

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA**



**Relación entre remolinos de mesoescala y estriaciones  
oceánicas en el Pacífico Sur-Oriental frente a Chile**

**Emilio Salvador Concha Concha**

**Habilitación Profesional  
para optar al Título de Geofísico**

**8 de Julio, 2016**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Relación entre remolinos de mesoescala y estriaciones  
oceánicas en el Pacífico Sur-Oriental frente a Chile**

**Emilio Salvador Concha Concha**

**Habilitación Profesional  
para optar al Título de Geofísico**

Profesor Guía:  
Dr. Ali Belmadani.

Comisión:  
Dr. Oscar Pizarro A., Dr. Andrés Sepúlveda A., Dr. Samuel Hormazábal F.



8 de Julio, 2016

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>12</b>
<b>Resumen</b>	<b>13</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>14</b>
<b>2. Hipótesis y objetivos</b>	<b>21</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	21
2.2. Hipótesis . . . . .	21
<b>3. Metodología</b>	<b>22</b>
3.1. Datos . . . . .	22
3.2. Algoritmo de detección y seguimiento de remolinos . . . . .	23
3.3. Comparación de detecciones y seguimientos de remolinos . . . . .	26
3.4. Análisis espectral . . . . .	27
3.5. Diagramas Hovmöller y perfiles promedio . . . . .	29
3.5.1. Polaridad y altura del nivel del mar . . . . .	29
3.5.2. Polaridad de generación y altura del nivel del mar . . . . .	30
3.6. Generación costera . . . . .	30
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>32</b>
4.1. Comparación de resultados de algoritmo . . . . .	32
4.2. Análisis espectral . . . . .	37
4.2.1. Estriaciones estacionarias . . . . .	37
4.2.2. Estriaciones transientes . . . . .	39
4.3. Estriaciones estacionarias . . . . .	46
4.3.1. Polaridad y polaridad de generación interior . . . . .	46
4.4. Estriaciones transientes . . . . .	50
4.4.1. Polaridad . . . . .	53
4.4.2. Polaridad de generación interior . . . . .	57
4.5. Estriaciones y generación costera de remolinos . . . . .	60
4.5.1. Estriaciones estacionarias . . . . .	61

4.5.2. Estriaciones transientes . . . . .	64
<b>5. Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>

---

# Índice de figuras

- 1.1. Promedio temporal (1993 - 1996) de la componente zonal de velocidad geostrófica,  $\bar{u}$ , estimada a partir de topografía dinámica absoluta (ADT) de AVISO/CLS (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data/Collecte Localisation Satellites, Francia), filtrada espacialmente con pasa-alto (Buckingham y Cornillon 2013). . . . . 15
- 1.2. a) Contornos grises representan SSH promedio (intervalo de contornos = 5cm) entre 1993 y 2002 de una simulación *hindcast* en el modelo OFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator)(Masumoto et al., 2004) en el Pacífico-Sur Oriental frente a Chile. Colores muestran el campo filtrado espacialmente con pasa-alto (media ventana de 4 °), en cm. Las líneas rojas segmentadas indican aproximadamente las crestas de las estriaciones, que al mismo tiempo son identificadas con letras ( $A_m$ ,  $B_m$  y  $C_m$ ), y las líneas grises segmentadas delimitan la zona del campo filtrado que fue promediado a lo largo de las estriaciones. b) Perfil promedio a lo largo de las estriaciones (casi-zonal) del campo filtrado de SSH, en cm, en función de la latitud. c) Estructura vertical promedio, a lo largo de las estriaciones, de las velocidades zonales en  $cm\ s^{-1}$  en función de la latitud. Las líneas rojas segmentadas señalan la posición de las crestas de las estriaciones (Melnichenko et al., 2010). . . . . 15
- 1.3. a) Mapa del 1 de Agosto de 2001 de anomalía del nivel del mar (SLA, por sus siglas en inglés) AVISO, en cm, en el Pacífico Nor-Oriental filtrado espacialmente con un pasa-alto de media ventana de 5 °. En líneas grises se marcan las crestas de las estriaciones y contornos de  $\pm 6$  cm demarcan algunos remolinos de mesoescala energéticos, y b) diagrama Hovmöller latitud-tiempo promediado zonalmente entre 130 y 152 °O. La curva negra muestra la trayectoria de un remolino ciclónico (Maximenko, comunicación personal). . . . . 16
- 1.4. Remolino anticiclónico propagándose hacia el Oeste en el hemisferio sur en 3 momentos distintos. En flechas negras se muestran las velocidades asociadas a su perímetro. Las bandas azul (valores negativos) y roja (valores positivos) representan los chorros que aparecen al promediar en el tiempo las velocidades geostróficas del remolino (figura basada en las de Scott et al. 2008 y Buckingham y Cornillon 2013). . . . . 18

1.5.	Trayectorias de remolinos con tiempo de vida $\geq 1$ año en el Pacífico Norte sobrepuestos al número de trayectorias de remolinos por $1/4^\circ$ de grilla, con tiempo de vida $\geq 16$ semanas entre el 14 de Octubre de 1992 y el 3 de Enero de 2007 (Schax y Chelton, 2008). . . . .	19
1.6.	Bandas de polaridad en los 4 principales sistemas de surgencia (Chaigneau et al., 2009). . . . .	19
1.7.	a) MDOT, en <i>cm</i> , con filtro espacial pasa-alto en el Pacífico-Sur Oriental. Líneas rojas denotan crestas de las estriaciones. b) Perfiles promedio a lo largo de las estriaciones y ne función de la latitud: MDOT en negro, densidad de remolinos ciclónicos en azul y anticiclónicos en rojo (Maximenko et al., 2013). . . . .	20
3.1.	Dominio utilizado. El campo corresponde a SLA AVISO filtrado del 2 de Febrero de 1993.	22
3.2.	Magnitud efectiva de la respuesta al filtrado espacial pasa-alto con una ventana media de $4^\circ$ tipo Hanning. El filtro es casi isotrópico en latitud ( $\theta$ , grados) y longitud ( $\phi$ , grados). Las longitudes de onda en unidades de Km asumen que $1^\circ = 111,2$ Km, por lo que corresponden a distancias meridionales. La caja gris destaca longitudes de onda de 300-500 Km (Buckingham y Cornillon, 2013). . . . .	24
3.3.	Algoritmo de seguimiento de remolinos. a) Contorno $C_t$ , en líneas continuas, de un remolino en un tiempo $t$ ; b) caso en que ningún contorno $C_{t+dt}$ , representado en líneas segmentadas, intersecta a $C_t$ por lo que se termina el seguimiento del remolino; c) caso en que varios remolinos en $t + dt$ intersectan a $C_t$ por lo que el algoritmo utiliza la función de costo para encontrar el más similar a $C_t$ ; d) sólo un remolino en $t + dt$ intersecta a $C_t$ ; e) $C_{t+dt}$ está dentro de $C_t$ ; f) $C_t$ está dentro de $C_{t+dt}$ (Pegliasco et al., 2015). . . . .	25
3.4.	Zona utilizada para calcular los espectros 2-D sobre el campo de SLA AVISO (en <i>cm</i> ) del 10 de Enero de 1993. . . . .	28
3.5.	Generación total de remolinos por punto de grilla ( $0.5^\circ$ de resolución) para a) AVISO y b) ROMS. . . . .	31
4.1.	Mapas de número de remolinos por punto de grilla para Chelton (izquierda), AVISO (centro) y ROMS (derecha). Arriba anticlónicos y abajo ciclónicos. . . . .	33
4.2.	Mapa de radio promedio de remolinos para Chelton (izquierda), AVISO (centro) y ROMS (derecha). Arriba anticlónicos y abajo ciclónicos. . . . .	34
4.3.	Mapas de amplitud promedio de remolinos para Chelton (izquierda), AVISO (centro) y ROMS (derecha). Arriba anticlónicos y abajo ciclónicos. . . . .	35
4.4.	Histogramas de a) radio y b) amplitud. AC (CI) es para anticiclónicos (ciclónicos). . . . .	36
4.5.	MDOT de AVISO (izq.) y SSH promedio de ROMS (der.), ambos filtrados espacialmente, en donde son visibles las estriaciones estacionarias. . . . .	37

4.6.	Desviación estándar espacial del campo promedio de SSH en función del período $T$ en que se promedia para a) AVISO y b)ROMS. Puntos representan los datos, líneas rojas las curvas ajustadas de la forma $\sigma = \alpha T^\beta$ en el sentido de los mínimos cuadrados a los datos y línea azul el decaimiento de la desviación estándar para un campo de remolinos aleatorio propuesto por Schlax y Chelton (2008).	38
4.7.	Espectros espaciales 2-D suavizados de MDOT de AVISO (izq.) y SSH promedio de ROMS (der.). Líneas segmentadas muestran inclinación de los máximos locales.	39
4.8.	Espectros promedios suavizados para AVISO (izq.) y ROMS (der.) de campos instantáneos de SLA. Líneas segmentadas muestran inclinación del máximo 1 en AVISO ( $21^\circ$ ) y del máximo único en ROMS ( $4^\circ$ ), y la línea segmentada y punteada muestra la inclinación del máximo 2 de AVISO ( $-14^\circ$ ).	40
4.9.	Espectros promedios suavizados de promedios anuales para AVISO (izq.) y ROMS (der.) de campos instantáneos de SLA. Líneas segmentadas muestran inclinación de los máximos locales.	40
4.10.	Reconstrucción idealizada de campo SLA AVISO utilizando a) máximo 1, b) máximo 2 y c) máximos 1 y 2 del espectro promedio. Valores de la abscisa y ordenada no corresponden a la ubicación geográfica exacta.	41
4.11.	a) Campo de SLA AVISO del 21 de Marzo de 1993. En líneas negras continuas se muestran crestas de estriaciones con inclinación de $-14^\circ$ y en líneas negras segmentadas las de $21^\circ$ . b) Campo de SLA ROMS para el primer día de la simulación. Líneas negras muestran crestas de estriaciones con inclinación de $4^\circ$ . c) Promedio de SLA del año 1994 en AVISO. Líneas negras marcan crestas con $-7^\circ$ de inclinación. d) Promedio del SLA del tercer año de ROMS. Líneas negras marcan crestas con $-4^\circ$ de inclinación.	42
4.12.	Propagación del campo idealizado reconstruido de SLA de AVISO. Colores rojos (azules) indican anomalías positivas (negativas). El desplazamiento del campo es hacia el Oeste con una velocidad de $3 \text{ cm s}^{-1}$ y hacia el ecuador con una velocidad de $0,26 \text{ cm s}^{-1}$ , a modo de emular la propagación promedio real del campo de remolinos. $\Delta t = 38$ semanas y en total abarca un período de $\sim 4$ años. La línea continua marca una posición fija donde inicialmente se ubica una cresta (inclinación noroeste-sureste, $-14^\circ$ ), la línea segmentada se mueve con una cresta (inclinación noreste-suroeste, $21^\circ$ ) hacia el noroeste y la curva cerrada muestra un contorno de $0.1 \text{ cm}$ de un remolino anticiclónico. Valores de abscisa y ordenada no corresponden a la ubicación geográfica exacta.	43
4.13.	Promedios temporales del campo idealizado de SLA de AVISO con propagación hacia el noroeste (Fig. 4.12). Período sobre el que se promedia aumenta desde $t_1 = 65$ días hasta 365 días con un incremento $\Delta t = 60$ días. Colores rojos (azules) indican anomalías positivas (negativas). La línea continua marca una posición fija donde inicialmente se ubica una cresta (inclinación noroeste-sureste, $-14^\circ$ ). Valores de la abscisa y ordenada no corresponden a la ubicación geográfica exacta.	44

4.14. a) Promedio temporal sobre un período de 1 año de campos idealizados de AVISO con propagación hacia el noroeste (Fig. 4.12) (mismo del último panel de Fig. 4.13) y b) su espectro de Fourier en 2 dimensiones. Valores de la abscisa y ordenada en a) no corresponden a la ubicación geográfica exacta. . . . .	45
4.15. Mapas de a) polaridad y b) polaridad de generación de remolinos para AVISO. . . . .	47
4.16. AVISO: a) Regiones utilizadas para calcular perfiles casi-meridionales, b) perfiles Oeste y c) perfiles Este de MDOT filtrado (rojo), polaridad (azul continua) y polaridad de generación (azul segmentada). . . . .	47
4.17. Mapas de a) polaridad y b) polaridad de generación de remolinos para ROMS. . . . .	48
4.18. ROMS: a) Regiones utilizadas para calcular perfiles casi-meridionales, b) perfiles Oeste y c) perfiles Este de SSH promedio filtrado (rojo), polaridad (azul continua) y polaridad de generación (azul segmentada). . . . .	48
4.19. Regiones Este y Oeste utilizadas para calcular diagramas Hovmöllers para a) AVISO 21 °, b) AVISO -14 ° sobre campo de SLA del día 30 de Diciembre de 2002, y c) ROMS 4 °, d) ROMS -4 ° sobre el campo de SLA del segundo día del año 21 de simulación. . . . .	50
4.20. Diagramas Hovmöller de SLA AVISO filtrada para secciones Oeste (izq.) y Este (der.) con una inclinación de 21° . . . . .	51
4.21. Diagramas Hovmöller de SLA AVISO filtrada para secciones Oeste (izq.) y Este (der.) con una inclinación de -14° . . . . .	51
4.22. Diagramas Hovmöller de SLA ROMS filtrada para secciones a) Oeste y b) Este con una inclinación de 4° . . . . .	52
4.23. Diagramas Hovmöller de SLA ROMS filtrada para secciones a) Oeste de baja frecuencia (media móvil de 1 año), b) Este de baja frecuencia, con una inclinación de -4°. . . . .	52
4.24. Desviación estándar por latitud promedio para diagramas Hovmöller de SLA para a) AVISO (Fig. 4.20 y 4.21) y b) ROMS (Fig. 4.22 y 4.23). . . . .	53
4.25. Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de remolinos AVISO (en colores) comparado con SLA AVISO filtrada (en contornos) con ventana móvil de 181 días para regiones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de 21°. Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación. . . . .	54
4.26. Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de remolinos AVISO (en colores) comparado con SLA AVISO filtrada (en contornos) con ventana móvil de 181 días para regiones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de -14°. Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación. . . . .	55

- 4.27. Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de remolinos ROMS (en colores) comparado con SLA ROMS filtrada (en contornos) con ventana móvil de 181 días para regiones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $4^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación. . . . . 56
- 4.28. Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación de remolinos (en colores) comparado con SLA AVISO filtrado (en contornos) con ventana móvil de 181 días para secciones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $21^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad de generación y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación. . . . . 57
- 4.29. Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación de remolinos (en colores) comparado con SLA AVISO filtrado (en contornos) con ventana móvil de 181 días para secciones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $-14^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad de generación y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación. . . . . 58
- 4.30. Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación de remolinos (en colores) comparado con SLA ROMS filtrado (en contornos) con ventana móvil de 181 días para secciones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $4^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad de generación y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación. . . . . 59
- 4.31. Generación costera de remolinos de AVISO a) anticiclónicos y b) ciclónicos, y de ROMS c) anticiclónicos y d) ciclónicos. La línea negra representa el límite de la banda costera utilizada para calcular los perfiles y diagramas Hovmöllers de generación costera. Sólo se consideran remolinos pertenecientes a trayectorias de mínimo 28 semanas de duración. La generación de ROMS está ploteada en la misma grilla que AVISO y dividida por 2.5 para que sean comparables. . . . . 60
- 4.32. a) Perfiles meridionales de polaridad de generación costera filtrados para AVISO y ROMS. Perfiles de polaridad de generación costera filtrados (línea roja) comparados con perfiles de estriaciones (MDOT o SSH promedio) en Oeste (línea azul segmentada) y Este (línea azul continua) filtrados para b) AVISO y c) ROMS. Las curvas de AVISO tienen un desfase meridional para Oeste y Este de  $-2.54$  y  $-1.37^\circ$ , respectivamente, mientras que para ROMS son de  $-3.92$  y  $-2.23^\circ$ , respectivamente. Espectros de perfiles de MDOT y SSH promedio y de perfil de polaridad de generación costera, en función del número de onda meridional, para d) AVISO y e) ROMS (sin filtrar). Líneas negras segmentadas indican rango aproximado correspondiente a estriaciones estacionarias. . . . . 62

---

4.33. Diagrama Hovmöller de anomalía de polaridad de generación costera en AVISO. . . . .	64
4.34. Diagrama Hovmöller de anomalía de polaridad de generación costera en ROMS. . . . .	64
4.35. AVISO: Series de tiempo de velocidad meridional de la polaridad de generación costera (azul) y casi-meridionales de SLA filtrada (roja 21 ° y negra -14 °) para regiones a) Oeste y b) Este. . . . .	65
4.36. ROMS: Series de tiempo de velocidad meridional de la anomalía de polaridad de generación costera (azul) y casi-meridionales de SLA filtrada (roja 4 °) para regiones a) Oeste y b) Este. . . . .	65

---

# Índice de tablas

- 4.1. Número de remolinos por tipo de dato y polaridad. . . . . 32
- 4.2. Correlaciones y correlaciones cruzadas máximas con sus respectivos lags en AVISO entre perfiles de MDOT y polaridad (MDOT-P), MDOT y polaridad de generación (MDOT-PG), y entre perfiles de polaridad y polaridad de generación (P-PG). Lags positivos (negativos) indican un desplazamiento hacia el norte (sur) de P en MDOT-P, PG en MDOT-PG y PG en P-PG. . . . . 49
- 4.3. Correlaciones y correlaciones cruzadas máximas con sus respectivos lags en ROMS entre perfiles de SSH promedio y polaridad (SSH-P), SSH promedio y polaridad de generación (SSH-PG), y entre perfiles de polaridad y polaridad de generación (P-PG). Lags positivos (negativos) indican un desplazamiento hacia el norte (sur) de P en SSH-P, PG en SSH-PG y PG en P-PG. . . . . 49

---

# Agradecimientos

Esta Habilitación Profesional fue realizada gracias al financiamiento del proyecto Fondecyt 11130499 “Dinámica de Estriaciones y Remolinos frente a Chile central”. Mis agradecimientos al Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción por la formación recibida sin la que no habría sido posible llevar a cabo éste trabajo. Agradezco también al Dr. Alexis Chaigneau del Institute of Research for Development de Francia por proporcionar las detecciones y seguimientos de remolinos y al Dr. Oleg Melnichenko del International Pacific Research Center de Hawai por compartir sus resultados de estriaciones transientes. Agradecer además a David Donoso por su constante buena disposición para resolver dudas y a mi profesor supervisor, Dr. Ali Belmadani, por su importantísima guía en éste trabajo y por lo mucho que considero que aprendí con él.

Finalmente, agradecer a los amigos que me ayudaron en distintos aspectos de ésta Habilitación, a mi madre Patricia por su apoyo fundamental en todo momento, y a Camila, ya que sin su ayuda técnica con LaTeX y apoyo en momentos de estrés no habría sido posible terminar.

---

# Resumen

Se estudian las características espacio-temporales de las estriaciones oceánicas en el Pacífico-Sur Oriental frente a Chile ( $105 - 70^{\circ}\text{O}$  y  $45 - 22^{\circ}\text{S}$ ) y su relación con remolinos de mesoescala. Estas estriaciones consisten en chorros casi-zonales alternados meridionalmente presentes en la mayor parte del océano global. Para esto son utilizados 20 años de datos altimétricos de AVISO y altura del nivel del mar de una simulación climatológica de 50 años de ROMS. Para la detección y seguimiento de remolinos se utiliza un algoritmo automatizado del tipo geométrico. Los resultados de éste son comparados con resultados de Chelton et al. (2011) para comprobar su consistencia. Especial atención se le presta a la zona del Frente subtropical (FST) y a la Zona de Transición Costera (ZTC) debido a lo energético de los remolinos en estas regiones. Mediante análisis espectral en 2 dimensiones se estudian las inclinaciones y longitudes de ondas de las estriaciones. Se detectan estriaciones estacionarias y transientes para ambos conjuntos de datos. Las estacionarias presentan características similares entre AVISO y ROMS. AVISO presenta 2 tipos de estriaciones transientes, con inclinaciones de  $21^{\circ}$  con respecto a la dirección zonal (es decir, suroeste-noreste) que se propagan hacia el ecuador y de  $-14^{\circ}$  (noroeste-sureste) que se propagan hacia el polo, mientras que ROMS muestra sólo un tipo de estriaciones transientes con un ángulo de  $4^{\circ}$  que se propagan hacia el ecuador. Las estriaciones tanto transientes como estacionarias, para AVISO y ROMS, muestran correspondencia con el campo de polaridad de remolinos, de modo que éstas serían la firma dejada por los caminos preferidos de remolinos. A su vez se demuestra la existencia de cierta organización dentro del campo de remolinos. También se observa correspondencia entre estriaciones estacionarias y polaridad de generación de remolinos, sugiriendo la existencia de un mecanismo de retroalimentación de los remolinos por las estriaciones. Sin embargo, dicha correspondencia no ocurre de forma significativa para las transientes. Se analiza el posible origen costero de las estriaciones comparándolas con la polaridad de generación costera de remolinos. Se concluye que éste es posible para AVISO en los dos casos pero se descarta para ROMS.

