId = 54627473769>.

Los datos de termosal se validaron con los datos de CTD como se explica en la sección de Métodos, quedando la lista de la Tabla 4 como la tabla final de los cruceros de termosal que se utilizaron en este trabajo y de los únicos que se hará mención en los siguientes apartados.

La nomenclatura utiliza la fecha en la que se realizó el crucero y el nombre del buque utilizado de la manera siguiente: los dos primeros dígitos son el año, los siguientes dos dígitos son el mes y las letras son la abreviatura del nombre del buque. Los nombres de los buques que realizaron los recorridos de este trabajo fueron los siguientes: R/V New Horizon (NH), R/V Oceanus (OC), R/V Ocean Starr (OS), R/V Sally Ride (SR), R/V Bell M Shimada (SH), R/V Roger Revelle (RR), R/V Miller Freeman (MF) y r/V David Starr Jordan (JD).

De los 35 cruceros que se seleccionaron, hay un total de 7 cruceros para invierno, 10 cruceros para primavera, 8 cruceros para verano y 12 cruceros para otoño que se muestran en la Tabla 5. No se logró obtener ningún año completo para su investigación, pero se tienen 6 cruceros en 2015 y 2016 que dieron información sobre El Niño 2015-2016.

**Tabla 5:** Cruceros de la región CalCOFI por estaciones que fueron tomados en cuenta (x) para la investigación.

	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO
2004	X			X
2005		X	X	
2006	X		X	X
2007		X	X	X
2008		X	X	X
2009	X	X		X
2010	X	X		X
2011	X	X		X
2012	X			X
2013		X	X	
2014	X	X		
2015		X	X	X
2016		X	X	X
TOTAL	7	10	7	11

## 2.3 Métodos

### 2.3.1 Caracterización de la variabilidad termohalina

#### 2.3.1.1 Oceanografía descriptiva

El control y la calidad de los datos es fundamental en este estudio para poder visualizar la variabilidad termohalina en la escala requerida, por lo que el filtrado de datos y la revisión minuciosa de cada uno de los cruceros es primordial. Para controlar los factores que amenazan la validez de la confiabilidad de los datos se utilizó una tabla de los cruceros de termosal y CTD que se tenían disponibles, desde 1998 hasta 2020 encontrados directamente de las campañas CalCOFI. En la primera etapa de este estudio, se realizó la selección de cruceros por medio de gráficos de salinidad y temperatura potencial con los que se determinó si los datos eran discontinuos y/o inconsistentes con estudios previos realizados. Para la salinidad y la temperatura potencial, en cada uno de los cruceros, se realizaron gráficos donde se muestran los datos ordenados y los intervalos de frecuencia. Se calcularon la media, valores máximos y mínimos y desviación estándar. Los datos que se encontraron con valores fuera de rango fueron omitidos para estos cálculos.

Los datos del termosal (intervalo = 100 m) fueron los datos base, estos fueron validados usando datos de CTD (intervalo = 37 m) de los cruceros. Con los datos CTD se realizaron perfiles de salinidad y temperatura potencial para cada uno de los cruceros y lances. Durante la validación de los datos de termosal, se compararon con los datos de CTD en cada una de las estaciones en profundidades menores a 5 metros, se buscaron datos de termosal en un radio de 1 km, con la consideración de que fueran tomados con menos de 1 día de diferencia, se cotejaron realizando regresión lineal y se calculó el coeficiente de determinación, aquellos cruceros con coeficientes menores a 0.95 fueron eliminados de la lista. Se realizó una interpolación de los datos de los cruceros que se trabajaron a  $\Delta = 100$  m. Todo lo anterior con apoyo del software Matlab.

Se realizaron cintillas de las propiedades termohalinas para cada uno de los cruceros, que fueron analizadas cuidadosamente una a una para visualizar los fenómenos de mesoescala y submesoescala previstos en el anteproyecto como frentes, filamentos, remolinos y surgencias. Posteriormente, para

observar las variaciones estacionales, se realizaron promedios de las propiedades termohalinas dividiendo la región en dos subsecciones.

Para la parte sur se tuvieron cruceros de invierno, primavera, verano y otoño; y para la parte norte solamente de invierno y primavera. Los cruceros tomados para la parte norte fueron 0401JD, 0602JD y 1101NH en invierno y en primavera 0903JD, 1104SH y 1304SH, considerados debido a la presencia de sus datos en la región norte. En la zona sur los cruceros que se promediaron fueron 7 por estación del año. Por el sesgo que puede aportar el fenómeno “El Niño” que ocurrió el año 2015-2016 a la variabilidad en la región, se excluyó de los promedios estacionales.

Se tomó un recorrido base para los promedios, este fue el de enero de 2004, debido a que era el más completo y estaba bien distribuido para generarlo, se interpolaron cada 100 m los datos de sus estaciones. Tomando el recorrido base y asignando en cada uno de sus puntos la propiedad (temperatura potencial, salinidad y densidad potencial), se promediaron datos de cada uno de los cruceros realizados en las estaciones (invierno, primavera, verano y otoño) correspondientes en un radio de 1 km. Todas las propiedades mostradas estacionalmente fueron estudiadas por promedios y crucero a crucero.

Se realizaron diagramas T-S para cada uno de los cruceros, a estos diagramas adicionalmente se les agregó una cintilla de la localización de las masas de agua. Para que fuera claro, se le agregó un color distinto a cada masa de agua que permitió observarlas en las cintillas. Estos diagramas se realizaron de manera similar con los promedios estacionales.

Se calculó la variable *spiciness* ( $\text{kg/m}^3$ ) con el método de Flament (2002) para mostrar el dominio de las masas de agua cálidas y saladas y de las frías y poco saladas en la región de estudio analizando su relación con la razón de densidad. Rudnick y Martin (2002) definen a la variable como:

$$\Delta\pi = \sqrt{(\alpha\Delta\theta)^2 + (\beta\Delta S)^2} \quad (6)$$

Esta variable se mostró de manera estacional.

Para caracterizar la compensación de las fluctuaciones de salinidad y temperatura potencial en la capa superior del océano de la región frente a California, este estudio requirió el cálculo de la razón de densidad. Para obtener la razón de densidad R, se calcularon con el paquete de MATLAB EOS-80 la temperatura potencial ( $\theta$ ), salinidad (S) correspondientes siguiendo la trayectoria del buque.

Los coeficientes de expansión térmica ( $\alpha$ ) y contracción salina ( $\beta$ ) se promediaron en un intervalo de 1 km, así como, las diferencias de temperatura potencial ( $\Delta\theta$ ) y salinidad ( $\Delta S$ ) para el mismo intervalo. Se calculó el arco tangente de la razón de densidad y cuya justificación de uso se relaciona a que tiene las ventajas siguientes: (1) vuelve la escala infinita de  $R$  a una escala finita de  $-\pi/2$  a  $\pi/2$ , (2) si se tiene  $\Delta S$  pequeño el ángulo de Turner está bien definido y (3) en regiones donde domina la temperatura potencial ( $1 < R < \infty$ ) o la salinidad ( $0 < R < 1$ ) ocupan el mismo espacio en la escala de  $Tu$  (Rudnick y Ferrari, 2000). Se realizaron cintillas en Matlab de dicha propiedad para localizar las zonas donde existía compensación.

### 2.3.1.2 Ondeletas de los gradientes de temperatura potencial y salinidad

Posteriormente, para encontrar las escalas y su ubicación, como lo propuesto por Rudnick y Ferrari (1999), en las que se producen los fenómenos de compensación se realizó análisis de ondeletas (wavelet analysis). Para realizarlo, se utilizaron secciones de 100 km de longitud a lo largo de todo el recorrido del crucero, estas secciones se fueron tomando cada 10 km de longitud, a cada sección se le realizó análisis de ondeletas donde se analizaron escalas de 5 a 20 km.

La transformada de ondeletas consiste en una técnica matemática que puede descomponer una señal en múltiples resoluciones más pequeñas por medio del control de los factores de escala y el desplazamiento de una sola función de ondeletas<sup>4</sup>, que son funciones bien definidas en el tiempo y el espacio (Venegas, 2001). Proporciona una estimación localizada de la amplitud y fase para cada espectro componente de la serie mostrando la evolución de sus características a lo largo del tiempo.

Las ondeleta se basan en la **convolución** de series de tiempo  $F(t)$  con un conjunto de funciones  $G_{ab}(t)$  con parámetros  $a$  y  $b$  derivados de la dilatación de la llamada ondeleta madre  $G(t)$ , donde

$$G_{ab}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} G\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (7)$$

---

<sup>4</sup> ScienceDirect, 2021. Wavelet Analysis. Consultado el 29 de mayo de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/wavelet-analysis>  
Para más información sobre el Wavelets consultar: Holschneider, M., Wavelets: An Analisis Tool, 423 pp., Claredon, Oxford, England, U.K., 1995.

donde  $b$  es un escalar conocido como parámetro “traductor” y corresponde a punto central de la ondeleta en las series de tiempo,  $a$  es un escalar real y positivo conocido como parámetro “escala de dilatación” y determina el ancho de la ondeleta.  $\frac{1}{a^{1/2}}$  normaliza las ondeletas para que tengan una unidad de energía y sean comparables para todas las escalas de  $a$ . Cualquier conjunto de funciones que satisfaga lo anterior se conoce como *ondeleta* (Venegas, 2001).

La transformada de ondeletas queda definida como la convolución de las series de tiempo  $F(t)$ ,  $t = 1 \dots N$ , con el conjunto de ondeletas  $G_{ab}(t)$  para diferentes parámetros  $a$  y  $b$  :

$$T(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \sum_{t=1}^N G^* \left( \frac{t-b}{a} \right) F(t), \quad (8)$$

donde el asterisco denota conjugación compleja y los parámetros  $a$  y  $b$  se permite que varíen continuamente. El parámetro de traducción  $b$  corresponde al tiempo en el caso de una serie temporal (o posición en el caso de una serie espacial). El parámetro de dilatación  $a$  corresponde al período temporal (inverso de frecuencia) o a la longitud de escala. Al cambiar la escala  $a$  y trasladar a lo largo del tiempo localizado  $b$  se puede construir una imagen bidimensional que muestre la amplitud de cualquier característica en la serie de tiempo como una función de la escala y también cómo esta amplitud varía con el tiempo (Venegas, 2001).

La ondeleta madre utilizada en este estudio fue la ondeleta de Morlet  $\Psi(x)$ , esta utilizada debido a su buen funcionamiento en procesos geofísicos (Venegas, 2001). Se obtiene teniendo en cuenta una sinusoidal, onda plana  $\exp(iQx)$  con el radio del número de onda  $Q$ , multiplicada por una Gaussiana  $\exp(-x^2)$ , en la escala espacial:

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) \exp(iQx). \quad (9)$$

Los coeficientes de ondeleta están en función de la escala ( $a$ ) y la posición ( $b$ ). Los coeficientes de los gradientes de temperatura potencial ( $\theta$ ) y de salinidad ( $S$ ) en una escala  $l$  y posiciones  $x_0$ , con apoyo de Rudnick y Ferrari (2000) se obtienen mediante:

$$\Delta\theta(l, x_0) = \frac{1}{|l|} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \left( \frac{x - x_0}{l} \right) \Delta\theta(x) dx, \quad (10)$$

$$\Delta S(l, x_0) = \frac{1}{|l|} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \left( \frac{x - x_0}{l} \right) \Delta S(x) dx, \quad (11)$$

donde el asterisco denota conjugación compleja y los coeficientes miden las variaciones de los campos.  $\Delta\theta$  y  $\Delta S$  en el punto  $x_0$  con la escala dada por  $l$ .

Los coeficientes de ondeletas  $\Delta\theta$  y  $\Delta S$  se multiplicaron por sus respectivos coeficientes de expansión y contracción con un filtro Gaussiano como lo hacen Rudnick y Ferrari (2000), mismo que definen como  $G_l(x) = \frac{1}{|l|\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{l^2}\right)$ . El resultado son coeficientes de ondeleta para la temperatura potencial y la salinidad definidos en distancia y ubicación (Rudnick y Ferrari, 2000).

### 2.3.1.3 Diagramas de dispersión de los coeficientes de ondeletas

Las partes reales de los coeficientes  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S$  se tomaron a las escalas de 5 km a 20 km y se realizaron diagramas de dispersión, colocando a cada uno en uno de los ejes. De ellos se obtuvo la descripción termohalina. Se tomó en cada uno de ellos la pendiente del eje central de la elipse para visualizar la tendencia de los datos.

### 2.3.1.4 PDF de los coeficientes de ondeletas

Ya que los coeficientes al ser solo el resultado de la operación matemática requieren de cálculos estadísticos para poder ser cuantificados (Rudnick y Ferrari, 1999), por lo cual, con las partes reales de los coeficientes  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S$  se realizaron Figuras de las funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) de cada uno de los cruceros, y se localizó la región donde se encontraban.

### 2.3.1.5 Eje principal de la elipse y mediana de los coeficientes

De los mismos coeficientes se graficaron la pendiente del eje principal de la elipse y la mediana. La primera es la pendiente del eje principal de la elipse que se encuentra a partir de la covarianza entre los coeficientes la temperatura potencial y la salinidad, esta medida al ser cuadrática es sensible a los frentes más pronunciados como lo explicaron Rudnick y Ferrari (2000). La mediana de los coeficientes es otra medida típica de la razón de densidad que no es particularmente sensible a los valores atípicos, por lo cual Rudnick y Ferrari (2000) lo consideran un estimador robusto.

### 2.3.1.6 Análisis de las series de distancia

Crucero a crucero se revisaron cada una de las series de distancia donde se mostraron los frentes identificados para estudiar cómo se comportaban la temperatura potencial, la salinidad y la densidad potencial. Posteriormente se estudió la variabilidad estacional realizando gráficos de pastel y cintillas para localizar su ubicación espacial.

## 2.3.2 Condiciones oceanográficas en la parte superior del océano de la región CALCOFI en relación con los frentes

Para estudiar la relación de los frentes con las propiedades termohalinas, se muestra en esta sección la unión de las propiedades a los frentes mostrados en la sección anterior, los resultados se muestran con ejemplos vistos crucero a crucero y estadística obtenida del conteo uno a uno. La primera propiedad estudiada fueron las masas de agua. Éstas se estudiaron a partir del conteo de los frentes con las características de las masas de agua características de la región y los resultados obtenidos se muestran en diagramas de pastel.

Los datos de CTD se utilizaron para calcular la profundidad de la capa de mezcla o PCM. La PCM se determinó con el método de Kara et al. (2000), donde se consideran los incrementos de temperatura potencial en un perfil dado. El valor de referencia que se consideró fue 10 metros de profundidad donde el contacto con la atmósfera ya no genera “efecto piel” en la superficie del océano (Fairall et al., 1996) y tiene una temperatura potencial similar a la de la superficie. Como se buscaba un perfil donde la temperatura potencial fuera uniforme se consideraron diferencias de temperatura potencial menores a

0.5 °C. Se calcularon las densidades potenciales de cada uno de los valores (el de 10 metros de profundidad y el de la densidad potencial a 10 metros  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) y se obtuvo un diferencial de ambos valores. A la densidad potencial del perfil completo, se le restó la densidad potencial del valor de referencia y se comparó con el diferencial. Los valores que fueron menores o iguales al de referencia se consideraron dentro de la capa de mezcla. La temperatura potencial de la capa de mezcla se calculó a partir del valor PCM, el promedio de las diferentes temperaturas potenciales a lo largo de la columna de agua fue el valor tomado. Para ver la comparación con los frentes, se realizaron figuras conjuntas de datos de CTD con sus respectivos recorridos de CTD.

Se calculó la estratificación con la frecuencia de Brunt Väisälä ( $N^2$ ) definida como:

$$N^2 = -\frac{g}{\sigma_\theta} \frac{d\sigma_\theta}{dz}, \quad (12)$$

para visualizar la profundidad de la termoclina y la estabilidad del fluido ante los desplazamientos verticales causados por la convección. En esta sección, se mostraron líneas de la región sur debido a que todos los cruceros cubren esta zona.

En dinámica atmosférica y oceanografía física, el radio de deformación de Rossby es la escala horizontal en la que los efectos de rotación de la Tierra se vuelven tan importantes como la flotabilidad (Gill, 1982).

Se encuentra definido como:

$$Ro = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{gH\Delta\sigma_\theta}{\sigma_\theta}}, \quad (13)$$

donde

$$f = 2\Omega \sin\varphi \quad (14)$$

$g$  es la gravedad,  $H$  es la profundidad de la capa de mezcla,  $\rho$  en la densidad potencial en la base de la capa de mezcla,  $\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta$  (en profundidad de capa de mezcla) -  $\sigma_{\theta_0}$  (superficial) y  $f$  es el parámetro de

Coriolis con  $\Omega$  es la velocidad angular de la tierra y  $\varphi$  la *latitud*. Rudnick y Ferrari (2000) encontraron que las escalas de compensación siempre fueron menores al radio de deformación calculado en la base de la capa de mezcla.

### 2.3.3 Explicación física propuesta

De acuerdo a Chen y Young (1995) y a Macvean y Woods (1980), la correlación entre los gradientes de temperatura y salinidad, generan contribuciones también al gradiente de flotabilidad, en el caso de ser antagónicos se obtiene flotabilidad compensada. En este trabajo, se estudió la flotabilidad ( $b$ ) y la derivada de la flotabilidad al cuadrado ( $b_x^2$ ) que es proporcional al coeficiente de difusión no lineal (Chen y Young, 1995), para observar el comportamiento de esta en relación con los frentes observados.

$$b = g[\alpha(\theta - \theta_0) - \beta(S - S_0)], \quad (15)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica promedio,  $\theta$  es la temperatura potencial en cada punto,  $\theta_0$  es la temperatura potencial promedio,  $\beta$  es el coeficiente de contracción salina,  $S$  es la salinidad en cada punto y  $S_0$  es la salinidad promedio.

$$b_x^2 = \left(\frac{\Delta b}{\Delta x}\right)^2, \quad (16)$$

donde  $\Delta b$  es el gradiente de flotabilidad en la distancia  $\Delta x$  (Chen y Young, 1995).

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Caracterización de la variabilidad termohalina en la capa de mezcla de la región CalCOFI de cada uno de los cruceros

#### 3.1.1 Oceanografía descriptiva

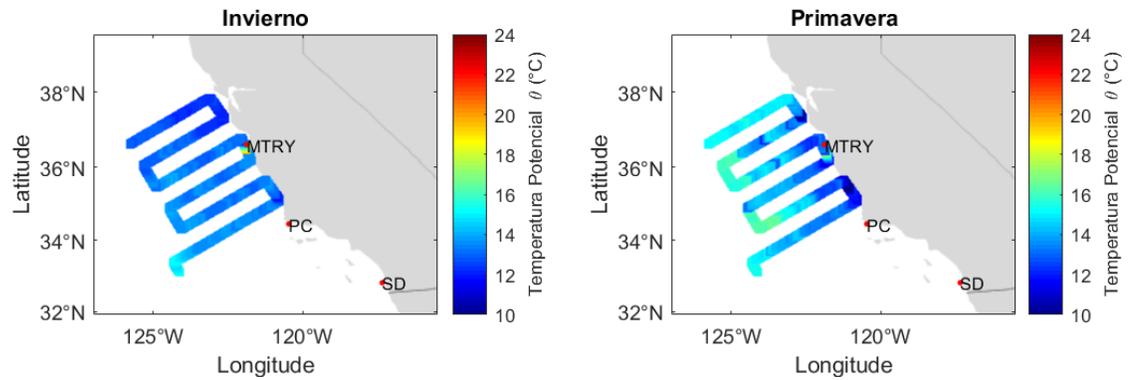
Los primeros datos que se estudiaron fueron los de termosal, la Tabla 5 es la descripción estadística de la zona de estudio realizada con datos de termosal, muestra la variabilidad de temperatura potencial, salinidad y densidad potencial de cada una de las estaciones del año y fue utilizada como base durante nuestra investigación. Los rangos que encontramos en la región de estudio oscilan entre 32-34 PSU para la salinidad, entre 10-24 °C para la temperatura potencial ( $\theta$ ) y entre 22.7-25.8  $kg/m^3$  para la densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ) que concuerdan con la descripción de la zona de estudio de Lynn y Simpson (1987). Se tienen los mínimos valores para la salinidad en el invierno ( $\sim 32$  PSU) junto con bajas temperaturas potenciales. La temperatura potencial superficial más baja muestreada se observa en la primavera ( $\sim 11$  °C) con las salinidades más altas ( $\sim 34$  PSU) y la más alta densidad potencial (1025.98  $kg/m^3$ ). La mayor temperatura potencial ocurrió en verano ( $\sim 23$ °C) junto a la menor densidad potencial ( $\sim 1023$   $kg/m^3$ ), muestra también un rango amplio de temperatura potencial con una desviación estándar de 1.201°C, que nos indica que los datos están más dispersos que en otras estaciones del año. La primavera y el verano muestran desviaciones estándar similares en salinidad y densidad potencial, que son mayores a las de invierno y otoño.

Para estudiar adecuadamente la zona se dividió en dos subregiones: la norte y la sur, como se explica en la metodología, por ello en esta sección se mostrarán primero las características de la región norte y posteriormente las de la región sur. Las mismas propiedades fueron calculadas para cada sección, por lo que se muestran primero cintillas de temperatura potencial, salinidad y densidad potencial, después diagramas T-S y la variable *spiciness*.

**Tabla 6:** Caracterización de la variabilidad estacional de la zona de estudio. Valores máximos, mínimos, media y desviación estándar de salinidad (S), temperatura potencial ( $\theta$ ) y densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ) de la zona de estudio. Los valores de densidad potencial están dados por  $\sigma_\theta-1000$ .

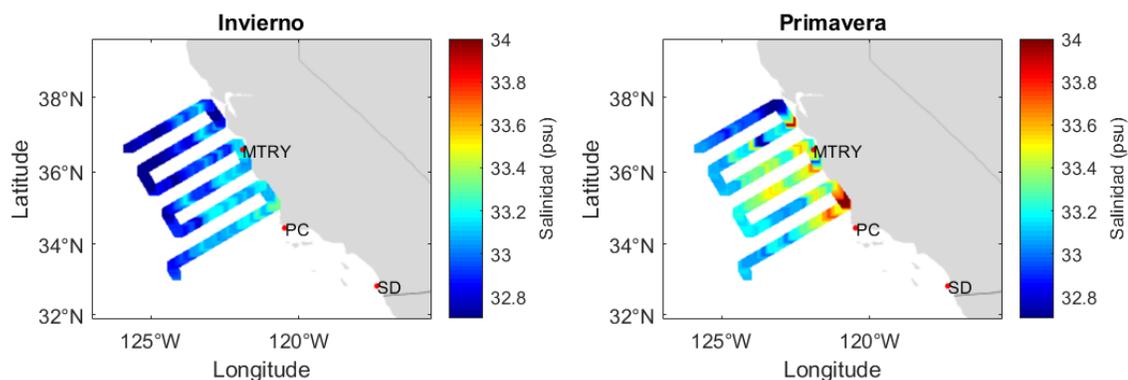
Estación		$\theta(^{\circ}\text{C})$	S(PSU)	$\sigma_\theta -1000$ (kg/m <sup>3</sup> )
Invierno	Rango	11.74 -16.52	<b>32.01</b> -33.64	23.9 -25.55
	Media	14.15	33.11	24.72
	Desviación estándar	1.08	0.21	0.20
Primavera	Rango	<b>10.87</b> -16.65	32.67 - <b>33.98</b>	<b>24.15-25.98</b>
	Media	14.71	33.26	24.70
	Desviación estándar	1.09	0.19	0.31
Verano	Rango	12.96 - <b>23.08</b>	32.88 -33.77	<b>22.88</b> -25.45
	Media	18.05	33.32	23.99
	Desviación estándar	1.201	0.16	0.31
Otoño	Rango	14.16-20.40	32.99 -33.55	23.37 -24.95
	Media	17.64	33.28	24.06
	Desviación estándar	0.97	0.11	0.23

En la Figura 6 se tienen los promedios de la zona norte de la región para invierno y primavera, en el invierno se mantiene en la región temperatura potencial baja ( $< 14^{\circ}\text{C}$ ) mostrándose casi uniforme a excepción de la última línea donde el recorrido se aleja más de la costa, ahí se muestran temperaturas de  $15^{\circ}\text{C}$ . En primavera predomina el azul oscuro, lo que indica temperaturas menores a  $12^{\circ}\text{C}$ , cerca de la costa frente al norte de Monterey y hasta antes de Punta Concepción, lejos de la costa en esas mismas latitudes de observan temperaturas potenciales más altas con tonalidades de azul claras y verdes ligeros; en la línea más al norte del recorrido de primavera se muestran temperaturas alrededor de  $15^{\circ}\text{C}$  cerca de la costa.



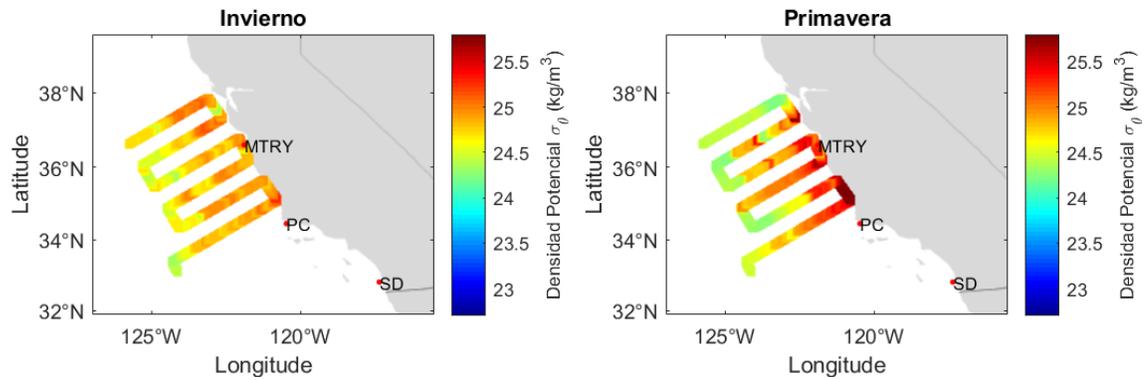
**Figura 6:** Cintillas del promedio de temperatura potencial estacional, para invierno y primavera en el norte de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

En la Figura 7 se observan las salinidades promedio para la zona norte de invierno y primavera, en el invierno la salinidad es muy baja ( $< 32.8$  PSU) en diagonal desde las costas de Monterrey y mar a dentro frente a Punta Concepción, cerca de la costa desde Monterrey hasta el norte de Punta Concepción, la salinidad ronda 33.3 PSU. En la primavera se mantienen algunos valores bajos de salinidad lejos de la costa y cerca en la última línea del recorrido; se observan gradientes de salinidad cerca de la costa, y salinidades altas al norte de Punta Concepción.

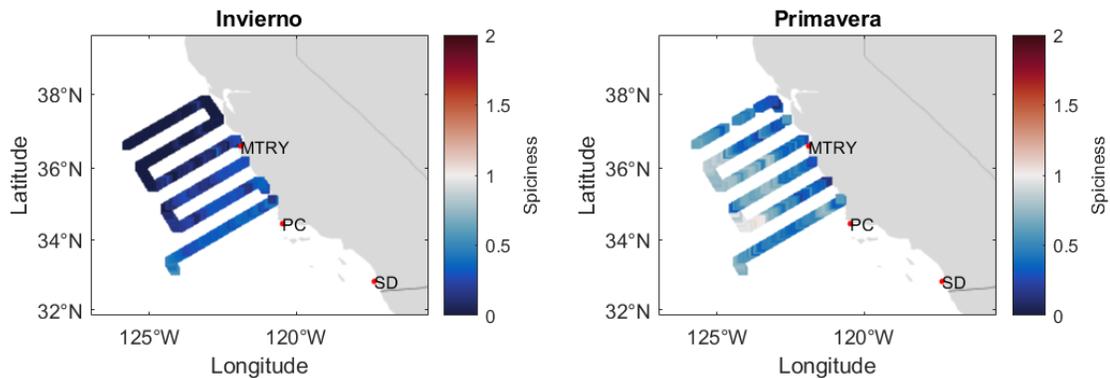


**Figura 7:** Cintillas del promedio de salinidad estacional, para invierno y primavera en el norte de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

En la densidad potencial, mostrada en la Figura 8 se distingue que, en invierno, las densidades potenciales son mayores cerca de la costa que lejos de la costa en toda la parte norte de la región y en la primavera de manera similar, pero los valores son menos constantes, es decir, se muestran cambios más bruscos de densidad potencial de cerca a lejos de la costa que en el invierno, los valores más altos de densidad se tienen al sur de las costas de Monterrey.



**Figura 8:** Cintillas del promedio de densidad potencial estacional, para invierno y primavera en el norte de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.



**Figura 9:** Spiciness promedio para la parte norte de la región, estaciones de invierno y primavera.

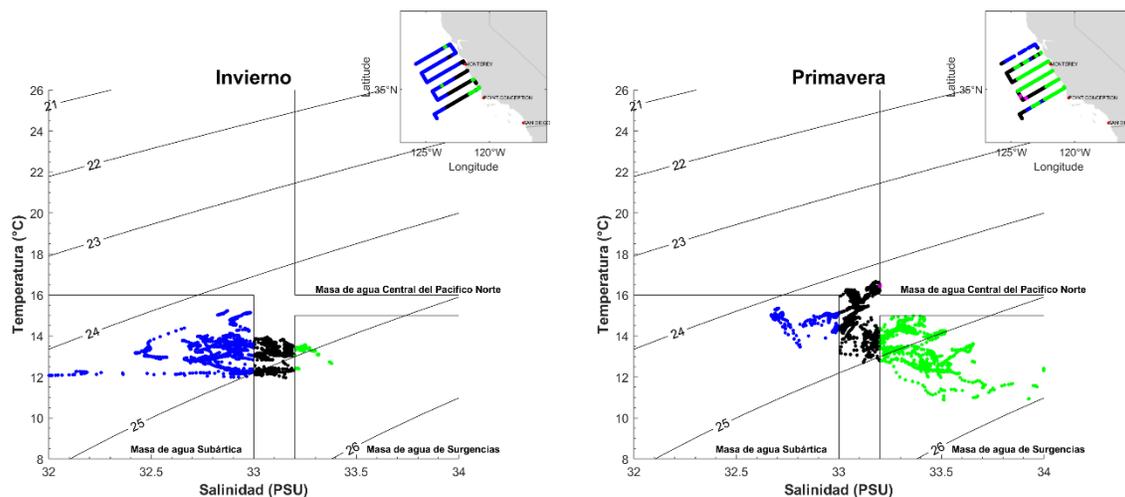
La variable *spiciness* calculada para los promedios resalta la presencia de las diferentes masas de agua, dicha propiedad se muestra en la Figura 9 para el invierno y la primavera al norte de la región CalCOFI. Valores bajos de *spiciness* ( $< 1 \text{ kg/m}^3$ ) indican presencia de agua poco salada y fría, mientras que valores altos ( $> 1 \text{ kg/m}^3$ ) indican la presencia de agua cálida y salada. En invierno y primavera agua fría y poco salada domina en el norte, en el invierno hay valores más bajos de *spiciness* que en la primavera. En primavera se distingue que lejos de la costa hay valores intermedios de la variable ( $\sim 1 \text{ kg/m}^3$ ).

Con los datos de termosalinógrafo (6 metros de profundidad), en esta región se encontraron masas de agua superficiales que fueron localizadas con los siguientes rangos y colores: 1) Masa de agua Subártica: (azul) temperatura potencial  $< 16 \text{ }^\circ\text{C}$  y salinidad  $< 33 \text{ PSU}$ , 2) Masa de agua de Surgencias: (verde) temperatura potencial  $< 15 \text{ }^\circ\text{C}$  y salinidad  $> 33.2 \text{ PSU}$ , 3) Masa de agua Central del Pacífico Norte: (magenta)

temperatura potencial  $> 16\text{ }^{\circ}\text{C}$  y salinidad  $> 33.2\text{ PSU}$ . En negro se tiene al agua mezclada o típica de la región.

En la Figura 10 se muestran los Diagramas T-S de invierno y primavera en el norte de la región CalCOFI, se distingue que las masas de agua presentes son la masa de agua Subártica y masa de agua de Surgencias, en el invierno predomina la masa de agua Subártica, mientras que en la primavera la masa de agua de Surgencias. En el invierno la masa de agua Subártica se desplaza lejos de la costa paralela a la latitud sobre los  $125^{\circ}$  oeste, y la masa de agua de Surgencias está al norte de Punta Concepción cerca de la costa. En la primavera, la masa de agua de Surgencias cubre el norte de la región CalCOFI desde dos líneas al norte de Monterey, en la línea más al norte, se muestra agua Subártica.

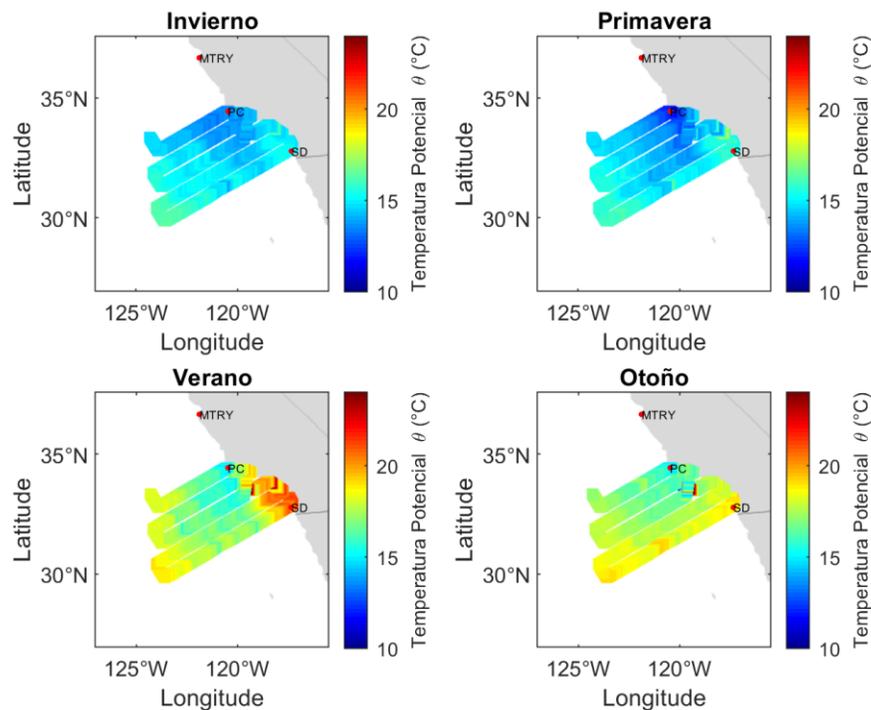
Relacionando las masas de agua con la variable *spiciness* tenemos que la masa de agua Subártica corresponde a los valores más bajos de *spiciness* ( $\sim 0\text{ kg/m}^3$ ), mientras que los valores alrededor de  $0.5\text{ kg/m}^3$  corresponden en esta región a la masa de agua de Surgencias.