---

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años, prácticamente en todo el océano global, se han observado estructuras consistentes en conjuntos de chorros casi zonales cuyo sentido se alterna meridionalmente, a éstos se les ha llamado estriaciones (Fig.1.1). Éstos chorros se encuentran en balance geostrófico, vale decir que existe un balance entre la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión que se puede expresar de la siguiente forma:

$$fv = g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (1.1)$$

$$fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (1.2)$$

en donde  $g$  es la aceleración de gravedad,  $f$  el parámetro de Coriolis,  $\eta$  es el nivel del mar asociado al campo de presión y  $u$  y  $v$  las componentes zonal y meridional de la velocidad geostrófica, respectivamente. Producto de que  $u \propto \frac{\partial \eta}{\partial y}$  es que las estriaciones también son visibles en campos de altura del nivel del mar. Sus velocidades geostróficas son relativamente bajas, del orden de 1 cm/s, asociadas a anomalías del nivel del mar del orden de 1 cm (Fig.1.2). Usualmente se debe promediar en un período de meses o años para que sean visibles debido a que la señal de los remolinos es mucho mayor a la de las estriaciones en imágenes instantáneas ( $\sim 2$  a  $5$  cm en altura del nivel del mar y  $\sim 10$  a  $15$  cm  $s^{-1}$  en velocidades de rotación). Además, en algunos casos es necesario filtrar espacialmente la gran escala debido a que la magnitud de ésta ( $\sim 20$  a  $60$  cm y velocidades de  $\sim 10$  cm  $s^{-1}$ ) también es mucho mayor a la de las estriaciones en promedios temporales. Poseen una longitud de onda de entre 300 a 500 km y una extensión en profundidad de varios cientos de metros con una intensificación de sus velocidades en superficie (Fig.1.2.c). Zonalmente pueden alcanzar varios miles de kilómetros (Fig. 1.1 y 1.2.a).

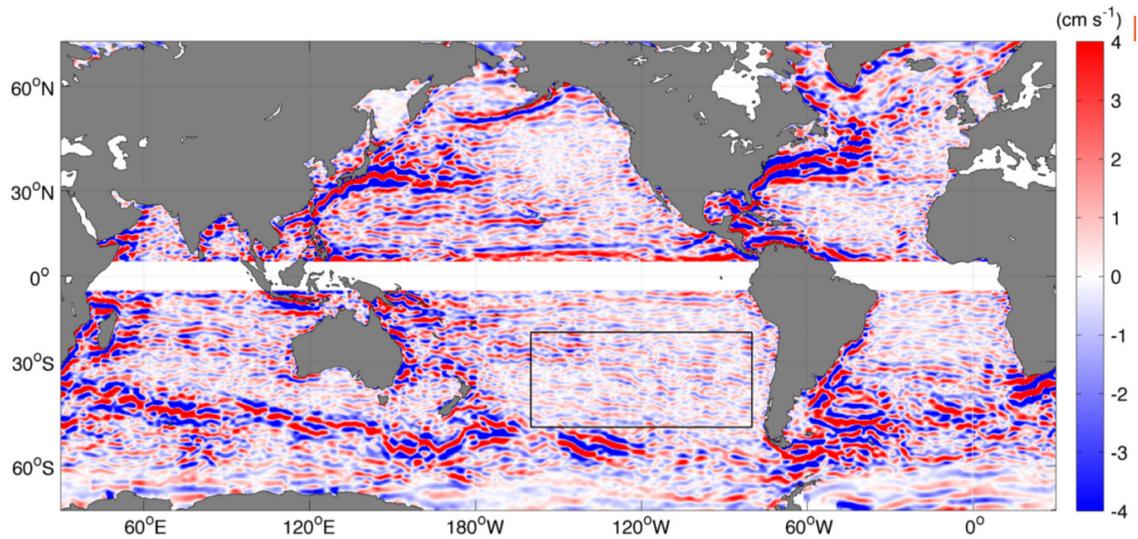


Figura 1.1: Promedio temporal (1993 - 1996) de la componente zonal de velocidad geostrófica,  $\bar{u}$ , estimada a partir de topografía dinámica absoluta (ADT) de AVISO/CLS (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data/Collecte Localisation Satellites, Francia), filtrada espacialmente con pasa-alto (Buckingham y Cornillon 2013).

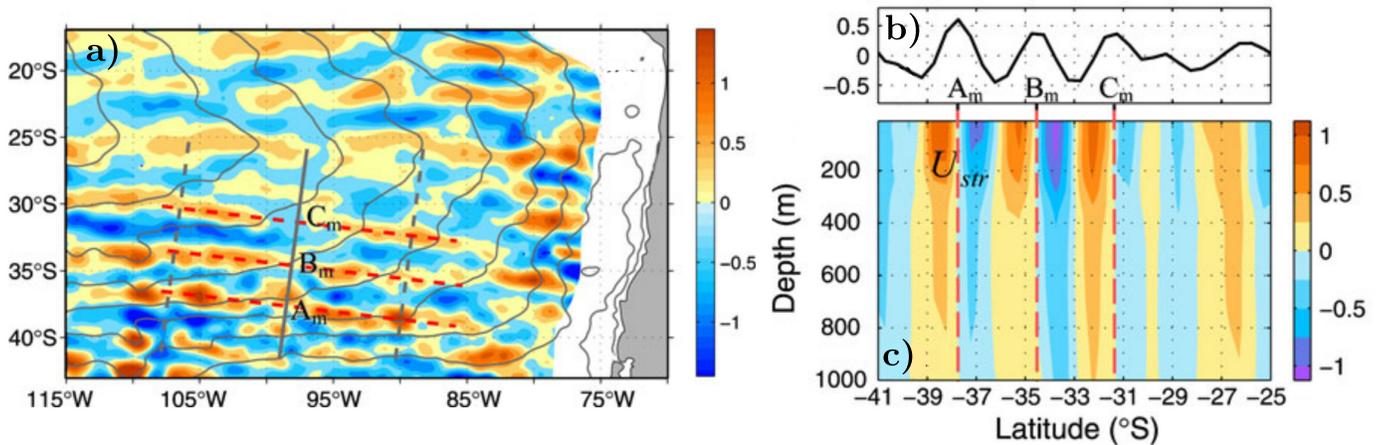


Figura 1.2: a) Contornos grises representan SSH promedio (intervalo de contornos = 5cm) entre 1993 y 2002 de una simulación *hindcast* en el modelo OFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator)(Masumoto et al., 2004) en el Pacífico-Sur Oriental frente a Chile. Colores muestran el campo filtrado espacialmente con pasa-alto (media ventana de  $4^\circ$ ), en cm. Las líneas rojas segmentadas indican aproximadamente las crestas de las estriaciones, que al mismo tiempo son identificadas con letras ( $A_m$ ,  $B_m$  y  $C_m$ ), y las líneas grises segmentadas delimitan la zona del campo filtrado que fue promediado a lo largo de las estriaciones. b) Perfil promedio a lo largo de las estriaciones (casi-zonal) del campo filtrado de SSH, en cm, en función de la latitud. c) Estructura vertical promedio, a lo largo de las estriaciones, de las velocidades zonales en  $cm\ s^{-1}$  en función de la latitud. Las líneas rojas segmentadas señalan la posición de las crestas de las estriaciones (Melnichenko et al., 2010).

Las estriaciones han sido detectadas en distintos conjuntos de datos, tales como altimetría satelital (Maximenko et al. 2005, Ivanov et al. 2009, 2012), topografía dinámica media del océano (MDOT por sus siglas en inglés) (Maximenko et al. 2008a, Buckingham y Cornillon 2013), imágenes satelitales de temperatura superficial (Buckingham y Cornillon 2013, Buckingham et al. 2014), mediciones in situ de boyas derivadoras, batitermógrafos desechables y boyas ARGO (Centurioni et al. 2008, Maximenko et al. 2008a, Van Seville et al. 2011) y modelos numéricos del océano (Galperin et al. 2004, Nakano y Hasumi 2005, Kamenkovich et al. 2009, Richards et al. 2006, 2008, Melnichenko et al. 2010, Chen et al. 2015). Si bien las velocidades de éstos chorros son relativamente bajas existe evidencia de que son capaces de advectar el campo de temperaturas (Maximenko et al. 2008a, Buckingham et al. 2014), aportar a la mezcla de trazadores (Chen y Flierl, 2015), transportar desechos marinos en superficie (Maes et al., 2016) y modificar vientos de baja altura (Taguchi et al. 2012). A la par de las estriaciones estacionarias se han observado estriaciones transientes en datos de altimetría (Maximenko et al. 2005) y simulaciones numéricas (Kamenkovich et al. 2015) con una propagación hacia el ecuador (Richards et al. 2006, Taguchi et al. 2012). En la Fig. 1.3 se observa la propagación hacia el ecuador de estriaciones transientes en el Pacífico Norte. Aunque la propagación de éstas ha sido estudiada no se han publicado trabajos en donde se aborde cuantitativamente la desviación de la dirección zonal de las estriaciones. Sin embargo, Oleg Melnichenko (International Pacific Research Center, Hawai, EEUU) (comunicación personal, Marzo, 2016) encontró estriaciones transientes con una inclinación Noreste-Suroeste en el Pacífico Sur Oriental con propagación hacia el ecuador en datos de AVISO y OFES, además de estriaciones estacionarias con inclinación noroeste-sureste en OFES y MDOT para la misma región.

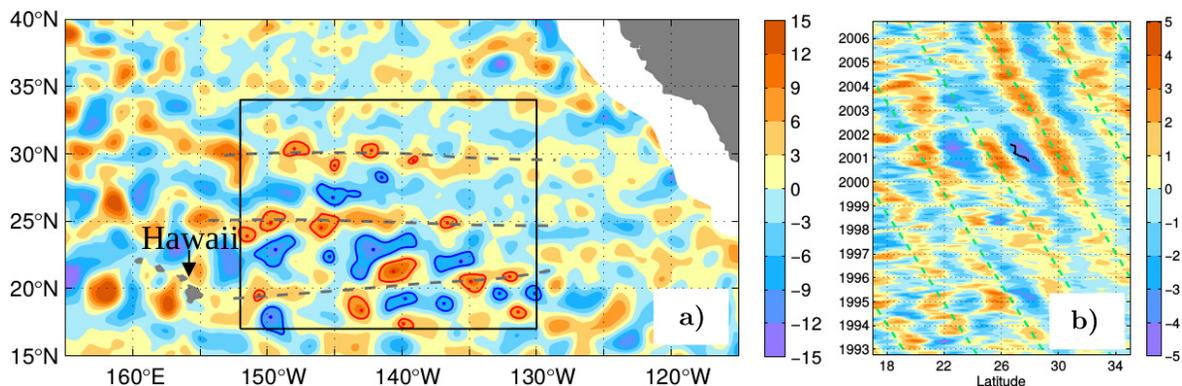


Figura 1.3: a) Mapa del 1 de Agosto de 2001 de anomalía del nivel del mar (SLA, por sus siglas en inglés) AVISO, en cm, en el Pacífico Nor-Oriental filtrado espacialmente con un pasa-alto de media ventana de  $5^\circ$ . En líneas grises se marcan las crestas de las estriaciones y contornos de  $\pm 6$  cm demarcan algunos remolinos de mesoescala energética, y b) diagrama Hovmöller latitud-tiempo promediado zonalmente entre  $130$  y  $152^\circ$ O. La curva negra muestra la trayectoria de un remolino ciclónico (Maximenko, comunicación personal).

Actualmente no existe consenso sobre si las estriaciones corresponden a chorros reales o si son el producto artificial del promedio de las velocidades asociadas al campo de remolinos de mesoescala.

Los remolinos se definen como una circulación cerrada relativamente persistente en el tiempo, es decir, que el tiempo de giro de una parcela de fluido, dentro de la estructura, es mucho menor al tiempo en que la estructura se mantiene identificable (Cushman-Roisin y Beckers, 1994). Se encuentran en balance geostrófico (ec. 1.1 y 1.2). Su radio varía típicamente entre 30 y 100 Km y su amplitud alcanza comúnmente valores de  $\sim 8cm$  con velocidades de giro del orden de  $\sim 5cms^{-1}$ . El tiempo de vida puede ser de hasta 1 año (Chelton et al., 2011) y pueden clasificarse de acuerdo a su polaridad/sentido de giro en remolinos ciclónicos (rotación horaria en el hemisferio Sur) o anticiclónicos (rotación antihoraria en el hemisferio Sur). Independiente de su polaridad todos los remolinos presentan una propagación hacia el Oeste con velocidades típicas de entre 2 y 3  $cm/s$ , y un desplazamiento meridional: los anticiclónicos tienden a moverse hacia el ecuador y los ciclónicos hacia los polos (Morrow et al. 2004, Chaigneau y Pizarro, 2005.a).

En el caso particular del Pacífico Sur-Oriental frente a Chile la generación de remolinos se debe principalmente, según lo que muestran modelos numéricos de alta resolución como datos observados, a inestabilidades baroclínicas de corrientes costeras (Leth y Shaffer 2001, Hormazábal et al. 2004). Existen 2 zonas en donde la actividad de remolinos es particularmente relevante, la primera es la Zona de Transición Costera (ZTC) (Hormazábal et al. 2004) que consiste en una banda que se extiende desde la costa hasta 600-800 Km hacia el interior entre los  $19^\circ$  y  $39^\circ S$  y posee alta variabilidad de mesoescala asociada a remolinos. La mitad Sur de ésta ( $29^\circ$  y  $39^\circ S$ ) se caracteriza por poseer valores altos de energía cinética de remolinos (EKE por sus siglas en inglés, ec.3.1). La otra es la zona del Frente Sub Tropical (FST) (Chaigneau y Pizarro, 2005.b) que consiste en una zona de transición entre aguas subtropicales en el norte y aguas subantárticas en el sur y que también tiene asociada una alta EKE.

Schlax y Chelton (2008) sostienen que las estriaciones podrían ser artefactos producidos por el paso de remolinos de mesoescala (Fig.1.4). El mecanismo propuesto consiste en que un remolino anticiclónico en el hemisferio sur desplazándose hacia el Oeste se va a ver, en un campo de velocidades geostróficas promediadas en el tiempo, como 2 chorros zonales (o casi zonales) adyacentes y con sentido opuesto, esto dado que dicho remolino tiene valores de corrientes positivos (hacia el este) en la parte sur, valores negativos (hacia el oeste) en la parte norte y valores meridionales de velocidad que se anulan al promediar. Ésto sería análogo para remolinos ciclónicos y en el hemisferio norte.

De ésta forma el campo de remolinos, con distribución aleatoria en el estudio de Schlax y Chelton (2008), produciría un patrón de estriaciones que decaería en una relación inversa con el período de tiempo,  $T$ , en que se promedia, la tasa propuesta por ellos es de  $T^{-1}$  corregida posteriormente por Buckingham et al., (2014) a  $T^{-0.5}$ . Sin embargo, y como fue conjeturado por Maximenko et al. (2005, 2008a) y Scott et al. (2008), Schlax y Chelton (2008) muestran la existencia de caminos preferidos por los remolinos en el Pacífico Norte (Fig.1.5). De la misma forma Chelton et al. (2011) y Chaigneau et al. (2009) utilizando datos de altimetría, a nivel global el primero y para los cuatro grandes sistemas de surgencia de borde oriental el segundo, encuentran bandas de polaridad de remolinos alternadas que serían equivalentes a caminos preferidos polarizados (Fig. 1.6). En base a esto, se genera una explicación

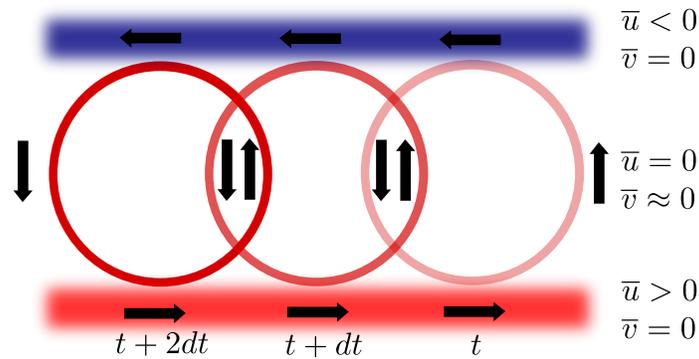


Figura 1.4: Remolino anticiclónico propagándose hacia el Oeste en el hemisferio sur en 3 momentos distintos. En flechas negras se muestran las velocidades asociadas a su perímetro. Las bandas azul (valores negativos) y roja (valores positivos) representan los chorros que aparecen al promediar en el tiempo las velocidades geostroficas del remolino (figura basada en las de Scott et al. 2008 y Buckingham y Cornillon 2013).

alternativa a la hipótesis de las estriaciones como artefacto al sugerir que se deberían a la organización del campo de remolinos en éstas trayectorias preferidas (Maximenko et al., 2005). Sobre esto Schlax y Chelton (2008) especulan, para el Pacífico Norte, que se deben a lugares preferidos de generación en la costa en conjunto con meandros permanentes en la región del Sistema de Corrientes de California (Centurioni et al., 2008) y no a mecanismos internos del océano. A su vez, uno de estos mecanismos internos podría ser la cascada de energía inversa (Rhines, 1975) en donde el campo de turbulencia se ordena en chorros zonales. En cuanto a los mecanismos costeros existe más de uno posible; Centurioni et al. (2008) sostienen que los meandros en la costa, asociados con fuentes y sumideros de vorticidad, podrían emitir ondas de Rossby y/o remolinos que formen chorros en el océano, mecanismo llamado plumas  $\beta$  (Belmadani et al., 2013, Davis et al., 2014). Otro candidato costero también sería la irradiación de inestabilidades de corriente de borde oriental (Hristova et al., 2008, Wang et al., 2012). Aparte de los posibles mecanismos de estriaciones aquí mencionados existen muchos más, 15 en total al menos para las estriaciones estacionarias (Maximenko et al., 2008b).

Complementario a la generación costera, la generación de remolinos a lo largo de las estriaciones podría proveer una retroalimentación del campo de éstos por las estriaciones como lo especula Maximenko et al. (2005). Entre 2 bandas de velocidad opuesta podría generarse un cizalle meridional de tal forma que se originen nuevos remolinos mediante inestabilidades barotrópicas, los que con sus velocidades de rotación asociadas aportarían a mantener las estriaciones (Belmadani et al., 2015).

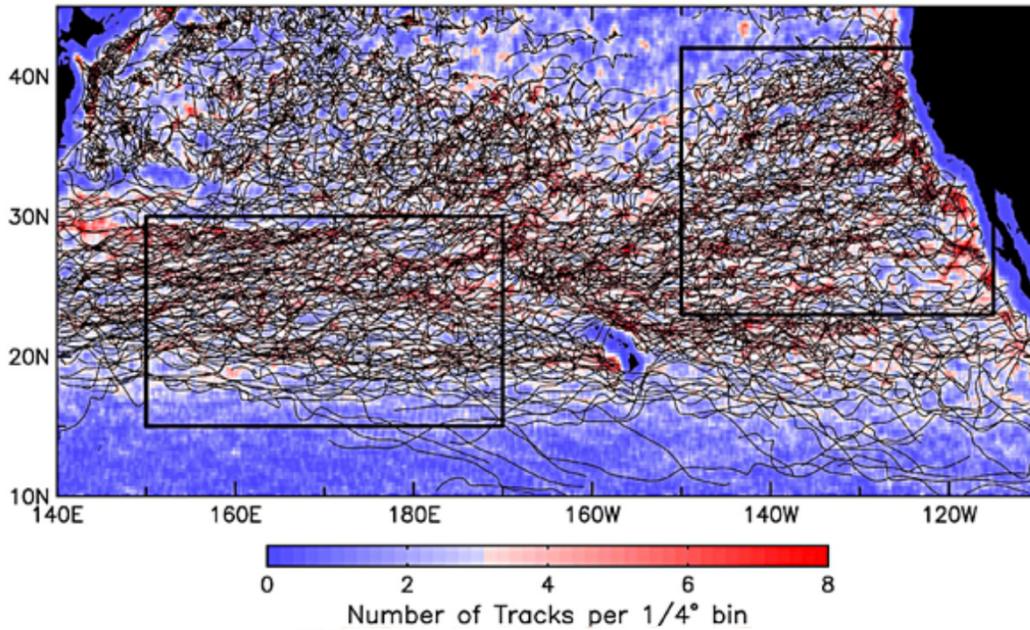


Figura 1.5: Trayectorias de remolinos con tiempo de vida  $\geq 1$  año en el Pacífico Norte sobrepuestas al número de trayectorias de remolinos por  $1/4^\circ$  de grilla, con tiempo de vida  $\geq 16$  semanas entre el 14 de Octubre de 1992 y el 3 de Enero de 2007 (Schax y Chelton, 2008).

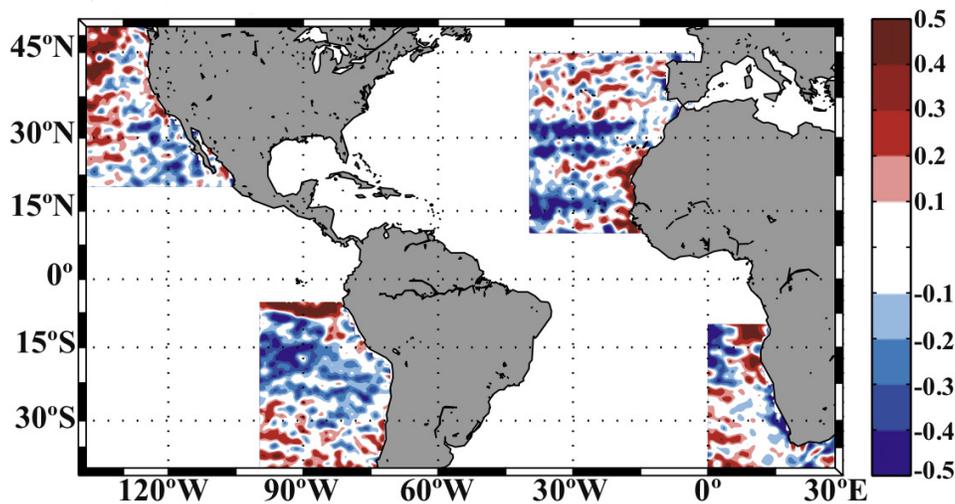


Figura 1.6: Bandas de polaridad en los 4 principales sistemas de surgencia (Chaigneau et al., 2009).

No obstante, Maximenko et al. (2013) muestran, utilizando datos de MDOT, que si bien existen caminos preferidos de remolinos, por polaridad, estos están inversamente correlacionados con la distribución de las estriaciones (Fig.1.7). Es decir, que las rutas preferidas por los remolinos ciclónicos, que poseen una anomalía negativa del nivel del mar, están alineados con fases positivas del nivel del mar asociadas a las estriaciones y viceversa. Ésta configuración descartaría que las estriaciones sean artefactos o que sean reforzadas y/u originadas por los remolinos.

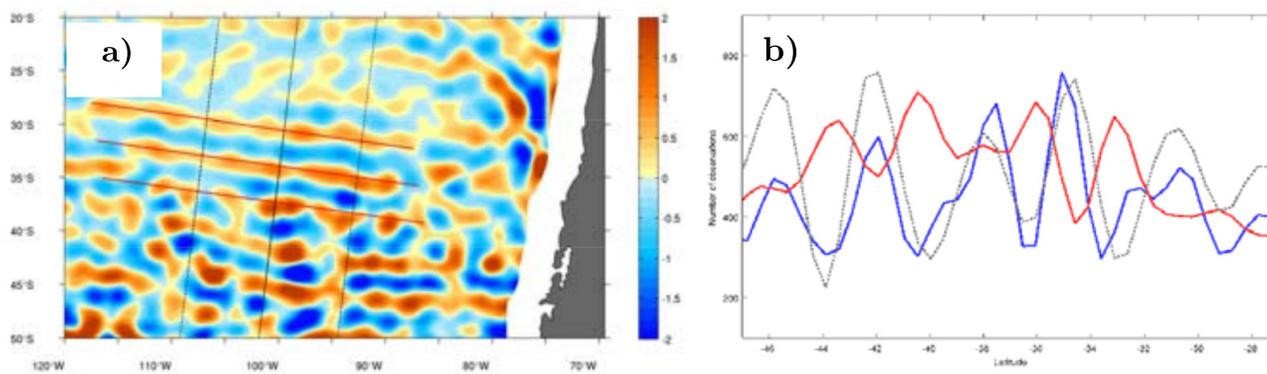


Figura 1.7: a) MDOT, en *cm*, con filtro espacial pasa-alto en el Pacífico-Sur Oriental. Líneas rojas denotan crestas de las estriaciones. b) Perfiles promedio a lo largo de las estriaciones y ne función de la latitud: MDOT en negro, densidad de remolinos ciclónicos en azul y anticiclónicos en rojo (Maximenko et al., 2013).

El foco de ésta habilitación profesional es estudiar la relación entre estriaciones y remolinos de mesoescala frente a Chile central mediante mediciones altimétricas y una simulación numérica de larga duración, además de un algoritmo automatizado de detección y seguimiento de remolinos. Como primera etapa se estudia el tipo de estriaciones existentes y sus características, si son de carácter transiente, estacionario, o ambos, y sus características espacio-temporales. Luego se determina la relación que éstas tienen con los remolinos que dominan el campo de mesoescala y que rol juegan éstos en los posibles mecanismos generadores y sustentadores de estriaciones. El estudio de generación está centrado en estimar que tan probable es el origen costero de las estriaciones, versus un origen oceánico, no centrándose en un mecanismo específico.

---

# Capítulo 2

## Hipótesis y objetivos

### 2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es estudiar la relación entre remolinos de mesoescala y estriaciones oceánicas en el Pacífico Sur frente a Chile central utilizando datos altimétricos y una simulación numérica junto con un algoritmo automatizado de detección y seguimiento de remolinos

Para llevar a cabo esto, los objetivos específicos son:

- Determinar el decaimiento de la amplitud de las estriaciones al promediar en el tiempo.
- Determinar las características espacio-temporales de las estriaciones, incluyendo su inclinación y propagación, entre otros.
- Determinar si existen bandas de polaridad de remolinos y si éstas coinciden con la distribución espacial de estriaciones.
- Estudiar si existe generación de nuevos remolinos a lo largo de las estriaciones dado que ésto podría indicar la existencia de un mecanismo oceánico de mantención de las mismas.
- Definir si existen lugares preferidos, por polaridad, de generación de remolinos en la costa y si estos podrían constituir un mecanismo de generación de estriaciones.

### 2.2. Hipótesis

Las hipótesis planteadas son:

- La amplitud de las estriaciones no decae como un campo de remolinos aleatorios.
- Existe una correspondencia espacial y temporal entre distribución de polaridad de remolinos y estriaciones.
- Hay generación de remolinos a lo largo de las estriaciones contribuyendo a mantenerlas.
- Las estriaciones se deben al menos en parte a la polaridad de generación de remolinos en la costa.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Datos

El dominio utilizado en este estudio está definido por 105 - 70 °O y 45 - 22 °S (Fig.3.1).

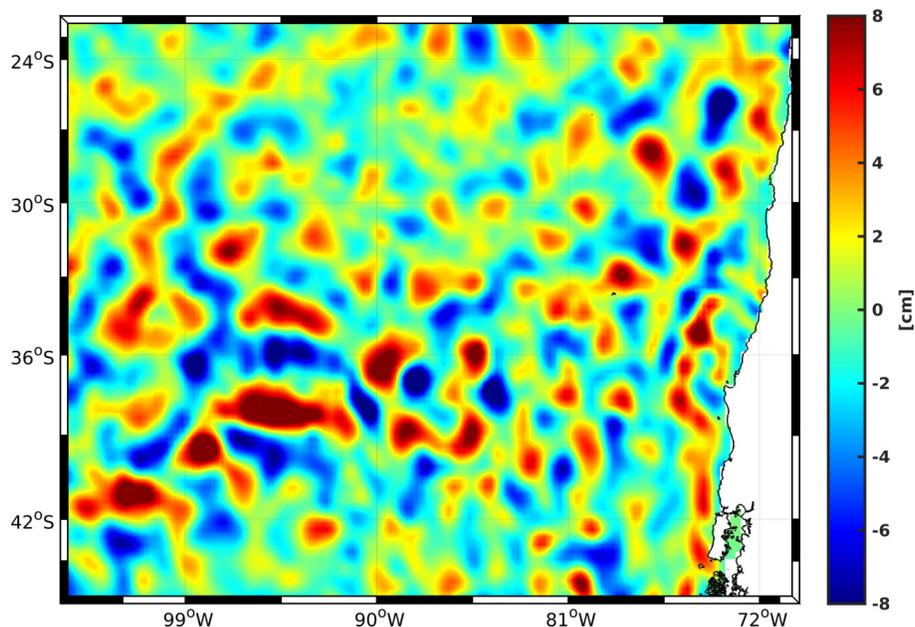


Figura 3.1: Dominio utilizado. El campo corresponde a SLA AVISO filtrado del 2 de Febrero de 1993.

Se utilizan 2 conjuntos de datos: por una parte Topografía dinámica absoluta (ADT por su siglas en inglés, que equivale a  $MDOT + SLA$ ) de AVISO con datos diarios, resolución espacial de  $1/4^\circ$  y que comprende el período 1993 a 2012, es decir 20 años. Su descarga fue de forma libre desde <http://www.aviso.altimetry.fr/>. Está construida en base a las mediciones de sólo 2 satélites (“two sat merged”) en vez de todos los satélites disponibles en un tiempo dado (“all sat merged”), con el propósito de que el campo sea más homogéneo en el tiempo. Si bien esto permite que el seguimiento de los remolinos sea óptimo, también hace que los datos no tengan la mejor calidad posible. Aunque se utilizan las

mediciones de sólo dos satélites al mismo tiempo, no son los mismos dos en todo el período. Los principales satélites utilizados son el Topex/Poseidon, Jason-1 y Jason-2. Topex/Poseidon (T/P) posee un período de órbita de 10 días a una altura de 1336 Km y utiliza principalmente el Nasa Radar Altimeter (NRA) que opera en 2 frecuencias: 13.6 y 5.3 GHz, en donde la segunda es utilizada para la corrección ionosférica. Jason-1 posee el mismo período de órbita y altura que el T/P y su principal sensor es el Poseidon-2 que opera en las mismas frecuencias del NRA. Jason-2 posee las mismas características que el Jason-1 y utiliza como sensor el Poseidon-3 que opera en la mismas frecuencias que los anteriores y que acoplado con el sensor DORIS, que determina con precisión la posición del satélite, reduce los errores de medición cerca de zonas costeras.

Por otra parte, se utiliza la altura del nivel del mar (SSH por sus siglas en inglés) de una simulación numérica climatológica en ROMS (Regional Ocean Modeling System) (Shchepetkin y McWilliams, 2005) con promedios cada 2 días y resolución espacial de  $1/10^\circ$ . La simulación abarca un período de 50 años después de un tiempo de spin-up de 8 años, lo que permite estudiar las estriaciones en un período de tiempo mayor a los 20 años de AVISO y en particular, comprobar la hipótesis de decaimiento de las estriaciones propuesta por Schlax y Chelton (2008). La simulación utiliza como forzantes flujos de calor y de boyantez de NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) (Kalnay et al., 1996) y vientos de SCOW (Scatterometer Climatology of Ocean Winds)(Risien y Chelton, 2008). Estos últimos son capaces de capturar estructuras de pequeña escala, dinámicamente importantes para el océano, que no son representadas por otros atlas de viento basados en observaciones o en los campos de reanálisis de NCEP/NCAR. En particular se sabe que los vientos NCEP introducen sesgos en el sistema de corrientes costeras y la actividad de mesoescala frente a Perú y Chile (Cambon et al., 2013). Para las condiciones de borde abierto de temperatura, salinidad, velocidad horizontal y altura del nivel del mar, se utilizó una climatología mensual obtenida del modelo OFES con forzante NCEP/NCAR, al igual que para las condiciones iniciales.

## 3.2. Algoritmo de detección y seguimiento de remolinos

Para la detección y seguimiento de remolinos se utiliza un algoritmo automatizado en los campos de ADT y SSH a los que se les ha aplicado un filtro espacial pasa-alto tipo Hanning con una ventana media de  $4^\circ$  para eliminar la gran escala. Este mismo es el filtro ocupado por Maximenko et al. (2008a) y varios autores más para caracterizar las estriaciones. La respuesta al filtrado se muestra en la Fig.3.2 y aquí se observa la disminución en la magnitud de longitudes de onda superiores a 500 Km ( $\sim 4.5^\circ$ ), un leve aumento de la magnitud de longitudes de 300-500 Km ( $\sim 4.5-2.7^\circ$ ) y ninguna variación significativa de longitudes inferiores a 300 Km.

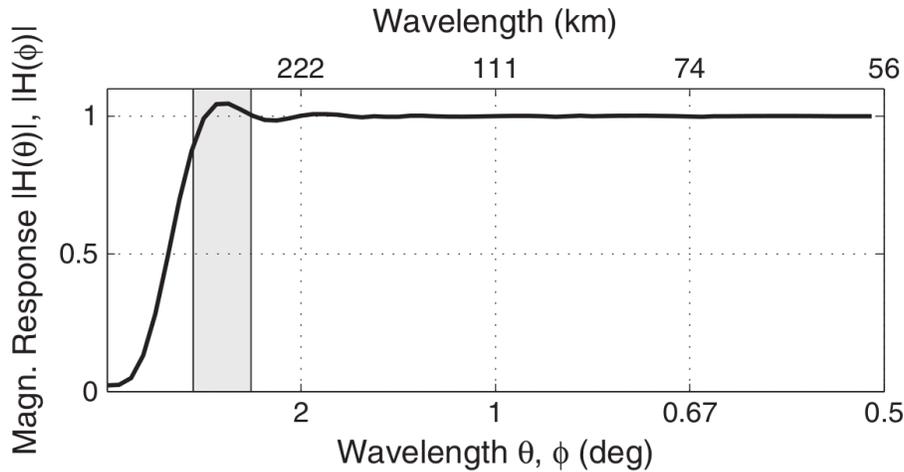


Figura 3.2: Magnitud efectiva de la respuesta al filtrado espacial pasa-alto con una ventana media de  $4^\circ$  tipo Hanning. El filtro es casi isotrópico en latitud ( $\theta$ , grados) y longitud ( $\phi$ , grados). Las longitudes de onda en unidades de Km asumen que  $1^\circ = 111,2$  Km, por lo que corresponden a distancias meridionales. La caja gris destaca longitudes de onda de 300-500 Km (Buckingham y Cornillon, 2013).

El método utilizado es el “winding-angle method” que es del tipo geométrico y fue desarrollado por Pegliasco et al. (2015). Los métodos geométricos se distinguen de los métodos físicos por utilizar características geométricas del campo de SLA o de velocidades (e.g líneas de corriente cerradas) para detectar remolinos, mientras que los segundos calculan coeficientes físicos (e.g vorticidad) para los campos y definen umbrales para determinar cuales puntos de grilla se encuentran dentro o fuera de un remolino. Es el caso del método de Okubo-Weiss (OW) que utiliza el parámetro de OW (Okubo, 1970; Weiss, 1991) el cual es definido en función de las tasas de deformación por cizalle y esfuerzo y la vorticidad del campo de velocidades. Al mismo tiempo, el método de OW define los remolinos como regiones con valores negativos de su parámetro y selecciona como remolinos a los conjuntos de puntos de grilla que tengan valores menores a cierto umbral negativo.

En una primera etapa el algoritmo de Pegliasco et al. (2015) detecta máximos y mínimos locales para cada mapa de la altura del nivel del mar, ADT o SSH en éste caso, correspondientes a los centros de remolinos anticiclónicos y ciclónicos, respectivamente. Luego busca el mayor contorno cerrado de ADT o SSH para cada centro de remolino que encierre solamente a dicho centro, este contorno corresponde al borde del remolino. El método utilizado, en cuanto a la detección, es el mismo desarrollado por Chaigneau et al. (2009) y que en su versión anterior (Chaigneau et al., 2008) utilizaba líneas de corriente cerradas del campo de velocidades geostróficas en vez de contornos cerrados de altura del nivel del mar. Sin embargo, al ser ambos contornos cerrados iguales bajo una aproximación geostrófica, y para optimizar el costo computacional y reducir el ruido asociado al cálculo de gradientes, en la última versión se utilizan solamente los contornos de altura del nivel del mar. Cabe mencionar que éste método detecta menos “remolinos falsos” que otros métodos típicamente utilizados (Chaigneau et al., 2008; Souza et al., 2011; Yi et al., 2014), con un 92.7% de detecciones correctas y un 18.7% de detecciones falsas (Chaigneau et al., 2008).

Como producto final el algoritmo de detección entrega los centroides, que son los centros de gravedad del remolino; los centros, que son el punto de grilla más cercano al centroide (y ubicación del extremo local de SLA); contornos de los remolinos definidos como polígonos; y variables asociadas tales como área que cubre el remolino; radio equivalente, definido como el radio que tendría una circunferencia con su misma área; amplitud, igual a la distancia entre el valor extremo de SLA dentro del remolino y el valor de SLA de su contorno; y valores de las componentes de velocidad y EKE dentro del remolino, definiéndose ésta última como:

$$EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \quad (3.1)$$

donde  $u'$  y  $v'$  son las componentes, zonal y meridional respectivamente, de las anomalías de velocidad ( $u' = u - \bar{u}$ ,  $v' = v - \bar{v}$ ) en cada punto de grilla.

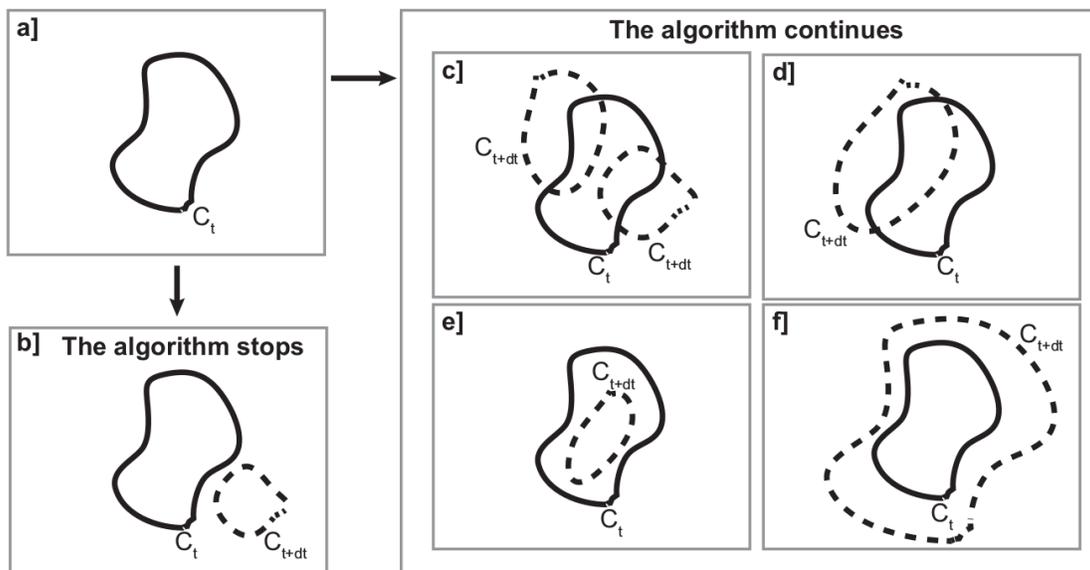


Figura 3.3: Algoritmo de seguimiento de remolinos. a) Contorno  $C_t$ , en líneas continuas, de un remolino en un tiempo  $t$ ; b) caso en que ningún contorno  $C_{t+dt}$ , representado en líneas segmentadas, intersecta a  $C_t$  por lo que se termina el seguimiento del remolino; c) caso en que varios remolinos en  $t + dt$  intersectan a  $C_t$  por lo que el algoritmo utiliza la función de costo para encontrar el más similar a  $C_t$ ; d) sólo un remolino en  $t + dt$  intersecta a  $C_t$ ; e)  $C_{t+dt}$  está dentro de  $C_t$ ; f)  $C_t$  está dentro de  $C_{t+dt}$  (Pegliasco et al., 2015).