**Figura 10:** Diagramas T-S para invierno y primavera del promedio de los cruceros, junto con su respectiva cintilla para la localización de las masas de agua en el mapa de la región. 1) Masa de agua Subártica (azul), 2) Masa de agua de Surgencias (verde), 3) Masa de agua Central del Pacífico Norte (magenta), 4) Agua mezclada o típica (negro).

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran cintillas de los promedios de temperatura potencial, salinidad y densidad potencial respectivamente para el sur de la región. En la Figura 11 en invierno y primavera, la temperatura potencial está por debajo de los  $17^{\circ}\text{C}$ , azules poco intensos se tienen de punta concepción a San Diego a 200 km de la costa. En ambas estaciones del año, se observa frente a las costas de San Diego un gancho

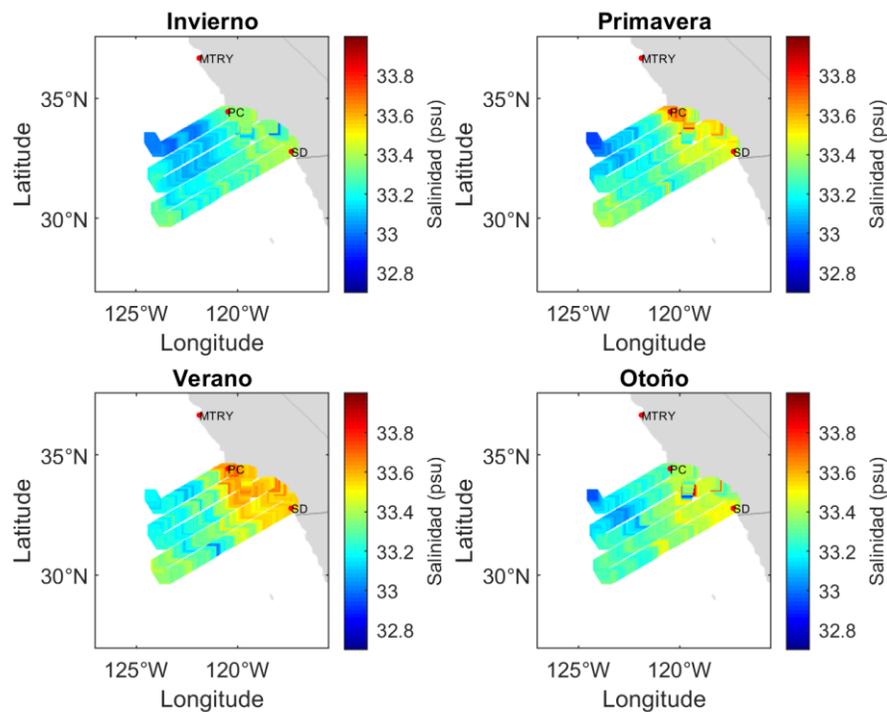
de temperatura potencial cálida que está lejos de la costa entre los 29° y 32°N y en la línea de costa. En verano cerca de la costa, entre los 32° y 34°N se observan temperaturas potenciales frías ( $\sim 16^\circ\text{C}$ ) que se mueven mar adentro desde Punta Concepción, lejos de la costa, los colores se tornan amarillos, se observa que mar adentro y a aproximadamente 200 km de la costa las tonalidades entre verde y amarillo son similares, frente a San Diego, se ven los colores cálidos de  $\sim 23^\circ\text{C}$  que son los mayores de todas las estaciones del año. En primavera y en verano, se muestran los gradientes más fuertes de temperatura potencial, principalmente cerca de la costa. En otoño, las temperaturas potenciales se observan menos variables que en las demás estaciones, observándose colores similares de amarillo a azul verde claro, en Punta concepción se observan la temperatura potencial más bajas de la estación, en la parte sur frente a San Diego hay temperatura potencial cálida mar adentro y frente a las costas con tonos similares de la barra de colores ( $\sim 19^\circ\text{C}$ ), lo que indica la presencia de gradientes poco pronunciados.



**Figura 11:** Cintillas del promedio de temperatura potencial estacional, para invierno, primavera, verano y otoño en el sur de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

La Figura 12 muestra las variaciones de la salinidad para las diferentes estaciones del año. En invierno, las salinidades se mantienen por debajo de los 33.3 PSU, encontrando las salinidades más bajas frente a punta concepción mar adentro, y las más altas de la estación cerca de la costa entre San Diego y punta concepción. En primavera y en verano, se precisan salinidades mayores a 33.7 PSU cerca de la costa de los

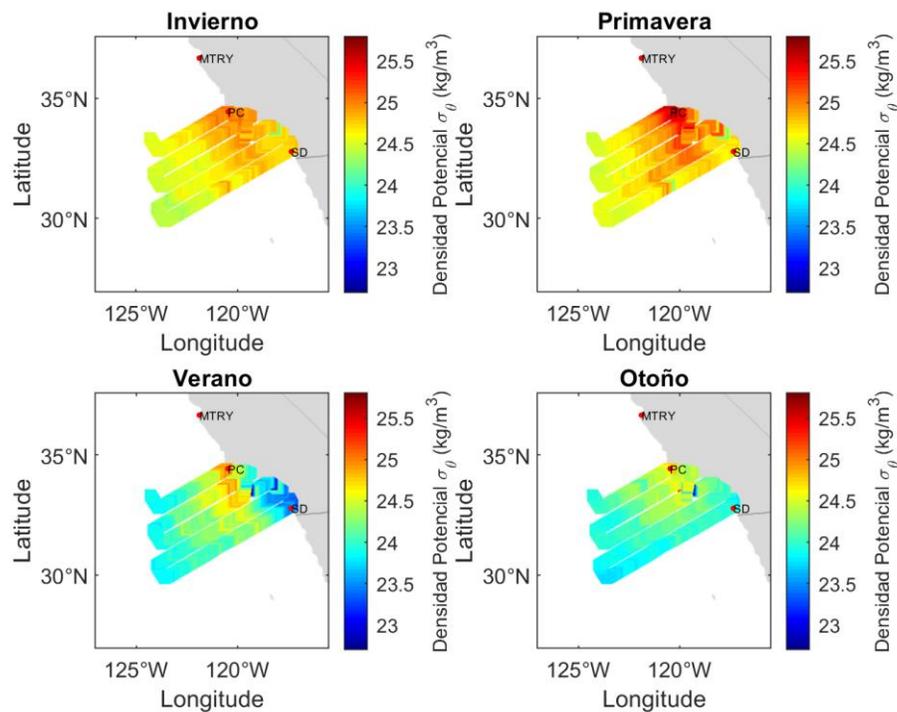
principalmente frente a Punta Concepción y gradientes intensos de salinidad. En primavera, se mantienen en salinidades intermedias a partir de los 34°N dirección sur, y bajas mar adentro frente a Punta Concepción. En el verano, debajo de los 34°N las salinidades siguen siendo altas (> 33.6 PSU), pero, menores en comparación a las que hay frente a Punta Concepción, mar adentro, se observan aguas poco saladas. En el otoño los gradientes de salinidad no son bruscos, los cambios se producen en algunos kilómetros, se mantienen las bajas salinidades lejos de la costa, frente a Punta Concepción hay salinidades de ~ 33.2 PSU, las salinidades más altas se dan al sur entre San Diego y Punta Concepción (~ 33.5 PSU).



**Figura 12:** Cintillas del promedio de salinidad estacional, para invierno, primavera, verano y otoño en la parte sur de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

La Figura 13 muestra la densidad potencial en la zona de estudio. En invierno y primavera, las densidades potenciales son altas (> 1024.4 kg/m<sup>3</sup>), más altas cerca de la costa que lejos de la costa partir de los 33°N hacia el norte, en las costas de San Diego las densidades potenciales son similares a la densidad potencial lejos de la costa, en la primavera hay densidades potenciales mayores cerca de la costa que en invierno, se muestran en color rojo oscuro alrededor de Punta Concepción, los gradientes de densidad potencial son fuertes en primavera. En el verano la mayoría de la región observada tiene densidades potenciales bajas (las más bajas del año < 1023.5 kgm<sup>-3</sup>) que se muestran en color azul oscuro principalmente en las costas de San Diego, hay salinidades bajas también mar adentro en toda la región; en Punta Concepción

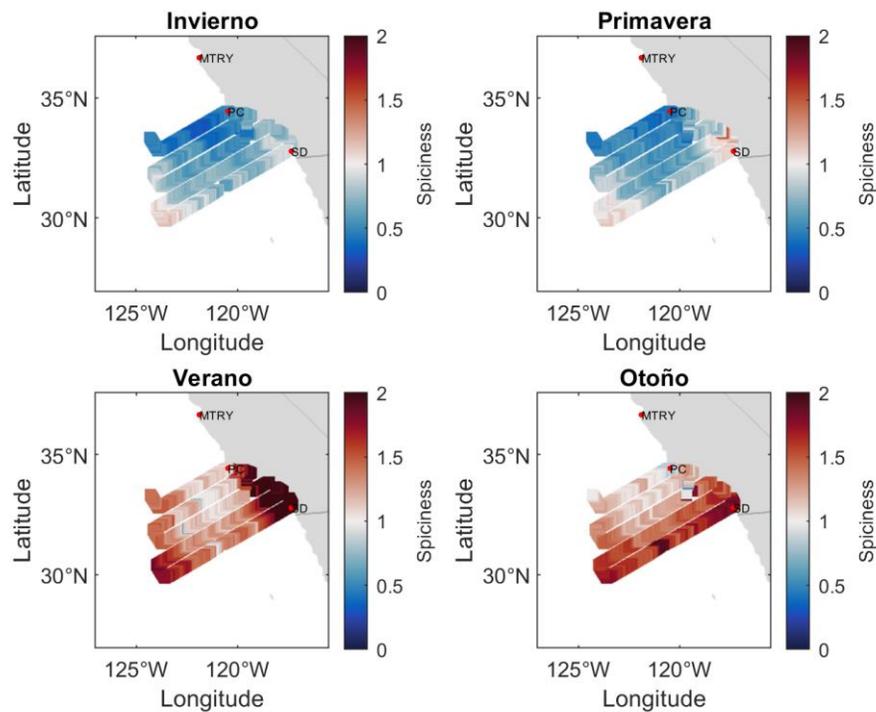
se muestran densidades potenciales mucho más altas que en el resto de la región en esta temporada, lo que ocasiona los gradientes de densidad potencial más fuertes del año en la zona sur de la región CalCOFI. En el otoño, las variaciones de densidad potencial son leves, se muestra variación cerca de la costa donde varía entre  $1024.7$  y  $1024.2 \text{ kg/m}^3$ , principalmente, frente a Punta Concepción, donde se observan las densidades potenciales mayores de la estación del año; lejos de la costa y cerca de San Diego se muestran zonas donde la variación de la densidad potencial es casi imperceptible manteniéndose la densidad potencial casi como una constante en  $1023.9 \text{ kg/m}^3$ , como se observa en la figura en tonalidades azul cielo.



**Figura 13:** Cintillas del promedio de densidad potencial estacional, para invierno, primavera, verano y otoño en el sur de la región. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

La *spiciness* calculada para los promedios de la parte sur se muestra en la Figura 13 para cada una de las estaciones del año. En invierno y primavera agua fría y poco salada domina la mayor parte de la región CalCOFI, se encuentran valores de  $\sim 0.5 \text{ kg/m}^3$  en el centro de cada una de las líneas y frente a Punta Concepción, hay valores más altos de *spiciness* mar adentro y cerca de las costas de San Diego. El caso de primavera es similar al de invierno, pero se tienen calores ligeramente más elevados de *spiciness* que en invierno frente a las costas de San Diego. Los valores máximos de dicha variable se encontraron en el verano ( $\sim 1.98 \text{ kg/m}^3$ ), fuera de la costa y cerca de la costa entre San Diego y Punta Concepción, en longitudes alrededor de  $120^\circ\text{O}$  se observan valores de *spiciness* más bajos, el valor más bajo se encuentra

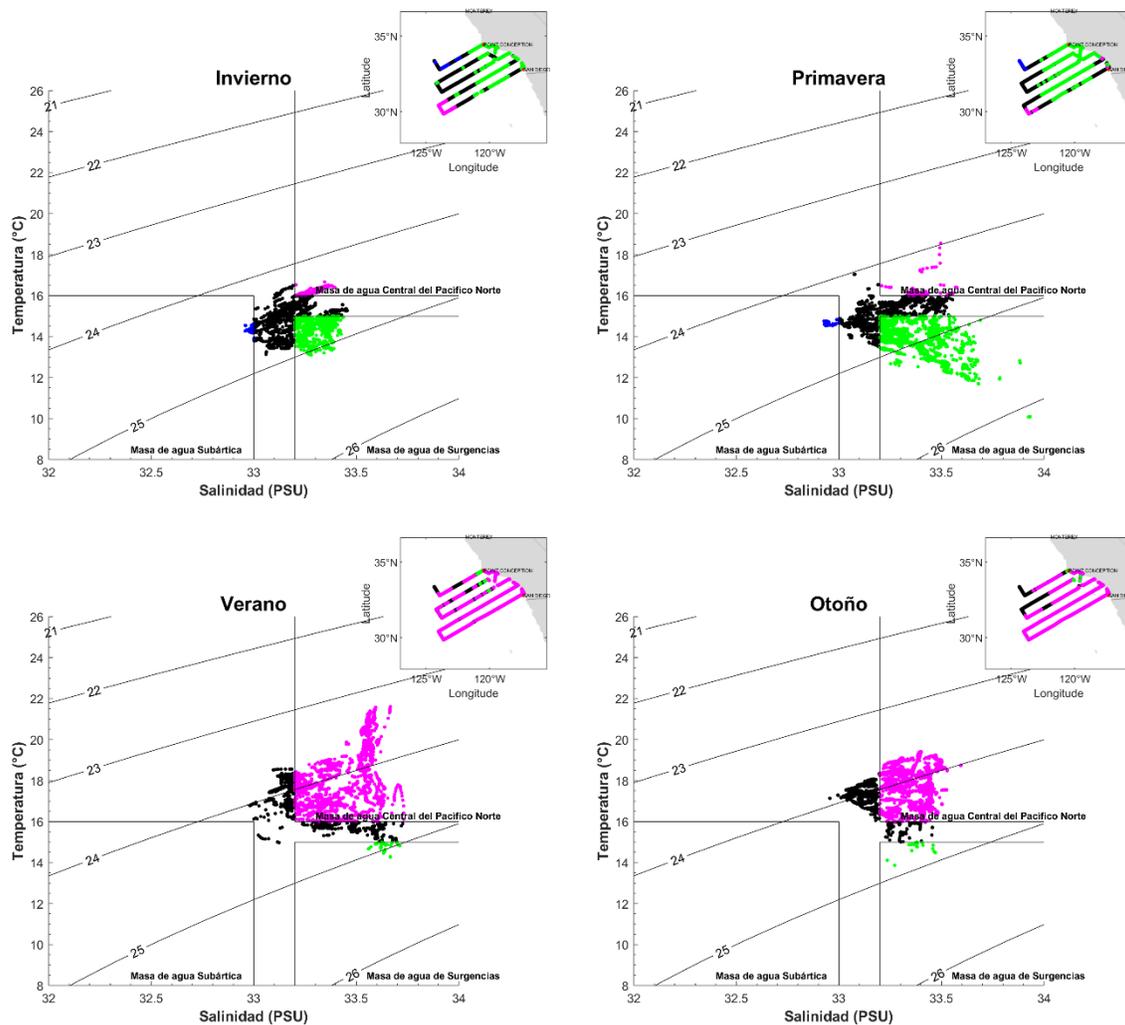
a los 120°O y entre más se aleja de esa longitud los valores aumentan. En el otoño al sur de la región se ve un fenómeno similar al del verano, pero con variaciones del valor de *spiciness* menores, los valores más bajos en esta época el año están al norte de Punta Concepción y se observan también a ~ 200 km de la costa. De todo lo anterior se colige que en invierno y en primavera las masas de agua dominantes son las frías y poco saladas, mientras que, en verano y otoño, dominan las cálidas y saladas.



**Figura 14:** Spiciness promedio para la parte sur de la región, estaciones de invierno, primavera, verano y otoño.

Los diagramas T-S mostrados en la Figura 15 mostraron la ocurrencia y predominancia de las diferentes masas de agua en la zona, mismas que fueron localizadas en las cintillas. En la Figura 15 se muestra el diagrama T-S de invierno en la esquina superior derecha, en él se muestran las masas de agua que predominan en la zona, como se muestra en la cintilla que lo acompaña, la masa de agua Subártica ocupa gran parte de la región lejos de la costa en la zona más al norte; cerca de la costa, la masa de agua de Surgencias aparece desde Punta Concepción hasta San Diego y mar adentro aparece poca agua central del Pacífico Norte. En el diagrama T-S de primavera se observa la masa de agua de Surgencias cubriendo casi toda la región sur CalCOFI, la masa de agua Subártica se observa poco lejos de la costa frente a Punta Concepción, la masa de agua central del Pacífico Norte se encontró al sur de la región frente a San Diego,

cerca de la costa y lejos de la costa, en medio de las diferentes masas de agua se muestra la masa de agua típica de la región marcada en negro.

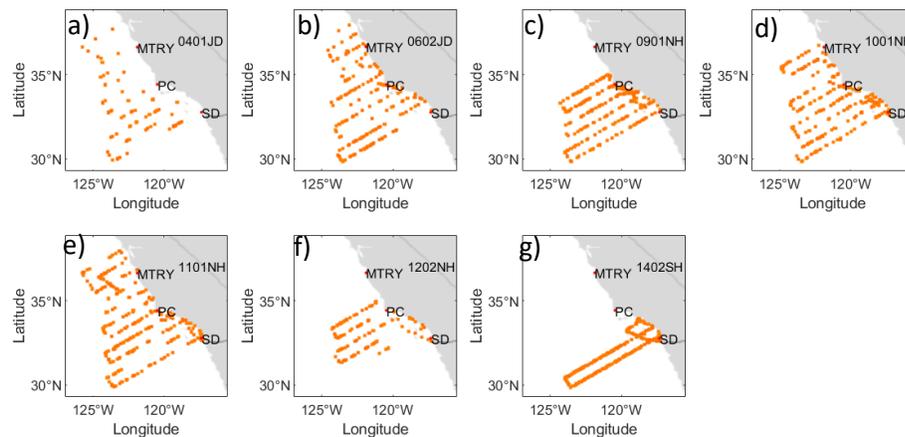


**Figura 15:** Diagramas T-S para invierno, primavera, verano y otoño del promedio de los cruceros, junto con su respectiva cintilla para la localización de las masas de agua en el mapa de la región. 1) Masa de agua Subártica (azul), 2) Masa de agua de Surgencias (verde), 3) Masa de agua Central del Pacífico Norte (magenta), 4) Agua mezclada o típica (negro).

En verano y otoño los diagramas T-S muestran el sur de la región cubierto por la masa de agua Central del Pacífico Norte en su mayoría, cerca de Punta Concepción hay aparición de la masa de agua de Surgencias en pocas cantidades, se observa principalmente en el verano, en el otoño se observan menos puntos, no hay presencia en estos meses de la masa de agua Subártica. En el verano se ven dispersos los puntos de temperatura potencial versus salinidad, al contrario del otoño en el cual se concentran, lo que indicaría

que en algunos lugares la densidad potencial se mantendría constante entre  $1023.8$  y  $1025 \text{ kgm}^{-3}$ , es la época del año donde se encuentran más concentrados.

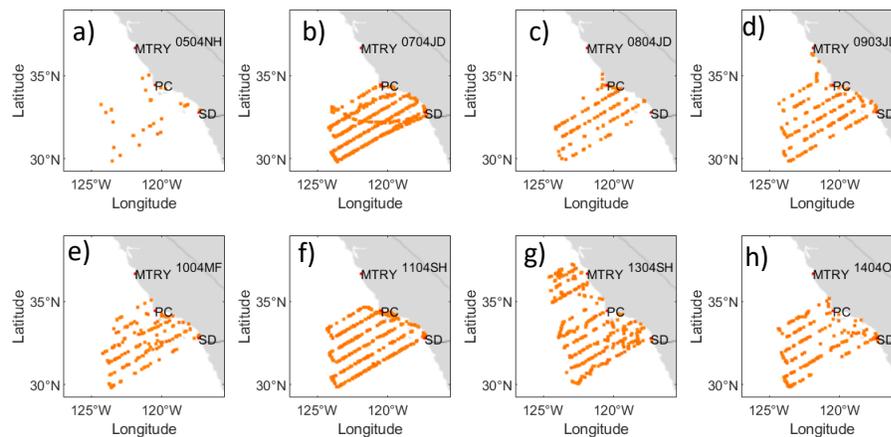
Comparando la variable *spiciness* con las masas de agua se confirma que la masa de agua de Surgencias presenta valores de  $\sim 0.5 \text{ kg/m}^3$ , la masa de agua Subártica no se observó en gran medida en esta zona de la región, por lo que ya no fue comparable, la masa de agua Central del Pacífico Norte tiene valores altos de *spiciness* que se encuentran en torno a  $1.5 \text{ kg/m}^3$  y hasta  $2 \text{ kg/m}^3$ . La masa de agua mezclada o típica de la región por lo regular tiene *spiciness* de  $1 \text{ kg/m}^3$ .



**Figura 16:** Ángulo de Turner igual a  $\frac{\pi}{4}$  (naranja) para cada crucero de invierno a) 0401JD, b) 0602JD, c) 0901NH, d) 1001NH, e) 1101NH, f) 1202NH, g) 1402SH, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujan.

Posteriormente a lo anterior, se calcularon con Matlab y TEOS-80  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S$ , para continuar con los objetivos, y con ellos R y Tu. Se hicieron cintillas de cada propiedad, sin embargo, las más útiles para encontrar compensación en la región de estudio fueron las de Tu, se explica por qué en la metodología. Debido a la continuidad de los datos y a que el parámetro Tu suele ser muy ruidoso no se pudieron obtener promedios de los datos, por lo que las cintillas realizadas fueron crucero a crucero para evitar pérdida de información y mantener la coherencia de los datos. De cada uno de los cruceros que se tienen se calculó el parámetro R con un  $\Delta d = 1 \text{ km}$ . Obteniendo así gradientes de salinidad y temperatura potencial cada kilómetro. Los cruceros que se muestran están divididos por estaciones del año: invierno (Figura 16), primavera (Figura 17), verano (Figura 18) e otoño (Figura 19), en ellos se muestran coloreadas en naranja las secciones donde existe compensación, es decir,  $Tu = \frac{\pi}{4}$ .

Los cruceros en invierno muestran al norte de la región CalCOFI (a la altura de las costas de Monterey) zonas compensadas y puntuales en los cruceros de enero de 2004, febrero de 2006, enero de 2010 y enero de 2011. Cerca de la costa se observan varios lugares donde hay compensación, los más evidentes son entre las costas de San Diego y Punta Concepción, generalmente a estas mismas latitudes a  $\sim 100$  km de la costa, se encuentran puntos más espaciados. Desde los  $29^{\circ}\text{N}$  y hasta los  $34^{\circ}\text{N}$  mar adentro se observan secciones continuas de compensación de  $\sim 200$  km que se mantienen en todos los cruceros, principalmente en las dos primeras líneas de abajo hacia arriba.



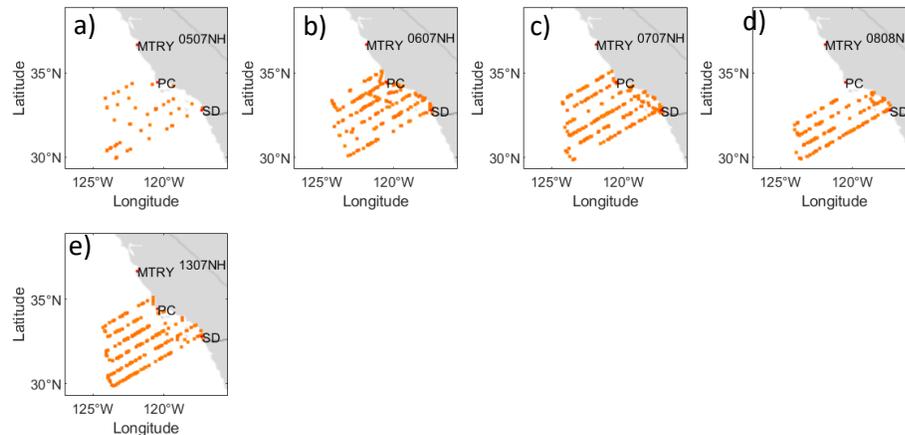
**Figura 17:** Ángulo de Turner igual a  $\frac{\pi}{4}$  (naranja) para cada crucero de primavera a) 0504NH, b) 0704NH, c) 0804JD, d) 0903JD, e) 1004MF, f) 1104SH, g) 1304SH, h) 1404OS, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron.

Los cruceros en primavera muestran compensación en secciones continuas al sur de la región CalCOFI principalmente alejadas de la costa, similar a lo que se observa en el invierno; se destaca que en la zona sur a  $\sim 200$  km de la costa suelen haber espacios en blanco (zonas sin compensación). Los años que mostraron mayor concentración de compensación fueron 2007, 2011, 2013 y 2014, eso sin olvidar que en los demás años también hubo. A diferencia de la estación del año anterior, en esta época entre las costas de San Diego y Punta Concepción no se muestra agrupamiento de compensación, los puntos se encuentran más dispersos.

En el norte de la región de estudio en primavera se observó en abril de 2013 compensación, con lo que se muestra que hay compensación en varios puntos de la región norte tanto cerca como lejos de la costa.

Como algunos cruceros de primavera, los cruceros de verano y otoño solamente cubren hasta la línea hidrográfica 76.6, por lo que se observa solamente la región sur. Esta zona en verano los cruceros de la

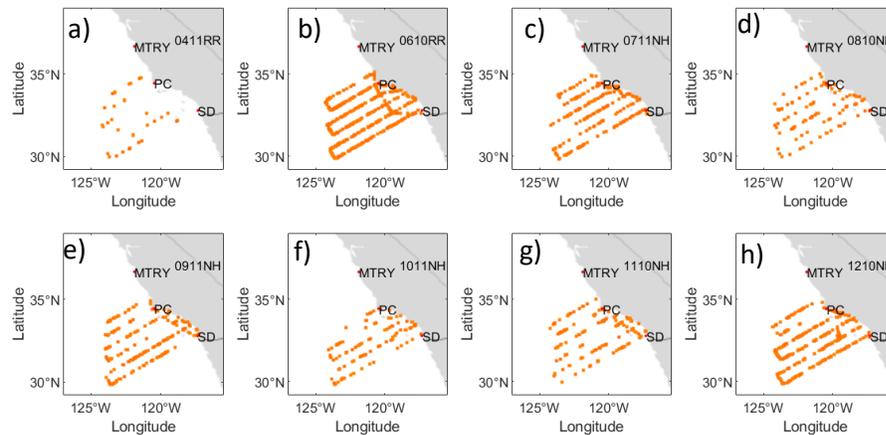
región tienen compensación dispersa en varios puntos y algunos segmentos de compensación muy marcados. Se observa que hay algunos puntos de compensación entre las costas de Punta Concepción y San Diego, después a  $\sim 100$  km de la costa, hay segmentos donde no hay compensación, posteriormente entre  $\sim 200$  y  $\sim 400$  km mar adentro vuelve a haber compensación, la compensación se mantiene en algunos años hasta el final de las líneas. Julio de 2007 fue el año que mostró menos compensación.



**Figura 18:** Ángulo de Turner igual a  $\frac{\pi}{4}$  (naranja) para cada crucero de verano a) 0507NH, b) 0607NH, c) 0707NH, d) 0808NH, e) 1307NH, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron.

En otoño las secciones de compensación son de hasta  $\sim 300$  km. Los años que mostraron menor compensación fueron noviembre de 2004, octubre de 2008 y noviembre de 2011, en los demás cruceros no se pudo encontrar un patrón de los lugares donde no hay compensación como en las otras épocas del año, en algunos de muestra a  $\sim 100$  km de la costa, pero en otros en esas mismas longitudes hay compensación.

En el otoño, hay compensación cerca y lejos de la costa en toda la parte sur de la región CalCOFI. En cualquier época del año hay compensación en la región CalCOFI, en mayor o menor medida y variaciones en su localización.



**Figura 19:** Ángulo de Turner igual a  $\frac{\pi}{4}$  (naranja) para cada crucero de otoño a) 0411RR, b) 0610RR, c) 0711NH, d) 0810NH, e) 0911NH, f) 1011NH, g) 1110NH, h) 1210NH, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron.

### 3.1.2 Análisis de ondeletas

Se realizó análisis de ondeletas obteniendo los coeficientes determinados en escala y distancia y se multiplicaron por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente ( $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S$ ). Buscando encontrar regiones donde dominara la compensación como en el ejercicio de las cintillas se realizó una descripción estadística de los coeficientes de ondeletas, para se tomaron solamente las partes reales de los coeficientes para las longitudes de onda entre 5 km y 50 km y se realizaron PDF's.

De todas las PDF's obtenidas de la frecuencia del ángulo de Turner en los 35 cruceros se encontró que las que tuvieron mayor ocurrencia fueron cuatro, éstas se muestran en la Figura 20, cada una perteneciente a un tipo de frente diferente.

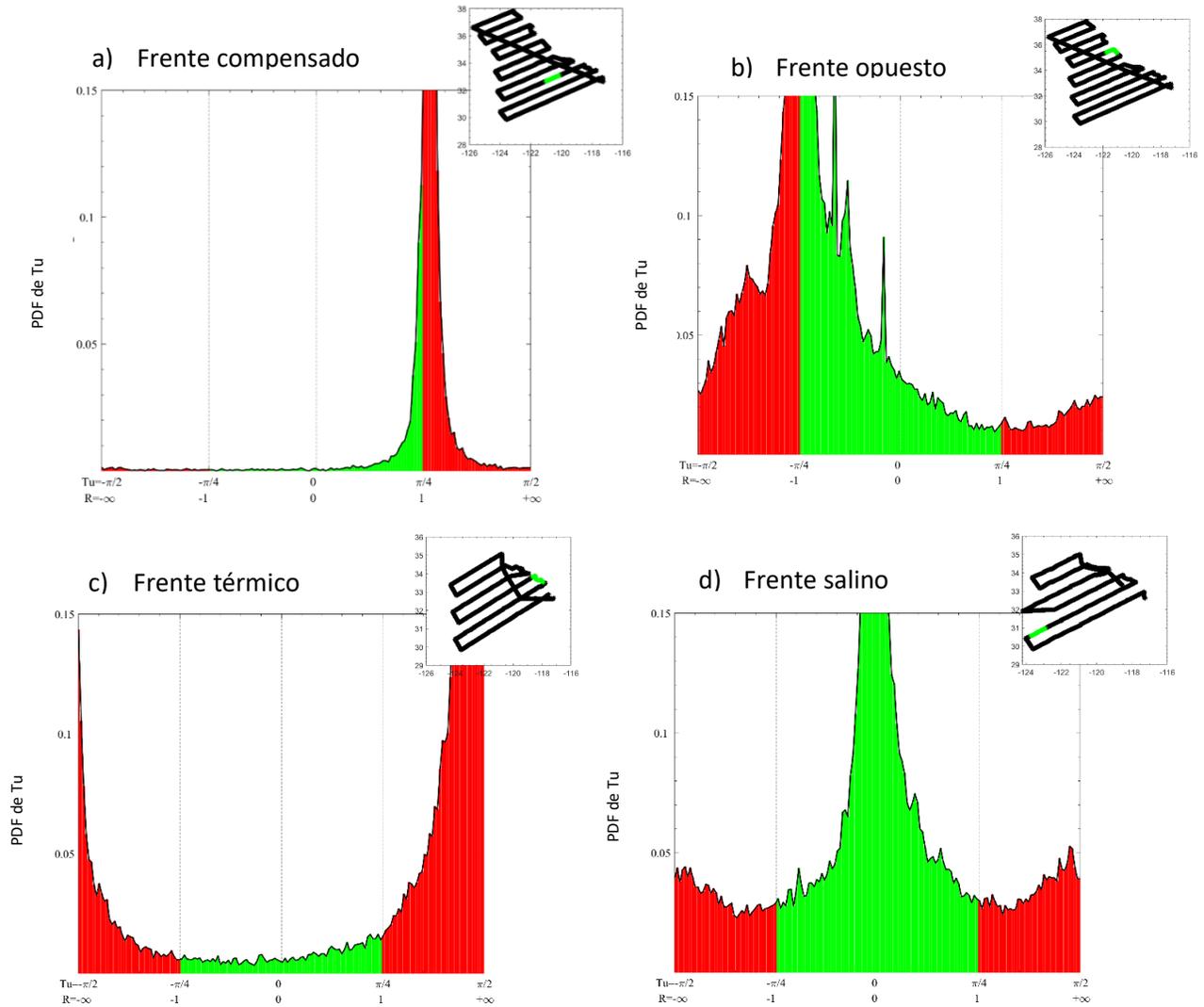
Se determinó el nombre de cada frente con base en los estudios previos, como el frente compensado; y por el frente mostrado, como el opuesto, el de salinidad y el de temperatura potencial. Es importante mencionar que los frentes de temperatura potencial y de salinidad también son frentes de densidad, pero con características especiales.