En una segunda etapa el algoritmo de seguimiento determina la trayectoria de los remolinos en base a los remolinos detectados para cada paso de tiempo. Primero el algoritmo divide a los remolinos en ciclónicos y anticiclónicos, y luego para cada uno de éstos en un tiempo  $t$  acotado por un contorno  $C_t$  (Fig.3.3.a) busca un remolino en un tiempo  $t + dt$  ( $dt = 1$  día para AVISO y  $dt = 2$  días para ROMS) delimitado por un contorno  $C_{t+dt}$  que se intersecte con  $C_t$  (Fig.3.3 c - f). Si ninguno de los remolinos

en el tiempo  $t + dt$  intersecta a  $C_t$ , entonces se asume que el remolino ha desaparecido (Fig.3.3.b) y se considera terminada esa trayectoria. En el caso de que el contorno  $C_{t+dt}$  se haya movido de su posición anterior pero intersecte a  $C_t$  (Fig.3.3.d) o que se haya mantenido en su posición pero haya aumentado o disminuido su tamaño (Fig.3.3 e - f) se asume que el remolino para  $t$  y  $t + dt$  es el mismo. En el caso de que 2 o más contornos  $C_{t+dt}$  intersecten a  $C_t$  (Fig.3.3.c) el algoritmo de seguimiento selecciona como parte de la trayectoria al que minimice una función de costo (FC) (Ec.(3.2)), en otras palabras al remolino intersectante en  $t + dt$  que más se parezca al remolino en  $t$ .

$$FC = \sqrt{\left(\frac{\Delta R - \overline{\Delta R}}{\sigma_{\Delta R}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A - \overline{\Delta A}}{\sigma_{\Delta A}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta EKE - \overline{\Delta EKE}}{\sigma_{\Delta EKE}}\right)^2} \quad (3.2)$$

En la ec.(3.2)  $\Delta R$ ,  $\Delta A$  y  $\Delta EKE$  representan, respectivamente, las variaciones de radio, amplitud y energía cinética entre el remolino delimitado por  $C_t$  y los remolinos delimitados por  $C_{t+dt}$  que lo intersectan. Asimismo,  $\overline{\Delta R}$ ,  $\overline{\Delta A}$  y  $\overline{\Delta EKE}$  son calculados estimando las diferencias promedio para aproximadamente 1000 trayectorias completadas exclusivamente mediante intersecciones entre  $C_t$  y un sólo  $C_{t+dt}$  (Fig.3.3 d - f). De la misma forma  $\sigma_{\Delta R}$ ,  $\sigma_{\Delta A}$  y  $\sigma_{\Delta EKE}$  corresponden a la desviación estándar de las diferencias calculadas para las  $\sim 1000$  trayectorias. Cuando los contornos  $C_{t+dt}$  intersectan a  $C_t$  se considera que el remolino en  $t$  se ha dividido en varios y el o los remolinos que no minimizan FC se consideran como una nueva trayectoria independiente. Cuando ocurre lo opuesto y dos o más remolinos se unen, la trayectoria que se mantiene es la del remolino más antiguo, considerándose terminada la trayectoria del más joven. Como salida el algoritmo de seguimiento entrega trayectorias, en la forma de centroides de tiempos consecutivos concatenados, y variables que indican cuándo y cuáles remolinos se fusionan en uno sólo o cuándo y qué remolino se separa en 2 o más.

### 3.3. Comparación de detecciones y seguimientos de remolinos

Con el fin de tener una estimación de qué tan consistentes son los resultados de detección y seguimiento con resultados anteriores, se comparan con los resultados del método de Chelton et al. (2011) aplicado a campos semanales de SLA de AVISO entre Octubre de 1992 y Abril de 2012 (19.5 años) con una resolución espacial de  $1/4^\circ$  calculados a nivel global y extraídos para la región. Estos resultados se encuentran disponibles para descarga libre en <http://cioss.coas.oregonstate.edu/eddies/> e incluyen coordenadas del centroide, radio equivalente, amplitud y velocidad de rotación promedio. El método geométrico utilizado por Chelton et al. (2011) para la detección aplica el mismo principio que el algoritmo de Pegliasco et al. (2015) mediante la identificación del mayor contorno cerrado de SSH que contenga un máximo o mínimo local, sin embargo incorpora condiciones de amplitud mínima de 1 cm y un área mínima de  $0.5^\circ$ . El algoritmo de seguimiento de Chelton et al. (2011) considerando un remolino de

referencia en un tiempo  $t$  busca el remolino más cercano en un tiempo  $t + 1$  dentro de un área elipsoidal, cuyo centro es el del remolino en  $t$ , con semi-ejes de 150 km exceptuando el semi-eje oeste de la elipse que tiene valores iguales o mayores a 150 km dependiendo de la latitud. El remolino identificado en  $t + 1$  debe tener un área y amplitud de 0.25 - 2.5 veces el área y amplitud del remolino en  $t$ .

Para la comparación se utilizan mapas de número, radio y amplitud de remolinos separados por polaridad, todos en una misma grilla de  $1/4^\circ$  de resolución y suavizados mediante un filtro pasa-bajo de media ventana de  $4^\circ$ . En los mapas de diagnóstico, así como en todo este estudio, cada remolino se representa mediante su centro, equivalente al punto de grilla más cercano a su centroide. Adicionalmente se presentan histogramas comparando las distribuciones de radio y amplitud. Dado que los 3 conjuntos de datos, AVISO y ROMS para Pegliasco et al. (2015) y Chelton et al. (2011), tienen distinta resolución temporal, se normalizan los resultados dejándolos como datos semanales. Esta comparación se hace para el período Enero 1993 a Abril 2012. En el caso de ROMS, dado que es una simulación climatológica se utiliza un período igual de largo. Cabe señalar que los resultados de Chelton no representan necesariamente el campo “verdadero” de remolinos, pero la comparación con éste da una estimación de qué tan consistentes son los resultados obtenidos con el algoritmo de Pegliasco et al. (2015).

### 3.4. Análisis espectral

A cada mapa de ambos conjuntos de datos (ROMS y AVISO) se les aplica un filtro espacial pasa-alto de Hanning sobre todo el dominio ( $105 - 70^\circ\text{O}$ ,  $45 - 22^\circ\text{S}$ ), con una media-ventana de  $4^\circ$  para así aislar el campo de mesoescala (Maximenko et al., 2008a). En una primera etapa se filtra el campo reemplazando previamente los valores inválidos de éste por ceros. En una segunda etapa se filtra un campo idéntico al original pero cuyos valores inválidos son reemplazados previamente por ceros y el resto por unos. El primer campo obtenido es dividido por el segundo y así se aplica una corrección a los efectos de borde generados al expandir los bordes originales con ceros al momento de filtrar.

Luego, cada set de datos se divide en 2 componentes: SLA asociada a posibles estriaciones transientes, y el campo promedio asociado a posibles estriaciones estacionarias. A continuación, para determinar la inclinación de las estriaciones (desviación de la dirección zonal) de forma objetiva se utiliza la Transformada Discreta de Fourier en 2 dimensiones. Se obtienen así los espectros de Fourier 2D para cada paso de tiempo de SLA, de los cuales se calcula un espectro promedio. Este mismo procedimiento se aplica a los mapas de SSH promedio. La transformada se ejecuta sobre una zona rectangular (Fig.3.4) de modo que ni la capa de esponja en ROMS ni los efectos costeros, como la generación de remolinos (tanto en altimetría como en la simulación) influyan en los espectros.

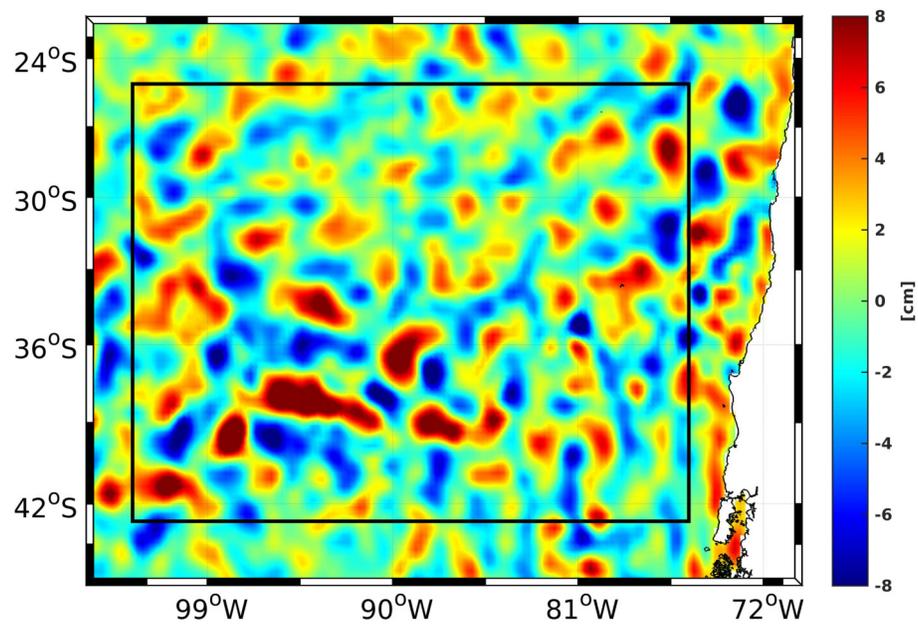


Figura 3.4: Zona utilizada para calcular los espectros 2-D sobre el campo de SLA AVISO (en *cm*) del 10 de Enero de 1993.

## 3.5. Diagramas Hovmöller y perfiles promedio

Los análisis descritos a continuación se realizan para 2 subregiones del dominio (Fig. 4.16, 4.18), una que contiene principalmente la zona oceánica incluyendo al FST (Chaigneau y Pizarro, 2005b) y otra que incluye la ZTC (Hormazábal et al., 2004) pero no la costa ya que la generación costera de remolinos podría impedir la correcta visualización de las estriaciones. La inclinación de estas zonas rectangulares cambia dependiendo de los ángulos determinados en el análisis espectral.

### 3.5.1. Polaridad y altura del nivel del mar

Para el análisis de estriaciones estacionarias se promedia casi-zonalmente a lo largo de una subregión con la misma inclinación que las estriaciones. Esto para los campos promedios de SSH y el mapa de polaridad de remolinos, obteniendo así dos perfiles a comparar mediante correlaciones. Esta metodología es similar a la utilizada por Maximenko et al.(2013). La polaridad se define en la ecuación (3.3)

$$Polaridad = \frac{N_{anticiclónicos} - N_{ciclónicos}}{N_{anticiclónicos} + N_{ciclónicos}} \quad (3.3)$$

donde  $N_{anticiclónicos}$  corresponde al número de remolinos anticiclónicos identificados a lo largo del período de estudio en un determinado punto de grilla, y  $N_{ciclónicos}$  al de ciclónicos, de modo que un valor de 1 significaría que la totalidad de remolinos son anticiclónicos y -1 que todos son ciclónicos.

Para los mapas de SLA se generan diagramas Hovmöller obtenidos promediando casi-zonalmente a lo largo de una subregión con la misma inclinación de las estriaciones transientes. La metodología es similar a la presentada en la Fig. 1.3.b, con la diferencia de que en este caso se aplica a secciones casi-zonales y no zonales, obteniendo un diagrama de latitud promedio versus tiempo. Esto mismo se aplica a los campos de anomalía de polaridad de remolinos.

Para formar un patrón de polaridad más claro en el análisis de estriaciones transientes se generan campos semestrales de remolinos mediante una ventana móvil uniforme de 181 días (valor impar para tener un valor central al cual asociarle una fecha), ya que cada campo individual tiene más puntos de grilla sin remolinos que con remolinos, sin que se observe un patrón visible. Ésta ventana móvil también se aplica a los datos de SLA pero promediando. Después de ésto se resta el promedio a la polaridad por latitud promedio, obteniéndose la anomalía de polaridad.

El objetivo de este análisis es determinar si existe una correspondencia, en el tiempo y el espacio, entre remolinos y estriaciones transientes mediante la comparación de ambos diagramas Hovmöller para una misma zona y período de tiempo calculando correlaciones por latitud promedio. Además a los diagramas se les aplica, mediante una ventana móvil de 5 años, la Transformada de Radon para estimar la velocidad casi-meridional de propagación de las estriaciones, es decir, la velocidad en la dirección perpendicular al eje de las estriaciones. En general se recomienda su uso por sobre la Transformada de

Fourier cuando el objetivo es calcular velocidades de propagación y no longitudes de onda ni períodos (Challenor et al., 2001).

### 3.5.2. Polaridad de generación y altura del nivel del mar

Análogamente a lo descrito en la sección anterior, se compara el campo de SLA con la polaridad de generación de remolinos en el océano interior, vale decir, la polaridad del primer remolino de cada trayectoria. No se toman en cuenta los remolinos generados por la separación de un remolino en 2 o más, dado que la génesis de estos no estaría asociada a inestabilidades barotrópicas (o baroclínicas). En éste análisis no se discrimina en la duración de las trayectorias.

## 3.6. Generación costera

Una posible explicación al patrón de estriaciones en el océano interior es que éste se genera en la costa, mediante lugares preferidos de generación de remolinos por polaridad. Para estudiar esto se define una banda costera, de  $1.2^\circ$  de ancho, ya que es donde se encuentra la mayor concentración de generación (Fig. 3.5). Además se consideran solamente remolinos con un tiempo de vida mínimo de 28 días, ya que se requiere que éstos tengan una propagación mínima hacia el océano interior donde podrían contribuir a las estriaciones. Dado que las velocidades de propagación en ésta región son del orden de  $\sim 3$  cm/s (Chaigneau y Pizarro, 2005a) los remolinos podrían alcanzar a recorrer una distancia de  $\sim 70$  Km ( $\sim 0.8^\circ$ ) en 28 días. Para el caso de las estriaciones transientes, se calculan campos de anomalía de polaridad de generación dentro de ésta banda utilizando una ventana móvil de 181 días y generando diagramas Hovmöllers latitud vs. tiempo. A dichos diagramas se les calcula la velocidad de propagación meridional, mediante Transformada de Radon con ventana móvil de 5 años, y se compara con la velocidad de propagación de las estriaciones en el océano interior. Para el caso de las estriaciones estacionarias se comparan los perfiles de estriaciones y de la generación costera, desfasando meridionalmente los primeros de acuerdo a su ángulo de inclinación y distancia de la costa, ya que de tener un origen costero éste se encontraría en donde la prolongación de la estriación hacia el Este intersecte a la costa. Se incluye además un análisis espectral 1D con transformada de Fourier para extraer las principales escalas meridionales.

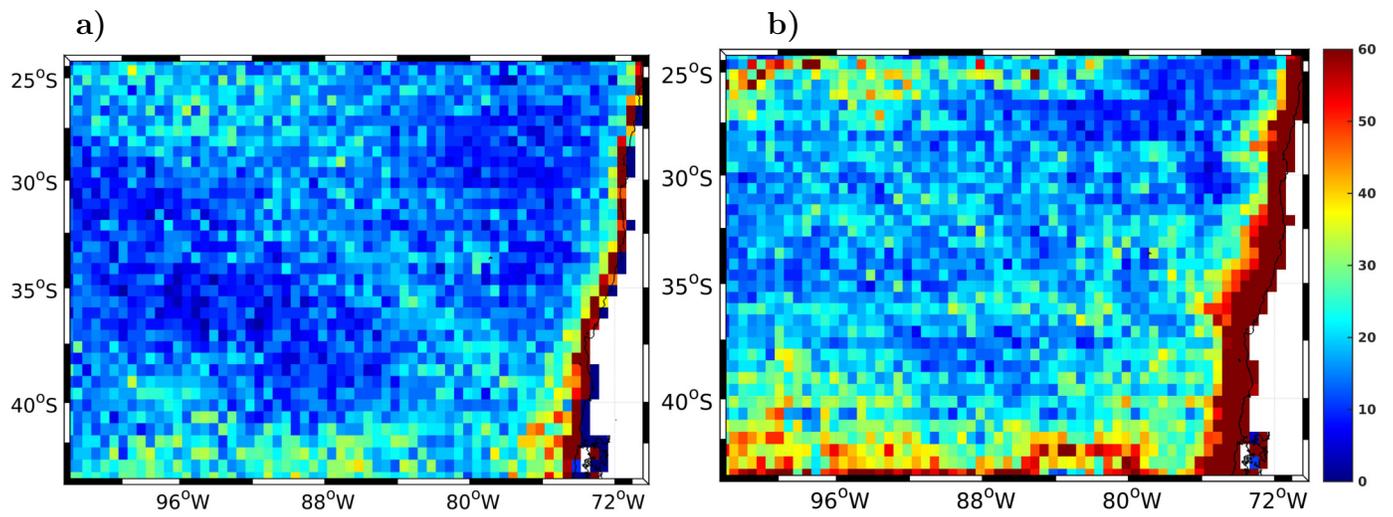


Figura 3.5: Generación total de remolinos por punto de grilla ( $0.5^\circ$  de resolución) para a) AVISO y b) ROMS.

---

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Comparación de resultados de algoritmo

Los diagnósticos utilizados para la comparación del algoritmo de detección y seguimiento sólo consideran remolinos cuya amplitud sea mayor o igual a 1 cm, que pertenezcan a una trayectoria que tenga al menos 4 semanas de duración y cuya área sea igual o superior a  $0.5^{\circ 2}$ , de modo que sean comparables a los resultados de Chelton et al. (2011). En esta sección en general se hablará de AVISO para referirse solamente a los resultados obtenidos en este estudio con ese conjunto de datos y con el método de Pegliasco et al. (2015), mientras que a los de Chelton et al. (2011) se les hace referencia simplemente con el nombre de Chelton. AVISO al igual que Chelton tiene un 52 % de anticiclónicos y 48 % de ciclónicos, cercano a lo obtenido con ROMS de 54 % de anticiclónicos y 46 % de ciclónicos (ver tabla 4.1). ROMS, a pesar de tener una mejor resolución espacial, muestra menos remolinos que AVISO. Esto podría deberse al forzante climatológico, ya que no se reproduce la variabilidad intraestacional ni interanual de remolinos. Al mismo tiempo AVISO muestra un mayor número de remolinos que Chelton ya que éste último no detecta muchos de radio menor a 80 km (Fig. 4.4.a) que sí detecta AVISO. El algoritmo de Chelton además no contempla separación de remolinos en 2 o más, fenómeno bastante común de acuerdo a lo observado en AVISO y ROMS, considerando cómo 1 sólo a dos o más remolinos que se encuentren muy cerca.

	Chelton	AVISO	ROMS
Anticiclónicos	44,333 (52 %)	70,019 (52 %)	65,283 (54 %)
Ciclónicos	40,452 (48 %)	65,829 (48 %)	55,286 (46 %)
Total	84,785	135,848	120,569

Tabla 4.1: Número de remolinos por tipo de dato y polaridad.

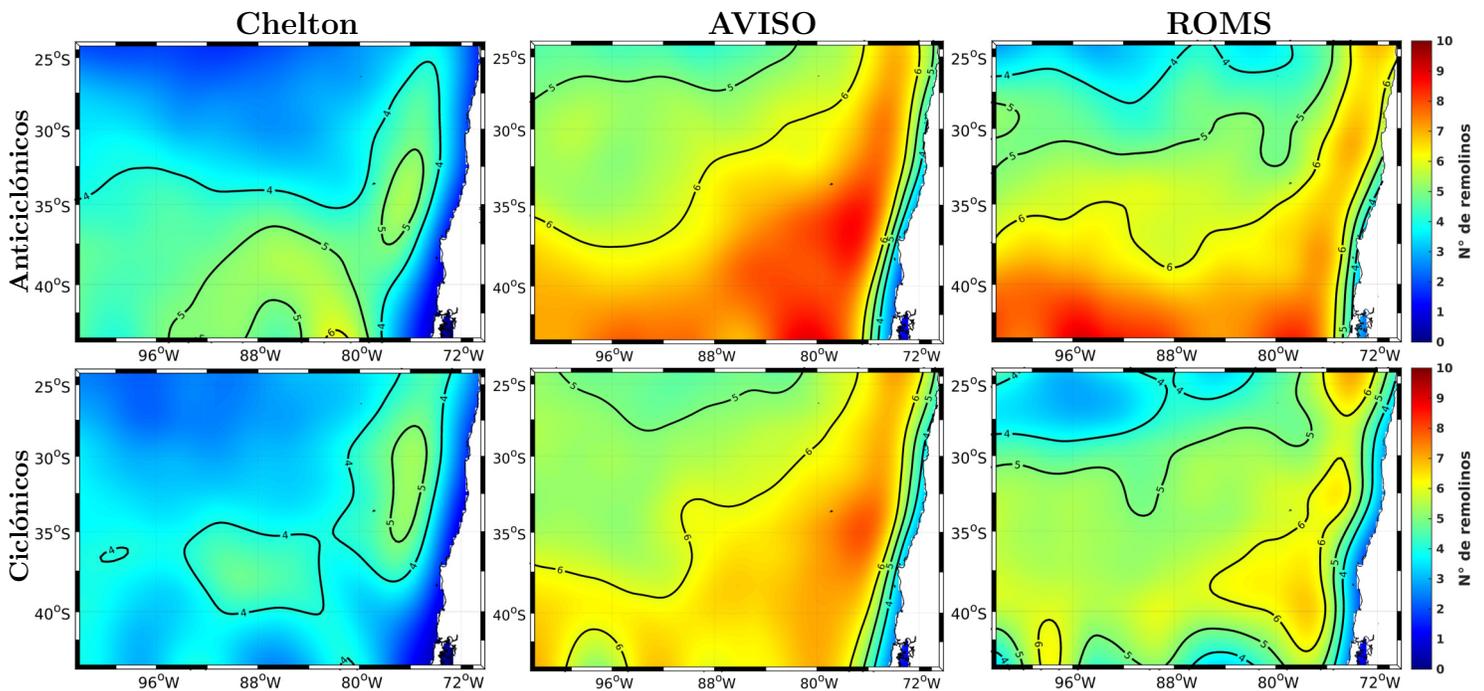


Figura 4.1: Mapas de número de remolinos por punto de grilla para Chelton (izquierda), AVISO (centro) y ROMS (derecha). Arriba anticlónicos y abajo ciclónicos.

Para los campos de número de remolinos (Fig.4.1) se puede observar que el algoritmo utilizado detecta un mayor número tanto para AVISO como para ROMS en comparación a Chelton (tabla. 4.1). Las isolíneas de 5 remolinos de ciclónicos y anticlónicos en AVISO están relativamente cerca de las de ROMS pero se encuentra mucho más al sur en Chelton. Sin embargo, la estructura general se mantiene en los 3 casos: mayor número de remolinos cerca de la costa (ZTC) y en la mitad sur del dominio (FST) mientras que en el nor-oeste existen valores más bajos. Se ve que los valores se mantienen relativamente constantes a lo largo de la costa para ambas polaridades, sin embargo al sur del dominio estos decaen en los 3 mapas de ciclónicos en varias longitudes. Los ciclónicos son más numerosos en la ZTC para los tres casos, mientras que los anticlónicos son más numerosos en el FST, similar a lo mostrado por Chaigneau et al. (2009) (Fig. 1.6) y Chelton et al. (2011) (no se muestra) para la zona.

Los rangos de los valores de radio promedio (Fig.4.2) en Chelton son significativamente mayores que los de AVISO, esto debido a que Chelton no detecta muchos remolinos de radio inferior a 80 km (Fig. 4.4.a). ROMS y AVISO son muy similares entre sí. Independientemente de los rangos la forma de los 3 es bastante similar: valores más bajos en el sur y cerca de la costa y valores más altos en el norte y nor-oeste. Esto se explicaría por el radio de Rossby que aumenta hacia el ecuador y los remolinos generados en la ZTC que aumentan su tamaño a medida que se propagan hacia el Oeste. Los máximos de AVISO para ciclónicos y anticlónicos oscilan entre el oeste y el norte, mientras que en ROMS, si bien aparecen mayores valores en el oeste para anticlónicos, los máximos siempre se mantienen en el norte.

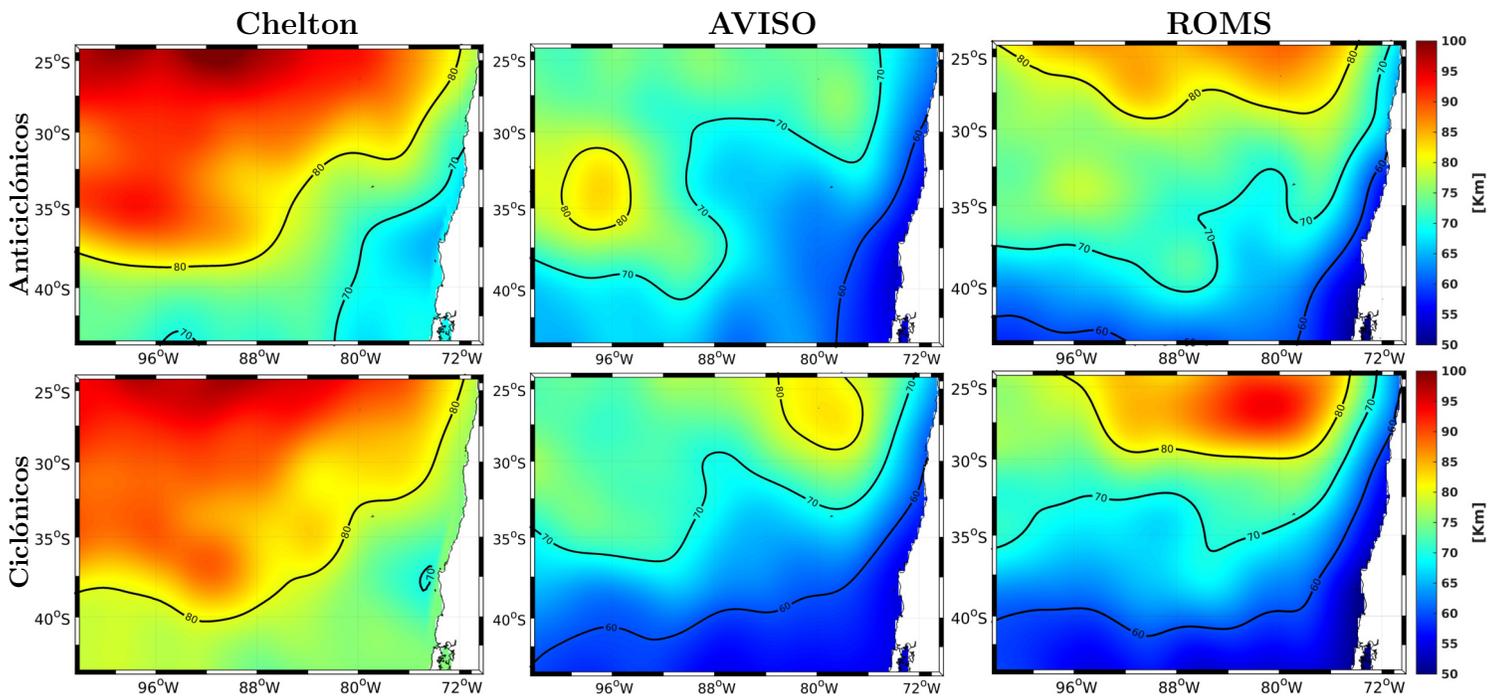


Figura 4.2: Mapa de radio promedio de remolinos para Chelton (izquierda), AVISO (centro) y ROMS (derecha). Arriba anticiclónicos y abajo ciclónicos.

En todos los mapas de amplitud (Fig.4.3) pueden distinguirse 2 zonas de valores locales máximos; en el océano interior aproximadamente entre 30 y 40 °S y 85 y 100 °O asociado al FST (Chaigneau y Pizarro, 2005.b) y en la zona costera entre 38 y 28 °S asociado a la ZTC (Hormázabal et al. 2004). Dado que bajo una aproximación geostrofica (ec.1.1 y 1.2) la EKE (ec.3.1) es proporcional a  $\frac{Amplitud^2}{Radio^2}$  lo observado aquí es coherente con los trabajos de Hormázabal et al. (2004) y Chaigneau y Pizarro (2005.b), ya que los máximos locales en amplitud coinciden con valores relativamente bajos de radio. En el FST los remolinos anticiclónicos poseen mayores amplitudes que los ciclónicos y en la ZTC ocurre lo opuesto. El FST tiene valores similares para los mapas ciclónicos de AVISO y Chelton, mientras que ROMS, en comparación a AVISO, reproduce amplitudes con valores menores en ambas polaridades. La amplitud de ciclónicos en la ZTC es menor en Chelton comparado a AVISO. ROMS, en relación a AVISO, sobreestima de forma importante la amplitud en la ZTC para los ciclónicos y en menor medida también para los anticiclónicos.

En el histograma de radio (Fig.4.4.a) se observa que el máximo número de remolinos se encuentra entre los 40 y 50 Km de radio para el algoritmo de Pegliasco et al. (2015), tanto con AVISO como con ROMS, mientras que Chelton tiene su máximo centrado entre 60 y 80 Km. Para radios menores a  $\sim 50$  km los ciclónicos en AVISO presentan un mayor número, invirtiéndose ésta tendencia para radios mayores a 50 km, no obstante en Chelton ocurre lo opuesto a los  $\sim 85$  Km. A diferencia de AVISO, para ROMS en todos los rangos siempre existe un mayor número de anticiclones.

En cuanto al histograma de amplitudes (Fig.4.4.b) se observa que el máximo para todas las curvas se ubica aproximadamente a los 2 cm. Entre 1 y 2 cm Chelton presenta igual número de remolinos por

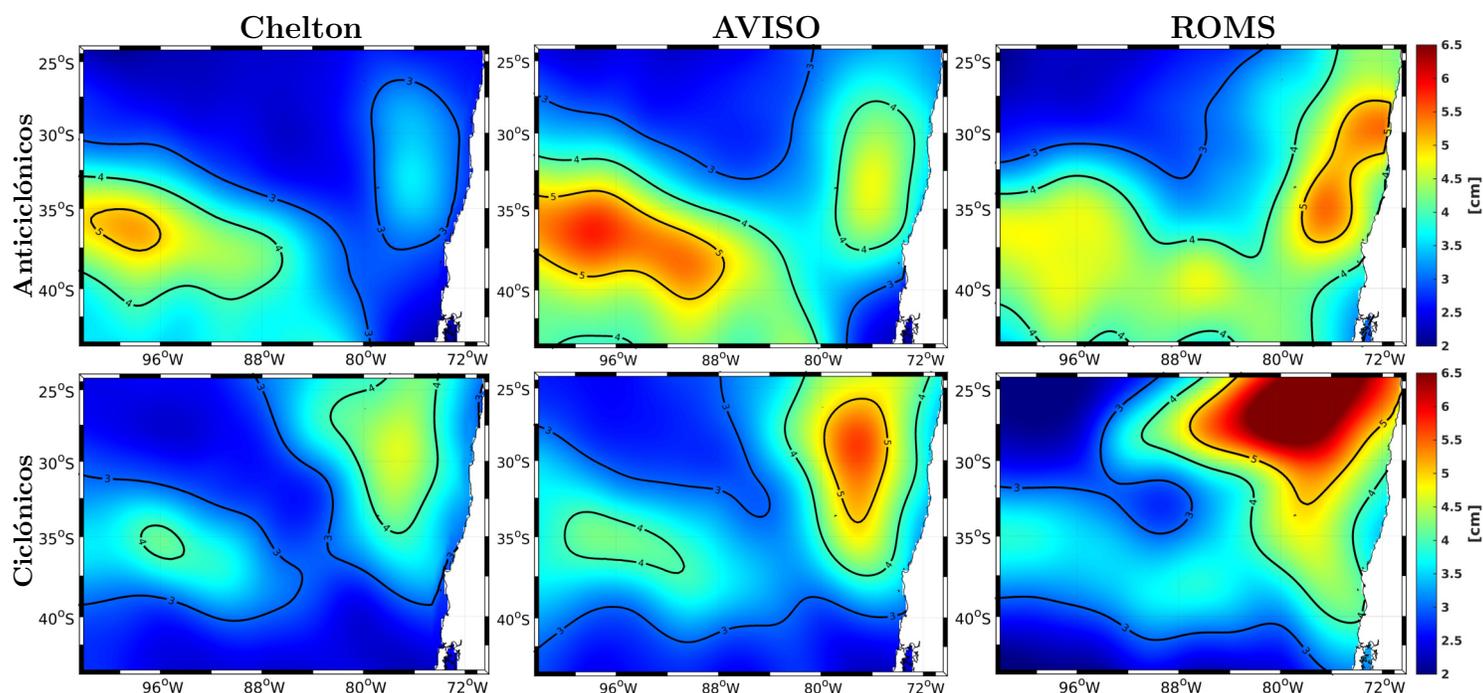


Figura 4.3: Mapas de amplitud promedio de remolinos para Chelton (izquierda), AVISO (centro) y ROMS (derecha). Arriba anticlónicos y abajo ciclónicos.

polaridad, de 2 cm en adelante predominan los anticiclónicos en todo el rango. Contrariamente, AVISO posee más ciclones hasta los 3 cm, luego esto se invierte. ROMS presenta un comportamiento similar al de AVISO pero a los 2 cm.

En resumen, a pesar de que el algoritmo de Pegliasco et al. (2015) en ambos casos detecta entre 30-40 % más de remolinos que Chelton, la forma general de los histogramas (Fig.4.4) es la misma. Para las características espaciales se observa que en general éstas son las mismas. No obstante entre ROMS y AVISO existe una discrepancia importante que es la sobreestimación de amplitud de ROMS en la ZTC para ciclónicos.

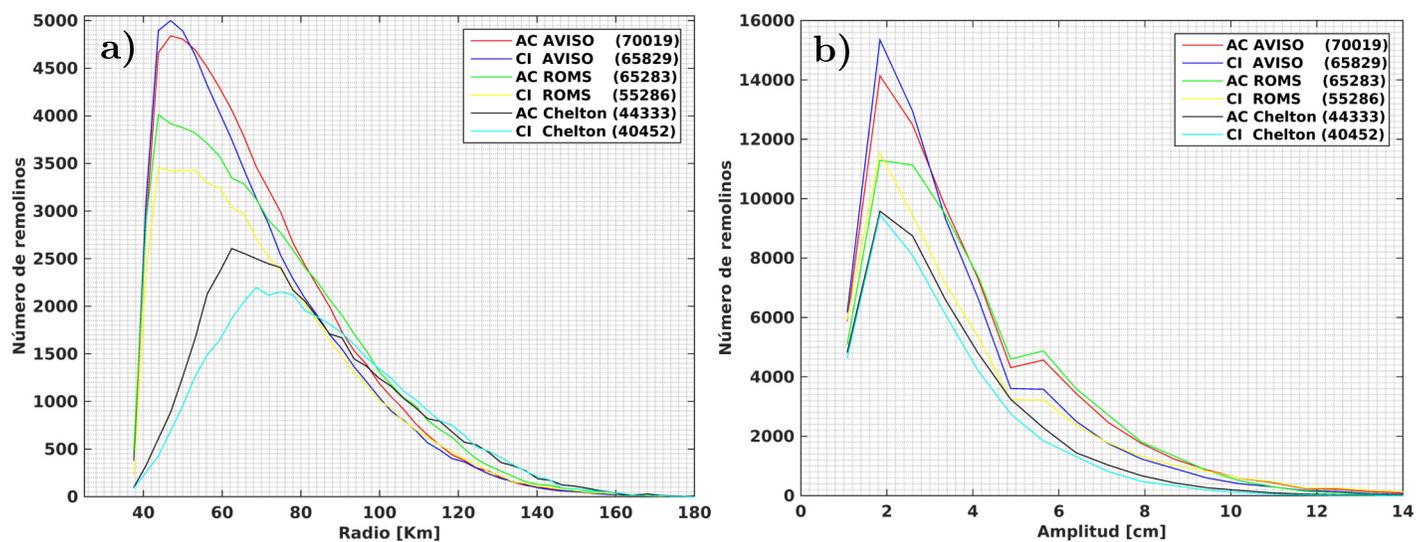


Figura 4.4: Histogramas de a) radio y b) amplitud. AC (CI) es para anticiclónicos (cyclónicos).

## 4.2. Análisis espectral

### 4.2.1. Estriaciones estacionarias

En la Fig.4.5 se observa el campo promedio de MDOT de AVISO y SSH promedio de ROMS, filtrados. En ambos se ve un patrón bandeado casi-zonal en prácticamente todo el dominio, correspondiente a las estriaciones estacionarias. Éstas son más energéticas en ROMS, con una desviación estándar de 1 *cm* superior a la de AVISO de 0.7 *cm*, posiblemente debido al forzante climatológico del modelo y consecuente falta de variabilidad interanual e intraestacional que podría resultar en menor variabilidad de la ubicación de las estriaciones, o a la mayor resolución. Las estriaciones en ROMS además están mejor definidas en su extensión zonal que en AVISO.

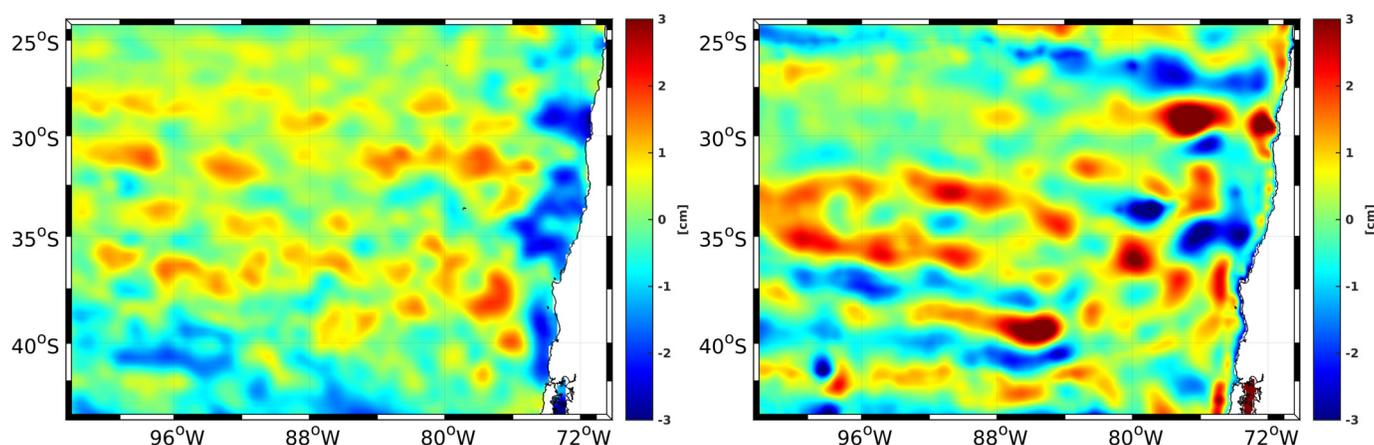


Figura 4.5: MDOT de AVISO (izq.) y SSH promedio de ROMS (der.), ambos filtrados espacialmente, en donde son visibles las estriaciones estacionarias.

Por otra parte, se observa que al aumentar el período de tiempo en que se promedian los campos, la desviación estándar espacial decae como  $\propto T^{-0,36}$  para AVISO y  $\propto T^{-0,2}$  para ROMS. Es decir, decaen más lento que la tasa propuesta originalmente por Schlax y Chelton (2008), y posteriormente corregida por Buckingham y et al. (2014), de  $\propto T^{-0,5}$  para un campo de remolinos con ubicaciones aleatorias. Vale decir que el campo no es completamente aleatorio, lo que sugiere que la persistencia de las estriaciones podría ser el resultado de caminos preferidos de remolinos.

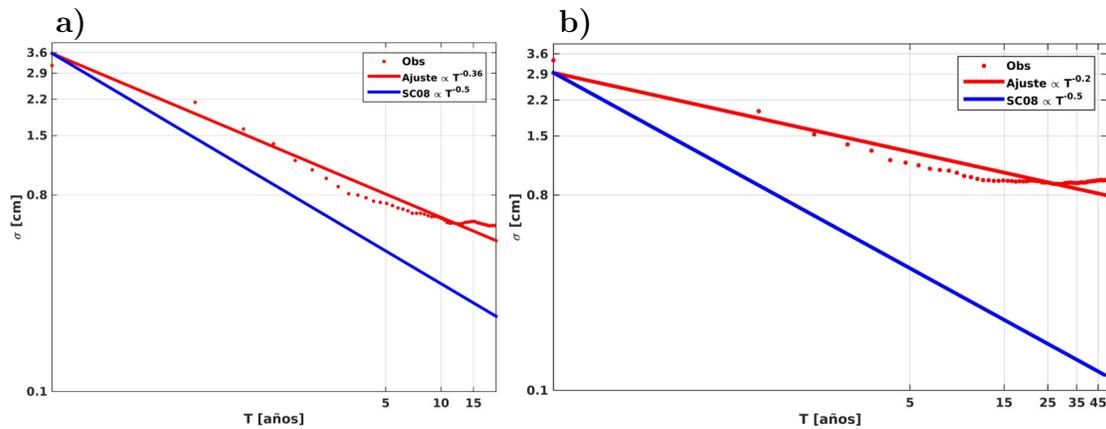


Figura 4.6: Desviación estándar espacial del campo promedio de SSH en función del período  $T$  en que se promedia para a) AVISO y b)ROMS. Puntos representan los datos, líneas rojas las curvas ajustadas de la forma  $\sigma = \alpha T^\beta$  en el sentido de los mínimos cuadrados a los datos y línea azul el decaimiento de la desviación estándar para un campo de remolinos aleatorio propuesto por Schlxax y Chelton (2008).