Las propiedades encontradas en el análisis de ondeletas para cada uno de los frentes se describen en un apartado individualmente con su ubicación, PDF, diagrama de dispersión, mediana, pendiente de la elipse y la series de distancia.

La Figura 20 muestra también las secciones (marcadas en las cintillas superiores) de 100 km de longitud, en las cuales se obtuvieron las PDF's mostradas, las longitudes de onda analizadas son desde 5 hasta 20 km, cada uno incluye el nombre del frente. Se encontró que el frente compensado (Figura 20a) posee concentración de los coeficientes de ondeleta en  $R = 1$  o  $Tu = \frac{\pi}{4}$  para todas las longitudes de onda, en los demás valores de  $R$  o  $Tu$  la probabilidad de observarlos es poca; en el frente opuesto, las mayores frecuencias se encuentran en los valores cercanos a  $R = -1$  o  $Tu = -\frac{\pi}{4}$ , los demás valores también tienen ocurrencia, aunque, en menor medida, este frente fue el más inestable que se encontró debido a que se esperaba que su PDF fuera similar a la del frente de compensación pero en negativo, sin embargo, lo más parecido que se encontró en todas las PDF's estudiadas, fue el que aparece en la Figura 20b; el frente térmico en la Figura 20c tiene una PDF similar a un columpio, donde son frecuentes los valores extremos ( $Tu = \pm \frac{\pi}{2}$ ), los valores centrales del columpio tienen poca ocurrencia; la PDF del frente salino se encuentra centrada en  $Tu = 0$ , y las frecuencias de los valores alrededor menores como se observa en la Figura 20d.

Se realizaron diagramas de pastel para estudiar la estacionalidad de cada uno de estos eventos tomando como referencia las PDF's de la Figura 20, y se agregó la categoría de zonas no identificadas en la cual se consideró a todas aquellas PDF's que no entraron dentro de ninguna de estas categorías, estos PDF's muestra combinación de los anteriores o no muestran que ninguna propiedad sea la que domina. Los diagramas de pastel consideran los eventos de escalas desde 5 km hasta 20 km, y para el cálculo se tomaron en cuenta todos los cruceros de cada una de las estaciones del año, donde se realizó una suma acumulativa para cada uno de los eventos mostrados.

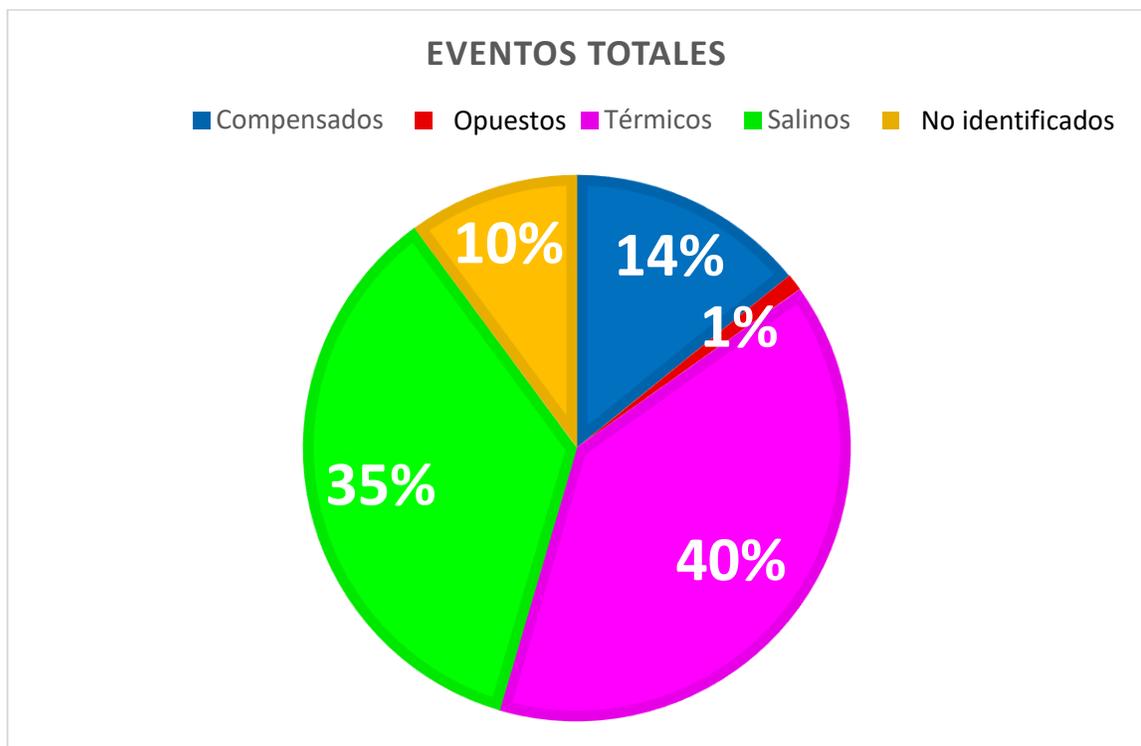
En la Figura 21 se muestra el gráfico de pastel el total de los eventos computados, donde se observa que los frentes térmicos son los más observados (40 %) en los 35 cruceros, los frentes salinos ocupan también una parte importante del total de frentes (35 %), los frentes compensados son el tercer lugar de los frentes totales, observados en un 14 %, los eventos no identificados son el 10 % del total de eventos y los menos comunes para la región de estudio son los frentes opuestos con una ocurrencia del 1 % del total.



**Figura 20:** PDF's característicos de a) Frente compensado: centrado en  $R = 1$ , en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del cruce de enero de 2004. b) Frente opuesto: centrado en  $R = -1$ , en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del cruce de enero de 2004. c) Frente térmico: a los lados en  $R = \pm\infty$ , en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del cruce de octubre de 2006. y d) Frente salino: centrado en cero, en la parte superior se muestra la ubicación exacta del frente en color verde, en el recorrido del cruce de noviembre de 2007.

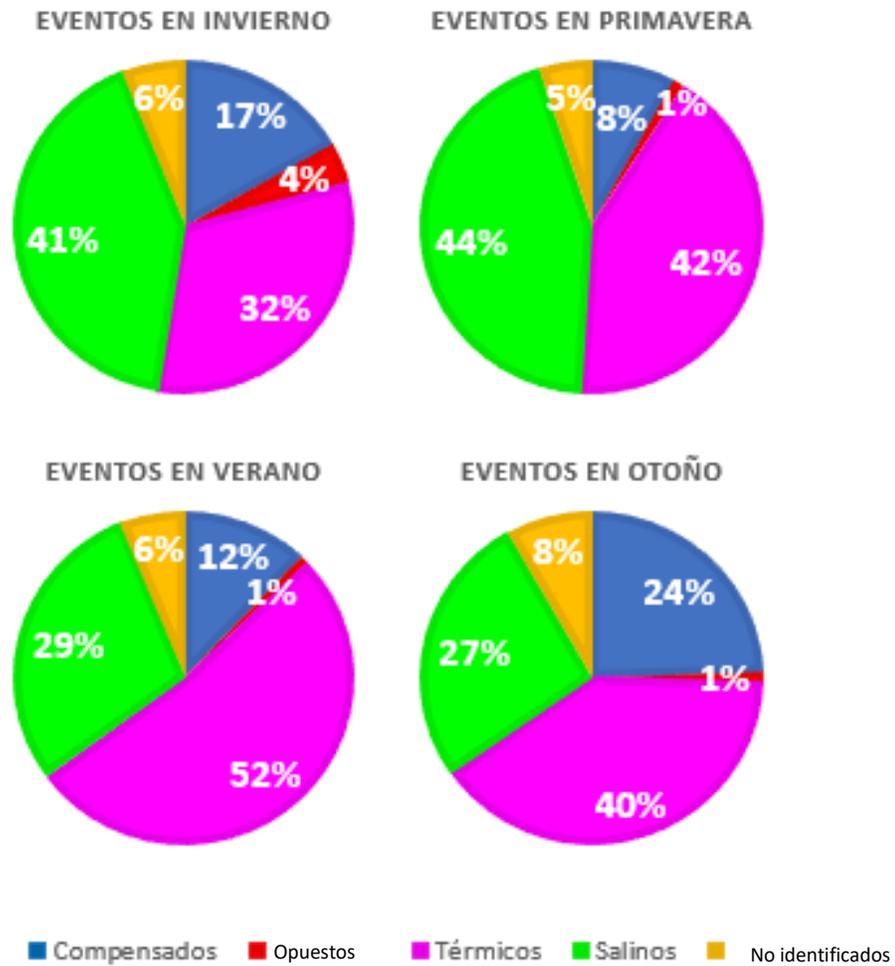
En la Figura 22 muestran a los eventos en cada época del año, para estos cálculos se realizó la suma acumulativa de los cruces por temporada que se muestra en la Tabla 4 del presente trabajo para estudiar la estacionalidad de los frentes. El invierno es la época del año donde se registraron más frentes opuestos (4 %), el segundo lugar en frentes compensados (17 %) y el segundo lugar de frentes salinos (42 %); los eventos denominados como otros aparecen en un 6 % del total de los eventos revisados. En primavera se muestra la mayor cantidad de eventos salinos (44 %), a la par de los eventos térmicos (42 %); los frentes compensados ocupan solo el 8 % del total de los eventos, los eventos no identificados con el 5 % ambos

eventos son los registrados en menor cantidad durante todas las épocas del año; los frentes de densidad están presentes en 1 %. En el verano el gráfico de pastel de la Figura 22 muestra que los frentes térmicos son los más abundantes 52 % siendo la época del año que registra el mayor porcentaje de frentes térmicos; los frentes salinos ocupan el 29 %; los frentes compensados están presentes en un 12 %, los no definidos tienen una ocurrencia del 6 % y los frentes opuestos ocupan un porcentaje muy pequeño menor al 1 %. El otoño es la época del año donde la compensación es mayor con el 24 %; los frentes salinos se muestran menos que en otras épocas del año (28 %); los eventos térmicos disminuyen con respecto al verano y solo ocupan el 39 %; los no identificados están presentes en el máximo del año con el 8 % y los frentes opuestos solamente tienen el 1 % del total.



**Figura 21:** Diagrama de pastel de los eventos, un total de 13863. La Figura muestra la suma acumulativa de todos los cruceros para cada uno de los frentes observados. El evento dominante es el térmico con 39 %, seguido del salino con el 35 %, el compensado tiene el 14 %, los no identificados el 10 % y los opuestos 1 %.

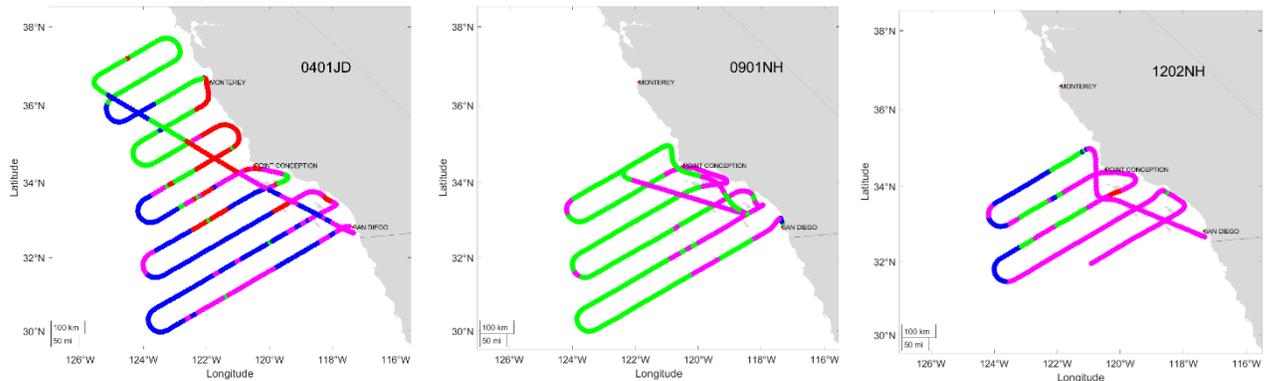
Por medio de cintillas se visualizó la ubicación de cada uno de los frentes en la región CalCOFI. Los resultados se muestran explicados en las Figuras 23 a 26, donde se tiene para cada una de las estaciones del año tres cruceros que ejemplifican a la temporada, en color azul están marcados los frentes compensados, en color rojo los frentes opuestos, en magenta los frentes térmicos y en verde se tiene a los frentes de salinidad.



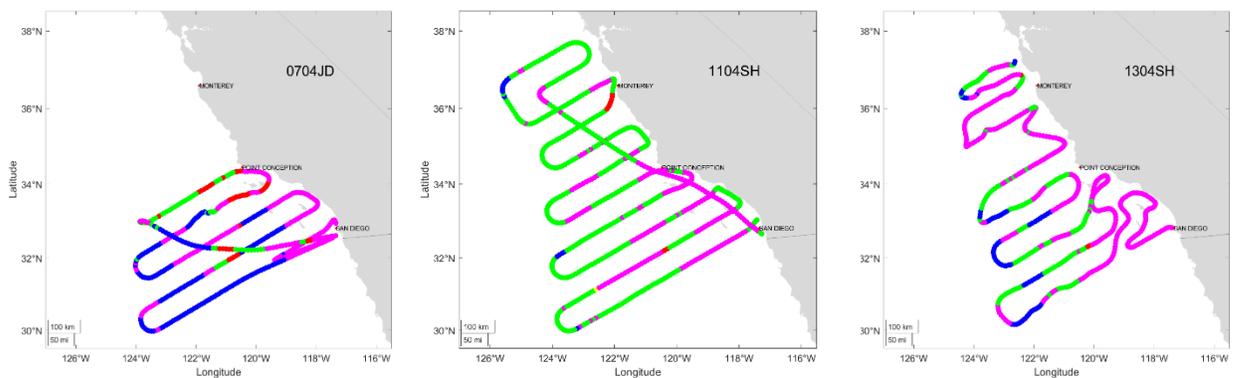
**Figura 22:** Diagramas de pastel para los eventos de invierno, primavera, verano y otoño. La figura se tiene la suma acumulativa de los cruceros de cada estación del año para cada uno de los frentes observados Total de eventos en invierno: 2438; total de eventos en primavera: 4247.; total de eventos de verano: 2420; total de eventos en otoño: 4758.

En la Figura 23 los frentes compensados aparecen principalmente lejos de la costa en los cruceros de enero de 2004 y febrero de 2012, en enero de 2009 se observó compensación solo frente a las costas de San Diego; en el crucero de enero de 2004 se aprecian frentes opuestos cerca de la costa entre Monterrey y Punta Concepción, también se pueden ver a ~ 400 km de la costa bajo la latitud de Punta Concepción, se observa un segmento de frente opuesto también en febrero de 2012; los frentes térmicos aparecen principalmente entre Punta Concepción y San Diego; se muestra en el crucero de enero de 2004 que los frentes de salinidad ocurren en la parte norte, arriba de Monterrey, mientras que en el crucero de enero de 2009 y el de febrero de 2012 no se puede observar dicha zona ya que en esos cruceros no se tomaron esas mediciones, sin embargo, los frentes de salinidad en estos dos cruceros están lejos de la costa en la

parte sur. En primavera, los frentes compensados aparecen lejos de la costa en la región sur, como lo muestra la Figura 24; se muestra frentes de densidad en el crucero de abril de 2007 cerca a Punta Concepción y algunos a  $\sim 400$  km mar adentro en el sur de la región; los frentes térmicos se mantienen cerca de la costa en su mayoría por toda la región de estudio; los frentes de salinidad en esta época del año se encuentran lejos de la costa principalmente, no obstante, también se notan en regiones pequeñas cercanas a la costa.



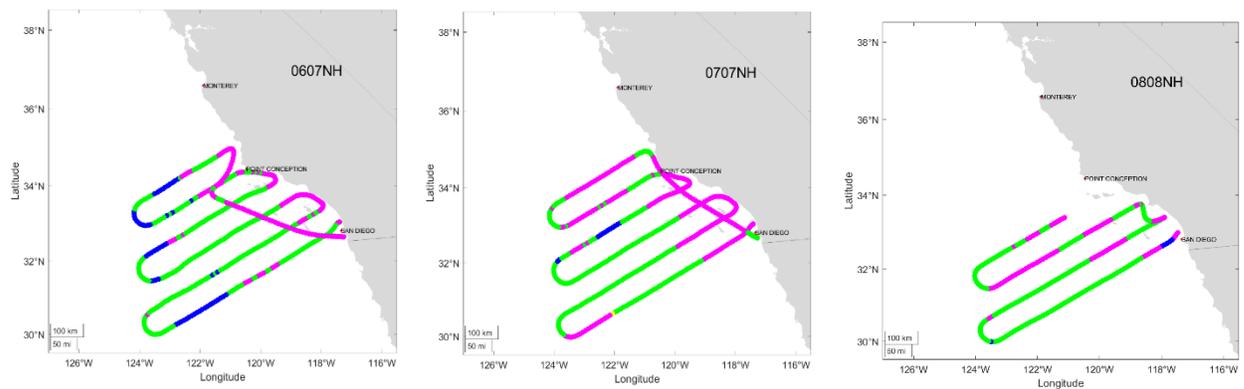
**Figura 23:** Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de enero de 2004, enero de 2009 y febrero de 2012. Frente compensado (azul), frente opuesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo).



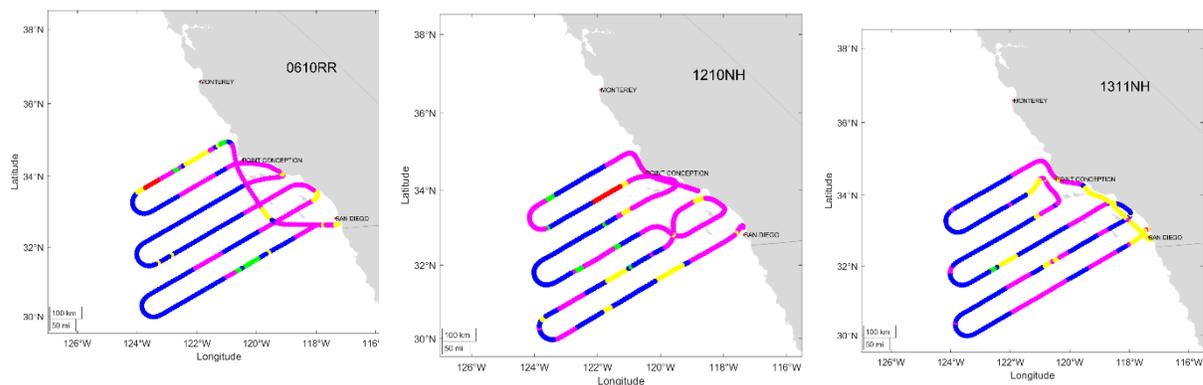
**Figura 24:** Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de abril de 2007, abril de 2011 y abril de 2013. Frente compensado (azul), frente puesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo).

En la Figura 25 se muestran tres cruceros de verano, en ellos se observa que el frente compensado está lejos de la costa en menor o mayor cantidad dependiendo del año de estudio, el crucero de julio de 2006

muestra mayor compensación que los otros cruceros. En todos los cruceros de verano los frentes de temperatura potencial se encuentran cerca de la costa, entre las costas de San Diego y Punta Concepción y los frentes de salinidad se encuentran mayormente lejos de la costa a partir de  $\sim 200$  km lejos de la costa, a excepción del crucero de agosto de 2008. Los cruceros de otoño se muestran en la Figura 26 donde se distinguen dos tipos de frentes: frente compensado y frente de temperatura potencial. El frente compensado domina en la región lejos de la costa como en las otras estaciones del año, y los frentes de temperatura potencial resaltan cerca de la costa semejante a las otras temporadas del año. Hay presencia escasa de los frentes opuestos y de los de salinidad.



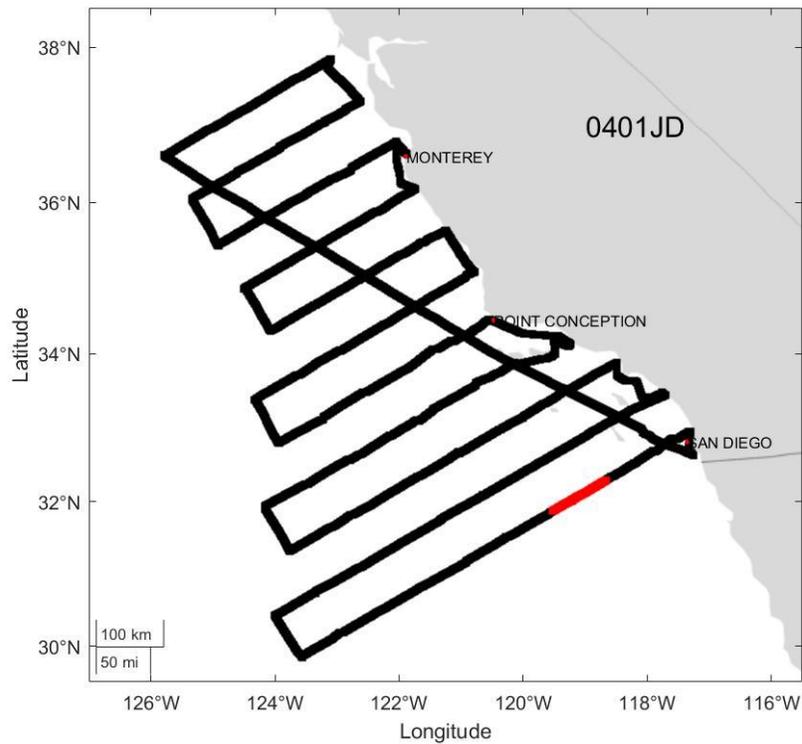
**Figura 25:** Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de julio de 2006, julio de 2007 y agosto de 2008. Frente compensado (azul), frente opuesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo).



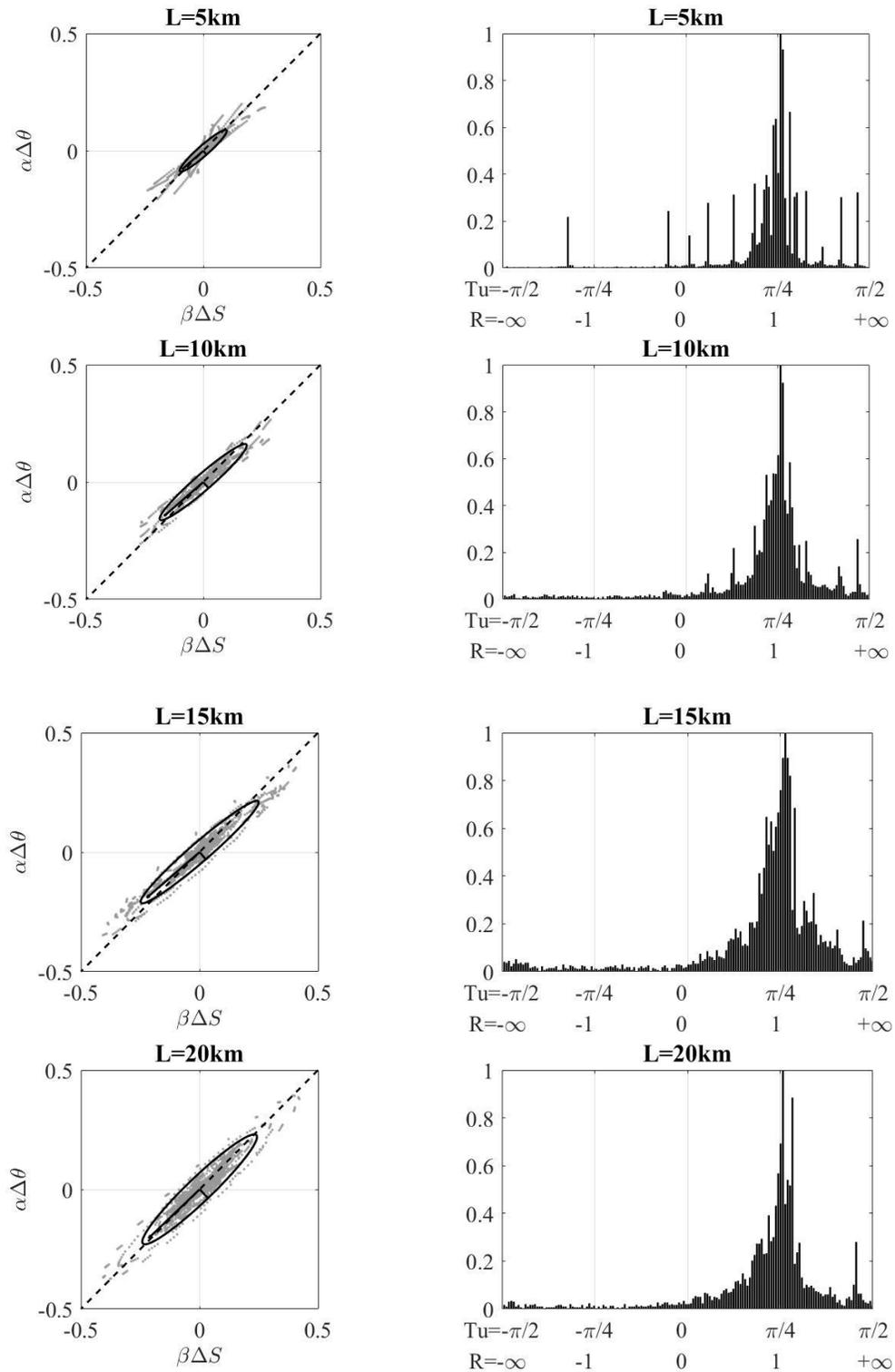
**Figura 26:** Tipos de frentes en la región de estudio para los cruceros de octubre de 2006, octubre de 2012 y octubre de 2013. Frente compensado (azul), frente opuesto (rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde), no identificado (amarillo).

### 3.1.2.1 Frente compensado

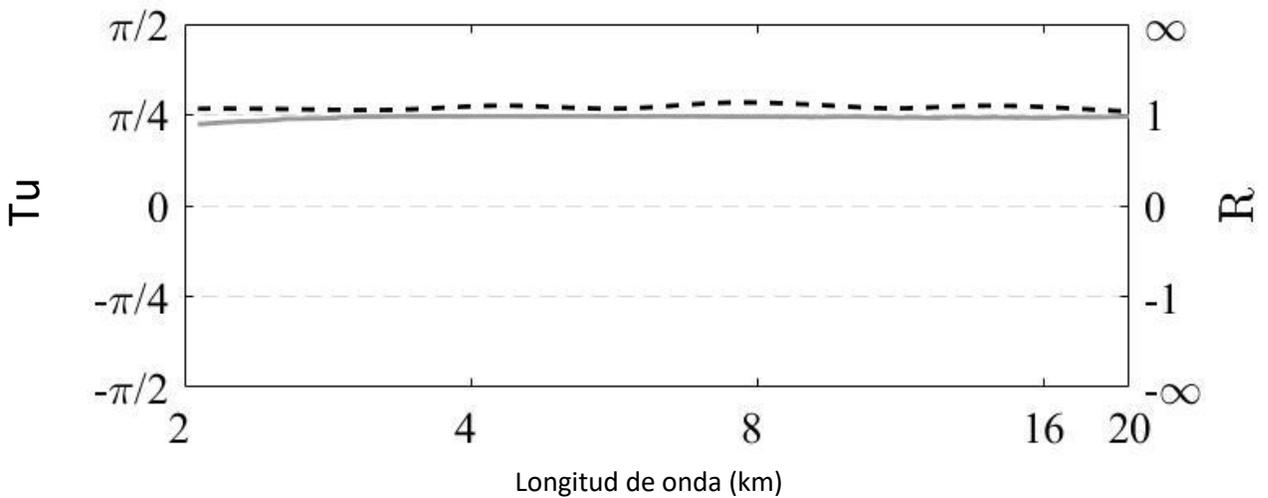
En la Figura 27 se muestra el recorrido crucero de enero de 2004, donde la zona que se encuentra en rojo es en la que se localizó la PDF del frente compensado, la franja está en la parte sur de la región de estudio a 200 km de la costa. En la Figura 28 se muestran los diagramas de dispersión y los histogramas de los coeficientes de ondeletas  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S_a$  a 5 km, 10 km, 15 km y 20 km. Los diagramas de dispersión cuentan con sus elipses características, en ellos se indica con la línea punteada la pendiente 1 y entorno a ella los puntos de este frente se alinean en todas las escalas analizadas. En los histogramas se observa las frecuencias de los coeficientes, en ellos las frecuencias de  $R = 1$  son mayores a las demás en todas las escalas. La escala en la que el histograma se mantiene mejor centrado en  $R = 1$  y los puntos del diagrama de dispersión sobre la pendiente 1 es en la de 10 km. En la Figura 29 la mediana de la razón de densidad es menor a la pendiente del eje principal de la elipse a todas las escalas porque los pequeños cambios de la temperatura potencial y la salinidad están menos correlacionados que los grandes (Rudnick y Ferrari, 2000).



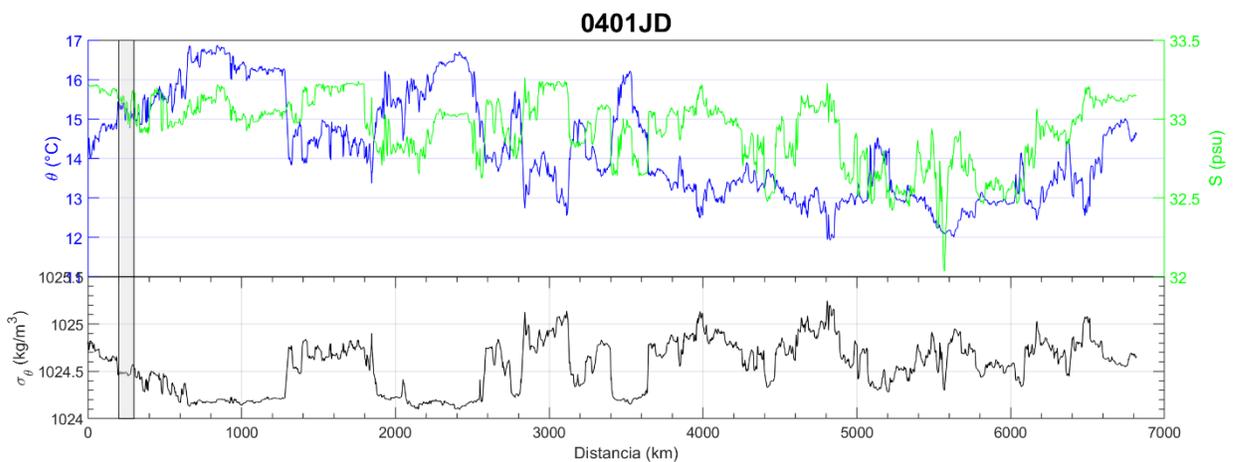
**Figura 27:** Recorrido del crucero CalCOFI de enero de 2004 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró compensación.



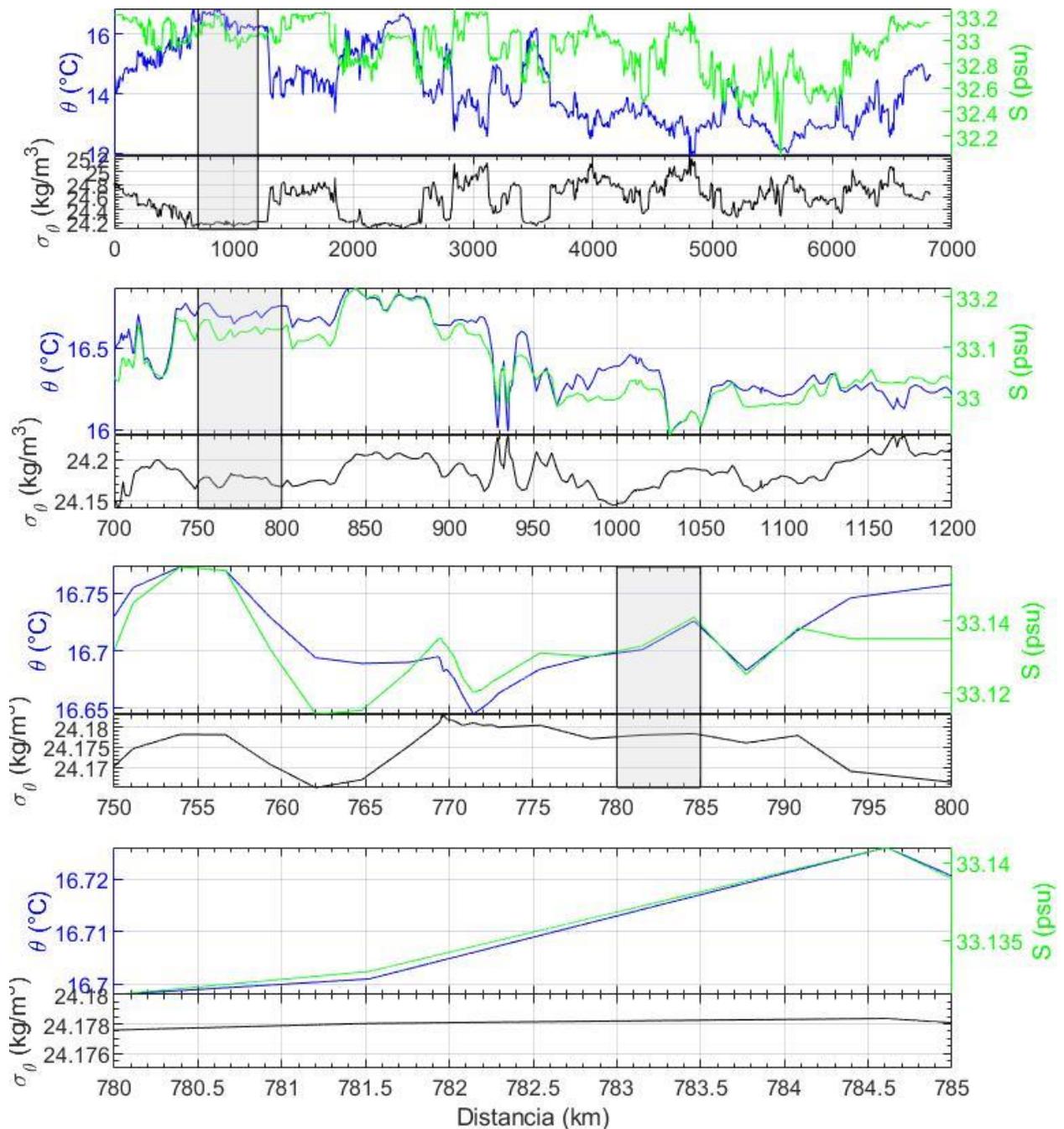
**Figura 28:** Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km, la línea punteada indica la pendiente 1. Los puntos de la distribución se encuentran a lo largo de la línea punteada lo que indica la tendencia a la compensación para todas las escalas mostradas. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, a todas las escalas estudiadas la distribución de frecuencia se encuentra concentrada en  $R = 1$ .



**Figura 29:** Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $Tu$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). Tanto el eje principal, como la mediana de la razón de densidad se encuentran cercanas a 1 en todas las escalas estudiadas de 2 a 20 km.



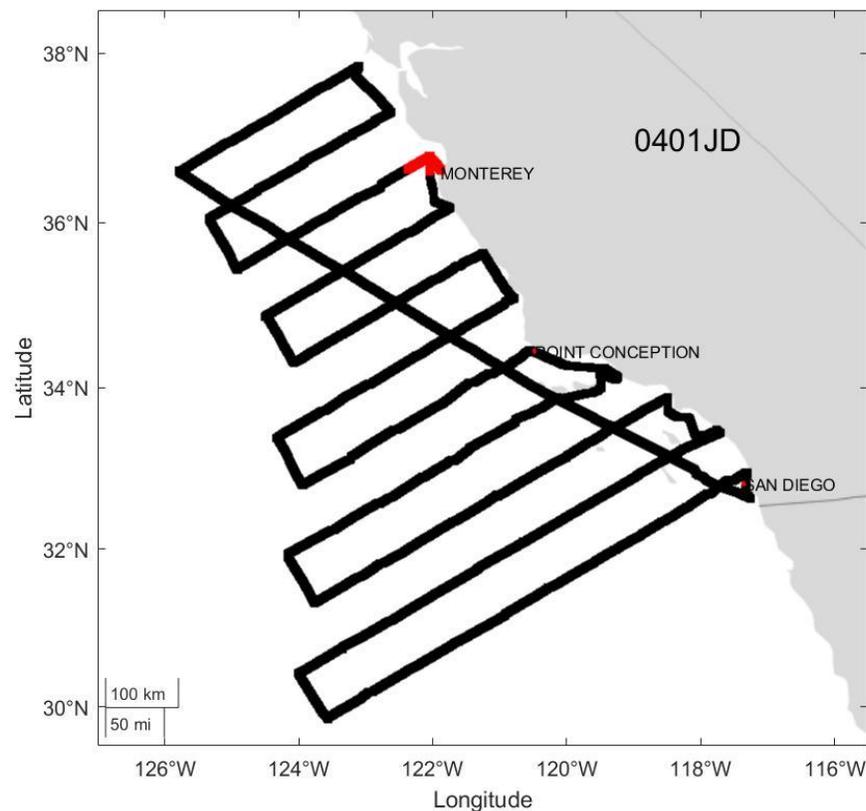
**Figura 30:** Serie de distancia del crucero de enero de 2004 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró la compensación, dicha sección se amplifica en la Figura 31.



**Figura 31:** Recorte de zona donde se muestra compensación a diferentes distancias para el crucero de enero de 2004 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_0$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Cada fluctuación de temperatura potencial está reflejada por una fluctuación de salinidad de la misma amplitud que cancela su efecto en la densidad potencial, hasta las escalas más pequeñas ( $\sim 1\text{km}$ ).

En las Figuras 30 y 31 donde se muestran las series de distancia se observa que en las franjas sombreadas que la salinidad y la temperatura potencial cambian, dicho de otra manera, tienen gradientes. Estos gradientes tienen la característica de que muestran una correlación positiva entre sí (correlación en esta zona entre las variables de 0.997), la salinidad y la temperatura potencial varían de tal manera que mantienen a la densidad potencial casi constante o con variaciones despreciables ( $\sim 0.001 \text{ Kg/m}^3$ ). Esto para cada una de las escalas de las series de distancia, que son cientos de kilómetros, decenas de kilómetros, kilómetros y 100 metros. El frente compensado, es un frente donde la salinidad y la temperatura potencial tienden a ser opuestas en su efecto en la densidad potencial y por ello se cancelan entre ellas, haciendo que la densidad potencial se mantenga constante o con variaciones despreciables.

### 3.1.2.2 Frente opuesto



**Figura 32:** Recorrido del crucero CalCOFI de enero de 2004 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró el frente opuesto.

La Figura 32 muestra el recorrido del crucero CalCOFI de enero de 2005, la región donde se encontró el PDF señalado como frente opuesto fue frente a las costas de Monterey. En la Figura 33 se muestran los diagramas de dispersión y los histogramas de los coeficientes de ondeletas  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S$  a 5 km, 10 km, 15 km y 20 km.

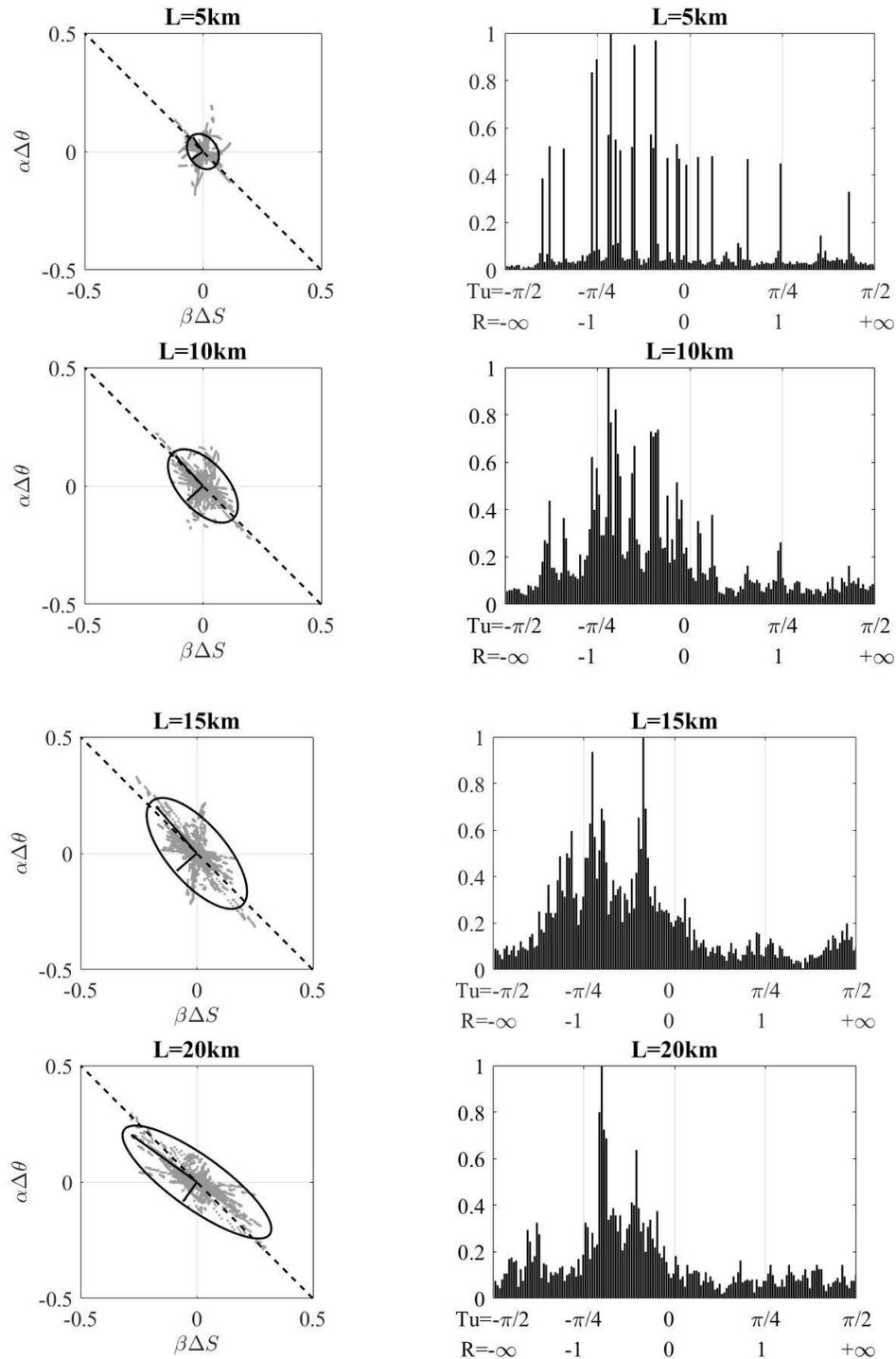
Los diagramas de dispersión muestran sus elipses características, en ellos se indica con la línea punteada la pendiente -1 y entorno a ella los puntos de este frente se alinean a los 5, 10 y 15 km, a los 20 km la pendiente se inclina hacia la izquierda.

En los histogramas se observa las frecuencias de los coeficientes, en ellos las frecuencias alrededor de  $R = -1$  son las mayores, empero en todos los histogramas existen picos en otros valores. La escala en la que el histograma se mantiene mejor centrado en  $R = -1$  y no hay picos tan altos en otros valores como los cercanos a -1; y los puntos del diagrama de dispersión sobre la pendiente -1 es en la de 10 km.

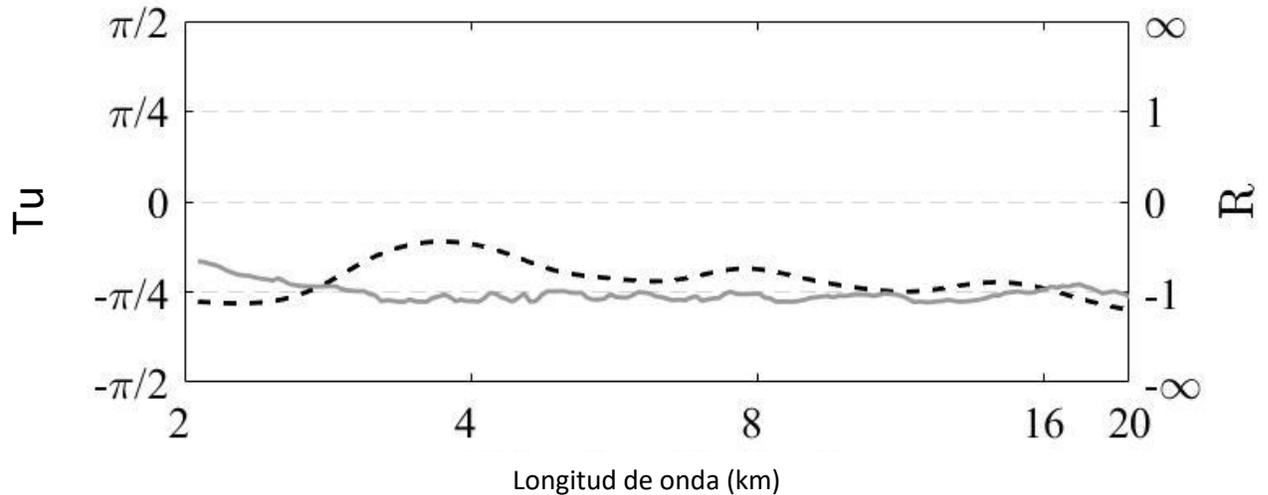
La Figura 34 considera dos medidas diferentes de la razón de densidad para visualizar sus variaciones a diferentes escalas, la pendiente del eje principal de la elipse y la mediana, en la figura entre 5 km y 16 km se mantiene entre -0.8 y -1.2. La mediana se mantiene de los 3 km a los 20 km muy cercana a -1.

En las series de distancia de las Figuras 35 y 36 se muestran la serie de tiempo del crucero con la zona donde se encontró al frente opuesto sombreado y posterior amplificaciones consecutivas del recorrido del crucero pasando por la región donde se encontró el frente opuesto. Las franjas sombreadas muestran gradientes de temperatura potencial y de salinidad, estos gradientes se correlacionan negativamente, la correlación de la salinidad y la temperatura en la zona es de -0.97, dicho en otras palabras, los gradientes son iguales, pero en sentido contrario, como se muestra en la Figura 54 a partir de la ampliación 2.

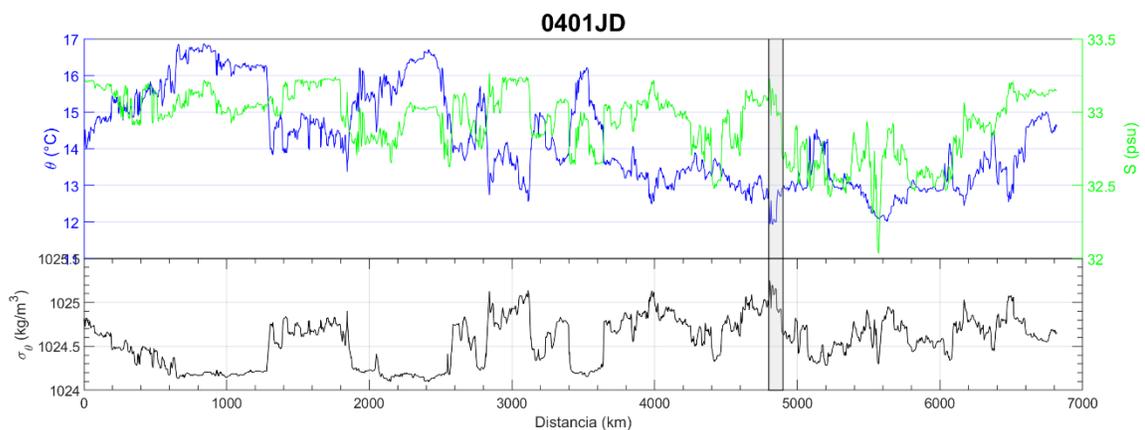
La salinidad es la que domina en este frente al gradiente de densidad potencial, ya que la densidad potencial sigue con una correlación positiva a la salinidad para escalas menores a 100 km. De lo anterior, el frente opuesto es un frente donde la salinidad y la temperatura potencial tienden a tener gradientes opuestos que amplifican al gradiente de densidad potencial, en este caso el gradiente de salinidad sigue al de densidad potencial.



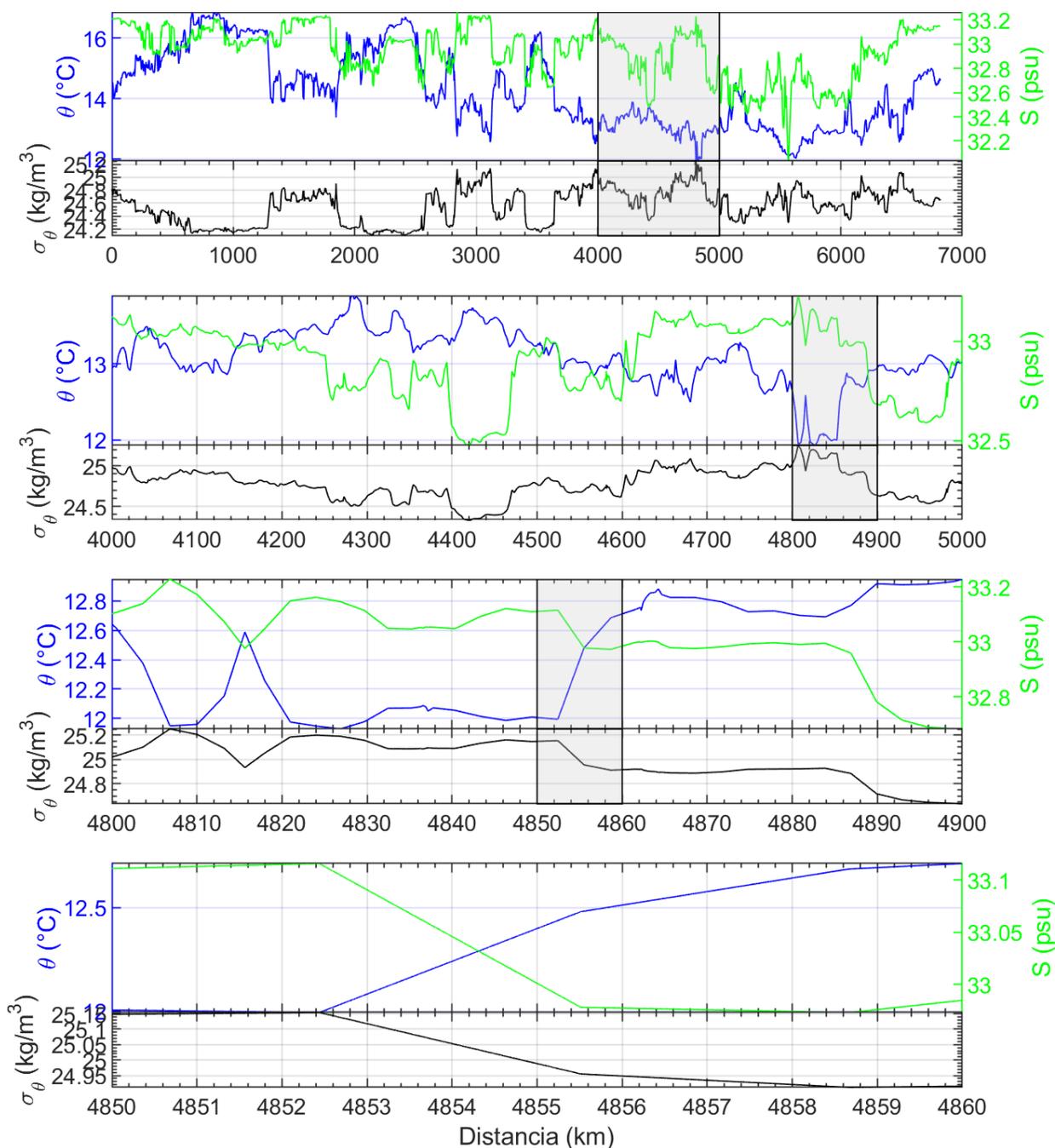
**Figura 33:** Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km, la línea punteada indica la pendiente -1. Los puntos de la distribución se encuentran a lo largo de la línea punteada lo que indica la tendencia a los frentes opuestos para todas las escalas mostradas. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, muestran distribuciones poco uniformes para las escalas de 5 km, 15 y 20 km, siendo la de 10 km en la que se muestra mayor frecuencia en  $R = -1$ .



**Figura 34:** Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $Tu$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). La mediana de la razón de densidad se muestra alrededor de  $R = -1$  a partir de 3 km y hasta 20 km, en escalas menores se aleja de  $R = -1$ . La pendiente de la elipse se muestra más cercana a  $R = -1$  en las escalas de 3 km y de 10 a 20 km. Entre 3 y 9 Km, se mantiene alejada de  $R = -1$ .



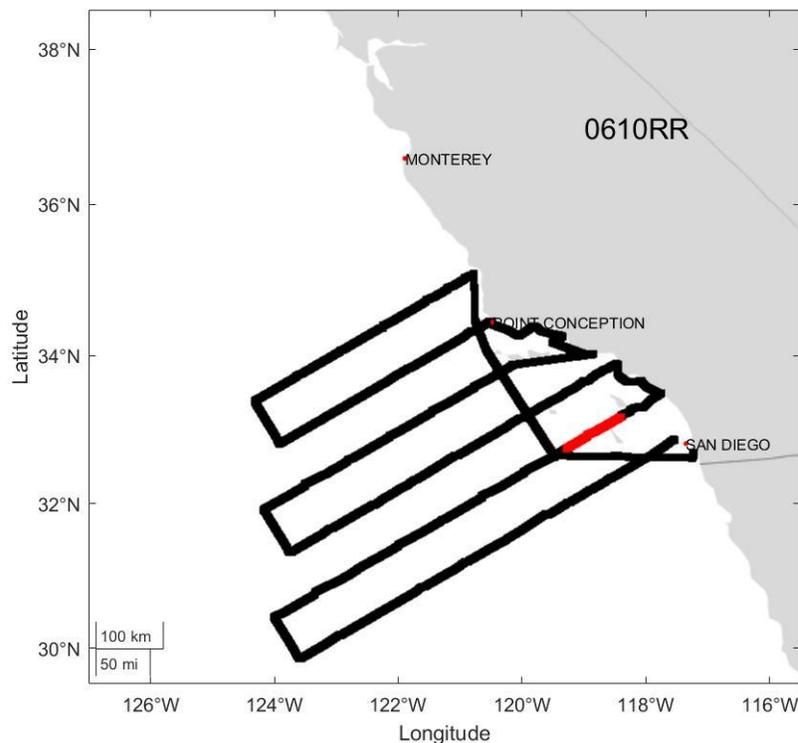
**Figura 35:** Serie de distancia del crucero de enero de 2004 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró el frente opuesto, dicha sección se amplifica en la Figura 36.



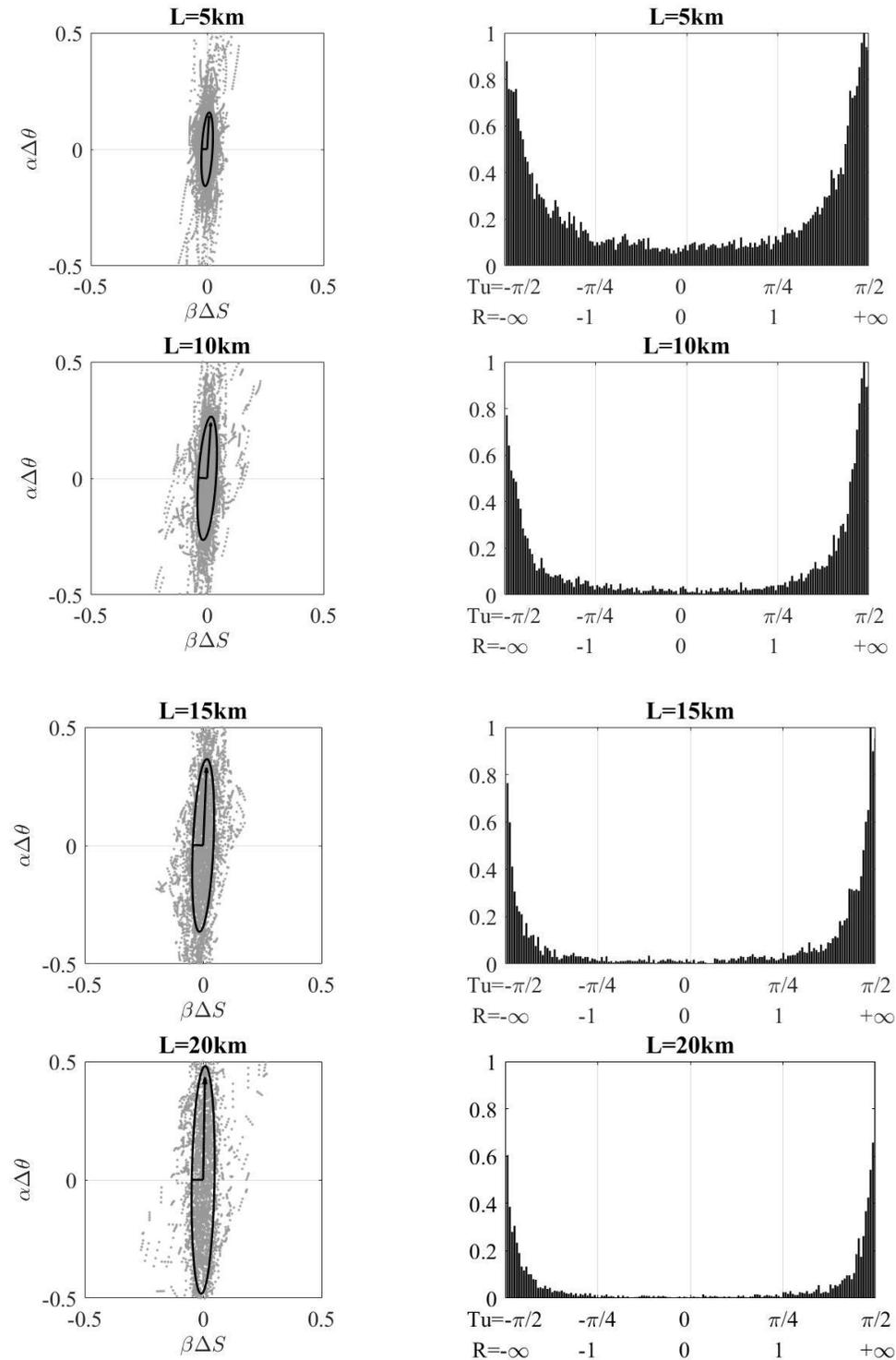
**Figura 36:** Recorte de zona donde se muestra el frente opuesto a diferentes distancias para el crucero de enero de 2004 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Cada fluctuación de temperatura potencial está correlacionada negativamente con cada fluctuación de salinidad generando un frente opuesto hasta la escala más pequeña observada ( $\sim 1$  km).

### 3.1.2.3 Frente térmico

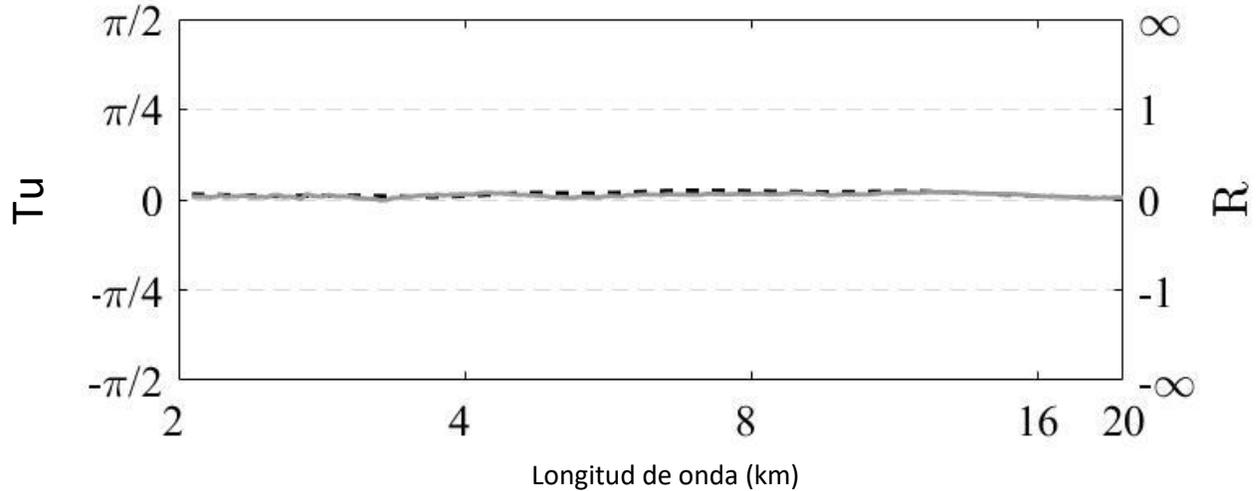
El frente térmico se muestra en la Figura 37 en el recorrido del crucero de octubre de 2006, el frente se encuentra en la parte sur de la región a 70 km de la costa entre las costas de San Diego y Punta Concepción. En la Figura 38 se muestran los diagramas de dispersión y los histogramas de los coeficientes de ondeletas  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S_a$  a 5 km, 10 km, 15 km y 20 km. Los diagramas de dispersión muestran sus elipses características, en ellos se observa una pendiente infinita, donde las elipses están paralelas al eje y y los coeficientes de ondeleta se encuentran alineados también en todas las escalas observadas. En los histogramas se aprecian las frecuencias de los coeficientes, mostrándose el columpio característico de este tipo de frente en todas las escalas observadas conservando las mayores frecuencias a los extremos en  $R = \pm\infty$  o  $Tu = \pm\frac{\pi}{2}$ . Las escalas en la que el histograma tiene la forma de columpio y los puntos del diagrama de dispersión están mejor alineados al eje x son a partir de 10 km. En la Figura 39 las medidas de la razón de densidad revelan que la pendiente del eje principal de la elipse y la mediana se mantienen en 0 en todas las escalas observadas.



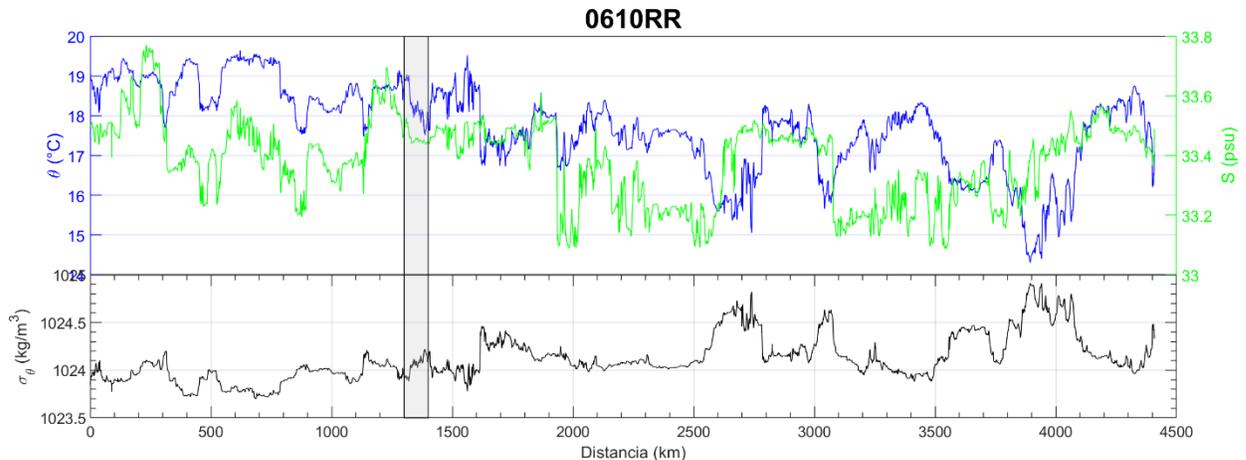
**Figura 37:** Recorrido del crucero CalCOFI de octubre de 2006 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró el frente térmico.



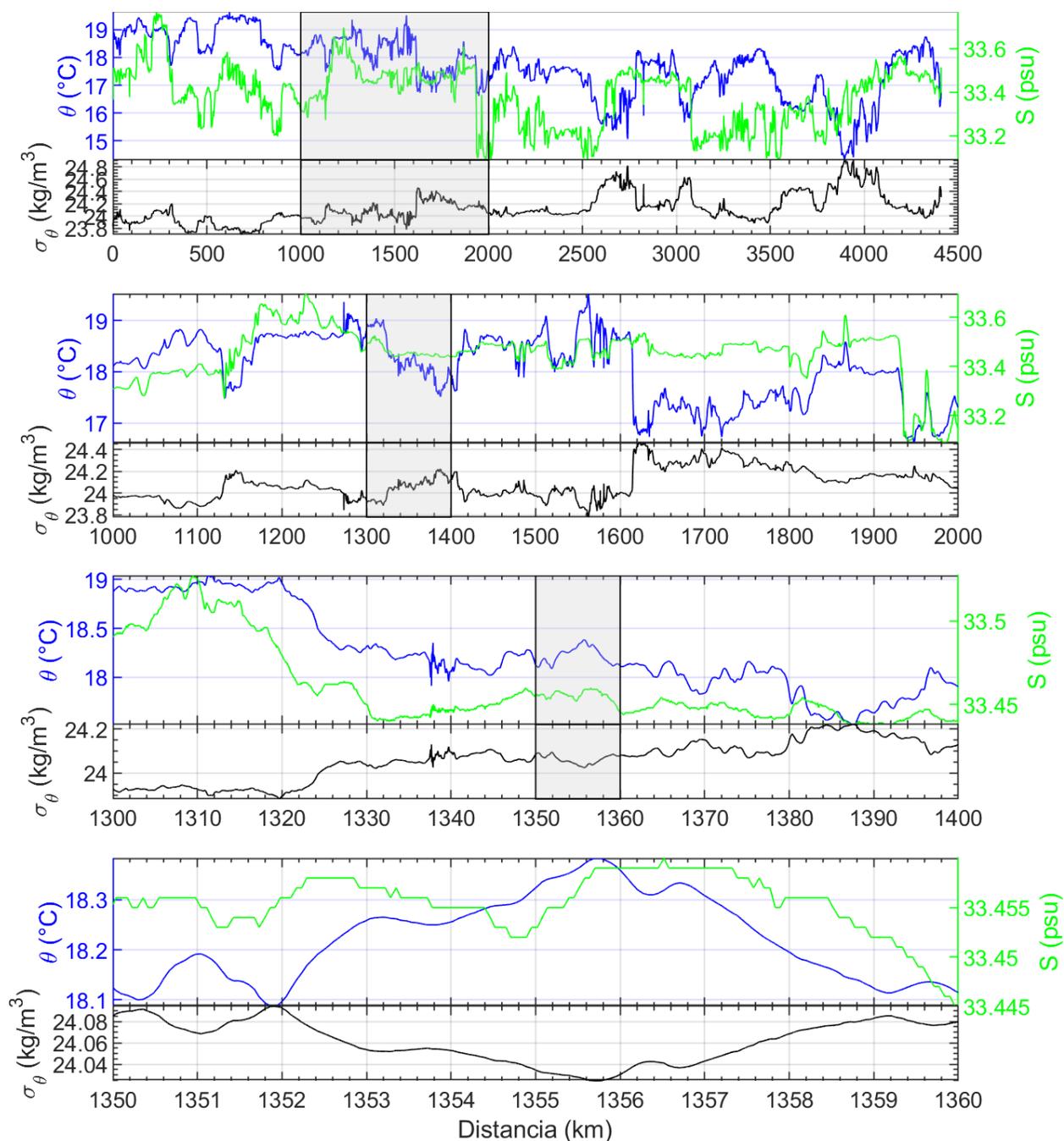
**Figura 38:** Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km. Los puntos se localizan a lo largo de la vertical indicando frente compensado a todas las escalas observadas. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, a todas las escalas observadas se muestran los frentes térmicos, siendo en 10 km en la que se muestra mayor frecuencia en  $Tu = \pm\pi/2$ .