La Fig. 4.7 muestra los espectros de Fourier suavizados en 2 dimensiones para el campo promedio de AVISO y ROMS . Para AVISO se observan 2 máximos locales secundarios en el primer y tercer cuadrantes ( $k_x k_y > 0$ ), donde  $k_x \approx \pm 0,2 \text{ rad}/^\circ$  y  $k_y \approx \pm 2,36 \text{ rad}/^\circ$ , los cuales representan las componentes del número de onda  $\mathbf{k}$  perpendicular a las estriaciones. Éstas equivalen a una longitud de onda zonal  $\lambda_x \approx 32^\circ$  y meridional  $\lambda_y \approx 2,7^\circ$  y a un ángulo de inclinación de  $\sim -5^\circ$  con respecto a la dirección zonal. Para ROMS se observan 2 máximos en los cuadrantes 1 y 3 con  $k_x \approx \pm 0,25 \text{ rad}/^\circ$  y  $k_y \approx \pm 1,72 \text{ rad}/^\circ$  equivalentes a  $\lambda_x \approx 25,6^\circ$  y  $\lambda_y \approx 3,7^\circ$  con una inclinación de  $\sim -8^\circ$ . Esto muestra un  $\lambda_{aviso} \approx 2,7^\circ$  menor que  $\lambda_{roms} \approx 3,7^\circ$  consistente con lo que se observa en la Fig.4.5, al igual que la diferencia en inclinaciones. Sin embargo, en general ROMS y AVISO son similares, con un campo de MDOT con estriaciones estacionarias cuyos números de onda son del mismo orden de magnitud y ambos con una inclinación noroeste-sureste con ángulos muy cercanos.

Cabe destacar el máximo saturado y cercano a 0 que se observa en la Fig. 4.7 de AVISO, el cual en realidad consiste en 2 máximos simétricos (cuadrantes 1 y 3), producto posible de un remanente de gran escala que quedó en el campo después de aplicar el filtrado espacial mediante ventana móvil. A futuro se sugiere utilizar otra técnica de filtrado como reconstruir el campo en base a su espectro de Fourier espacial, eliminando previamente las componentes de bajos números de onda del espectro. No obstante, en este caso la presencia de componentes de gran escala no alteran el análisis espectral de las estriaciones.

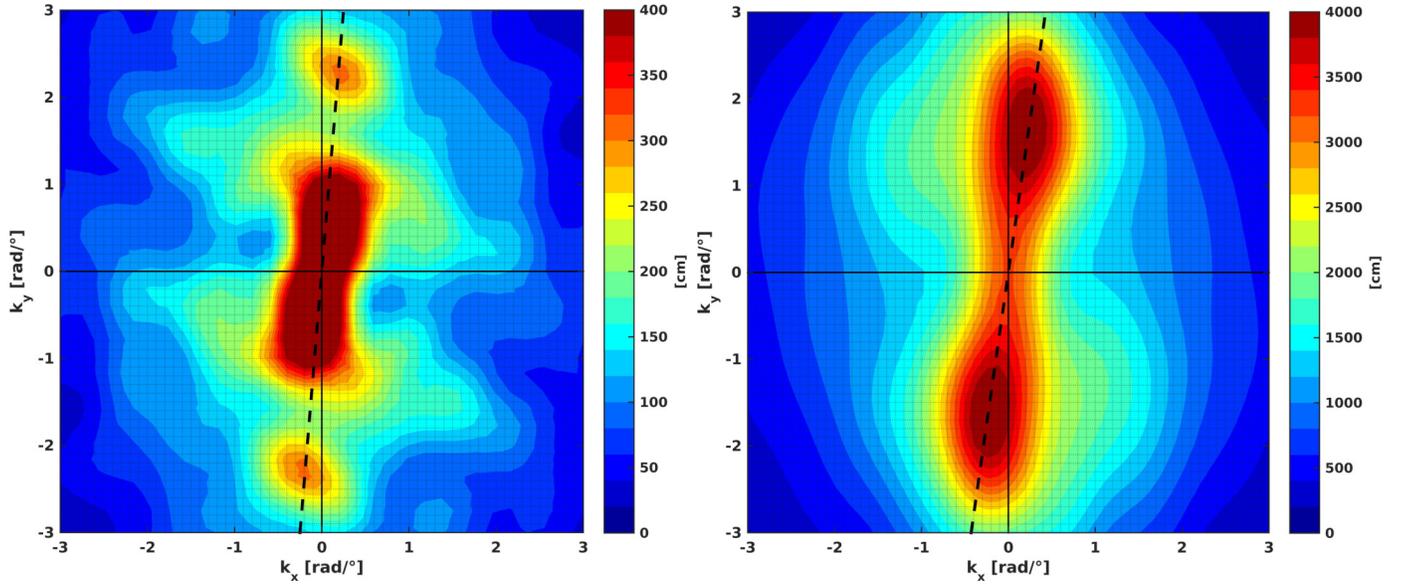


Figura 4.7: Espectros espaciales 2-D suavizados de MDOT de AVISO (izq.) y SSH promedio de ROMS (der.). Líneas segmentadas muestran inclinación de los máximos locales.

#### 4.2.2. Estriaciones transientes

En la Fig. 4.8 se observan los espectros promedio de los mapas instantáneos de SLA para AVISO y ROMS. El análisis realizado aquí se remite a estudiar los patrones casi-zonales representados en los espectros que estarían potencialmente asociados a estriaciones. Para AVISO se observan 3 máximos distintos, 2 de los cuales corresponden a estructuras casi-zonales ( $k_x$  pequeño). Uno demarcado con la línea segmentada (máximo 1) corresponde al mayor máximo local con  $k_x \approx \mp 0,59 \text{ rad/}^\circ$  y  $k_y \approx \pm 1,57 \text{ rad/}^\circ$  ( $\lambda_x \approx 10,7^\circ$  y  $\lambda_y \approx 4^\circ$ ) y una inclinación de  $\sim 21^\circ$ . El otro (máximo 2), demarcado con la línea segmentada y punteada, corresponde al tercer máximo, en magnitud, con  $k_x \approx \pm 0,39 \text{ rad/}^\circ$  y  $k_y \approx \pm 1,57 \text{ rad/}^\circ$  ( $\lambda_x \approx 16^\circ$  y  $\lambda_y \approx 4^\circ$ ) y una inclinación de  $\sim -14^\circ$ . Los máximos 1 y 2 son similares a los obtenidos por Chen et al. (2015) que calcula espectros para el Pacífico Nor-Oriental con campos de velocidad geostrofica obtenidos a partir de anomalías semanales de SSH (AVISO) entre 1992 y 2009 con una resolución de  $1/4^\circ$ . En su estudio obtienen un primer máximo con orientación noreste-suroeste, y un segundo máximo con orientación noroeste-sureste. En el espectro de ROMS de la Fig. 4.8 se observa sólo 1 máximo correspondiente a una estructura casi-zonal denotado por la línea segmentada con  $k_x \approx \mp 0,12 \text{ rad/}^\circ$  y  $k_y \approx \pm 1,7 \text{ rad/}^\circ$  ( $\lambda_x \approx 50,2^\circ$  y  $\lambda_y \approx 3,7^\circ$ ) y una inclinación de  $\sim 4^\circ$ , consistente con lo observado en un tiempo específico en la Fig. 4.11.b.

Dado que la magnitud de las estriaciones es menor a la de los remolinos es común que se calculen promedios temporales, de velocidad o altura del nivel del mar, para hacer visibles a éstas. Sin embargo, se observa que para promedios en un período suficientemente largo, 1 año en este caso, para AVISO (Fig. 4.9) desaparecen las estructuras asociadas a la inclinación de  $\sim 21^\circ$ . Sólo queda una componente

de baja frecuencia con una orientación similar a la del máximo 2 en la Fig. 4.8 con  $k_x \approx \pm 0,2 \text{ rad/}^\circ$  y  $k_y \approx \pm 1,6 \text{ rad/}^\circ$  ( $\lambda_x \approx 32^\circ$  y  $\lambda_y \approx 4^\circ$ ). En la Fig. 4.11.c se observa el promedio anual de SLA de AVISO para 1994, el cual concuerda con el espectro de AVISO en la Fig. 4.9 . Chen et al. (2015), calculando un espectro para la componente de baja frecuencia ( $0.4 \text{ año}^{-1}$ ) del campo de velocidades geostroficadas, obtiene un espectro similar al de la Fig. 4.9 para AVISO.

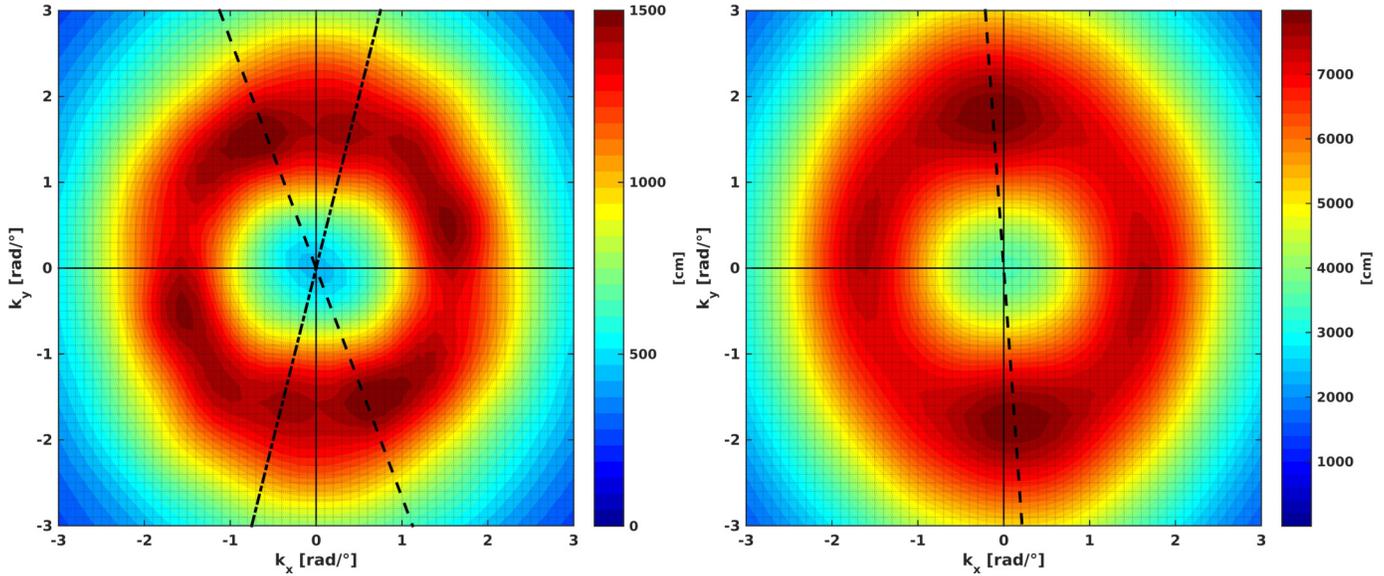


Figura 4.8: Espectros promedios suavizados para AVISO (izq.) y ROMS (der.) de campos instantáneos de SLA. Líneas segmentadas muestran inclinación del máximo 1 en AVISO ( $21^\circ$ ) y del máximo único en ROMS ( $4^\circ$ ), y la línea segmentada y punteada muestra la inclinación del máximo 2 de AVISO ( $-14^\circ$ ).

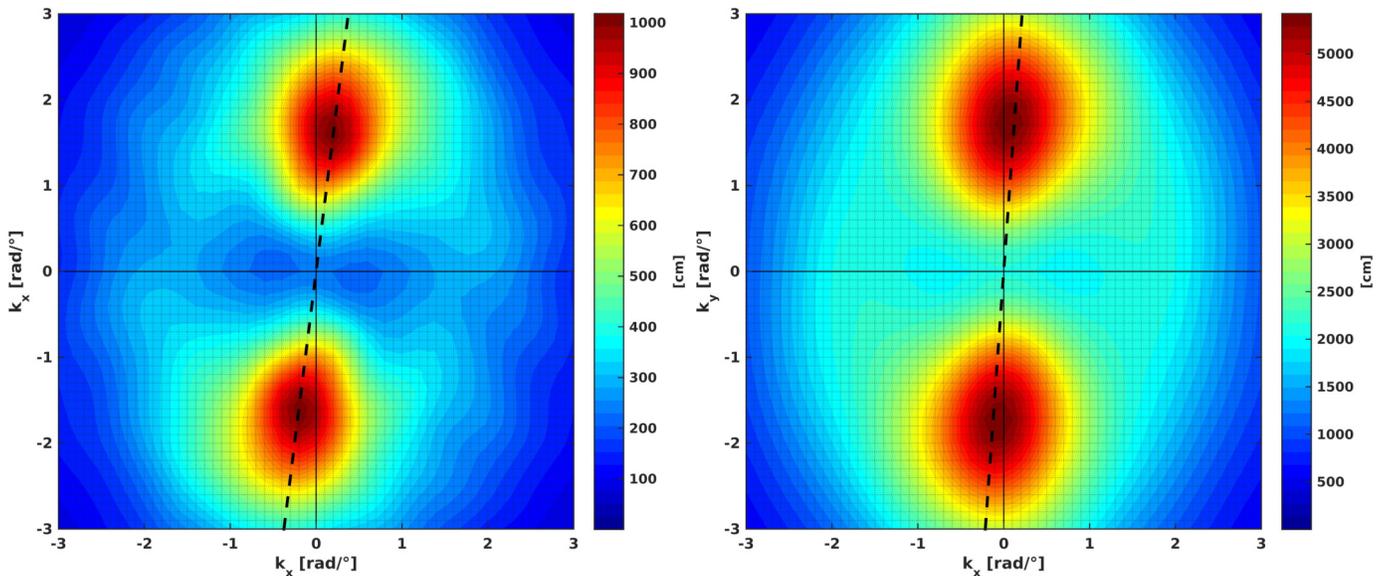


Figura 4.9: Espectros promedios suavizados de promedios anuales para AVISO (izq.) y ROMS (der.) de campos instantáneos de SLA. Líneas segmentadas muestran inclinación de los máximos locales.

En la Fig. 4.9 para el espectro promedio de baja frecuencia de ROMS se observa algo muy similar a lo de AVISO, un sólo máximo con valores de  $k_x \approx \pm 0,12 \text{ rad}/^\circ$  y  $k_y \approx \pm 1,72 \text{ rad}/^\circ$  ( $\lambda_x \approx 52,2^\circ$  y  $\lambda_y \approx 3,66^\circ$ ). En la Fig. 4.11.d se puede ver el promedio para el tercer año de ROMS, consistente con lo mostrado en el espectro.

En base a los espectros de AVISO y ROMS se puede decir que existen 2 tipos de estriaciones en SLA, uno de alta frecuencia, refiriéndose a períodos menores a 1 año, cuyas fases están alineadas de noreste a suroeste y otra de baja frecuencia con orientación noroeste a sureste. Esto es más claro en AVISO ya que éste último también es visible en la alta frecuencia, es decir que en imágenes instantáneas debería ser posible ver ambas estriaciones.

Aplicando la transformada inversa de Fourier al espectro de la Fig. 4.8 de AVISO modificado de forma que sólo contenga los píxeles que definen los máximos 1 y 2, se reconstruye un patrón idealizado de lo que se ve en una instantánea de SLA AVISO (Fig. 4.10) y se observa que éste describe una estructura similar a la de un tablero de ajedrez. Dicho patrón además es visible en cierta medida en imágenes instantáneas (Fig. 4.11.a).

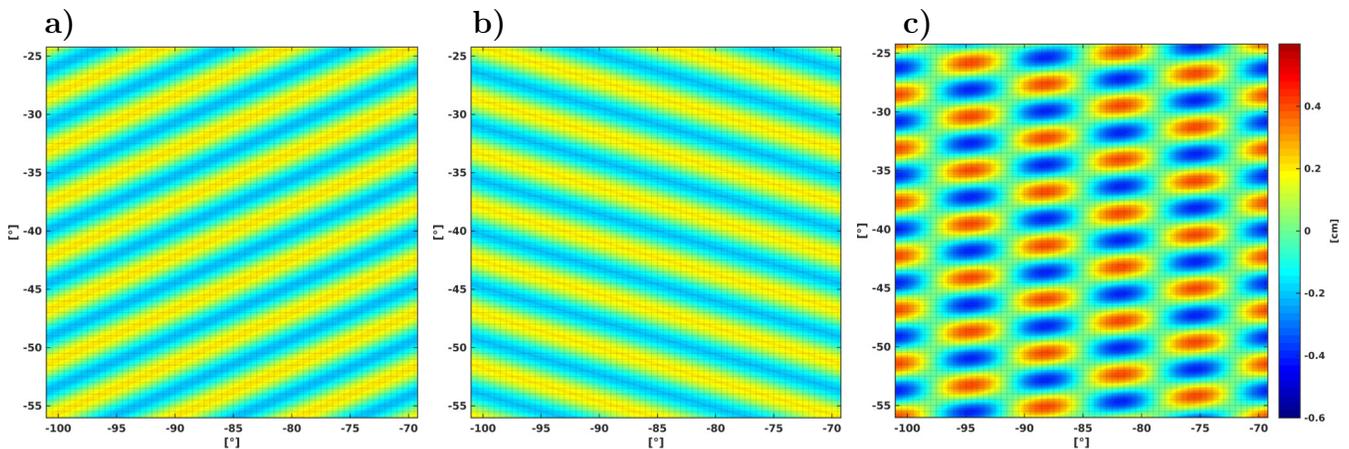


Figura 4.10: Reconstrucción idealizada de campo SLA AVISO utilizando a) máximo 1, b) máximo 2 y c) máximos 1 y 2 del espectro promedio. Valores de la abscisa y ordenada no corresponden a la ubicación geográfica exacta.

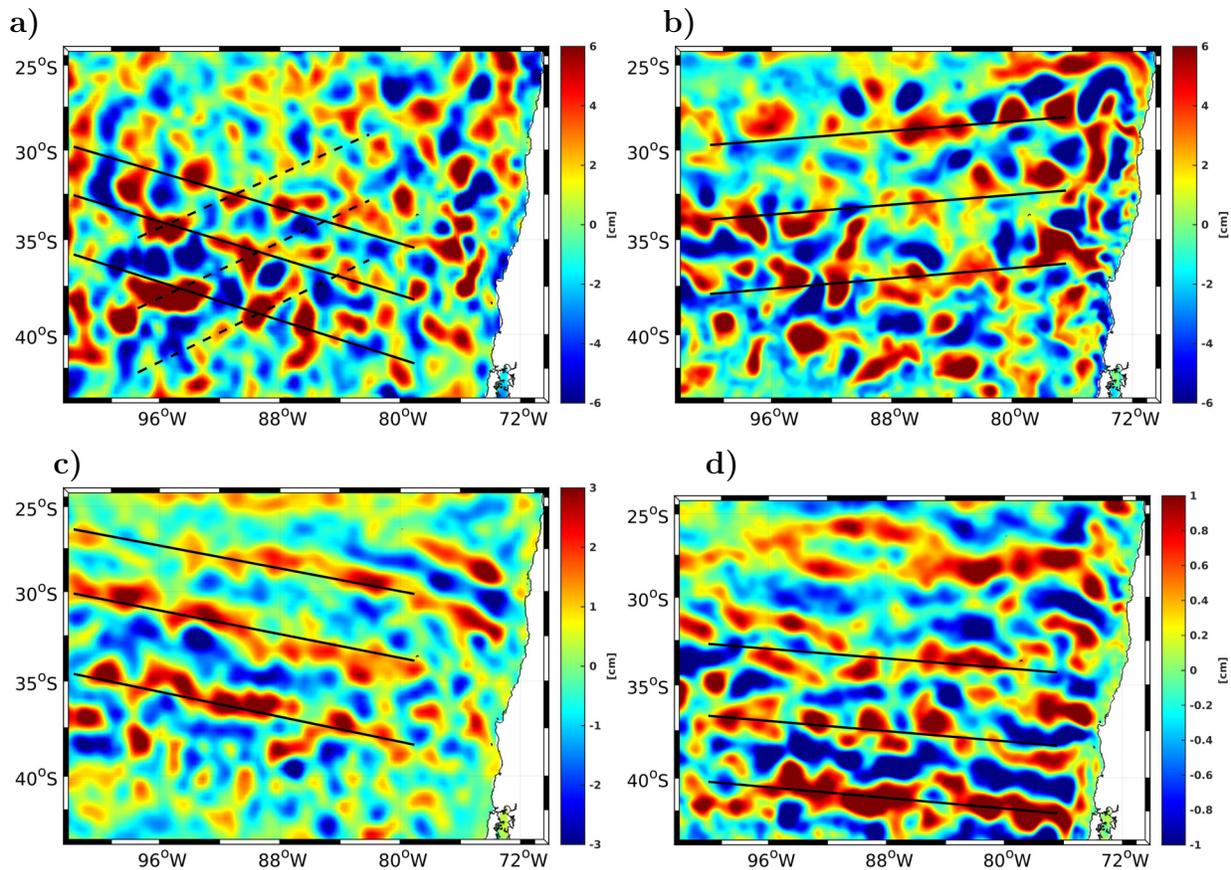


Figura 4.11: a) Campo de SLA AVISO del 21 de Marzo de 1993. En líneas negras continuas se muestran crestas de estriaciones con inclinación de  $-14^\circ$  y en líneas negras segmentadas las de  $21^\circ$ . b) Campo de SLA ROMS para el primer día de la simulación. Líneas negras muestran crestas de estriaciones con inclinación de  $4^\circ$ . c) Promedio de SLA del año 1994 en AVISO. Líneas negras marcan crestas con  $-7^\circ$  de inclinación. d) Promedio del SLA del tercer año de ROMS. Líneas negras marcan crestas con  $-4^\circ$  de inclinación.