**Figura 39:** Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $Tu$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). Tanto el eje principal, como la mediana de la razón de densidad se encuentran cercanas a 0 en todas las escalas estudiadas de 2 a 20 km.



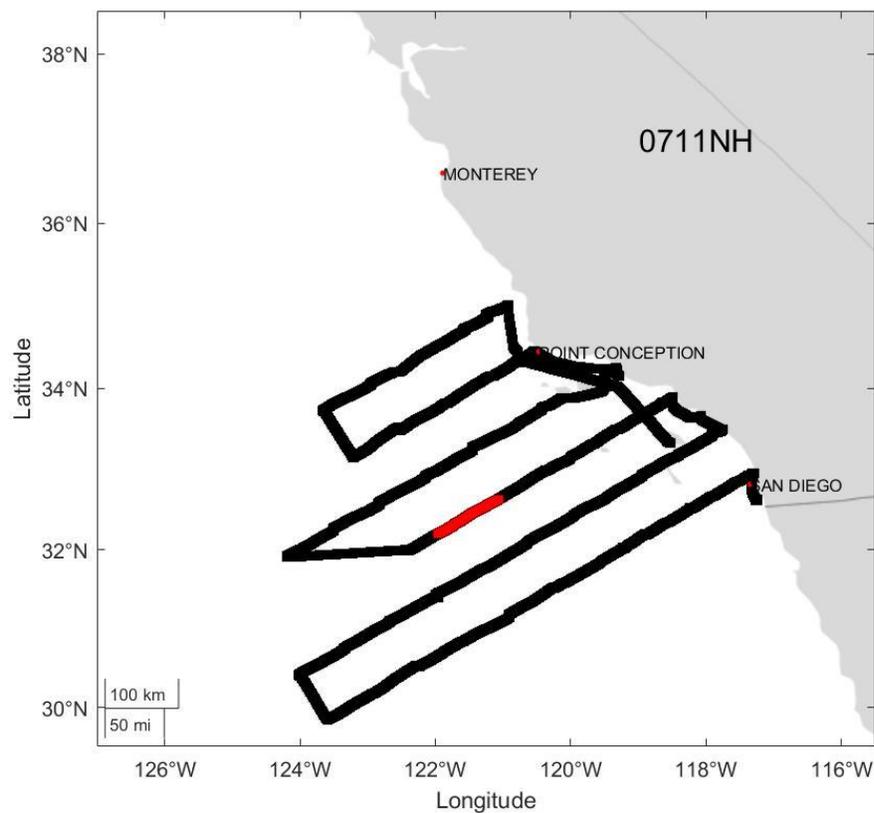
**Figura 40:** Serie de distancia del crucero de octubre de 2006 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró el frente térmico, dicha sección se amplifica en la Figura 41.



**Figura 41:** Recorte de zona donde se muestra el frente de temperatura a diferentes distancias para el crucero de octubre de 2006 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. La salinidad se mantiene casi constante o con variaciones despreciables, mientras que la temperatura potencial varía; se observa que la densidad potencial sigue a la temperatura potencial con una correlación negativa.

La serie de distancia de la Figura 40 expone el recorrido total del crucero CalCOFI y está sombreada la región donde se encuentra el frente térmico; en la Figura 41, en el segundo acercamiento se presenta en la zona sombreada, la característica principal de este frente, que es donde hay grandes gradientes de salinidad y pequeños de temperatura potencial, la densidad potencial también tiene gradientes. Se evidencia que el gradiente de temperatura potencial domina al gradiente de densidad potencial, ya que el gradiente de densidad potencial es el reflejo del de temperatura potencial, pero en sentido opuesto. Por consiguiente, el frente térmico es un frente de densidad donde la salinidad tiene gradientes pequeños en comparación a los gradientes de temperatura potencial, haciendo que la densidad potencial tenga gradientes similares a los de temperatura potencial, pero en sentido opuesto, teniendo una correlación entre ambas variables de 0.95.

#### 3.1.2.4 Frente salino



**Figura 42:** Recorrido del crucero CalCOFI de noviembre de 2007 en color negro, en rojo la sección de 100 km donde se encontró el frente salino.

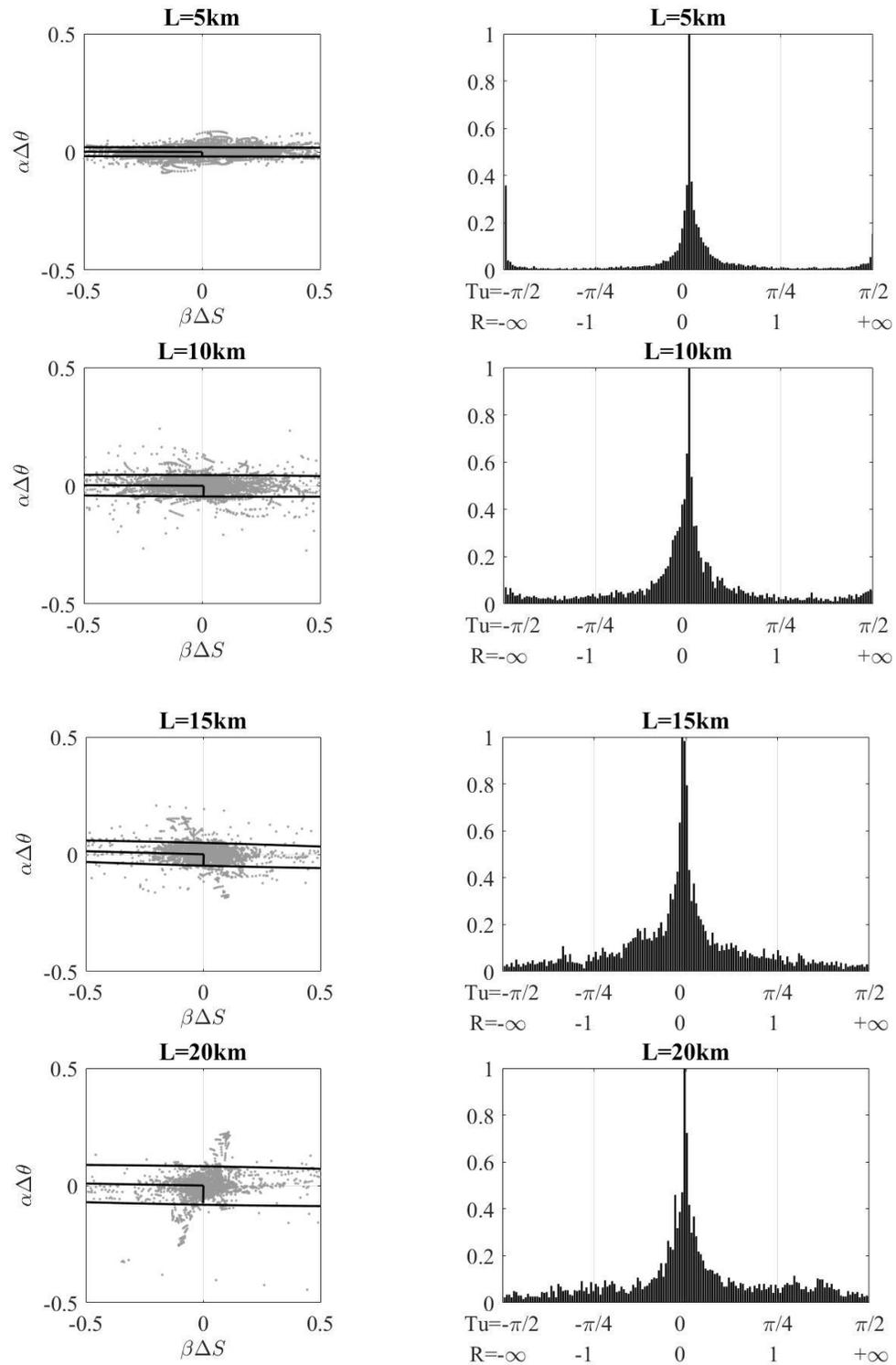
El frente salino se muestra en la Figura 42 en el recorrido del crucero de noviembre de 2011, el frente se encuentra en la parte sur de la región mar adentro entre las costas de San Diego y Punta Concepción. En la Figura 43 se muestran los diagramas de dispersión y los histogramas de los coeficientes de ondeletas  $\alpha\Delta\theta$  y  $\beta\Delta S$  a 5 km, 10 km, 15 km y 20 km.

Los diagramas de dispersión muestran sus elipses características, en ellos los coeficientes de ondeletas se alinean al eje x, por lo que la pendiente que generan es igual a 0, en las escalas de 5 km y 10 km los puntos están bien alineados, no obstante, en las escalas de 15 km y 20 km los coeficientes se dispersan hacia otros lugares, siendo la escala más irregular la de 20 km. En los histogramas se tienen las frecuencias de los coeficientes donde la máxima frecuencia está en 0 y sus alrededores a 5, 10, 15 y 20 km. A 10 km es la escala en que los coeficientes en el diagrama de dispersión están bien alineados y los histogramas están centrados en 0, superior que en las demás.

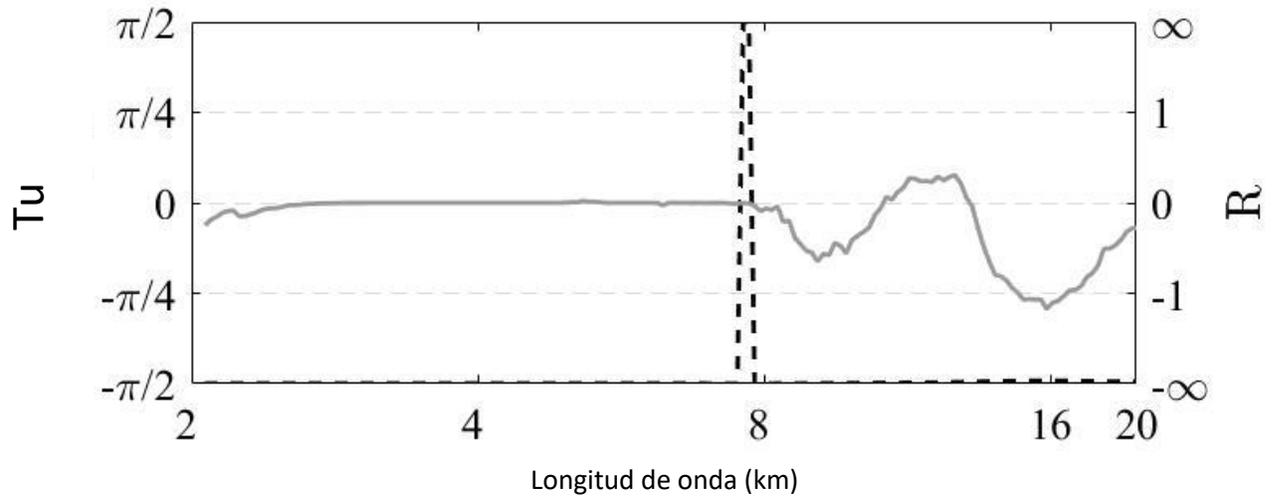
En la Figura 44 las medidas de la razón densidad evidencian que la pendiente del eje principal de la elipse se mantiene en  $R = -\infty$  o  $Tu = -\frac{\pi}{2}$  en casi todas las escalas, mostrando un salto a 7km a  $R = \infty$  o  $Tu = \frac{\pi}{2}$  y regresando; la mediana se mantiene en 0 desde 2.5 km hasta 8km, después de eso, las variaciones son impredecibles.

En las series de distancia de las Figuras 45 y 46 se muestran la serie de distancia del crucero completa con la zona donde se encontró al frente salino sombreado y en la siguiente las ampliaciones consecutivas del recorrido del crucero pasando por la región donde se encontró el frente de salinidad. Las franjas sombreadas muestran gradientes de temperatura potencial y de salinidad, los gradientes de salinidad son más grandes que los de temperatura potencial, como se muestra en las ampliaciones.

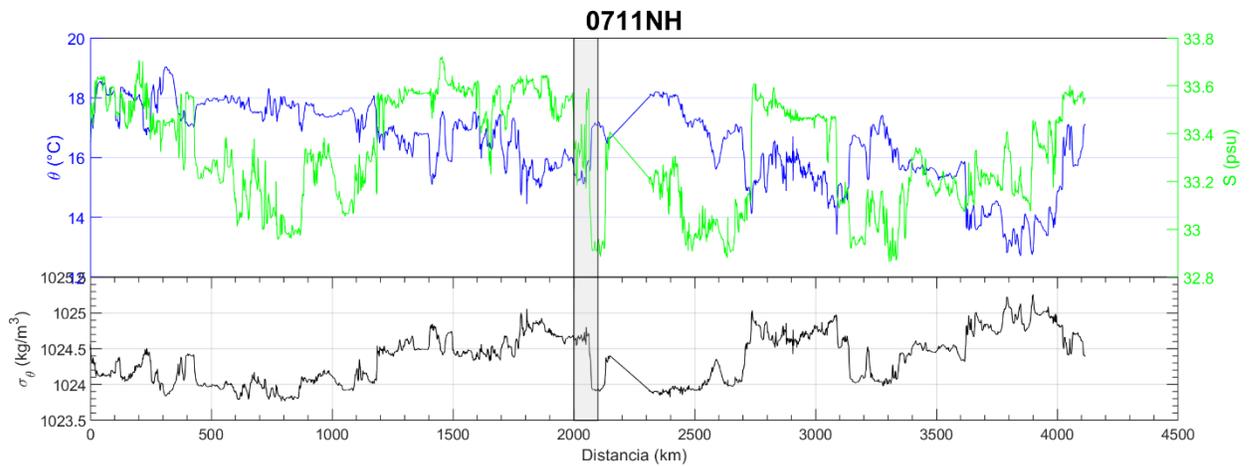
En este caso, los gradientes de densidad potencial siguen a los de salinidad, con una correlación positiva mostrando su mismo recorrido con el mismo sentido. En tal caso, un frente salino es un frente de densidad en el cual la temperatura potencial tiene gradientes pequeños en comparación a los gradientes de salinidad, haciendo que la densidad potencial tenga gradientes similares a los de la salinidad en el mismo sentido. La correlación entre ambas variables es de -0.92.



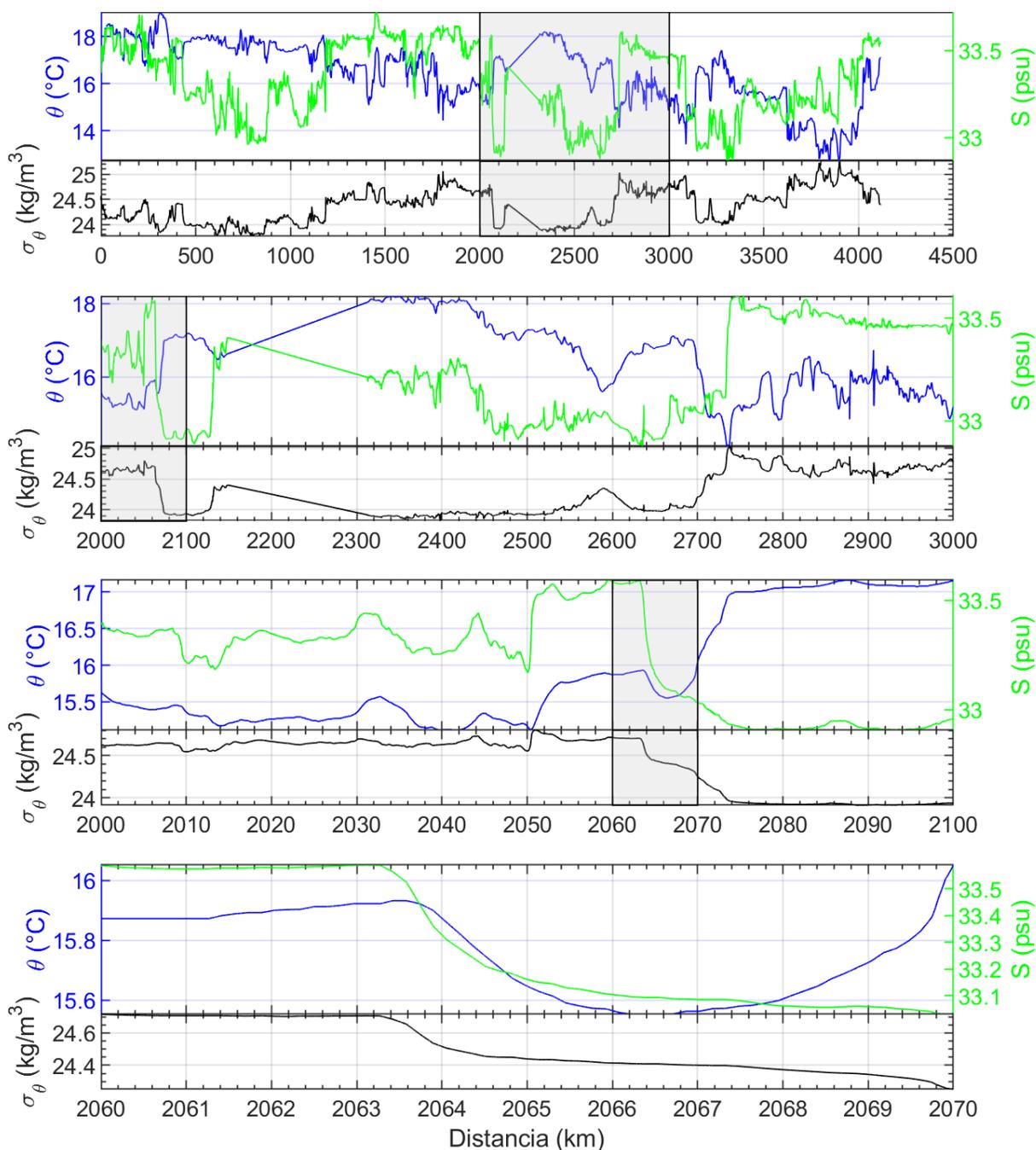
**Figura 43:** Diagramas de dispersión de los coeficientes de temperatura potencial y de salinidad para las longitudes de onda (a) 5 km, (c) 10 km, (e) 15 km y (g) 20 km. En las escalas mostradas, los puntos siguen a la pendiente 0 en todas las escalas mostradas, principalmente en 5 y 10 kilómetros. Histogramas de frecuencia del ángulo de Turner para las longitudes de onda (b) 5 km, (d) 10 km, (f) 15 km y (h) 20 km, en las escalas mostradas se observa que el histograma con mayor frecuencia cercana a 0 es el de 10 km.



**Figura 44:** Razón de densidad en función de la longitud de onda en línea continua y la pendiente del eje principal de la elipse de los coeficientes de temperatura potencial y salinidad en línea punteada, en escala logarítmica. De lado izquierdo se encuentran los valores del ángulo de Turner ( $Tu$ ) y de lado derecho los valores correspondientes de la razón de densidad ( $R$ ). El eje principal se mantiene en 0 desde 3 hasta 8 km, donde se muestra mayor variación, la mediana se mantiene en  $-\pi/2$ , con solo un pico a  $\pi/2$  entre 7 y 8 km.



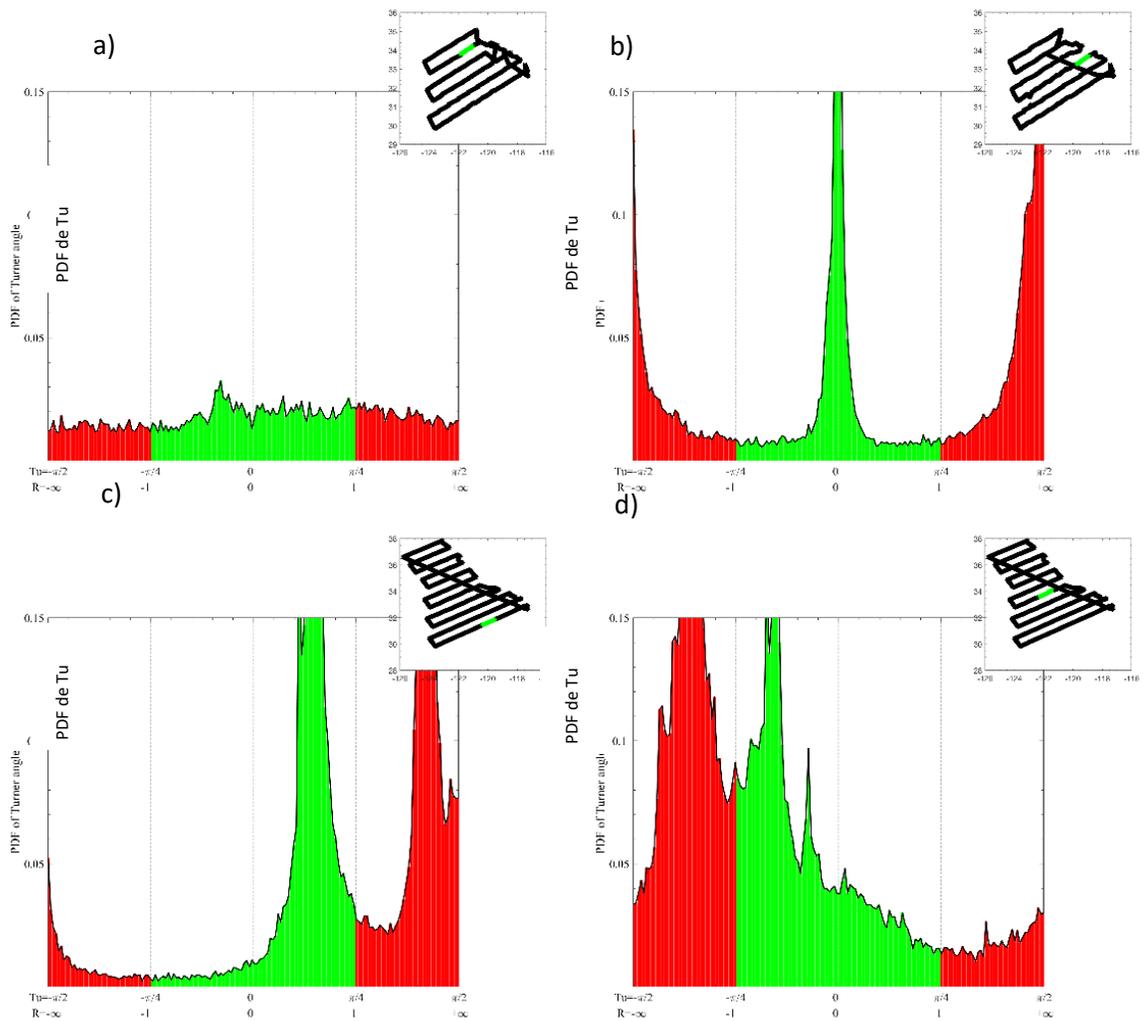
**Figura 45:** Serie de distancia del crucero de noviembre de 2007 durante todo el trayecto recorrido por el crucero CalCOFI. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción termohalina respectivamente. Los datos fueron interpolados cada 100 metros. La región sombreada son los 100 km donde se encontró el frente salinidad, dicha sección se amplifica en la Figura 44.



**Figura 46:** Recorte de zona donde se muestra el frente salino a diferentes distancias para el crucero de noviembre de 2007 sobre el recorrido total del crucero y sus sucesivas magnificaciones del orden 10. La temperatura potencial  $\theta$  (líneas azules), salinidad  $S$  (líneas verdes) y la densidad potencial  $\sigma_\theta$  (líneas negras) de mediciones en la superficie. Los ejes verticales de la temperatura potencial y salinidad están escalados por los coeficientes de expansión térmica y contracción salina respectivamente. La variación de temperatura potencial es pequeña en comparación a la variación de la salinidad, por lo que la salinidad controla el gradiente de salinidad teniendo una correlación positiva.

### 3.1.2.5 Zonas no identificadas

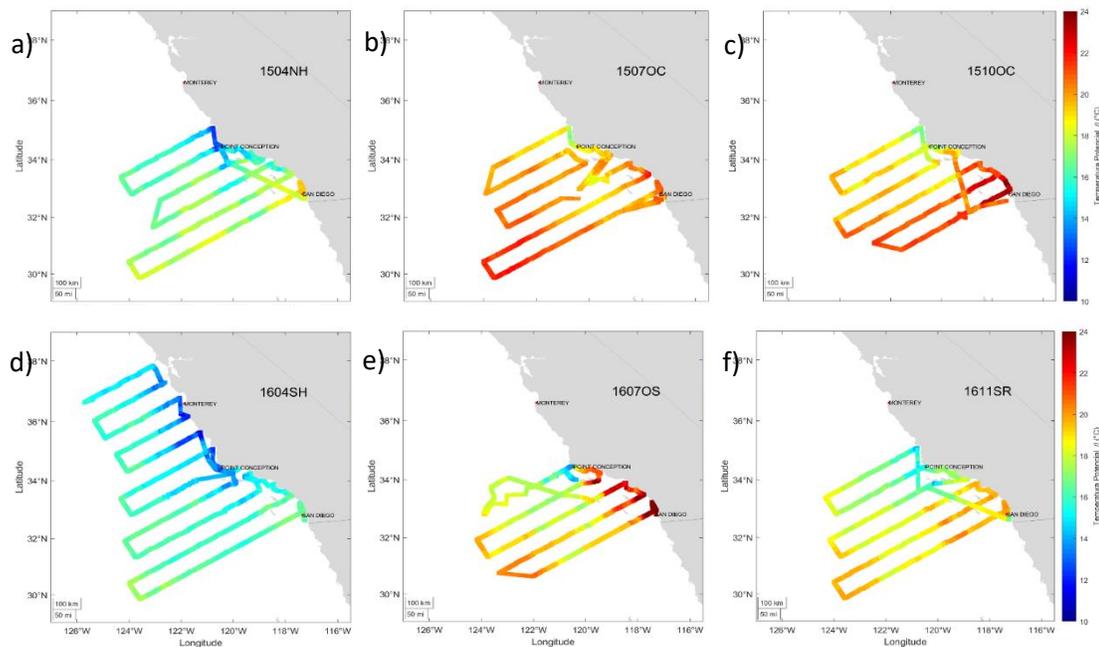
Las zonas no identificadas son aquellos en los que las PDF's relacionadas a ellos no entran en ninguna de las categorías que mostramos con anterioridad, las PDF's suelen ser combinación de los anteriores o no muestran que ninguna propiedad sea la que domina. Para estudiar esta categoría se podría realizar también un catálogo de PDF's en esta zona, no obstante, en esta investigación no fue posible su estudio detallado. Quedará pendiente para futuras investigaciones. En la Figura 47 se muestran las posibles PDF's de estas zonas, cada una tiene un comportamiento distinto.



**Figura 47:** PDF's características de las zonas no identificadas, los ejemplos que se muestran son de los cruces de a) abril de 2005, b) enero de 2004, c) enero de 2004, d) julio de 2006.

### 3.1.3 El Niño 2015-2016

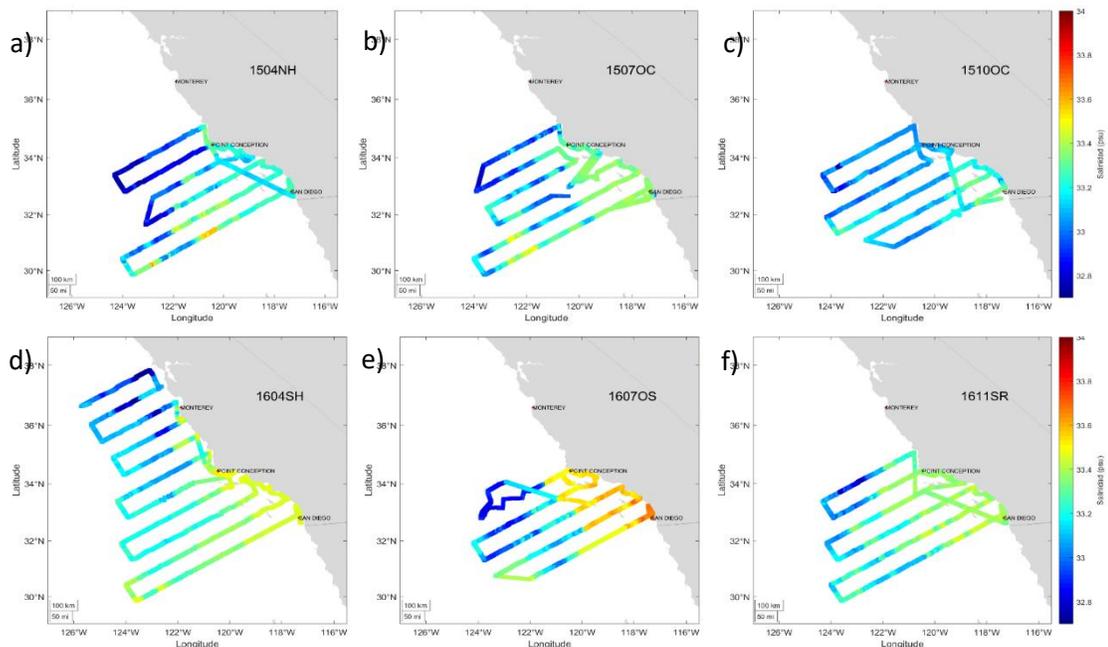
Los cruceros de El Niño se analizaron individualmente, en esta sección se tienen los meses de abril, julio y octubre/noviembre de los años 2015 y 2016, para cada crucero se realizaron cintillas de temperatura potencial, salinidad y densidad potencial, también se encontró la variable *spiciness* y se encontraron sus masas de agua por medio de los diagramas T-S, es importante mencionar que en estos cruceros se agregó la masa de agua Ecuatorial, que tiene valores similares a los de la masa de agua Central del Pacífico Norte, pero que su aparición es más cercana a la costa.



**Figura 48:** Cintillas de temperatura potencial para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

En la Figura 48 se tiene la temperatura potencial para los cruceros de abril, julio y octubre de los años 2015 y 2016, en abril de 2015 y en abril de 2016, se muestran temperaturas frías ( $< 14^{\circ}\text{C}$ ) cerca de la costa en Punta Concepción, como se ve en 2015 y hacia el norte de Punta Concepción, como se muestra en 2016. Frente a las costas de San Diego, los colores indican que en 2015 hubo temperaturas potenciales más altas en esa zona ( $\sim 19.5^{\circ}\text{C}$ ) que en 2016 donde la temperatura potencial solo llegó a  $\sim 17^{\circ}\text{C}$ . Lejos de la costa de San Diego en 2015 se mantienen temperaturas potenciales alrededor de  $19^{\circ}\text{C}$ , mientras que en 2016 la temperatura potencial lejos de la costa se conserva en  $17^{\circ}\text{C}$ . En julio de ambos años la Figura indica que las temperaturas potenciales más elevadas se dieron entre Punta Concepción y San Diego, en 2016 la

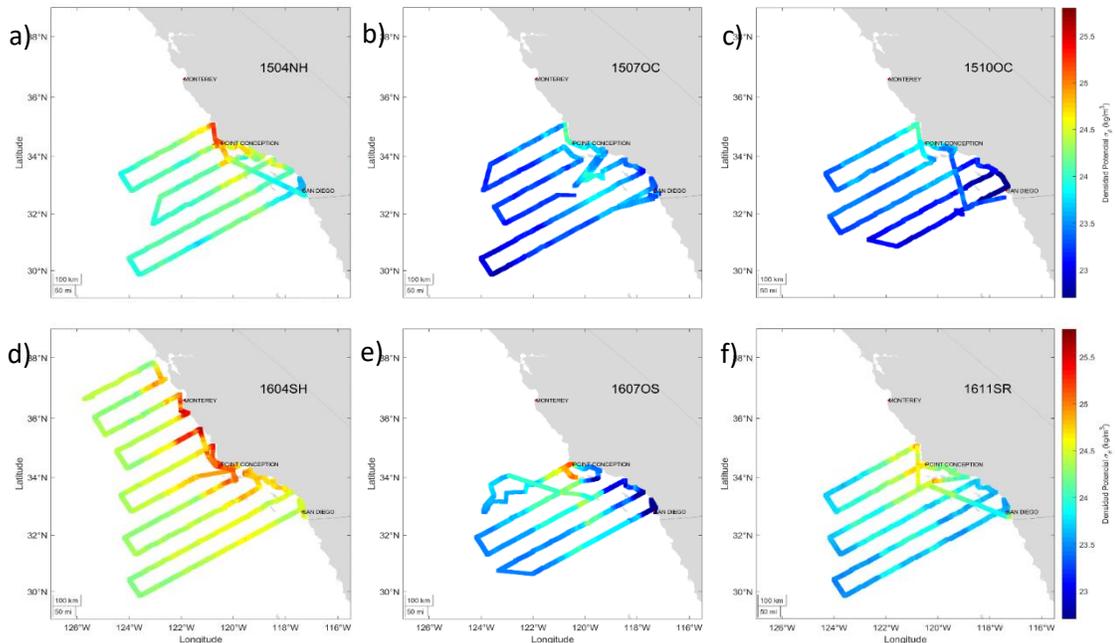
temperatura potencial alcanzó los 24°C en esta zona, en cambio, en 2015 se mantuvo en ~ 20°C. En julio de 2016, frente a las costas de Punta Concepción hay temperaturas potenciales que rondan 13°C, en tanto que en 2015 el mínimo en la misma zona fue de 17°C. En octubre de 2015 se mantienen temperaturas potenciales altas entre San Diego y Punta Concepción, encontrando un máximo de 24°C, cerca al continente; mar adentro la temperatura potencial se mantiene mayor a 21°C; al norte de Punta Concepción la temperatura es menor que en el resto del recorrido (~ 17°C). En noviembre de 2016 la temperatura potencial se mantiene en un rango de entre 19 – 20.5°C en la región, a excepción de en los alrededores de Punta Concepción, donde se mantiene en 15°C.



**Figura 49:** Cintillas de salinidad para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

En la Figura 49, en el crucero de abril de 2015, la salinidad se estuvo en < 33 PSU lejos de la costa en diagonal a la línea de costa, cerca de la costa la salinidad se mantiene alrededor de 33.3 PSU, en la línea del recorrido frente a San Diego, se muestra regiones donde la salinidad alcanza valores de 33.6 PSU, lo que indica gradientes de salinidad existentes. La salinidad en abril de 2016 en el norte de la región es baja (~ 33 PSU) al disminuir la latitud se ve un aumento en la salinidad a lo largo de 122 ° O, en la región cerca de la costa entre Monterey y San Diego la salinidad se encontró en 33.5 PSU. En julio de 2015 hay salinidades bajas lejos de la costa al igual que en abril de 2015, pero la salinidad cerca de la costa aumentó a 33.4 PSU. En julio de 2016 se distinguen gradientes de salinidad a lo largo del recorrido del buque,

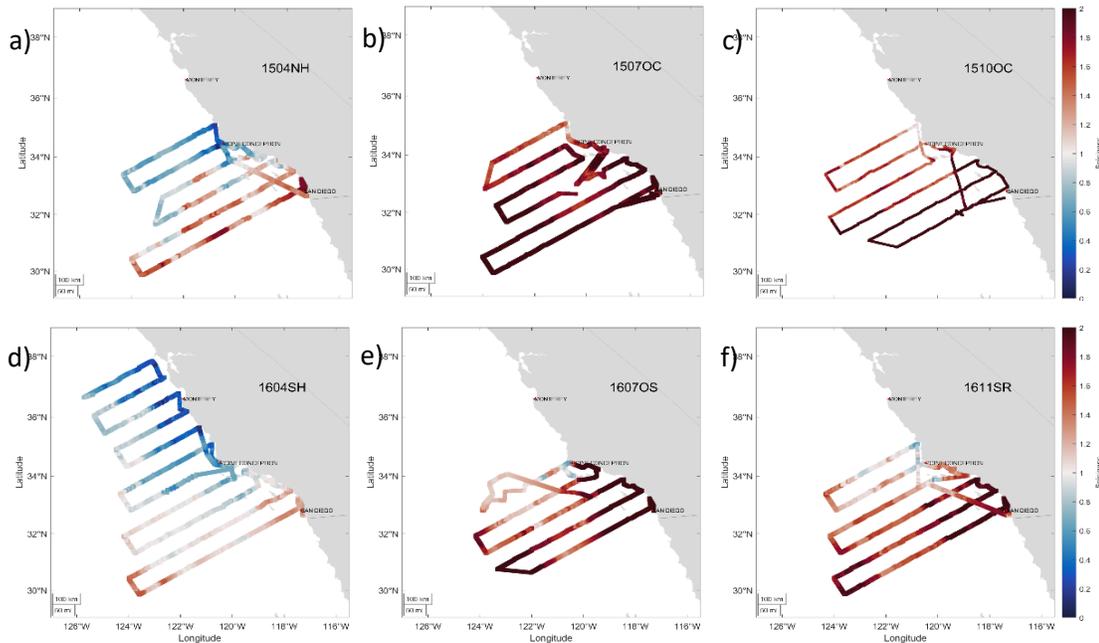
teniendo un rango amplio de salinidades que va desde los 33.7 PSU cerca de San Diego a los 32.8 mar adentro, en la parte intermedia de la región la salinidad es baja a los 121° O. En octubre de 2015 la salinidad varía muy poco (33.1-33.3 PSU), el máximo de salinidad en esta época del año se encuentra frente a las costas de San Diego. En noviembre de 2016 la salinidad se mantiene en 33.4 a lo largo de la costa desde San Diego hasta Punta Concepción y la salinidad disminuye al alejarse del continente, las salinidades menores se encontraron lejos de la costa frente a Punta Concepción.



**Figura 50:** Cintillas de densidad potencial para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

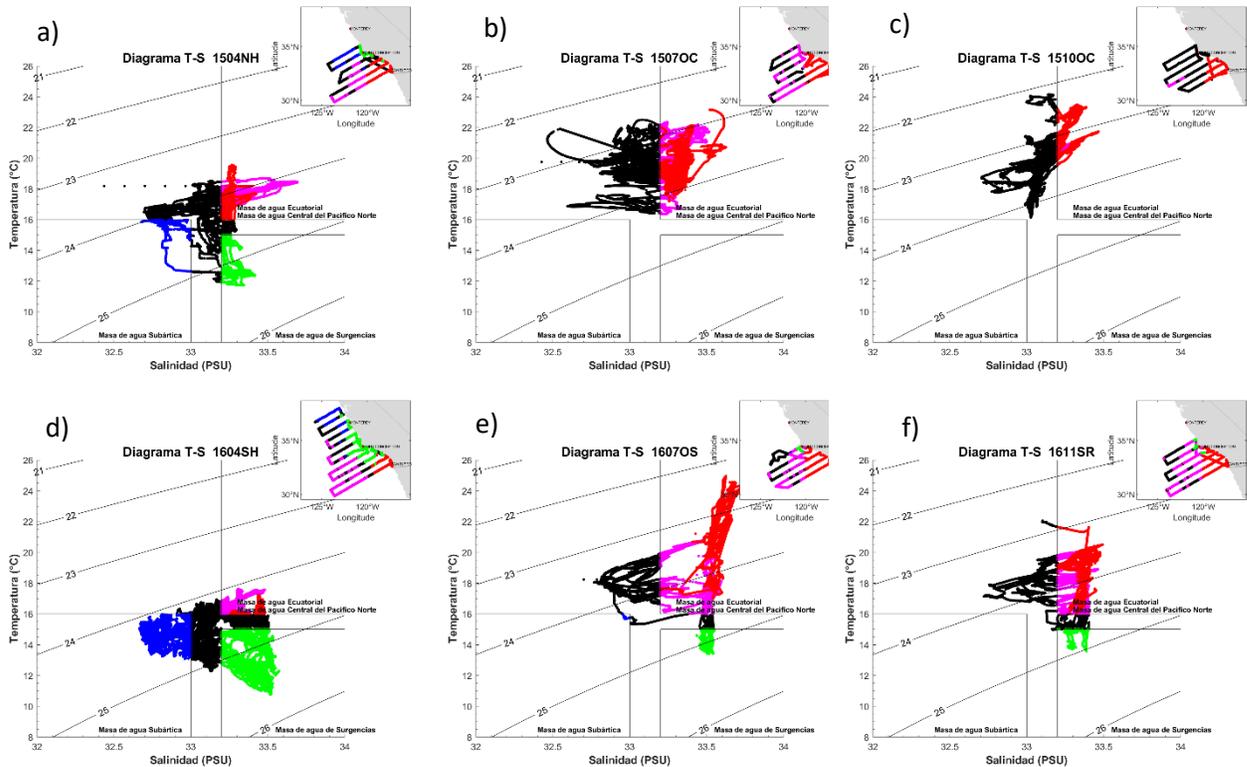
En abril de 2015 (Figura 50) se tiene que la densidad potencial es mayor cerca de Punta Concepción ( $< 1025 \text{ kg/m}^3$ ), caso similar a abril de 2016, sin embargo, como abril de 2016 cubre la zona norte, se observa que la densidad potencial elevada está desde Punta Concepción hasta Monterey; en ambos cruceros la densidad disminuye lejos de la costa. En abril de 2015 la densidad potencial menor de este crucero está frente a San Diego ( $\sim 1023.7 \text{ kg/m}^3$ ). En abril de 2016 la densidad potencial lejos de la costa tiene valores de  $\sim 1024.3 \text{ kg/m}^3$ . Los cruceros de julio y octubre de 2015 tienen rangos similares de densidad potencial ( $1023 \text{ kg/m}^3$ - $1024 \text{ kg/m}^3$ ), los valores máximos en ambos cruceros se identificaron en los alrededores de Punta Concepción y los valores mínimos en la región frente a San Diego. En julio de 2016 la densidad potencial alcanza un máximo de  $1025.2 \text{ kg/m}^3$  cerca de Punta Concepción y el mínimo de  $1023 \text{ kg/m}^3$  ceca de la costa al sur de Punta Concepción y San Diego; en el sur de Punta Concepción hay fuertes gradientes

de densidad; en la zona intermedia del recorrido la densidad potencial es  $\sim 1022.2 \text{ kg/m}^3$ , al extremo mar adentro la densidad disminuye a  $1023.7 \text{ kg/m}^3$ . El crucero de noviembre de 2016 muestra mayor densidad en los alrededores de Punta Concepción y menores en el resto del recorrido, el rango de valores de este crucero es de  $1023.7 \text{ kg/m}^3$  a  $1024.7 \text{ kg/m}^3$ , mayor al del año 2015 de la misma temporada.



**Figura 51:** Spiciness para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentran los valores máximos y en azul los mínimos.

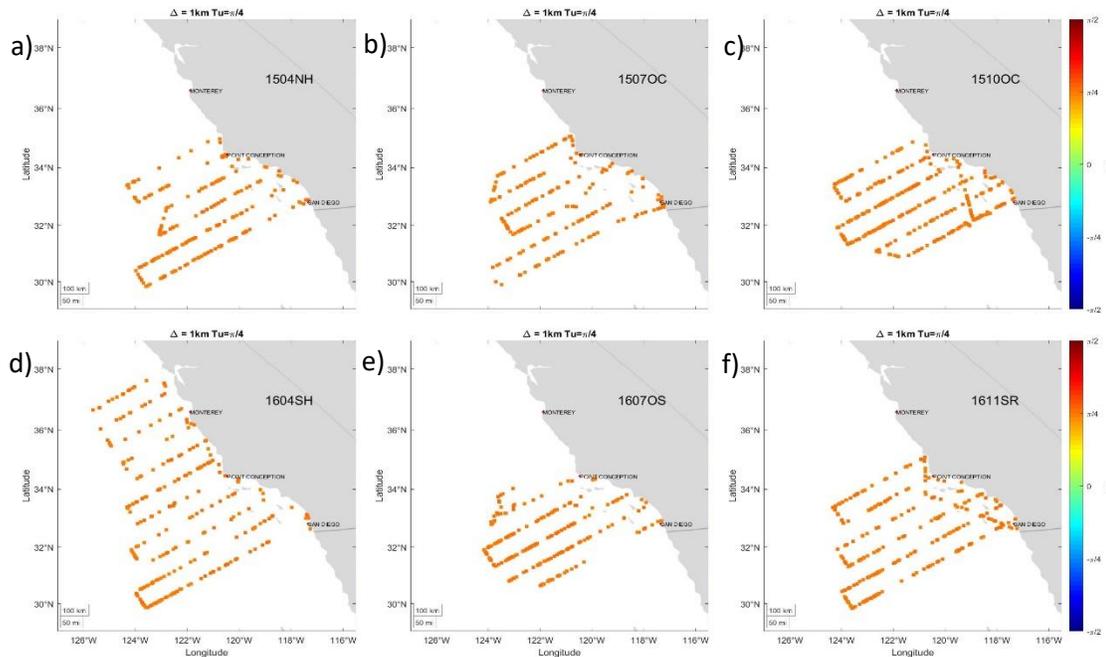
La variable *spiciness* mostrada en la Figura 51, ilustra para los cruceros de abril de los años 2015 y 2016 aguas frías y poco saladas al norte de la región (a partir de Punta Concepción) en esa zona la *spiciness* varía entre 0 y  $0.5 \text{ kg/m}^3$ . En el crucero de abril de 2015 entre las costas de San Diego y Punta Concepción la variable tiene valores de entre 1.5 y  $2 \text{ kg/m}^3$ , lo que nos indica agua cálida y salada. En el crucero de abril de 2016, lejos de la costa la variable está en  $\sim 1 \text{ kg/m}^3$  y así se conserva hacia el sur por el medio del recorrido, a los extremos del recorrido frente a San Diego la variable alcanza valores de  $1.5 \text{ kg/m}^3$ . Los cruceros de julio y de octubre de 2015 muestran rangos de entre 1.5 y 2 en su recorrido a excepción de al norte de Punta Concepción, donde el valor mínimo es  $\sim 1 \text{ kg/m}^3$ . Los cruceros de julio y noviembre de 2016 tienen rangos similares a los de 2015 para el trayecto del buque, sin embargo, en estos cruceros alrededor de Punta Concepción los valores de *spiciness* disminuyen hasta  $0.5 \text{ kg/m}^3$ . Los máximos de la variable de los cuatro cruceros últimos cruceros descritos se encuentran entre las costas de San Diego y Punta Concepción.



**Figura 52:** Diagramas T-S para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En rojo se encuentra la masa de agua Ecuatorial producto de El Niño, en magenta se encuentra la masa de agua Central del Pacífico Norte, en verde la masa de agua de Surgencias y en azul la masa de agua Subártica.

La Figura 52 muestra los diagramas T-S para cada uno de los cruceros, en los cruceros de abril de 2015 y de 2016 se observa la presencia de masa de agua de Surgencias, Subártica, Ecuatorial y Central del Pacífico Norte. El crucero de abril de 2015 muestra presencia de la masa de agua Ecuatorial hasta al sur de Punta Concepción, la masa de agua de Surgencias está ubicada solamente alrededor de Punta Concepción y se observa masa de agua Subártica mar adentro a la altura de Punta Concepción. El crucero de abril de 2016 presenta en gran parte masa de agua de Surgencias, la masa de agua Ecuatorial se mantiene a la mitad del recorrido entre San Diego y Punta Concepción y la masa de agua Central del Pacífico Norte está lejos de la costa océano adentro. Los diagramas T-S de los cruceros de julio y octubre de 2015 muestran que las masas de agua presentes en la región en esa temporada son la masa de agua Ecuatorial y la Central del Pacífico Norte, masa de agua típica de la región está sobre la isopícula de 23 kg/m<sup>3</sup>. Los cruceros de julio y noviembre de 2016 tienen presencia de la masa de agua de Surgencias frente a las costas de Punta Concepción y también se encuentran presentes la masa de agua Ecuatorial y la masa de agua Central del Pacífico Norte.

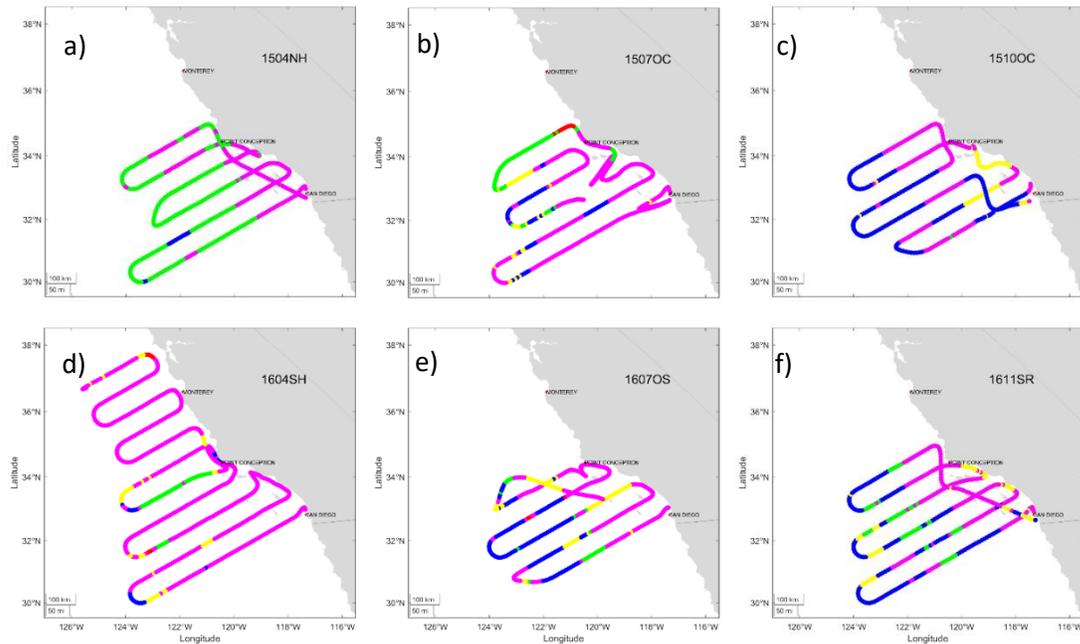
En estos cruceros se reconoció que los valores más bajos de *spiciness* se relacionaron a la masa de agua Subártica como se muestra en los cruceros de abril de los años 2015 y 2016, la masa de agua de Surgencias mantiene valores  $< 1 \text{ kg/m}^3$  como se observa en el crucero de abril de 2015 y todos los de 2016. Las masas de agua Central del Pacífico Norte y la masa de agua Ecuatorial tienen rangos de *spiciness* elevados de 1.5 a  $2 \text{ kg/m}^3$  en las regiones en las que aparecieron.



**Figura 53:** Ángulo de Turner igual a  $\frac{\pi}{4}$  (naranja) para cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016, otros valores del Ángulo de Turner no se dibujaron.

Con los datos en la Figura 53 se buscó compensación con los métodos antes vistos y se encontró en todos los cruceros de los años estudiados a lo largo de todo el recorrido del buque oceanográfico. Los cruceros que en este análisis observacional tuvieron mayor compensación fueron octubre de 2015 y noviembre de 2016, se observa que las regiones donde hay mayor compensación (segmentos continuos de compensación) están principalmente fuera de la costa en los meses de abril y julio de ambos años, cerca de la costa en esos meses existe compensación cerca de la costa, pero se muestra solamente en algunos puntos específicos.

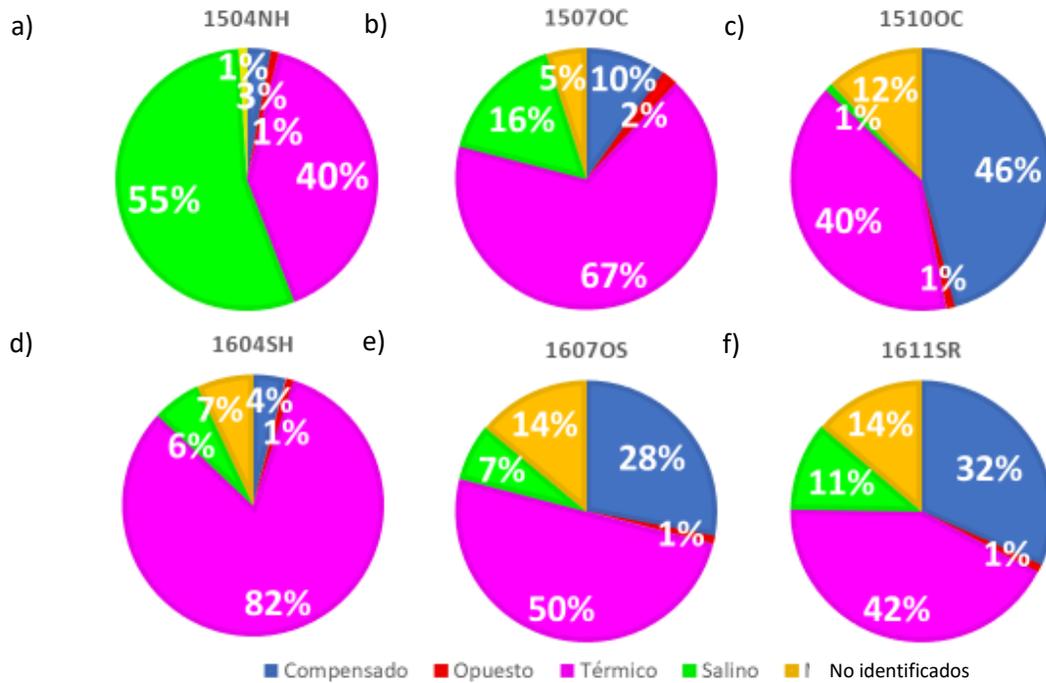
Posteriormente se realizó análisis de ondeletas para encontrar los frentes que hubo durante estos dos años con precisión, y se localizaron en cintillas los frentes observados (Figura 54).



**Figura 54:** Cintillas de ubicación de los frentes para los cruceros de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En azul se muestra el frente compensado, en rojo el frente opuesto, en magenta el frente térmico, en verde el frente salino y en amarillo el frente no identificado.

En abril de 2015 se encontraron frentes de temperatura cerca de la costa entre San Diego y Punta Concepción, lejos de la costa se encontraron frentes de salinidad, y en algunas regiones pequeñas se encontró compensación lejos de la costa. En julio de 2015 se observan frentes opuestos cerca de Punta Concepción, entre San Diego y Punta Concepción dominan los frentes térmicos, lejos de la costa hay frentes salinos y frentes compensados, también hay zonas no identificadas. En octubre de 2015 hay zonas no identificadas cerca de la costa, los frentes térmicos ocurren cerca de la costa desde San Diego a Punta Concepción y frente a San Diego lejos de la costa, hay compensación.

En el crucero de abril de 2016 los frentes que ocupan la mayor parte de la región son los térmicos, se encuentran cerca y lejos de la costa, se observan pocos frentes de salinidad, compensados y no identificados lejos de la costa. En julio de 2016 los frentes térmicos ocurren cerca de la costa, mientras que los compensados están fuera de la costa, en menor medida se tienen frentes de salinidad y no identificados. En noviembre de 2016 los frentes térmicos aparecen de nuevo cerca de la costa en toda la región, en algunas zonas cerca de la costa hay zonas no identificadas, lejos de la costa se encuentran los frentes compensados y algunos salinos.



**Figura 55:** Gráficos de pastel de frecuencia de frentes para crucesos de a) abril, b) julio y c) octubre de 2015 y d) abril, e) julio y f) noviembre de 2016. En azul se muestra el frente compensado, en rojo el frente opuesto, en magenta el frente térmico, en verde el frente salino y en amarillo el frente no identificado.

Como lo mostrado en las cintillas de las posiciones de los frentes en los diagramas de pastel de la Figura 55 se muestran los porcentajes de aparición de cada uno de los frentes estudiados por cruceo. El cruceo de abril de 2015 muestra que los frentes salinos dominaron la región siendo el 55 % del total de los frentes que se encontraron a lo largo de su recorrido, posteriormente los frentes térmicos conforman el 40 % del total de los frentes siendo de sima importancia, el 5 % restante de los frentes se dividió en los compensados (3 %), los opuestos (1 %) y los no identificados (1 %).

El cruceo de julio de 2015 expone que los frentes dominantes fueron los térmicos con el 67 % del total de los frentes, se consideró señalar que es el segundo con más frentes térmicos de los crucesos mostrados en esta sección, los frentes salinos aparecieron en un 16 %, los frentes compensados fueron el 10 % del total de los frentes, las zonas no identificadas estuvieron presentes en un 5 % y los frentes opuestos en un 2 %.

En el cruceo de octubre de 2015 se registró gran aparición de los frentes compensados, siendo el 46 % del total de los frentes estudiados en ese cruceo, los frentes térmicos estuvieron en segundo lugar siendo

el 40 % del total, y las zonas no identificadas tuvieron también presencia con el 12 %, los frentes que se observaron muy poco (1 %) fueron los salinos y los opuestos.

El crucero de abril de 2016 es el crucero en que más frentes térmicos se manifestaron ocupando un 82 % del total de los frentes observados, destacando que no solamente de los cruceros que se muestran en esta sección, sino de todos los cruceros revisados; las zonas no identificadas ocuparon el 7 % del total, seguidos de los salinos con el 6 %, los compensados con el 4 % y los opuestos (1 %).

El crucero de julio de 2016 tiene el 50 % de frentes térmicos, el 28 % de frentes compensados, el 14 % de zonas no identificadas, el 7 % de frentes salinos y el 1 % de frentes opuestos. Muestra menos frentes térmicos que julio de 2015 y disminuyen también en comparación a abril de 2016; al contrario de esto, los frentes compensados aumentaron con relación al crucero de julio de 2015, al igual que las zonas no definidas.

El crucero de noviembre de 2016 tiene aparición de frentes similar al crucero de julio del mismo año, los frentes térmicos disminuyeron su aparición ahora conformando el 42 % del total, los frentes compensados aumentaron y ocuparon el 32 % del total, las zonas no identificadas y opuestos se mantuvieron en 14 % y 1 % respectivamente y aumentaron los frentes salinos a 11 %. En los cruceros de julio y octubre de 2015 y todos los de 2016 revelan que los frentes salinos disminuyeron su presencia durante el fenómeno El Niño 2015-2016.

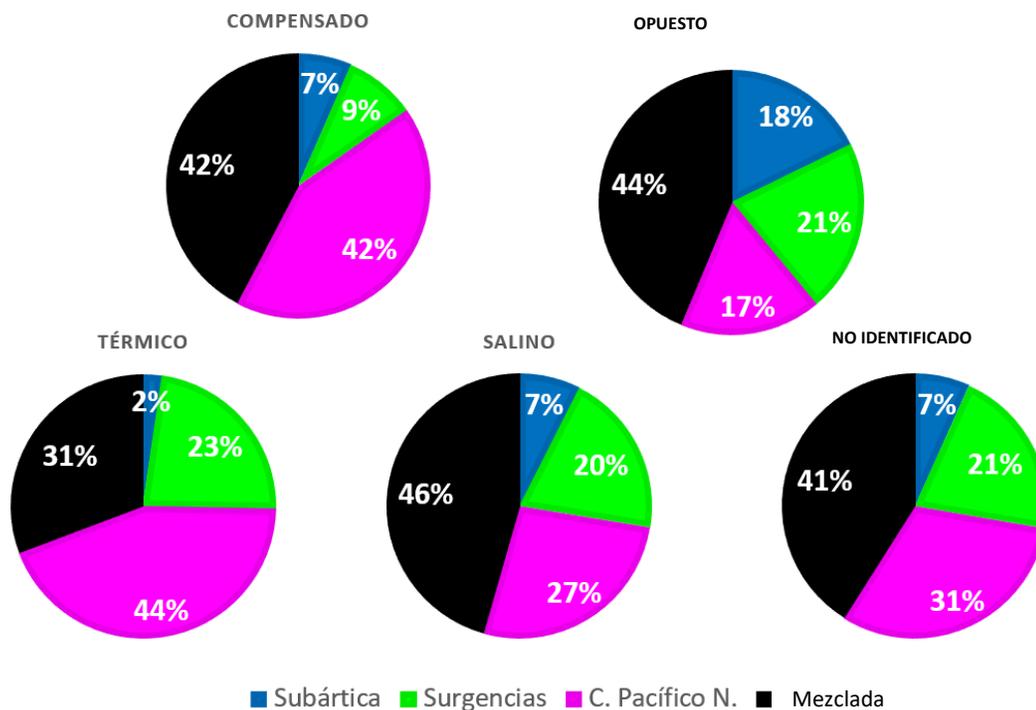
### **3.2 Condiciones oceánicas en la parte superior del océano de la región CalCOFI en relación con los frentes**

Una vez realizado el análisis de ondeletas se caracterizaron diferentes tipos de frentes por medio de sus PDF y diagramas de dispersión. Cada uno de estos frentes tiene diferentes condiciones oceanográficas (explicación física). En esta tesis se realizó una pesquisa sobre condiciones oceanográficas, sin embargo, el trabajo de continuar con la búsqueda y probar cada una de estas propuestas quedará pendiente para próximas investigaciones. Se estudiaron las variables masas de agua, profundidad de capa de mezcla, radio de deformación de Rossby, estratificación, y viento térmico.

### 3.2.1 Masas de agua

El estudio de las masas de agua se realizó cruceo a cruceo para identificar la relación de éstas con cada uno de los frentes estudiados, se realizaron cintillas de cada cruceo que se encontraron muy similares a los de la región de estudio, por lo que en este trabajo no se agregaron todas para evitar cansar al lector, es importante mencionar, los rangos para cada masa de agua son iguales a los que se utilizaron en el objetivo específico anterior. Las abundancias de cada uno de los frentes con sus masas de agua se encuentran representados en los diagramas de pastel de la Figura 45, donde se condensó la información de las masas de agua en los frentes estudiados.

La Figura 56 revela que la masa de agua típica estacional de la región está presente en todos los frentes en mayor o menor medida en todos los frentes estudiados, esta masa de agua le denominaremos mezclada, por simplicidad, ocupando 46 % del total de los frentes salinos como máximo, y el 31 % de los frentes térmicos como mínimo.



**Figura 56:** Diagramas de pastel de las masas de agua existentes para cada uno de los frentes encontrados. En total de frentes compensados es de 2092, el total de frentes opuestos es de 208, el total de frentes térmicos es de 5588, el total de frentes salinos es de 5061 y el total de no identificado es de 1475.

La masa de agua Central del Pacífico Norte, tiene el segundo lugar en ocurrencia después de la mezcla, se encuentra principalmente en los eventos de frente térmico (44 %) y frente compensado (42 %), en el frente térmico es la masa de agua más abundante y en el frente compensado se discute con la mezcla, entre ellas aparecen en el 84 % del total de frentes compensados.

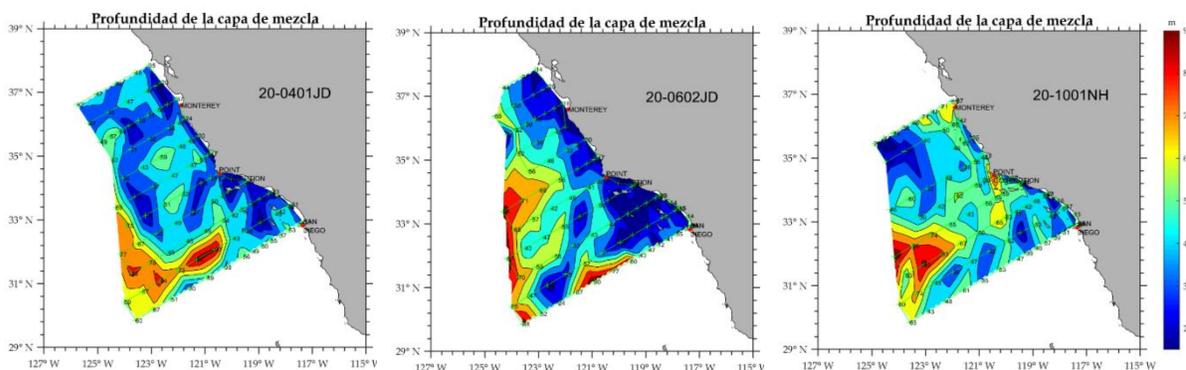
### 3.2.2 Profundidad de la capa de mezcla

Para obtener una descripción del comportamiento de los frentes en relación a la columna de agua, se utilizaron los datos de CTD para cada uno de los cruceros, con estos datos se calculó la profundidad de la capa de mezcla como lo explicado en los métodos.

A continuación, en las Figuras 57 a 60 se tienen las capas de mezcla para tres cruceros de cada estación, enseguida se realizaron las mismas figuras con los colores de los frentes puestos sobre las profundidades y con ello se analizó la ubicación de los frentes y las relaciones de cada uno de ellos con la profundidad capa de mezcla.

En la descripción general de los datos, realizada con promedios, se encontró que: la PCM más somera se encuentra normalmente cercana a la costa y más profunda lejos de la costa para todas las estaciones del año; se advierte que la PCM es mayor en invierno que en otras estaciones del año, con una profundidad máxima de 90 metros fuera de la costa al sur de la región CalCOFI, frente a las costas de San Diego a Punta Concepción, misma locación para la cual se encontraron las profundidades mayores en otras temporadas. Frente a las costas de Punta Concepción, la PCM es mayor que la PCM cerca de otras costas. No se puede comparar la parte norte de la región en las estaciones de verano y otoño debido a que los cruceros en esa época del año no cubren esa zona.

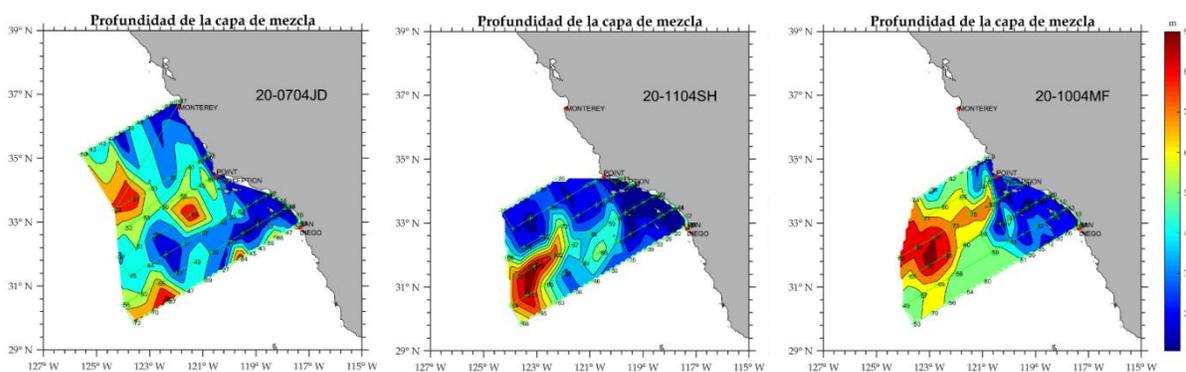
Como dato adicional, se estimaron las temperaturas potenciales promedio de la capa de mezcla la cuales coincidieron los datos de termosal tomados a seis metros de profundidad (teniendo correlaciones de  $\sim 0.998$  para los datos de termosal más cercanos al lance), por lo cual no se agregó y se consideró a los datos de termosal tomados 6 metros de profundidad como una buena referencia a la capa de mezcla completa. Las barras de colores son idénticas para cada estación, pero, no entre ellas para fines de la investigación.



**Figura 57:** Profundidad de la capa de mezcla en invierno para los cruceros 0401JD, 0602JD y 1001NH. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores.

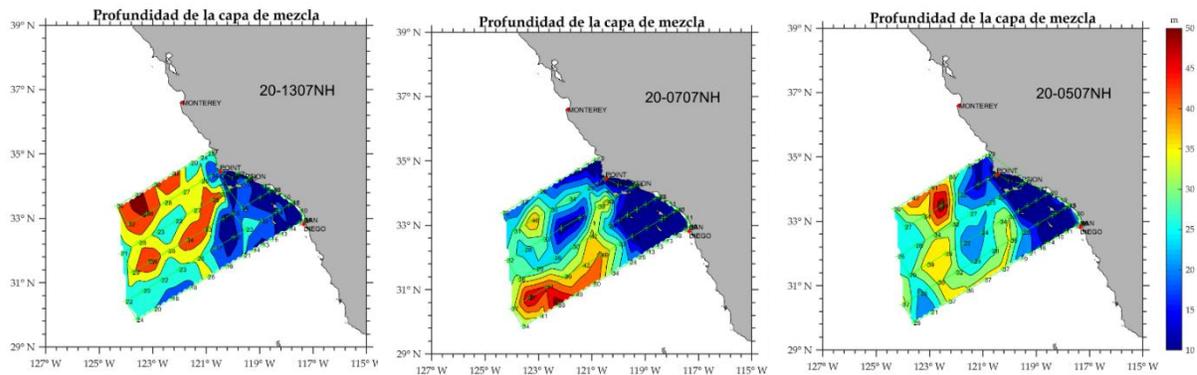
En el invierno (Figura 57), en el crucero de enero de 2008 se muestra un gancho en la profundidad de la capa de mezcla, mismo que se tiene presente en las cintillas de ese crucero, en él se observa una zona donde la profundidad de la capa de mezcla es de  $\sim 89$  m y parece estar conectado mar adentro, en los otros cruceros no se apreció.