En la Fig. 4.12 se muestra un esquema muy simple de como sería la propagación del campo idealizado de AVISO. Se presenta una propagación hacia el Oeste, uniforme para todo el campo, de  $C_x = 3 \text{ cm s}^{-1}$  (Chelton et al., 2011), con un desplazamiento menor hacia el ecuador de  $C_y = 0,26 \text{ cm s}^{-1}$ , ésto equivale a un ángulo, con respecto a la dirección Oeste, de  $5^\circ$  (Chelton et al., 2011). Se aproxima el desplazamiento meridional de ésta forma ya que, sin discriminar por polaridad, la mayor parte de los remolinos, entre  $10$  y  $50^\circ\text{S}$ , poseen propagación meridional hacia el ecuador (Chelton et al., 2011). El intervalo de tiempo entre cada mapa es de  $\Delta t = 38$  semanas abarcando un período total de  $\sim 4$  años. Con una línea negra continua se muestra la posición inicial de la cresta de una estriación de  $-14^\circ$  y la línea segmentada se mueve alineada con la cresta de una estriación de  $21^\circ$ . El contorno representa una isolínea de  $0.1 \text{ cm}$  de un remolino anticiclónico. Se observa que las estriaciones de  $21^\circ$  poseen una propagación meridional hacia el ecuador, mientras que las de  $-14^\circ$  se mueven hacia el polo.

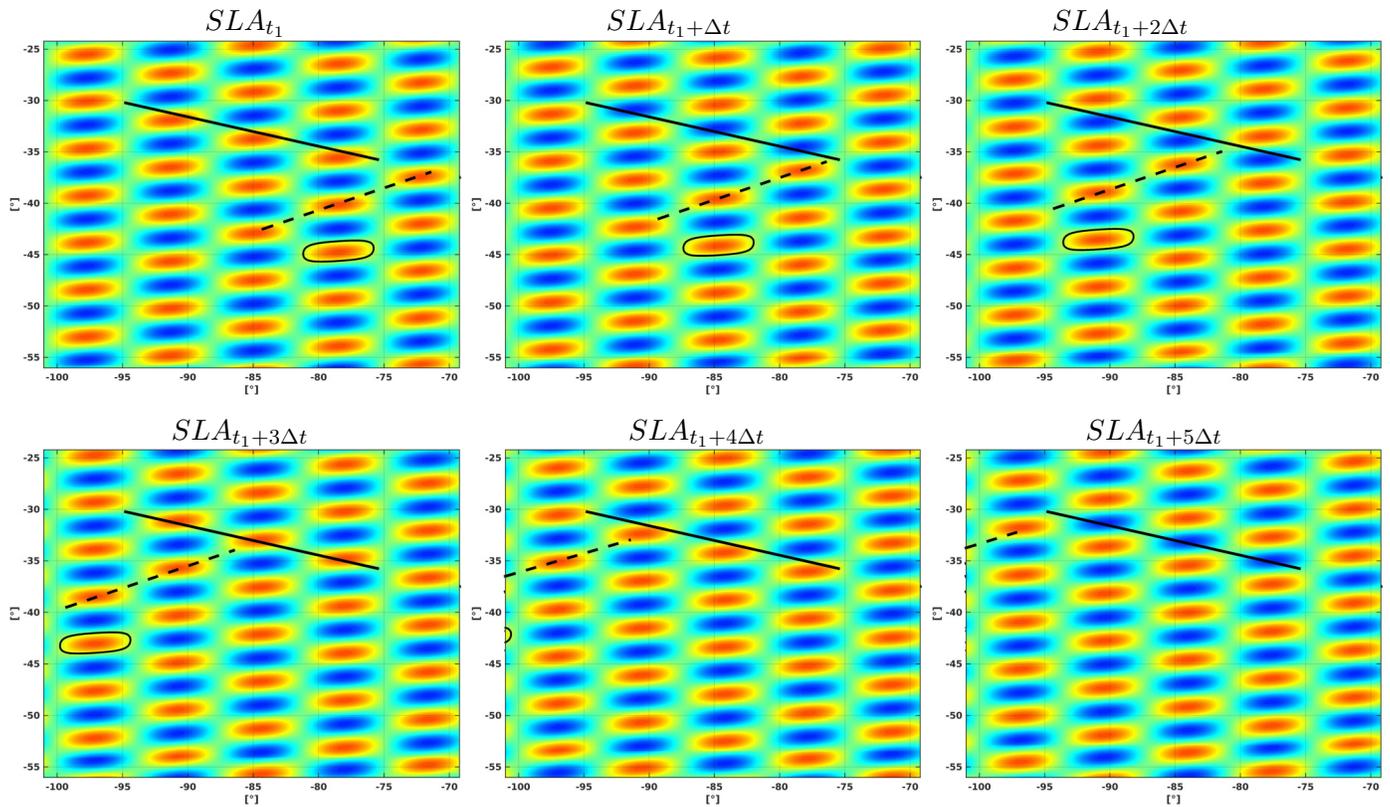


Figura 4.12: Propagación del campo idealizado reconstruido de SLA de AVISO. Colores rojos (azules) indican anomalías positivas (negativas). El desplazamiento del campo es hacia el Oeste con una velocidad de  $3 \text{ cm s}^{-1}$  y hacia el ecuador con una velocidad de  $0,26 \text{ cm s}^{-1}$ , a modo de emular la propagación promedio real del campo de remolinos.  $\Delta t = 38$  semanas y en total abarca un período de  $\sim 4$  años. La línea continua marca una posición fija donde inicialmente se ubica una cresta (inclinación noroeste-sureste,  $-14^\circ$ ), la línea segmentada se mueve con una cresta (inclinación noreste-suroeste,  $21^\circ$ ) hacia el noroeste y la curva cerrada muestra un contorno de  $0.1 \text{ cm}$  de un remolino anticiclónico. Valores de abscisa y ordenada no corresponden a la ubicación geográfica exacta.

Para comprender porqué las estriaciones de  $21^\circ$  no son visibles en el espectro de promedios anuales, se promedia el campo idealizado móvil de AVISO aumentando progresivamente el período sobre el cual se calcula la media (Fig. 4.13). Aquí el período aumenta desde  $t_1 = 65$  días hasta 365 días con un incremento  $\Delta t = 60$  días. Se observa que gradualmente las estriaciones de  $21^\circ$  van desapareciendo hasta que en un período de 1 año éstas prácticamente ya no son visibles. Al promediar una anomalía positiva (negativa), que se propaga hacia el noroeste, ésta deja valores positivos (negativos) a su paso, los que son reforzados por las demás anomalías de su mismo signo que se propagan por la estriación de  $-14^\circ$  también hacia el noroeste. De éste modo, se generan bandas prácticamente uniformes en su extensión casi-zonal, como se ve en el último panel de la Fig. 4.13. Al generarse esta uniformidad a lo largo de las estriaciones de  $-14^\circ$  las de  $21^\circ$  desaparecen.

Se observa que el espectro de 2 dimensiones del promedio anual para el campo idealizado (Fig. 4.14.b) es similar al de la Fig. 4.9, con un  $k_x \approx \pm 0,37 \text{ rad}/^\circ$ ,  $k_y \approx \pm 1,35 \text{ rad}/^\circ$  ( $\lambda_x \approx 17^\circ$ ,  $\lambda_y \approx 5^\circ$ ) y una inclinación de  $\sim -15^\circ$ .

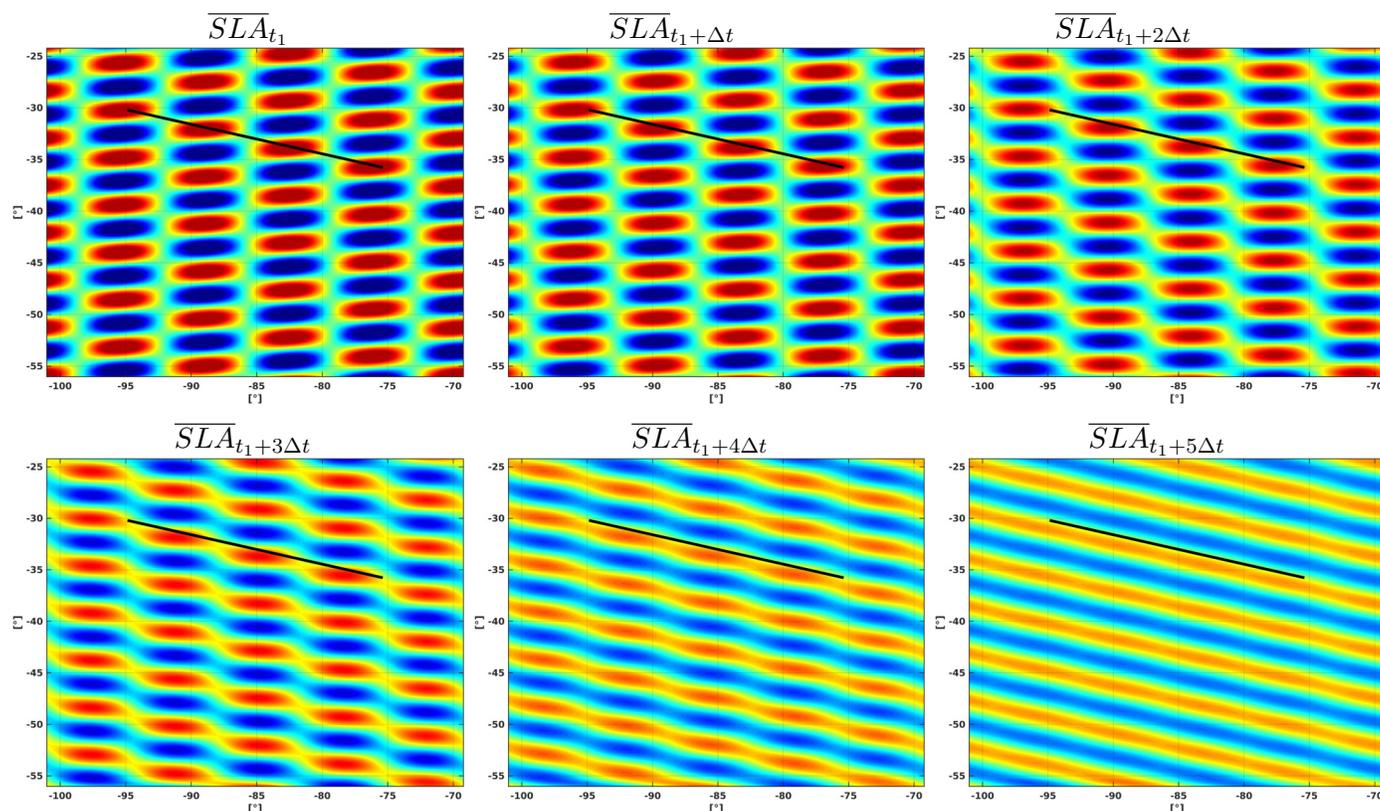


Figura 4.13: Promedios temporales del campo idealizado de SLA de AVISO con propagación hacia el noroeste (Fig. 4.12). Período sobre el que se promedia aumenta desde  $t_1 = 65$  días hasta 365 días con un incremento  $\Delta t = 60$  días. Colores rojos (azules) indican anomalías positivas (negativas). La línea continua marca una posición fija donde inicialmente se ubica una cresta (inclinación noroeste-sureste,  $-14^\circ$ ). Valores de la abscisa y ordenada no corresponden a la ubicación geográfica exacta.

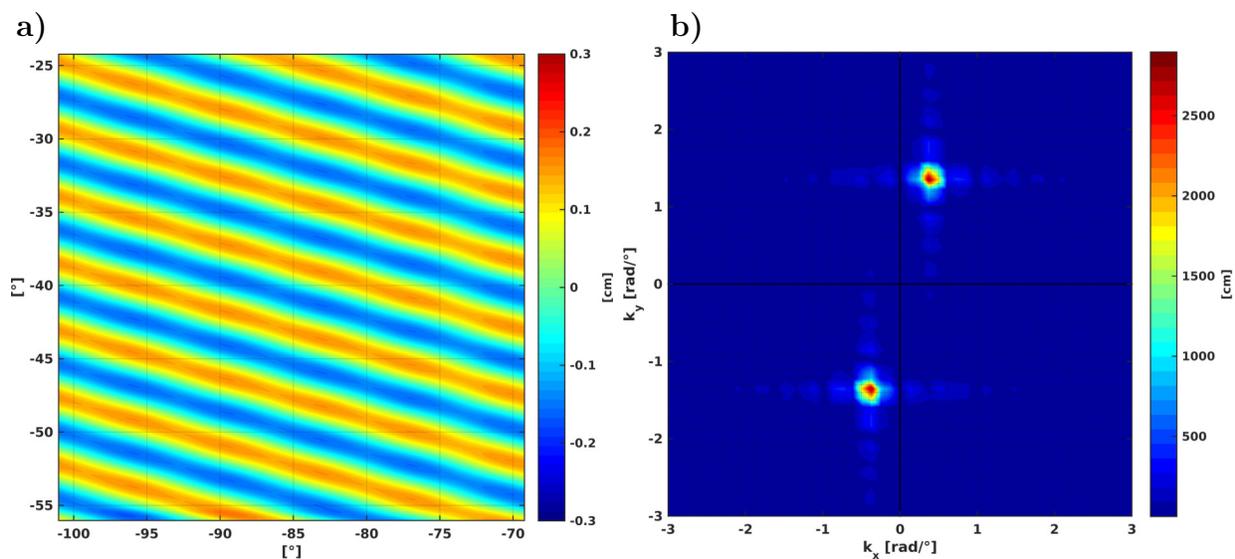


Figura 4.14: a) Promedio temporal sobre un período de 1 año de campos idealizados de AVISO con propagación hacia el noroeste (Fig. 4.12) (mismo del último panel de Fig. 4.13) y b) su espectro de Fourier en 2 dimensiones. Valores de la abscisa y ordenada en a) no corresponden a la ubicación geográfica exacta.

## 4.3. Estriaciones estacionarias

### 4.3.1. Polaridad y polaridad de generación interior

Se observa que existen bandas de polaridad de remolinos para AVISO y ROMS (Fig. 4.15.a y 4.17.a). Éstas son mucho más marcadas en ROMS y con tendencia a poseer mayor polaridad anticiclónica en el sur y ciclónica en el norte, al igual que lo presentado por Chaigneau et al. (2009) (Fig. 1.6). De manera similar existen bandas de polaridad de generación para AVISO y ROMS (Fig. 4.15.b y 4.17.b) con mayor generación de anticiclónicos en el norte y de ciclónicos en el sur. Esta relación inversa entre mapas de polaridad se explica por el hecho de que las zonas más polarizadas en generación son al mismo tiempo zonas en donde se generan menos remolinos (Fig. 3.5), teniendo menor peso ante la generación costera que es por lejos la más relevante.

Utilizando los ángulos obtenidos mediante los espectros se calculan perfiles para los campos promedios de AVISO y ROMS. En las Fig. 4.16.a y 4.18.a se muestran las regiones utilizadas para AVISO y ROMS con una inclinación de  $-5^\circ$  para AVISO y  $-8^\circ$  para ROMS. Se comparan 3 perfiles: MDOT o SSH promedio (estriaciones estacionarias), polaridad de remolinos y polaridad de generación de remolinos, todos filtrados espacialmente. Para AVISO entre el MDOT y la polaridad (MDOT-P) se observa una buena correspondencia en la zona Oeste (Fig. 4.16.b) con una correlación de 0.51 (ver tabla 4.2). Lo mismo ocurre entre la polaridad y polaridad de generación (P-PG) con una correlación de 0.53. Sin embargo la correlación entre MDOT y polaridad de generación (MDOT-PG) es de 0.05, mejorando a 0.1 con un lag de  $0.25^\circ$ . A pesar de ésto último, al norte de  $35^\circ\text{S}$  (Fig. 4.16.b) se observa una buena correspondencia entre las 3 curvas con correlaciones de 0.9 para MDOT-P, 0.5 para MDOT-PG y 0.7 para P-PG.

En la sección Este (Fig. 4.16.c) se observa una buena correspondencia entre MDOT-P (correlación de 0.52), sin embargo MDOT-PG presenta una correlación de 0.2 subiendo a 0.42 con un lag de  $0.75^\circ$ . Lo mismo ocurre entre P-PG con una correlación de 0.14 que aumenta a 0.3 con un lag de  $0.5^\circ$ .

SSH-P y P-PG de ROMS en la región Oeste (Fig. 4.18.b) muestran una buena coincidencia con correlaciones de 0.74 y 0.6, respectivamente (ver tabla 4.3). Sin embargo SSH-PG muestra correlaciones más bajas, de  $\sim 0.3$  que no aumentan significativamente con lag. No obstante, si se considera sólo la zona al sur de los  $31^\circ\text{S}$ , la correlación de SSH-PG aumenta a 0.5, con las otras 2 también aumentando, probablemente relacionado a la presencia del FST. Para la sección Este, si bien se observa una buena correlación, de 0.7, en SSH-P, no ocurre lo mismo con la polaridad de generación que tiene correlaciones de 0.2 para SSH-PG y 0.3 para P-PG, sin aumentar significativamente con los lags.

Tanto en ROMS como en AVISO se observa una correspondencia entre polaridad de remolinos y MDOT y SSH promedio filtradas, estos resultados son contrarios a lo expuesto por Maximenko et al., 2013, en donde existe una correlación inversa de remolinos y estriaciones estacionarias. Lo obtenido aquí sugiere dos posibilidades: que el patrón de estriaciones se debe, al menos en parte, a la presencia

de caminos preferidos de remolinos o que las estriaciones estacionarias encaminan a los remolinos a desplazarse por ciertas trayectorias, éstos 2 mecanismos no siendo excluyentes el uno del otro. Del mismo modo también se observa generación de remolinos a lo largo de las estriaciones lo que podría indicar la existencia de un mecanismo de retroalimentación que refuerce al campo de éstos. Sin embargo esto se ve restringido principalmente a la sección Oeste en AVISO y ROMS (zona del FST).

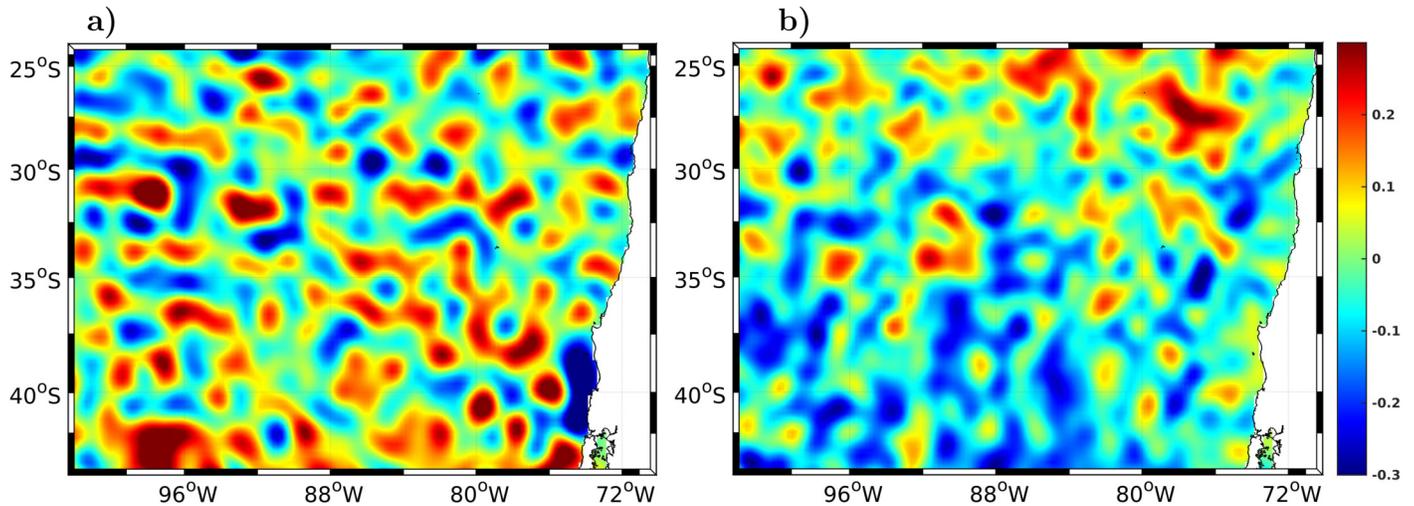


Figura 4.15: Mapas de a) polaridad y b) polaridad de generación de remolinos para AVISO.