A partir de  $\sim 400$  km lejos de la costa se advierten las mayores profundidades de la capa de mezcla en invierno, ahí pasan de profundidades alrededor de 50 m a aumentar drásticamente hasta llegar a profundidades de hasta 90 m al alejarse más de la costa.

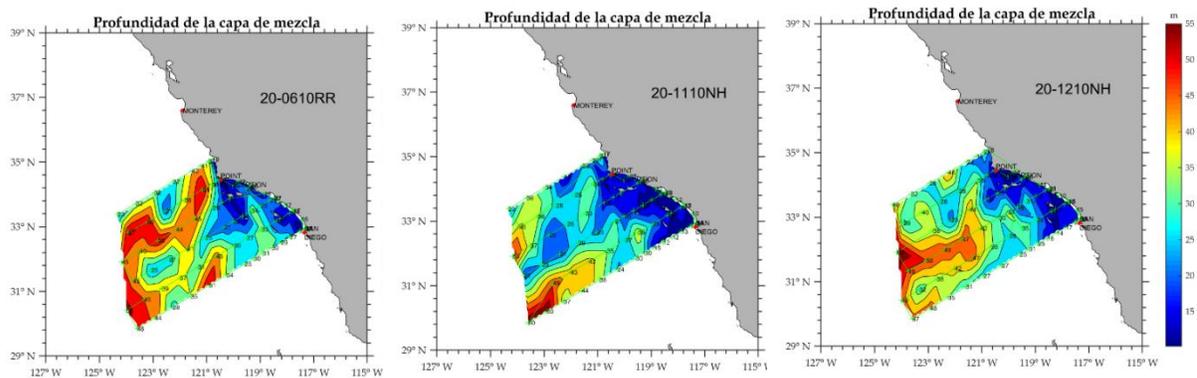


**Figura 58:** Profundidad de la capa de mezcla en primavera para los cruceros 0704JD, 1004SH y 1104JD. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores.

En la primavera (Figura 58) la PCM tiene profundidades similares a las del invierno, manteniendo la máxima a 90 m. En el crucero de abril de 2011, se distingue un gancho similar al que se avizoró en el crucero de enero de 2004 pero algunos grados al oeste, en este mismo crucero la zona somera se extiende a  $\sim 600$  km de la costa. En el crucero de abril de 2007 y en el de abril de 2010 se registró que hubo profundidades mayores a distancias más cercanas a la costa que durante el invierno.



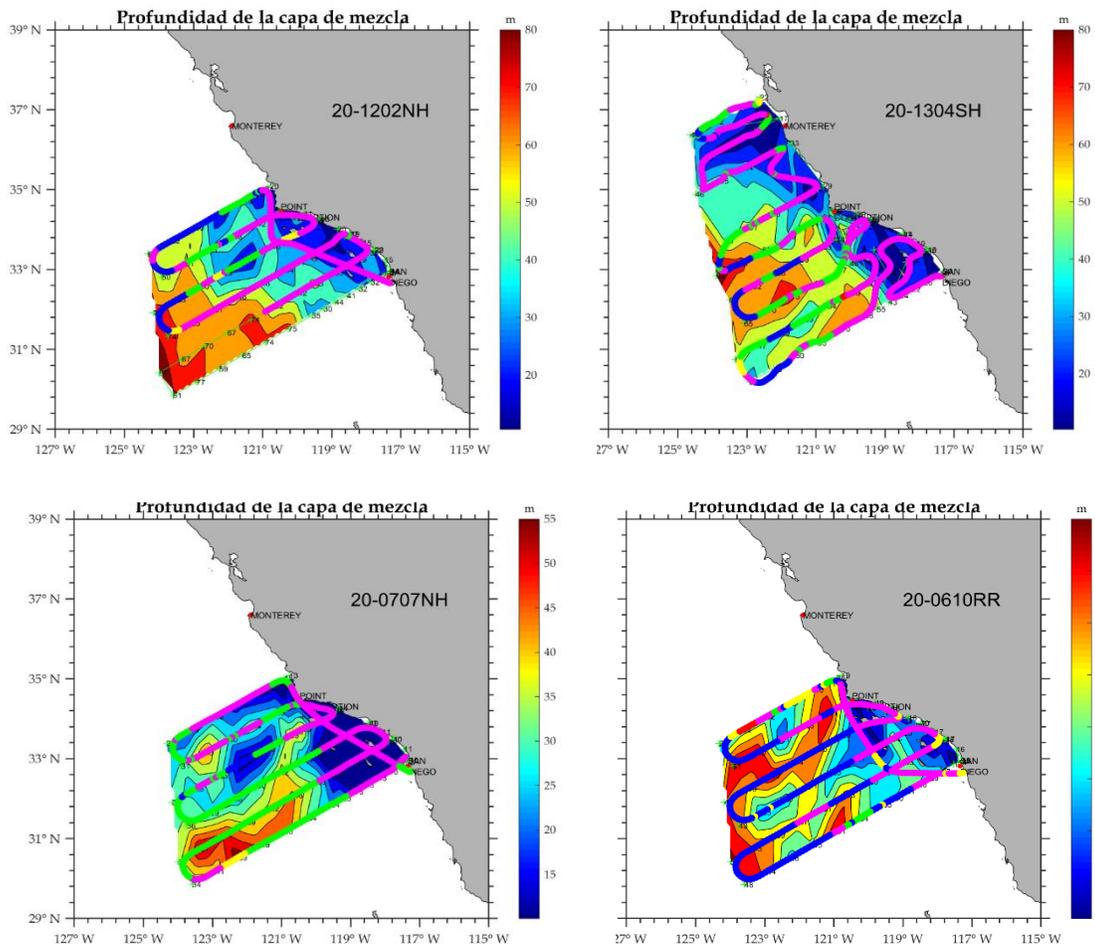
**Figura 59:** Profundidad de la capa de mezcla en verano para los cruceros 0507NH, 0707NH y 1307NH. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores.



**Figura 60:** Profundidad de la capa de mezcla en otoño para los cruceros 0610RR, 1110NH y 1210NH. Los tonos rojos indican máximos y los tonos azules mínimos, como se muestra en las barras de colores.

En el verano, mostrado en la Figura 59, la PCM mayor es de 50 m mar adentro, en la región cercana a la costa la PCM es somera. En los tres cruceros analizados se observa un gancho en cuyo interior la PCM es menor a lo que se encuentra alrededor, en el crucero en el que se muestra el cambio más drástico es en

el de julio de 2007, en los demás las diferencias son más pequeñas entre el centro y el rededor. Frente a Punta Concepción se observa que la profundidad de la capa de mezcla es mayor, que, en el resto de la zona costera, en la figura pareciera que desde Punta Concepción hay una pinza que detiene las profundidades mayores desde Punta Concepción y se abren como cortina mar adentro, se nota principalmente en primavera y verano.



**Figura 61:** Profundidad de la capa de mezcla y sus frentes para los cruceros de febrero de 2012, abril de 2013, julio de 2007 y octubre de 2006. Frente compensado (azul), frente opuesto(rojo), frente térmico (magenta), frente salino (verde); los colores rojos de PCM indican profundidades máximas estacionales y azules someras. En las figuras se muestra que la compensación en la capa de mezcla se encuentra condensada en las zonas donde la profundidad de la capa de mezcla es mayor en cada una de las estaciones del año; los frentes de temperatura potencial en profundidades someras; los frentes salinos zonas profundas; los frentes opuestos ni el evento no identificado fueron localizados en estas figuras.

En la Figura 60 están las PCM de los cruceros de otoño, en esta estación del año la PCM mayor es de 55 m, cerca de la costa, las profundidades someras menores a 25 m están a ~ 100 km de la costa, después de eso

aumentan las profundidades, en esta temporada se observa que las profundidades mayores a 38 m dominan la región estudiada. Frente a Punta Concepción se repara que la PCM es somera, en disparidad a la primavera y al verano. Punta Concepción tiene efecto punta, en la zona existen giros y surgencias.

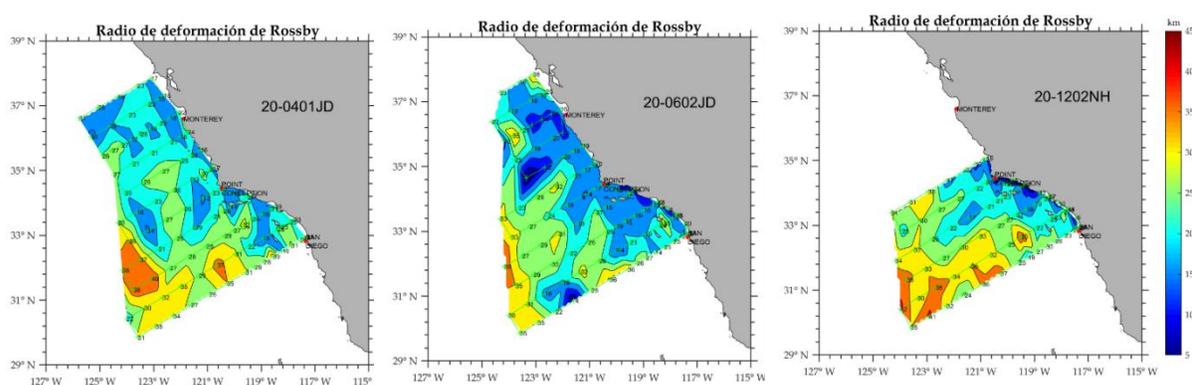
Para identificar las relaciones existentes entre cada uno de los frentes y la PCM se realizaron figuras donde se superpusieron los frentes de cada crucero a sus profundidades de capa de mezcla, al escrutar la comparación de ambos se observa que cuando la capa de mezcla es profunda, existen zonas de compensación, la profundidad de la capa de mezcla no es la máxima anual sino la máxima estacional, esto sucedió en todos los cruceros que se examinaron y en los que se encuentran en la Figura 61.

En otoño de 2006 es en el que se vislumbra mejor. Se distingue paralelamente la aparición de frentes térmicos cerca de la costa en cada uno de los cruceros, en los cuales la profundidad de la capa de mezcla es somera. Curiosamente en el crucero de octubre de 2010, justo donde se da el cambio de los colores fríos a los cálidos cambia también el tipo de frente mostrado, alternándose entre magenta y azul. Los frentes salinos se encontraron principalmente lejos de la costa durante todo el año cuando la PCM es medianamente profunda. Los frentes opuestos con ocurrencia mucho menos común se registraron en diversos lugares muy puntuales, por lo que no se encontró una ubicación abundante.

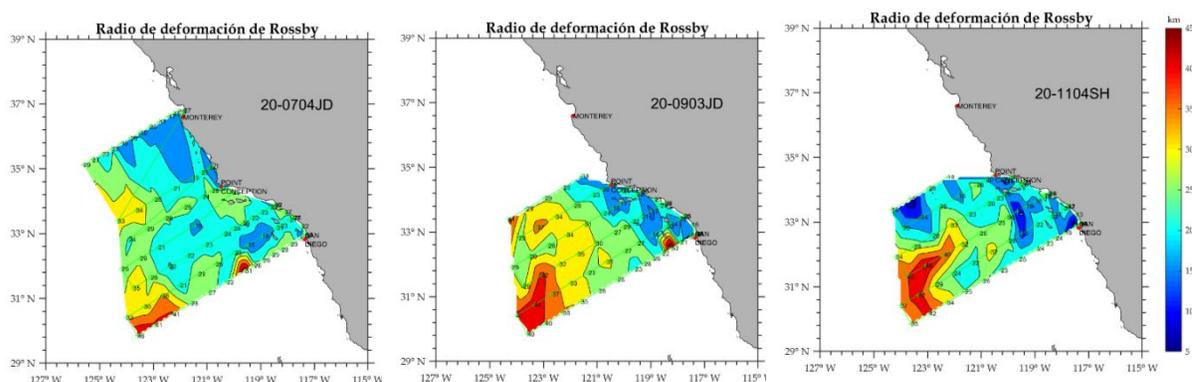
### 3.2.3 Radio de deformación de Rossby

Se encontró que el radio de deformación de Rossby varía entre 5 y 45 kilómetros en la región CalCOFI. En general, lejos de la costa el radio de deformación de Rossby es mayor que cerca de la costa, sin embargo, en verano, se observaron radios de deformación mayores en la costa entre San Diego y Punta Concepción. Para las figuras de radio de deformación de Rossby las barras de colores se mantienen iguales para todas las épocas del año. Los cruceros de invierno mostraron radios de deformación de entre 5 y 20 kilómetros a partir de los 34° norte hacia el norte en los ~ 500 km cercanos a la costa, fuera de la costa, en la zona sur de la región CalCOFI los radios varían entre 25 y 35 kilómetros en todos los cruceros analizados. El gancho que se observó en la capa de mezcla del crucero de enero de 2004 tiene radio de deformación de 25 km y se distingue la zona de las demás, todo lo anterior se contempla en la Figura 62. De manera similar al invierno, la primavera (Figura 63) exhibió radios de deformación en los primeros 200 km cercanos a la costa radios de deformación menores a 20 kilómetros en la región sur, mostrando que al norte en el crucero de abril de 2007 se tienen radios de deformación pequeños también. Fuera de la costa el rango es de 25 a 40 km aumentando mar adentro. El verano (Figura 64) reveló radios de deformación de entre 25

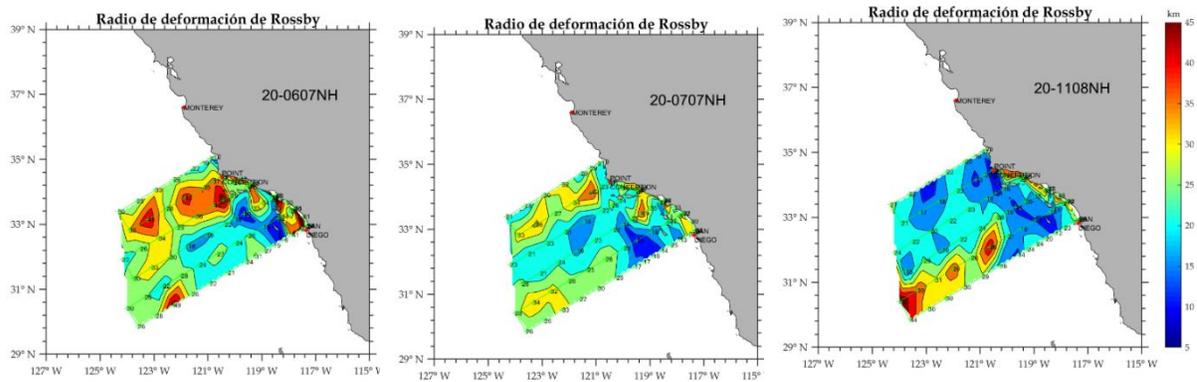
y 45 kilómetros, cerca de la costa y lejos de la costa, manteniendo radios de deformación de Rossby de entre 5 y 20 kilómetros en el centro de la región, quedando “rodeados” por los radios de deformación de Rossby mayores, en esta temporada es en la cual se tienen los radios de deformación mayores en la región de estudio. En otoño, la zona sur de la región CalCOFI se mantiene con radios de deformación de Rossby de entre 5 y 20 kilómetros mostrándose homogéneo en grandes áreas, los radios de deformación mayores son de 30 km lejos de la costa (Figura 65). No se pudieron identificar características clave de la presencia de alguno de los tipos de frentes con el radio de deformación de Rossby.



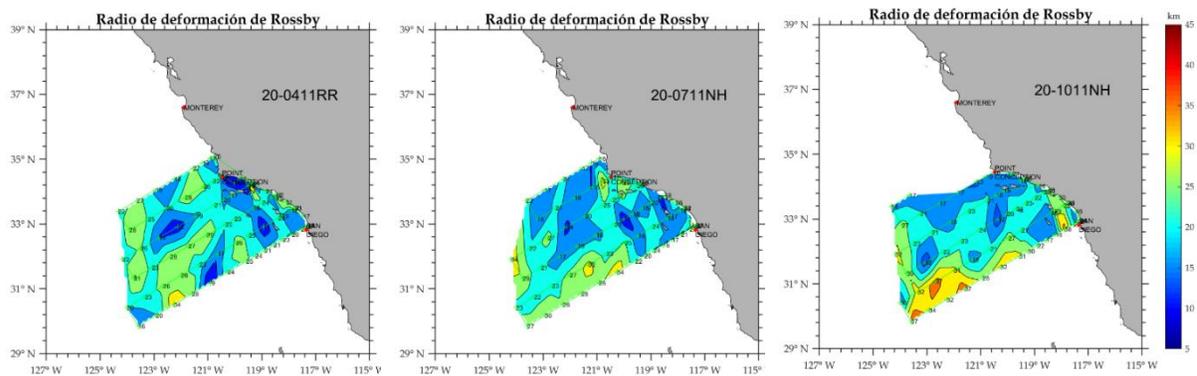
**Figura 62:** Radio de deformación de Rossby en invierno para los cruces de enero de 2004, febrero de 2006 y febrero de 2012. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores.



**Figura 63:** Radio de deformación de Rossby para los cruces de abril de 2007, marzo del 2009 y abril de 2011. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores.



**Figura 64:** Radio de deformación de Rossby para los cruceros de julio de 2006, julio de 2007 y agosto de 2011. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores.



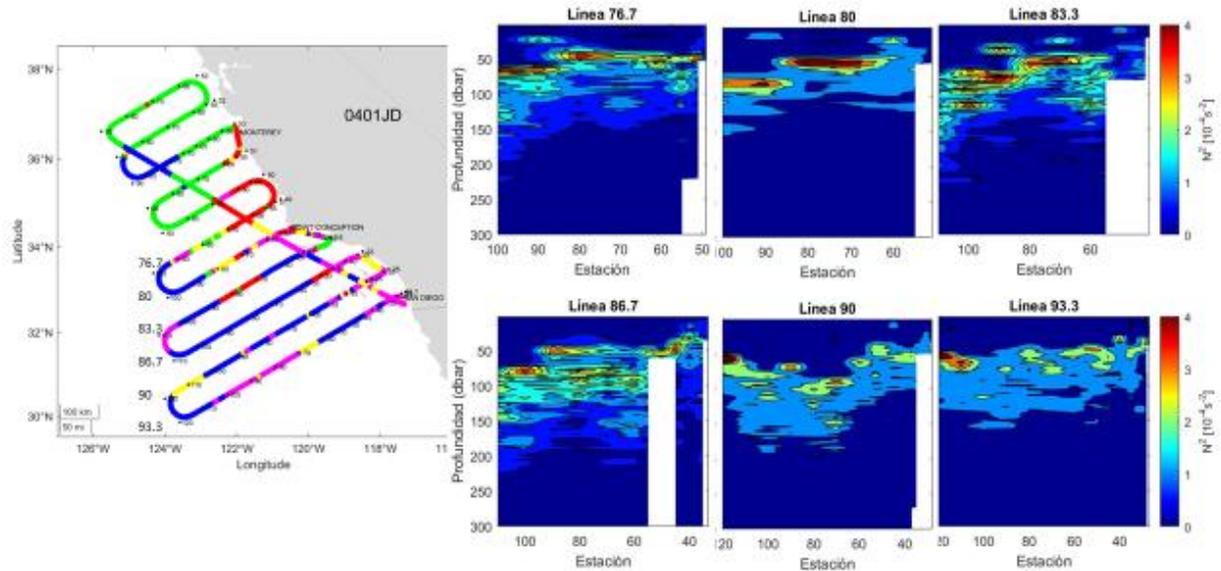
**Figura 65:** Radio de deformación de Rossby para noviembre de 2004, noviembre de 2007 y noviembre de 2010. Los colores cálidos indican radios de deformación mayores y los fríos menores.

### 3.2.4 Estratificación

Por medio de la frecuencia de Brünt Väisälä se mostró el grado de estratificación de cuatro cruceros característicos para exhibir qué sucede bajo el océano en el lugar donde se encuentran cada uno de los frentes encontrados. Los cruceros que se tomaron como referencia coinciden con todos los demás cruceros analizados y muestran todas las propiedades estudiadas, por lo que pueden ser tomados como representativos de las estaciones del año.

Para las Figuras se tomaron solamente las líneas hidrográficas que se encuentran al sur de la región CalCOFI, desde la línea 76.7 hasta la 93.3, en el crucero de octubre de 2012 no se mostró la línea 83.3 por

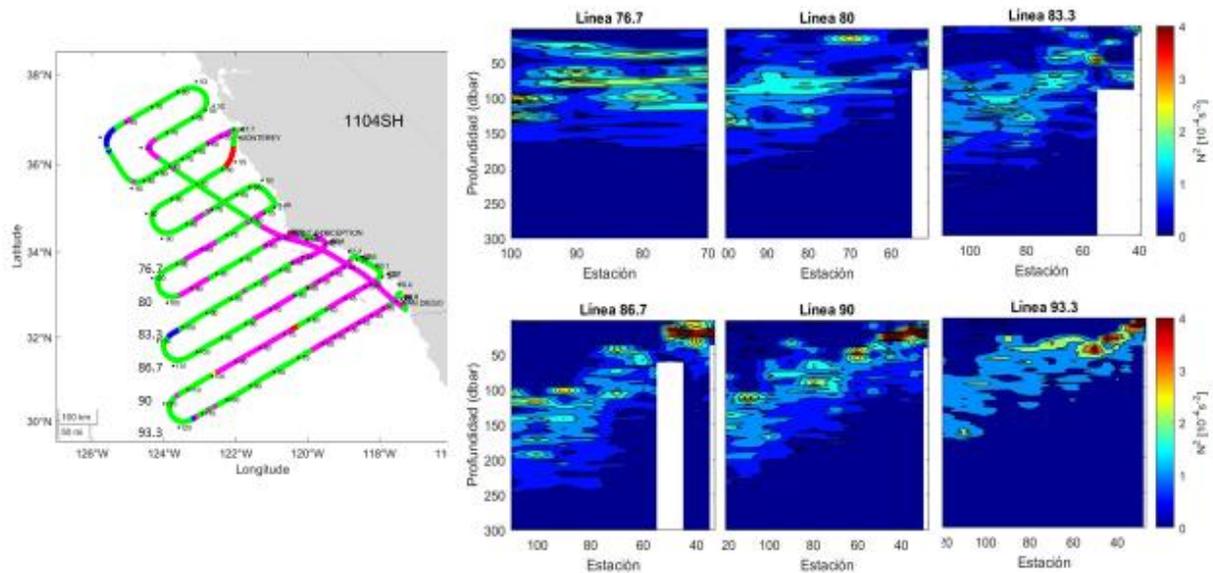
falta de datos. Se tiene presente que los valores donde existe alta estratificación (altas frecuencias) se encuentran el color rojo y los que tienen poca (bajas frecuencias) están en azul.



**Figura 66:** Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de enero de 2004, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 0401NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico (magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas.

El crucero de enero de 2004 (Figura 66) denota que en las regiones en las que hay compensación las frecuencias bajas de Brunt Väisälä se mantienen hasta los 50 m de profundidad en toda la región observada, en la costa las líneas muestran frecuencias altas cerca la superficie y estas mismas se manifiestan en el recorrido del crucero con frentes térmicos, principalmente en la línea 86.7. En la línea 83.3 se observa cerca de la costa que existe un frente de salinidad seguido de uno de temperatura potencial, coincidiendo con que en el térmico la frecuencia aumenta cerca de la costa, en el salino se distinguen frecuencias a 30 m de profundidad, en esta misma línea entre las estaciones 60 y 80 se tienen frentes opuestos que coinciden sobre frecuencias de Brunt Väisälä cercanas a la superficie, en la parte en medio hay un frente de salinidad, justo donde las frecuencias disminuyen y a parecen a mayor profundidad; en torno a lo anterior, hay frentes compensados donde las mayores frecuencias están en torno a las 50 m de profundidad.

Lo antes dicho, coincide con el gancho mostrado con anterioridad, este es un remolino ciclónico: el remolino del sur de California. En la línea 76.7, sobre la estación 90, se muestra un frente de temperatura potencial, que coincide también con las frecuencias altas cercanas a la superficie; de la estación 50 a la 70 donde se muestran los frentes de densidad se tienen frecuencias de Brunt Väisälä menores a 0 cercanas a la superficie. El evento no identificado, no pudo ser caracterizado, debido a que es un conjunto de variaciones.



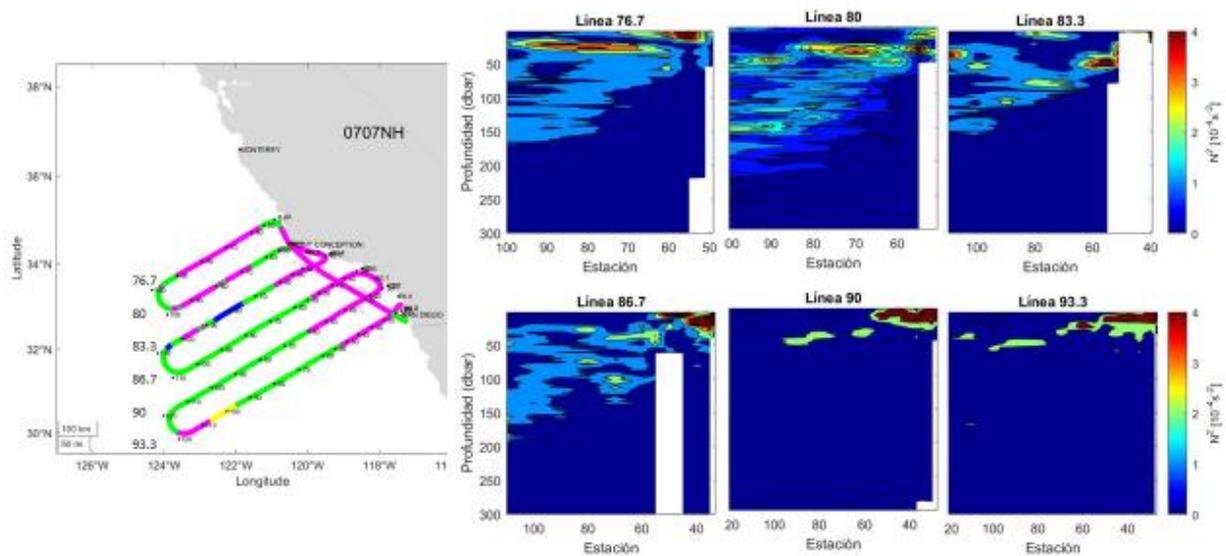
**Figura 67:** Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de abril de 2011, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 1104NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico (magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas.

En el crucero de abril de 2011, mostrado en la Figura 67, se presenta una fuerte inclinación en la pycnoclina desde los 0 y hasta los 100 decibares de profundidad, el movimiento vertical de encuentra presente hasta los 250 m de profundidad, como se muestra en la Figura 40 para las líneas hidrográficas 83.3, 86.7, 90 y 93.3, las mayor  $N^2$  se encuentra entre las estaciones 60 y 40, que son las más cercanas a la costa.

En este crucero, las zonas donde la estratificación está más marcada, según lo mostrado por el perfil, los frentes dominantes son los frentes térmicos; en la zona donde no se muestra fuerte estratificación, sino

hasta mayores profundidades, los frentes que dominan son los frentes de salinidad que se localizan fuera de la costa.

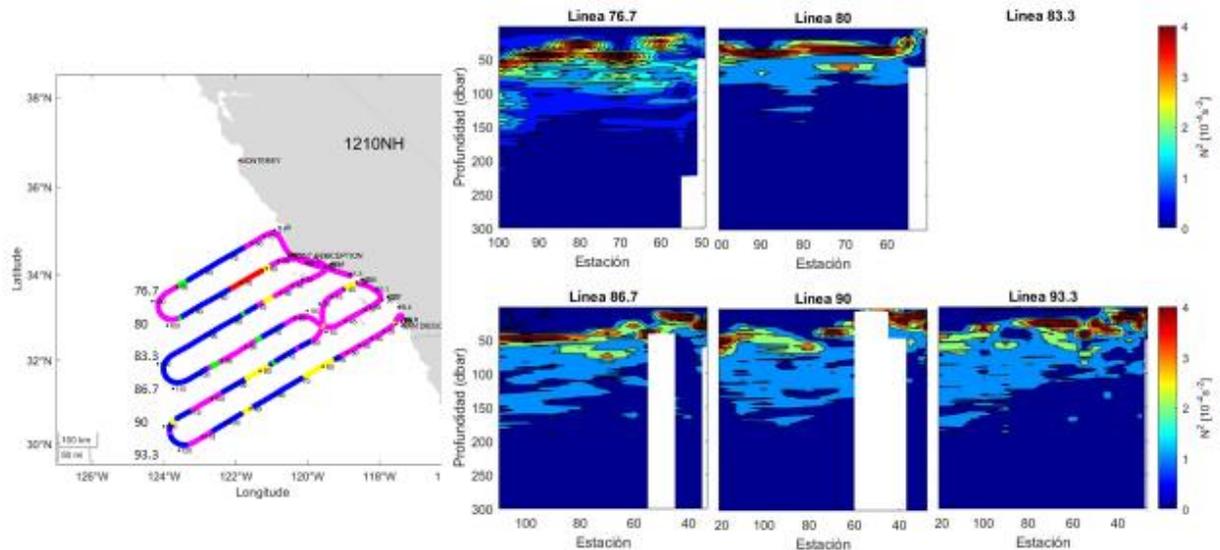
Los frentes opuestos y de salinidad que están paralelos a la línea de costa no muestran una clara relación con la estratificación, los primeros porque no se muestra la estratificación en la latitud, y los segundos porque están muy cerca de frentes de salinidad y temperatura potencial para determinarlos. Las mayores frecuencias de Brunt Väisälä se encuentran frente a San Diego y dos líneas al norte, esto es de las estaciones 40 a 50 en las líneas 86.7, 90 y 93.3.



**Figura 68:** Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de julio de 2007, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 0707NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico(magenta) y salino(verde), las líneas hidrográficas están señaladas.

En la Figura 68, el crucero de julio de 2007 expone que los frentes térmicos se encuentran sobre las regiones donde la estratificación es mayor cerca de la superficie ( $< 20$  m de profundidad), se manifiesta en todas las líneas cerca de la costa y en la línea 76.7 y 80 fuera de costa. Los frentes compensados están presentes cuando la estratificación no es tan fuerte como se expone en la línea 83.8 entre las estaciones 80 y 90. Los frentes de salinidad en este crucero se muestran lejos de la costa, bajo ellos la estratificación

es débil y se muestra inclinada desde la superficie y hasta los 200 m de profundidad advirtiendo movimiento sobre la diagonal para las líneas desde la 76.7 y hasta la 86.7 de norte a sur.



**Figura 69:** Frecuencia de Brunt Väisälä para las líneas hidrográficas en la zona sur de la región CalCOFI del crucero de octubre de 2012, los valores en rojo expresan frecuencias altas y en azul bajas. La cintilla muestra el recorrido del crucero 1210NH con cada uno de los frentes compensado (azul), de densidad potencial (rojo), térmico (magenta) y salino (verde), las líneas hidrográficas están señaladas.

En el crucero de octubre de 2012 presente en la Figura 69 se tiene de nuevo estratificación fuerte cerca de la superficie donde están los frentes térmicos, donde hay frentes compensados la estratificación comienza a mayor profundidad, generalmente alrededor de 50 m, cuando en los térmicos es  $< 20$  m. Se muestra que la estratificación es paralela a la superficie, en diferencia a la primavera y al verano y se mantiene “plana” a mayores profundidades. No pudo identificarse en este crucero la relación de los frentes salinos, opuestos ni no identificados con la estratificación.

### 3.2.5 Sumario

Podemos recapitular lo anterior en la siguiente tabla:

**Tabla 7:** Compendio de frentes, escala dominante 10 km.

Frentes	Ubicación	Estación	PCM	MA	Estratificación[10 <sup>-4</sup> s <sup>-2</sup> ]
Compensado	Lejos de la costa	Todo el año (Principalmente en otoño)	Máxima estacional (Profunda)	CPN	N <sup>2</sup> = 0 hasta 50 m de profundidad
Opuesto	Zona de surgencias y centro de remolino ciclónico	Invierno, primavera, otoño (Principalmente en invierno)	-	Mezclada o típica	N <sup>2</sup> < 0 cerca de la superficie
Salino	Lejos de la costa (al sur)	Invierno, primavera y verano (Principalmente en invierno)	Semiprofunda	Mezclada o típica	0 ≤ N <sup>2</sup> ≤ 1 hasta 100 m de profundidad
Térmico	Cerca de la costa (al sur)	Todo el año (Principalmente en verano)	Somera	CPN	N <sup>2</sup> > 2 cerca de la superficie

### 3.3 Explicación física

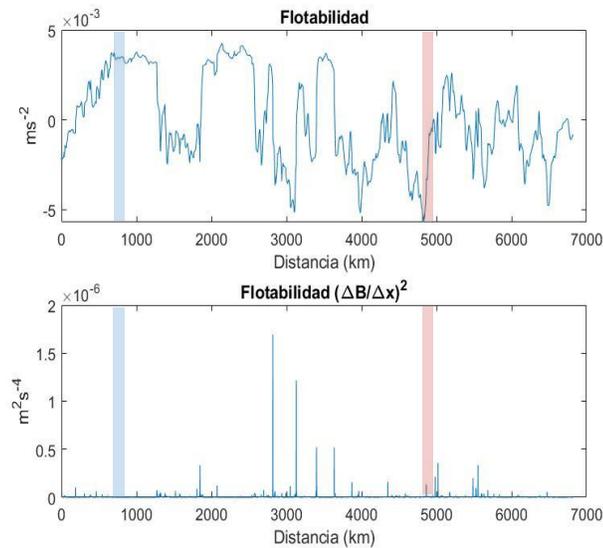
#### 3.3.1 Viento térmico

En escalas grandes donde se cumple que  $Ro \ll 1$ ,  $Fr \ll 1$  y  $H/L \ll 1$ , el océano se mantiene en un estado cercano a balance hidrostático y geostrofico (Taylor y Thompson, 2022). La combinación de estos balances implica una corriente horizontal cortada verticalmente conocida como viento térmico que equilibra los gradientes horizontales de flotabilidad:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} = b, f \hat{z} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla_h p \rightarrow -f \hat{z} \times \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \nabla_h b, \quad (17)$$

## Balance hidrostático y balance geostrófico → balance térmico

donde  $\nabla_h = (\partial_x, \partial_y, 0)$  es el operador gradiente horizontal,  $b = -g\rho/\rho_0$  es la flotabilidad (Taylor y Thompson, 2022).

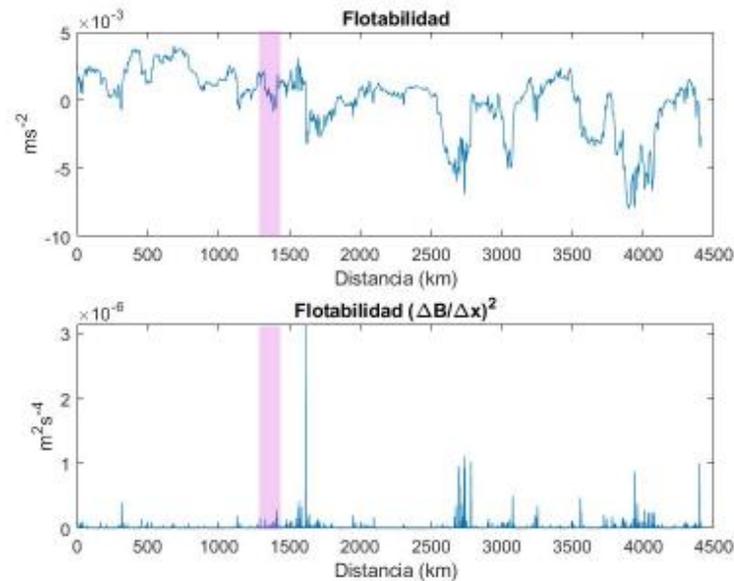


**Figura 70:** Flotabilidad y derivada de la flotabilidad en el crucero de enero de 2004, la zona sombreada en azul es donde se encuentra la compensación, la zona sombreada en rojo es donde se encuentra el frente opuesto.

De lo anterior tenemos que si  $\nabla_h b \approx 0$ , caso del frente compensado, entonces  $\frac{\partial u}{\partial z} \approx 0$  y, por lo tanto, domina la difusión turbulenta. Caso contrario,  $\nabla_h b \neq 0$ . Como se vio durante la investigación, los frentes opuestos, térmicos y salinos presentan gradientes de densidad y por lo tanto  $\nabla_h b \neq 0$  en todos ellos. La compensación es el resultado de difusión preferencial de gradientes horizontales de flotabilidad, ocurre porque los movimientos desequilibrados debido a los gradientes son más fuertes en la capa de mezcla que en el interior geostrófico; se mantiene en presencia de los movimientos de mesoescala y el forzamiento termohalino que actúan en la capa de mezcla (Macvean y Woods, 1980).

En la Figura 70 se muestran dos de los frentes estudiados, el frente compensado y el frente opuesto, en el frente compensado la flotabilidad se mantiene casi constante, mientras que en el frente opuesto la flotabilidad tiene un cambio brusco, se observa en la derivada de la flotabilidad que, en el caso compensado, se mantiene en 0, mientras que en el frente opuesto existe un cambio marcado. En el frente

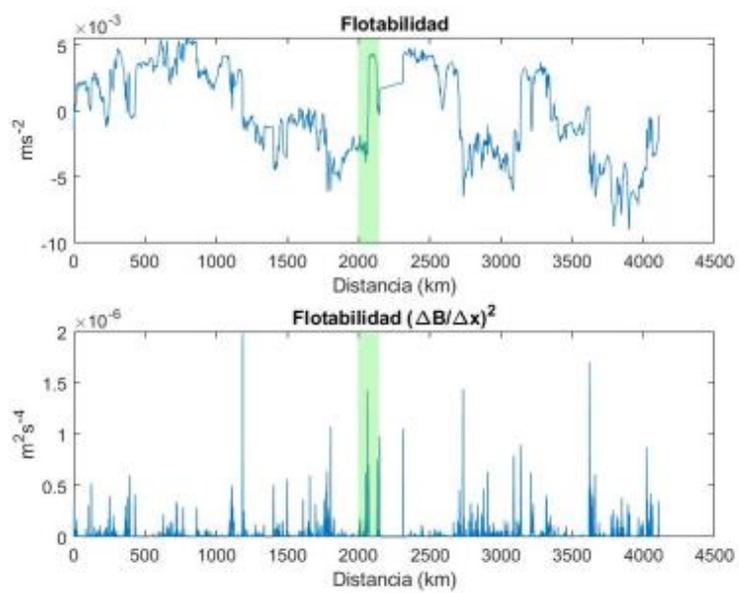
térmico (Figura 71) el cambio en la flotabilidad es evidente, al igual que en el frente de salinidad (Figura 72).



**Figura 71:** Flotabilidad y derivada de la flotabilidad en el crucero de octubre de 2006, la zona sombreada en magenta es donde se encuentra el frente térmico.

La deformación de mesoescala aumenta exponencialmente los gradientes de flotabilidad hasta que se vuelven gravitacionalmente inestables y se mezclan como explican Macvean y Woods (1980). La agitación de los remolinos geostróficos produce frentes de escala generalmente pequeña. Debido a la restricción del viento térmico, las regiones de tensión horizontal fuerte coinciden espacialmente con la circulación geostrófica vertical evitando las pequeñas escalas en la densidad potencial, de lo anterior, la densidad potencial tiene grandes escalas espaciales por las restricciones del viento térmico (Macvean y Woods, 1980), por ello este balance es una buena aproximación para la mesoescala o escalas mayores.

En la submesoescala el equilibrio dinámico es frecuentemente inestable (Macvean y Woods, 1980). El estiramiento no lineal por remolinos geostróficos tiende a destruir el balance del viento térmico. La circulación ageostrófica instantáneamente restaura el balance de viento térmico. Es las velocidades verticales ageostróficas permiten al fluido permanecer en superficies isopicnas y suprimir todos los efectos frontogénicos en  $\rho$  (Macvean y Woods, 1980).



**Figura 72:** Flotabilidad y derivada de la flotabilidad en el crucero de noviembre de 2007, la zona sombreada en verde donde se encuentra el frente salino.

## Capítulo 4. Discusión

---

En este trabajo se estudió la variabilidad estacional e interanual de las fluctuaciones de temperatura potencial, salinidad y densidad potencial en la capa de mezcla en la región CalCOFI con 35 cruceros que cubrieron las fechas desde enero de 2004 a noviembre de 2016. Se mostró que en invierno y primavera domina el agua fría, principalmente en primavera, de igual manera, en primavera, la salinidad en la región es la máxima, al contrario, de lo mostrado por Jerónimo (2007), donde el ciclo estacional de la salinidad presenta las salinidades más bajas en la capa de mezcla en abril, esto puede deberse a que nuestra zona se ubica en el centro-sur de California, donde la Corriente de California ocurre generalmente a 300-400 km de la costa, mientras que en Baja California, donde se encuentra la región IMECOCAL, ocurre a 200 km (Lynn y Simpson, 1987).

Por otro lado, en primavera ocurre el máximo de surgencias costeras, por lo que se puede encontrar agua más salada en superficie de origen subsuperficial. Los máximos en temperatura potencial se muestran en el verano y los mínimos en la salinidad se dan en el invierno. Lo que coincide con las descripciones y valores de las propiedades termohalinas de la zona de estudio como lo muestran Lynn y Simpson (1987). Dichos cambios, pueden ser explicados por las variaciones en la intensidad de la Corriente de California (Lynn y Simpson, 1987), la variación de la intensidad de las surgencias (Sching y Mendelssohn, 1997) y el ciclo estacional de la entrada de calor en la capa mezclada, donde el mínimo ocurre en invierno y el máximo en verano [Swenson y Niiler, 1996; Jerónimo, 2007].

Las cintillas mostraron los recorridos de los cruceros estudiados durante esta investigación y en invierno mostraron agua fría y poco salada al norte lo que corresponde a la masa de agua Subártica correspondiendo a Lynn y Simpson (1987), se muestra también en los diagramas T-S, donde se muestra su ubicación, esta masa de agua también está presente en la primavera. En el invierno de tormentas como lo señalan Walter et al. (2018) existen surgencias que son más débiles, pero tienen una alta variabilidad. Durante el invierno y la primavera, cerca de la costa frente a las costas de Punta Concepción hasta Monterey muestra aguas frías y saladas en mayor o menor medida coincidiendo con la zona de surgencias mostrada por Jacox et al. (2018) y Walter et al. (2018).

La época del año con surgencias más intensas la primavera, lo que corresponde al pico de surgencias en abril y mayo que señalan Walter et al. (2018) cuando los vientos son más fuertes y variables, lo anterior se muestra en el diagrama T-S donde la masa de agua predominante es la de Surgencias, también, la intensidad

de la Corriente de California es mayor en esta época del año (Lynn y Simpson, 1987). En la investigación, en la parte norte se localizó masa de agua de Surgencias hasta 500km lejos de la costa durante la primavera, que no es señalada por ninguno de los autores anteriores.

Se observa en la primavera agua cálida y salada cerca de la costa y lejos de la costa en la parte sur de la región, que coincide con la intrusión de la masa de agua Central del Pacífico Norte mencionada por Venrick (2000) relacionada el Frente de Ensenada y al remolino del sur de California justo en la zona mencionada por ellos en su Figura esquemática. El frente de Ensenada, no se observa claramente, sin embargo, se muestra como un gancho el principio y el fin en lo que abarca la zona de estudio. En el verano y en el otoño, la región se encuentra completamente dominada en toda la región por la masa de agua Central del Pacífico Norte, ya no se observan las características vistas en primavera, lo que coincide también con Venrick (2000) cuando menciona que en el verano se suele mover el frente de Ensenada 100-200 km al sur volviéndose difuso (Chereskin y Niiler, 1994). Esto se observa de igual manera en los diagramas T-S, donde en verano y en otoño la masa de agua predominante es la masa de agua Central del Pacífico Norte. Los valores de *spiciness* reflejaron resultados similares a los de las masas de agua siendo  $< 1 \text{ kg/m}^3$  en inviernos y  $> 1 \text{ kg/m}^3$  en veranos, coincidiendo con Lynn y Simpson (1987), representando en términos de las masas de agua valores  $< 0.5 \text{ kg/m}^3$  indicaron la presencia de la masa de agua Subártica, valores entre 0.5 y  $0.9 \text{ kg/m}^3$  la presencia de la masa de agua de Surgencias, centrado en  $1 \text{ kg/m}^3$  la presencia de agua mezclada o típica de la región y valores mayores la presencia de la masa de agua Central del Pacífico Norte.

La capa de mezcla se calculó en este trabajo con la técnica de Kara et al. (2000) utilizando diferencias de densidad potenciales, con los resultados se estudió la variabilidad estacional e interanual. La capa de mezcla en la región de estudio es poco profunda cerca de la costa y profunda lejos de la costa, estas profundidades coinciden con lo analizado en la literatura para la región estudio como lo muestran los resultados de Jerónimo (2007). Se destaca también, que, en la parte norte, donde hay zona de surgencias, la capa de mezcla es somera. En el invierno alcanzó profundidades de 80 m en promedio, y se mantuvo en primavera en 75 m en promedio; en verano y otoño las mayores profundidades llegaron hasta los 35 y 50 metros respectivamente. De lo anterior, su máximo fue en invierno y su mínimo en verano resultados que concuerdan con Jerónimo (2007). La temperatura potencial de la capa de mezcla en general es menor en el norte y en la zona de surgencias y mayores en el sur de la región, resultados esperados por la geografía de la zona entre  $29^{\circ}\text{N}$ - $39^{\circ}\text{N}$ . La estacionalidad de la capa de mezcla está influenciada por las variaciones en la Corriente de California y las surgencias (Jerónimo, 2007).

El radio de deformación de Rossby se mantiene debajo de los 50 Km durante todo el año, teniendo valores menores en otoño y mayores en invierno. Lejos de la costa es mayor en todas las estaciones del año y cerca de la costa es más pequeño en todos los cruceros observados en relación con la capa de mezcla.

La estratificación en la columna de agua calculada con la frecuencia de Brunt Väisälä, mostró ser fuerte. Esto se debe a la interacción de las masas de agua cálidas y saladas en la capa de mezcla consistente a la configuración local de la circulación, donde la contracorriente advecta agua cálida y salada que forma un remolino ciclónico y el agua fría y poco salada es de origen Subártico (Torres, 2012). Además, se observa una curvatura en la estratificación de las  $\sigma$ -clinas, levantadas cerca de la costa, característica de la zona de surgencias (Jacox et al., 2018).

## 4.1 Frentes

### 4.1.1 Frentes compensados

Se encontró que en promedio los coeficientes  $\alpha = 2.2 \times 10^{-4}$  y  $\beta = 6.9 \times 10^{-4}$ , datos que concuerdan con los datos de Jerónimo (2002). Los rangos de  $R$  son amplios y en algunas de las zonas de la región de estudio las lejanas a la costa se encontró que  $0.995 < R < 1.005$ . En concepto, un frente de densidad horizontal compensada se refiere a que los efectos de la salinidad y la temperatura potencial tienen efectos contrarios en la densidad potencial de modo que se compensan haciendo que la razón de densidad sea exactamente  $R = 1$ , por lo que la densidad potencial no cambia ( $\Delta\rho = 0$ ) (Rudnick y Ferrari, 2000), de esta definición, se reveló en este trabajo que existen grandes áreas de compensación en la capa de mezcla en la región frente a las costas de California que concuerdan con lo encontrado por Rudnick y Ferrari (1999, 2000), no obstante, la afirmación de Rudnick y Ferrari (1999) de que  $R = 1$  en la capa de mezcla en todos los océanos no concuerda del todo nuestros datos ya que existen otros frentes que son más comunes en nuestra región de estudio.

Rudnick y Ferrari (2000) con datos de 50-dbar demostraron que la temperatura potencial y la salinidad son fuertemente coherentes en todas las escalas observadas sus gradientes coinciden de modo que los gradientes de densidad potencial se minimizan, procedimiento realizado con ondeletas como en nuestro estudio y demostraron que los gradientes de densidad potencial son raros incluso a las escalas más pequeñas. Sus resultados indican que la mayor tendencia de compensación se da en las escalas entre 100

m y 10 km y sugirieron que la capa de mezcla se mezcla horizontalmente de forma que los gradientes de densidad potencial se disipan mientras los de salinidad y temperatura potencial persisten. En nuestro estudio, comprobamos que en ciertas regiones esto se cumple en escalas de hasta 5 km, empero no en todos lados. Ferrari y Rudnick encontraron en su trabajo que la compensación está presente en invierno y en nuestro análisis la compensación está presente en la región de estudio durante el año en mayor o menor medida y en regiones variables en la zona de compensación.

A la par varios autores señalan que las propiedades termohalinas de pequeña escala de varios kilómetros de ancho se caracterizan por los gradientes de densidad potencial se muestran frecuentemente compensados en la capa de mezcla ( $\Delta\rho \ll |\alpha\Delta\theta|, |\beta\Delta S|$ ) [Roden, 1977; Ahran, 1990; Yuan and Talley, 1992], en nuestra región de estudio si fueron encontrados varios kilómetros de compensación, más en este trabajo no se demostró que la pequeña escala de varios kilómetros se caracterice principalmente por los gradientes de densidad potencial frecuentemente compensados.

Young (1994) y Ferrari y Young (1997) siguieron que la compensación es el resultado de la difusión selectiva de los gradientes horizontales de densidad potencial. Esto sucede a causa de la acción combinada de movimientos no balanceados y mezcla vertical que remueve rápidamente gradientes de densidad potencial, pero deja escondidos gradientes compensados de salinidad y temperatura potencial. La compensación es el resultado de la difusión preferencial de los gradientes horizontales de flotabilidad, que ocurre por los movimientos no balanceados de estos gradientes que son más fuertes en la capa de mezcla que más cercanos al interior geostrófico Ferrari y Paparella (2003).

La compensación se mantiene también en presencia de movimientos de mesoescala y forzamiento termohalino que actúa en la capa de mezcla (Ferrari y Paparella, 2003), esto se demuestra alrededor del remolino del sur de California en la parte sur de la región de estudio.

Las regiones donde se encontraron frentes termohalinos donde confluyen las masas de agua de las zonas  $R \sim 1$ . Ferrari y Young (1997) encontraron que en difusión no lineal y dadas las condiciones iniciales, soluciones exactas del sistema de ecuaciones puede ser encontrado simplemente a un fluido denso uniéndose a un fluido más ligero, mientras que los gradientes de presión aceleran verticalmente al fluido, también encontraron que la compensación es más fuerte entre gradientes que entre campos de salinidad y de temperatura potencial. De la misma manera Ferrari y Paparella (2003) señalan que la mesoescala aumenta exponencialmente los gradientes de flotabilidad hasta que se vuelven gravitacionalmente inestables y se mezclan.

Otra propuesta que se considera en la región de estudio referente a la compensación es en relación con el viento, como lo mencionan Walter et al. (2018), en el periodo “Transición Invernal” en octubre/noviembre cuando los vientos disminuyen, aunque nuestra región de estudio no es la misma, al estar muy cercanas podrían aplicar las mismas características.

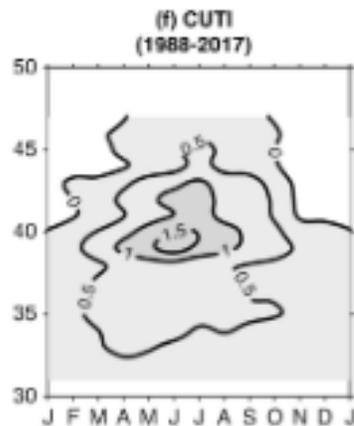
#### 4.1.2 Frentes opuestos

Los frentes opuestos están presentes cuando la columna de agua es inestable, esto sucede cuando agua más densa tiende a subir sobre agua más ligera creando un desequilibrio que genera oscilación, esto a su vez crea un gradiente de densidad potencial, en términos de flotabilidad significa que es negativa, es decir,  $N^2 < 0$  (Gill, 1982). Además, los frentes oceánicos de submesoescala se asocian a fuertes velocidades verticales (Mauzole et al., 2020). Al ser inestable los tiempos, en los que se puede localizar son muy cortos por lo que la escala de este trabajo no fue suficiente para observarlos con mayor frecuencia en nuestra región. Asimismo, las dimensiones de estos procesos y la duración no permiten mantener movimientos en balance geostrófico, por ello la submesoescala tiene movimientos ageostrófico (McWilliams, 2016). Estos frentes aparecen cuando la surgencia costera está activa o en remolinos ciclónicos, lo que coincide a lo encontrado en los datos estudiados.

Su importancia se da en el sentido que la submesoescala tiene movimientos verticales muy superiores a los de mesoescala (McWilliams, 2016). Como explica (Mauzole et al., 2020), los frentes de densidad o flotabilidad (frentes no compensados), ocurren en fluidos geofísicos (atmósfera y océano) como productos de una perturbación inicial, o anomalía que se acentúa por un campo a gran escala o mesoescala. A medida que el esfuerzo agudiza la anomalía, se desarrolla un gradiente y se pierde el equilibrio geostrófico. Con el fin de restablecer el equilibrio y atenuar el gradiente, una circulación secundaria aparece en el plano de frente cruzado, y un par de velocidades verticales de signo opuesto están asociadas con el frente: Las velocidades ascendentes se observan en el lado menos denso (cálido) del frente, mientras que el movimiento hacia abajo se encuentra en el lado más denso (frío) del frente de temperatura potencial (Mauzole et al., 2020).

### 4.1.3 Frentes térmicos

Los frentes térmicos fueron localizados durante todo el año, sin embargo, su ocurrencia es mayor durante el verano, cerca de la costa. Mauzole et al. (2020) encontró que los filamentos fríos representan a la mayoría de las estructuras frontales detectadas en la región CalCOFI. Su estacionalidad está fuertemente relacionada a la de las surgencias como lo muestra el parámetro CUTI (por sus siglas en inglés, Coastal Upwelling Transport Index) de Jacox et al. (2018) donde para los 31°N y hasta los 39°N (que abarca nuestra región de estudio) las surgencias costeras están presentes desde marzo y hasta noviembre como se muestra en la Figura 73. Coincidiendo con los lugares donde los frentes térmicos están presentes, cerca de la costa. De igual manera, las frecuencias de Brünt Väisälä muestran fuerte estratificación cerca de la superficie y la pycnoclina se muestra inclinada, lo que se relaciona consistentemente a las surgencias costeras. Se propone entonces que estos frentes son los que se relacionan principalmente a las surgencias costeras.



**Figura 73:** Estimaciones de transporte climatológico graficados con respecto a la latitud y los meses. (f) Índice de surgencias revisado (Costal Upwelling Transport Index) (Jacox et al., 2018).

### 4.1.4 Frentes salinos

En este tipo de frentes la densidad potencial está controlado principalmente por la salinidad, mientras la temperatura potencial se mantiene uniforme. Spiro y Mahadevan (2018) señalan que estos frentes se localizan principalmente en regiones donde hay salidas de cuerpos de agua dulce o se tiene temperatura potencial cerca al punto de congelación en la superficie, pero cabe mencionar, que en nuestra zona de estudio no se tienen esas características extremas y se encuentran presentes en abundancia. Mencionan

también, que una faceta importante de estos frentes viene de la compensación de la temperatura potencial por el enfriamiento de la atmósfera donde se reestratifican y esto ocurre en escalas de kilómetros donde los gradientes laterales de densidad potencial son dinámicamente inestables dentro de la capa de mezcla y se encuentran dentro de la submesoescala.

Los datos con los que Spiro y Mahadevan (2018) encontraron frentes de salinidad fueron similares a los nuestros (termosalinógrafo montado en buque con resolución de 10 km). En su investigación, las zonas donde dominan los frentes salinos mostraron relación con el enfriamiento de la superficie, el cual conduce debilitamiento selectivo de los frentes de densidad de submesoescala por compensación de la salinidad y la temperatura potencial y forma filamentos fríos de en los límites frontales de submesoescala más estratificados. También encontraron en contraste con nuestra investigación que estos frentes se encontraron en regiones con estratificación superficial y no donde hay capas de mezcla profundas, lo cual es contrario a lo que nosotros encontramos, ya que, en nuestro trabajo, se caracterizaron por estar en zonas donde la estratificación es medianamente superficial y donde la PCM es profunda.

Una propuesta de esta investigación es que estos frentes ubicados lejos de la costa se puedan deber a las diferencias entre las salinidades de las corrientes que pasan lado a lado (Corriente de California y Contracorriente de Davidson) o los remolinos de mesoescala anticiclónicos.

## **4.2 Frentes en relación con El Niño 2015-2016**

En el fenómeno El Niño 2015-2016 se identificó que hubo valores de temperatura potencial elevada en la región de estudio de acuerdo con Philander (1998), en los diagramas T-S se localiza la masa de agua Ecuatorial acarreada por la contracorriente que presenta valores altos de temperatura potencial y de salinidad viajando cerca de la costa.

De la investigación es importante destacar que, para los cruceros de abril de 2015 y abril de 2016, las masas de agua predominantes fueron la masa de agua Central del Pacífico Norte y la masa de agua Ecuatorial, como era de esperarse, debido al fenómeno “El Niño” (Siler et al., 2017). En el año 2015, los meses de julio y octubre no reportaron surgencias y en su lugar estuvo presente agua típica de la región poco densa ( $\sim 1023 \text{ kg/m}^3$ ), en el año 2016 en estos mismos meses se presentaron surgencias, con aguas ligeramente más cálidas y saladas que el promedio anual. Los frentes relacionados a este evento según lo mostrado por los datos fueron los térmicos ya que aumentaron su presencia durante esta temporada.

### **4.3 Explicación física propuesta**

En la explicación física se siguió a Chen y Young (1995) y a Taylor y Thompson (2022) que relacionan a la flotabilidad con la compensación y a su vez con el viento térmico. En la investigación se observa que la flotabilidad está directamente relacionada a la densidad mostrando el comportamiento de los frentes compensados y de los frentes de densidad (todos los revisados), dando como resultado que los gradientes de flotabilidad sean 0 en el caso compensado y diferentes a 0 en los otros casos, aún queda pendiente demostrar las variaciones de cualquiera de los frentes de densidad donde no es la difusión turbulenta la que domina.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En conclusión, en este trabajo se desarrolló una metodología para identificar frentes, basada en metodologías anteriores, pero que ahora contempla distinguir cuatro tipos de frentes diferentes de manera precisa a lo largo de un recorrido de un buque con datos continuos de termosalinógrafo, esto implica que teniendo datos de cualquier crucero se pueden extraer todas las características observadas en este trabajo.

Al inicio de esta investigación, se buscaba hallar compensación, lo cual se cumplió al encontrarla por métodos observacionales, sin embargo, el análisis de ondeletas reveló que había otros tipos de frentes que como se demostró son más importantes y comunes en la zona.

Se identificaron cuatro tipos de frentes en la región CalCOFI, divididos en dos categorías la primera: frentes compensados que incluye a los frentes compensados (no tiene gradientes de densidad potencial) y la segunda: frentes no compensados o de densidad que incluye a los frentes opuestos, frentes térmicos y frentes salinos (todos ellos tienen gradientes de densidad potencial). Estos frentes tienen variación estacional, características propias y explicación física diferente.

Con la profundidad de la capa de mezcla se encontraron relaciones de dos frentes, el frente compensado y el frente térmico. Frente compensado: se encuentra en las profundidades máximas de la capa de mezcla en todas las estaciones del año (el máximo variable por estación). Frentes térmicos: se encuentra cuando la PCM es somera en todas las estaciones del año.

La confluencia de las masas de aguas cálidas y saladas, con las frías y poco saladas en invierno crea gradientes compensados, debido a la fuerte mezcla que existe horizontalmente. Similarmente ocurre en verano y otoño. En el otoño los gradientes compensados se dan en segmentos de hasta  $\sim 200$  km, en estos mismos lugares la estratificación muestra  $N^2$  en 0 hasta  $\sim 50$  m de profundidad. En invierno y primavera la masa de agua de surgencias presenta frentes opuestos. Se pudo localizar en enero de 2004 que en el centro del remolino ciclónico del sur de California se generaron también frentes opuestos lo que los relaciona con zonas donde  $N^2 < 0$ , esto se da cuando la surgencia costera está activa y en remolinos ciclónicos.

Los frentes térmicos en relación con la estratificación se encontraron donde  $N^2$  es mayor cerca de la superficie, lo cual relaciona a estos frentes con las surgencias costeras, cercanos a la costa. En nuestra

región de estudio estos frentes son los más frecuentes. Los frentes salinos son muy frecuentes también en la región de estudio, pero aún no se encuentra determinada con precisión su explicación física.

Se plantea continuar con la investigación para probar y determinar las explicaciones físicas de cada uno de los frentes encontrados ya que esta investigación abrió nuevas posibilidades que no han sido exploradas. Además, se invita a encontrar una o varias explicaciones físicas para las zonas no identificadas, proponiendo estudiarlas con el mismo método de este trabajo.

## Literatura citada

---

- Ahran, M., 1990. The North Atlantic Current and Subarctic Intermediate Water. *Journal of Marine Research*, 48, pp. 109-144.
- Belkin, J., 2021. Remote Sensing of Ocean Fronts in Marine Ecology. *Remote sensing*, 13(883), doi: 10.3390/rs13050883
- Checkley, D. M., Barth, J. A., 2009. Patterns and processes in the California Current system. *Progress in Oceanography*, 83, pp. 49–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.028>.
- Chen, L., 1995. Mixed layer density ratio from the Levitus Data. *Journal of Physical Oceanography*, 25, pp. 691-701.
- Chen, L., Young, W. R., 1995. Density Compensated Thermohaline Gradients and Diapycnal Fluxes in the Mixed Layer. *Journal of Physical Oceanography*, 25, pp. 3026-3075.
- Chereskin, T., Niiler, P., 1994. Circulation in the Ensenada Front-September 1988. *Deep-Sea Research*, 41(8), pp. 1251-1287.
- Cushman-Roisin, B., Beckers, J., 2009. *Introduction to Geophysical Fluid Mechanics*. Academic Press, Hanover.
- Durazo, R., 2015. Seasonality of the transitional region of the California Currents System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, pp. 1173-1196, doi:10.1002/2014JC010405.
- Ferrari, R., Paparella, F., 2003. Compensation and Alignment of Thermohaline Gradients in the Ocean Mixed Layer. *American Meteorological Society*, 33, pp. 2214-2223.
- Ferrari, R., Young, W. F., 1997. On the development of thermohaline correlations as result of nonlinear diffusive parameterizations. *Journal of Marine Research*, 55(6), pp. 1069-1101.
- Flament, P., 2002. A state variable for characterizing water masses and their diffusive stability: spiciness. *Progress in Oceanography*, 54, pp. 493-501.
- Gill, A., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, San Diego.
- Gomez-Valdes, J., Vazquez-Cuervo, J., Aparco, J., Miranda, L. E., 2023. A Saildrone observes a compensated thermohaline front. Submitted to *Geophysical Research Letters*.
- Jackson, G.A. 1986. Physical oceanography of the Southern California Bight. Eppley, R.W. (ed.), *Plankton Dynamics of the Southern California Bight. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, 15. Springer-Verlag, pp. 13–52.
- Jacox, M. G.; Edwards, C. A.; Hazen, E. L.; Bograd, S. J. 2018. Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the U.S. West Coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, doi: 10.1029/ 2018JC014187.

- Jerónimo Moreno, G. 2007. Variabilidad termohalina de la capa superior del océano en la región sur de la corriente de California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 150 pp.
- Kara, A., Rochford, P., Hurlburt, H., 2000. An Optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research*, 108, pp. 16805-16821.
- Kolodziejczyk, N., Reverdin, G., Boutin, J., Hernandez, O., 2015. Observation of the surface horizontal thermohaline variability at mesoscale to submesoscale in the north-eastern subtropical Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, pp. 2588–2600, doi:10.1002/2014JC010455.
- Lynn, R. J., Simpson, J. J., 1987. The California Current System: The Seasonal Variability of its Physical Characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92, 1294-12966.
- Mauzole, Y. L., Torres, H. S., & Fu, L.-L., 2020. Patterns and dynamics of SST fronts in the California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, doi:10.1029/2019JC015499.
- Macvane, M. and Woods, J., 1980. Redistribution of scalars during upper frontogenesis: a numerical model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(448), pp. 293-311.
- McWilliams, J., 2019. A survey of submesoscale currents. *Geoscience Letters*, 6(3), doi:10.1186/s40562-019-0133-3.
- Ohman, M. D., Venrick, E. L., 2003. CalCOFI in a Changing Ocean. *The Oceanography Society*, 16, 76-85.
- Philander, S., 1998. What Is El Niño?. *GeoFIZZ*, 79(13), pp. 170.
- Ren, A. and Rudnick, D., 2021. Temperature and salinity extremes from 2014-2019 in the California Current System and its source waters. *Communications Earth & Environment*, 2(62), doi:10.1038/s43247-021-00131-9.
- Roden, G., 1977. Oceanic Subarctic fronts of the central Pacific: structure and response to atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research*, 7, pp. 761-778.
- Rudnick, D. and Ferrari, R., 1999. Compensation of Horizontal Temperature and Salinity Gradients in the Ocean Mixed Layer. *Science*, 283, pp. 526-529.
- Rudnick, D. and Ferrari, R., 2000. Thermohaline variability in the upper ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105, pp. 16857-16883.
- Rudnick, D., and Martin J., 2002. On the horizontal density ratio in the upper ocean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 36, pp. 3-21.
- Siegelman, L., O’Toole, M., Flexas, M., Fiviére, P., Klein, P., 2019. Submesoscale ocean front act as biological hotspot for southern elephant seal. *Nature*, 9(5588), doi:10.1038/s41598-019-42117-w.
- Siler, N., Kosaka, Y., Xie, S.P., Li, X., 2017. Tropical Ocean Contributions to California’s Surprisingly Dry El Niño of 2015/2016. *American Meteorological Society*, 30, pp. 10067-10079, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0177.1.
- Spiro, G. Mahadevan, A., 2018. Submesoscale-selective compensation of fronts in a salinity-stratified ocean. *Science Advances*, doi:10.1126/sciadv.1701504.

- Stommel, H., 1993. A Conjectural Regulating Mechanism for Determining the Thermocline Structure of the Mixed Layer. *American Meteorological Society*, 23, pp. 142-148.
- Svedrup, H., 1947. Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial current of the eastern. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 33, pp. 318-326.
- Swenson, M. S. y Niiler, P.P., 1996. Statistical analysis of the surface circulation of the California Current. *Journal of Geophysical Research*. 101(10), pp. 631-646.
- Venegas, S., 2001. *Patterns in Time: Time Series Analysis. Statistical Methods for Signal Detection in Climate*. Danish Center for Earth System Science, Denmark.
- Walter, R., Armenta, K., Shearer, B., Robbins, I., Steinbeck, J., 2018. Coastal upwelling seasonality and variability of temperature and chlorophyll in a small coastal embayment. *Continental Shelf Research*, 154, pp. 9-18.
- Young, W. R., 1994. The subinertial mixed approximation. *Journal of Physical Oceanography*, 27, pp. 381-402.
- Yuan, X., Talley, L., 1992. Shallow Salinity Minima in the North Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 22(11), pp. 1302-1316.