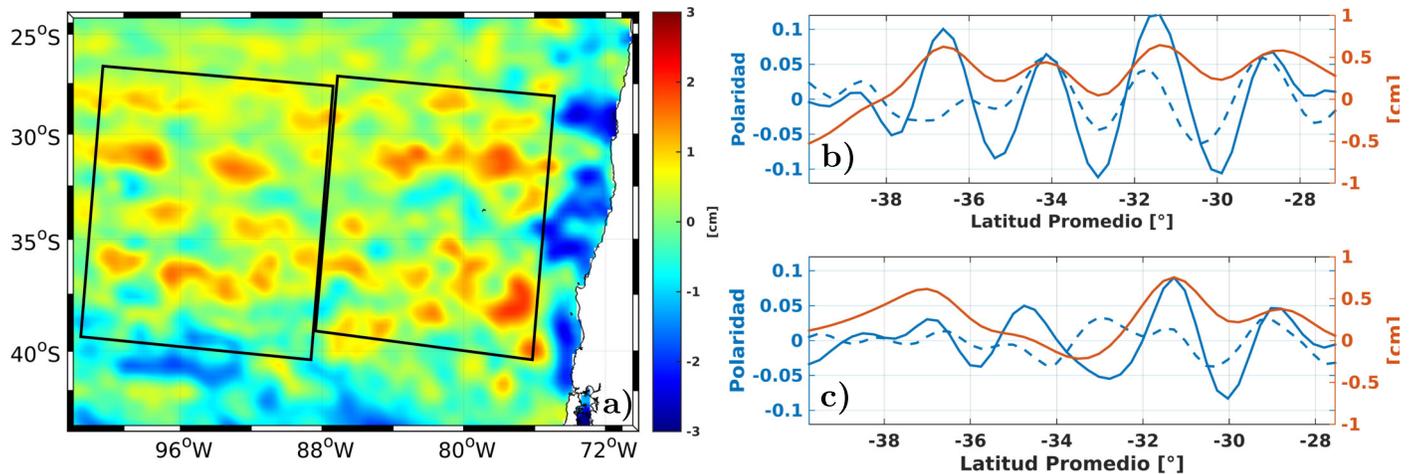


Figura 4.16: AVISO: a) Regiones utilizadas para calcular perfiles casi-meridionales, b) perfiles Oeste y c) perfiles Este de MDOT filtrado (rojo), polaridad (azul continua) y polaridad de generación (azul segmentada).

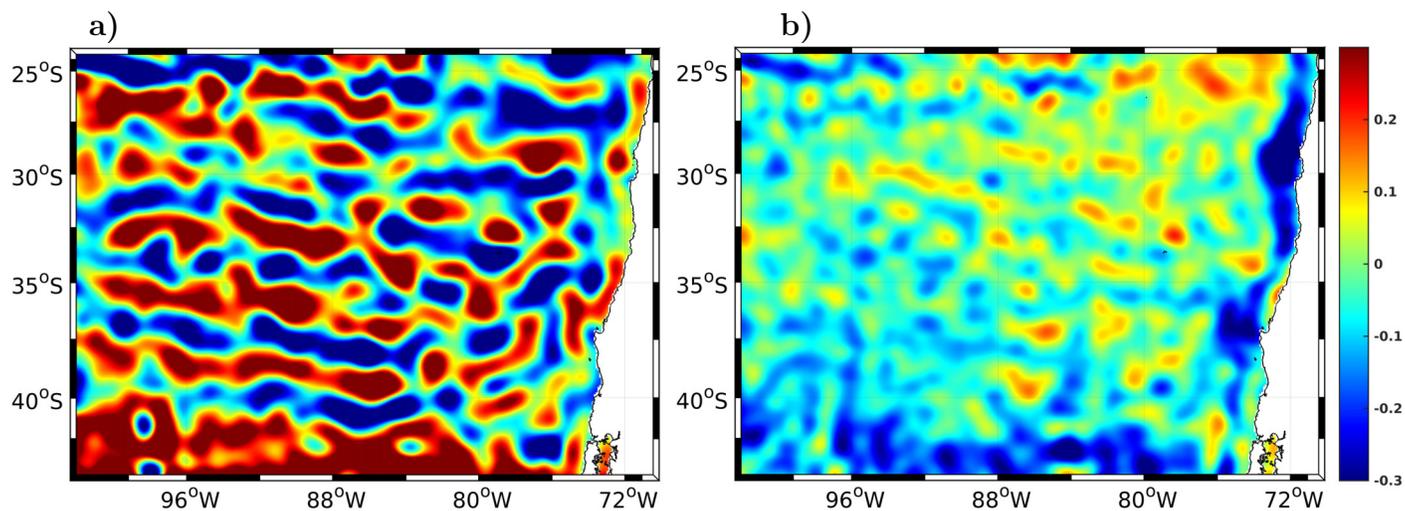


Figura 4.17: Mapas de a) polaridad y b) polaridad de generación de remolinos para ROMS.

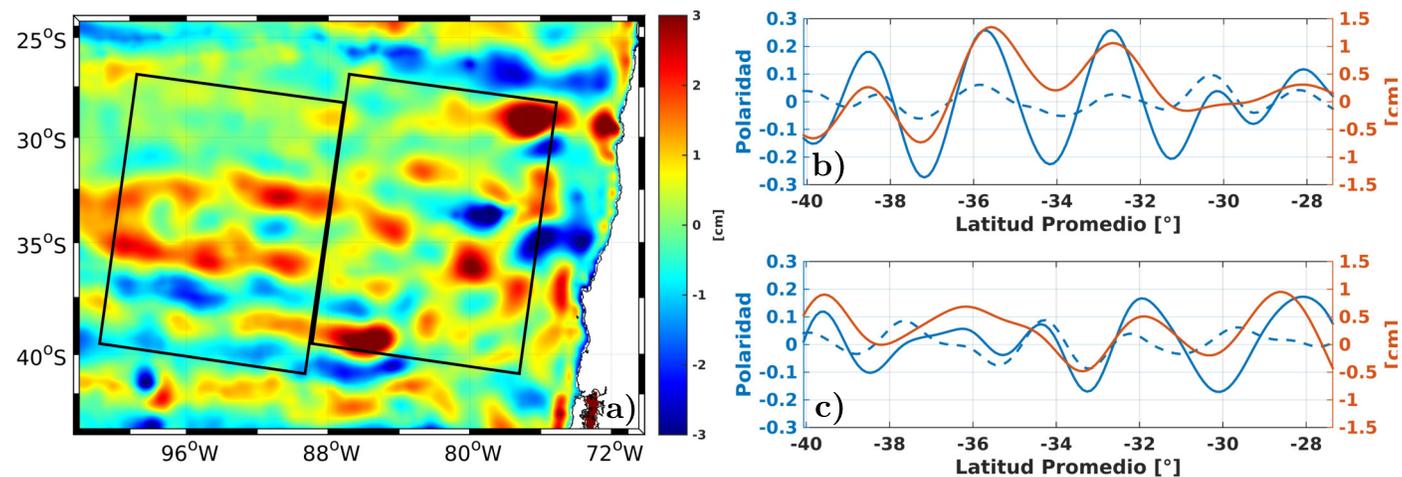


Figura 4.18: ROMS: a) Regiones utilizadas para calcular perfiles casi-meridionales, b) perfiles Oeste y c) perfiles Este de SSH promedio filtrado (rojo), polaridad (azul continua) y polaridad de generación (azul segmentada).

	Oeste			Este		
	Correlación	Corr. Cruzada	Lag	Correlación	Corr. Cruzada	Lag
MDOT-P	0.51	0.51	0 °	0.52	0.52	0 °
MDOT-PG	0.05	0.10	0.25 °	0.20	0.42	0.75 °
P-PG	0.53	0.53	0 °	0.14	0.30	0.5 °

Tabla 4.2: Correlaciones y correlaciones cruzadas máximas con sus respectivos lags en AVISO entre perfiles de MDOT y polaridad (MDOT-P), MDOT y polaridad de generación (MDOT-PG), y entre perfiles de polaridad y polaridad de generación (P-PG). Lags positivos (negativos) indican un desplazamiento hacia el norte (sur) de P en MDOT-P, PG en MDOT-PG y PG en P-PG.

	Oeste			Este		
	Correlación	Corr. Cruzada	Lag	Correlación	Corr. Cruzada	Lag
SSH-P	0.74	0.80	0.1 °	0.70	0.73	-0.2 °
SSH-PG	0.26	0.27	0.1 °	0.20	0.30	0.4 °
P-PG	0.60	0.60	0 °	0.30	0.33	0.2 °

Tabla 4.3: Correlaciones y correlaciones cruzadas máximas con sus respectivos lags en ROMS entre perfiles de SSH promedio y polaridad (SSH-P), SSH promedio y polaridad de generación (SSH-PG), y entre perfiles de polaridad y polaridad de generación (P-PG). Lags positivos (negativos) indican un desplazamiento hacia el norte (sur) de P en SSH-P, PG en SSH-PG y PG en P-PG.

## 4.4. Estriaciones transientes

A los diagramas Hovmöller de esta sección no se les ha aplicado ninguna ventana móvil para promediar en el tiempo, exceptuando donde se menciona explícitamente. Las regiones Este y Oeste que se definieron para calcular los diagramas para AVISO y ROMS se muestran en la Fig. 4.19.

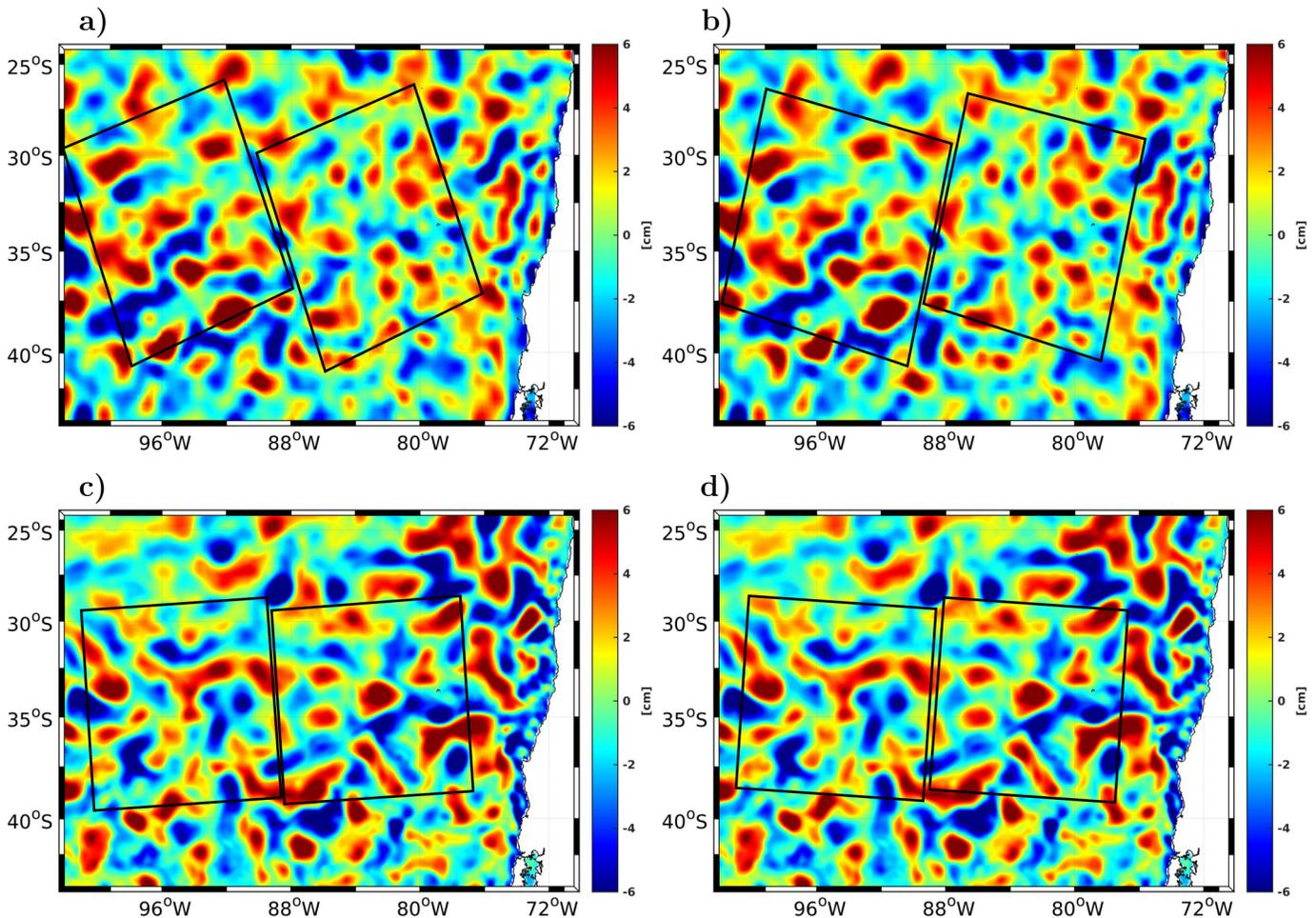


Figura 4.19: Regiones Este y Oeste utilizadas para calcular diagramas Hovmöllers para a) AVISO  $21^\circ$ , b) AVISO  $-14^\circ$  sobre campo de SLA del día 30 de Diciembre de 2002, y c) ROMS  $4^\circ$ , d) ROMS  $-4^\circ$  sobre el campo de SLA del segundo día del año 21 de simulación.

Para los diagramas de SLA de AVISO con una inclinación de  $21^\circ$  (Fig. 4.20) se observan estriaciones transientes propagándose hacia el ecuador en ambas secciones con velocidades promedio de  $2.8^\circ \text{año}^{-1}$  para el oeste y  $1.4^\circ \text{año}^{-1}$  para el este (Fig. 4.35), similares en dirección de propagación y ángulo a lo obtenido por O. Melnichenko (comunicación personal), mientras que para los diagramas con inclinación de  $-14^\circ$  (Fig. 4.21) se observa una propagación más lenta y hacia el polo (Fig. 4.35) de  $-0.4^\circ \text{año}^{-1}$  en el oeste y  $-0.6^\circ \text{año}^{-1}$  en el este. Esto es consistente con lo presentado para el campo idealizado. Las estriaciones de  $21^\circ$  poseen un menor período que las de  $-14^\circ$  producto de que sus velocidades son mayores.

Para ambos ángulos se aprecia una mayor energía en la mitad sur de los diagramas oeste en la zona del FST y en la mitad norte de los diagramas este en la zona de la ZTC (Fig. 4.24.a), aunque menos pronunciado para la zona este de  $21^\circ$ . El hecho de que para las estriaciones de  $-14^\circ$  exista una propagación hacia el polo se contrapone con los resultados de la Fig.1.3.b, sin embargo los resultados no son completamente comparables ya que en la Fig.1.3.b se utilizan promedios totalmente zonales.

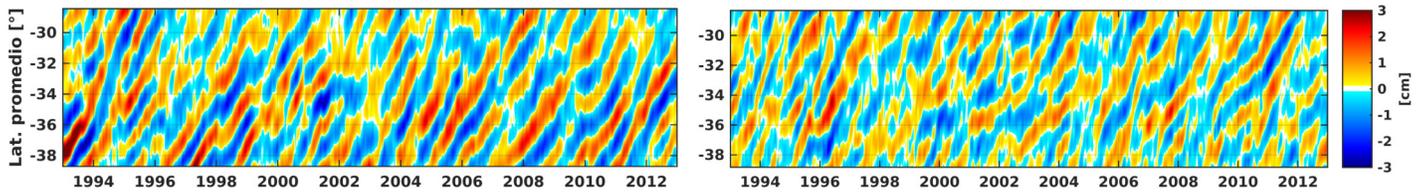


Figura 4.20: Diagramas Hovmöller de SLA AVISO filtrada para secciones Oeste (izq.) y Este (der.) con una inclinación de  $21^\circ$

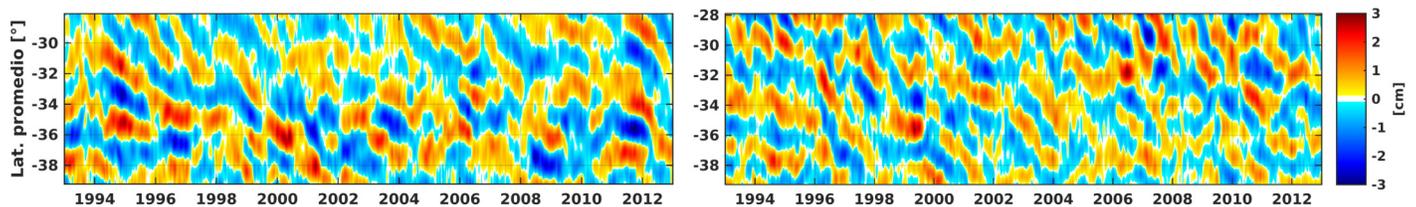


Figura 4.21: Diagramas Hovmöller de SLA AVISO filtrada para secciones Oeste (izq.) y Este (der.) con una inclinación de  $-14^\circ$

Para ROMS se observa que las estriaciones transientes para una inclinación de  $4^\circ$  (Fig. 4.22) se propagan hacia el ecuador en ambas secciones, sin embargo, a diferencia de las de AVISO, presentan una velocidad considerablemente menor, de  $0.4^\circ \text{año}^{-1}$  en el oeste y  $0.6^\circ \text{año}^{-1}$  en el este (Fig. 4.36). En cuanto a las estriaciones de baja frecuencia para  $-4^\circ$  (Fig. 4.23) éstas no tienen una propagación constante en el tiempo: si bien en algunos períodos se desplazan hacia el polo en otros también se mueven hacia el ecuador e incluso quedan estacionarias, y la magnitud de su velocidad es un poco menor a las de  $4^\circ$ . Al igual que para AVISO, se observa mayor energía en la parte sur de los diagramas oeste (FST) y en la mitad norte de los diagramas este (ZTC) (Fig. 4.24.b), con la diferencia de que en ROMS el nivel de energía entre este y oeste es similar. Aquí además se observa que la sobreestimación de la amplitud para ciclónicos en ROMS (Fig. 4.3) no genera una exageración de la energía de las estriaciones en la ZTC.

Las estriaciones de  $-4^\circ$  no difieren significativamente de las de las de  $4^\circ$ , producto de esto, de aquí en adelante sólo se consideraran las de  $4^\circ$  en ROMS.

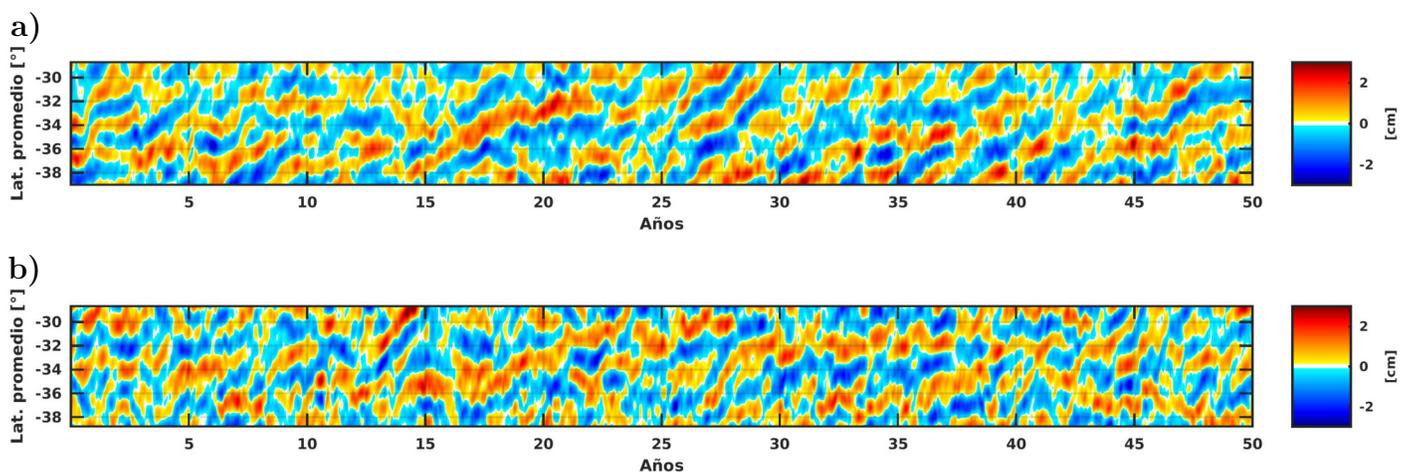


Figura 4.22: Diagramas Hovmöller de SLA ROMS filtrada para secciones a) Oeste y b) Este con una inclinación de  $4^\circ$

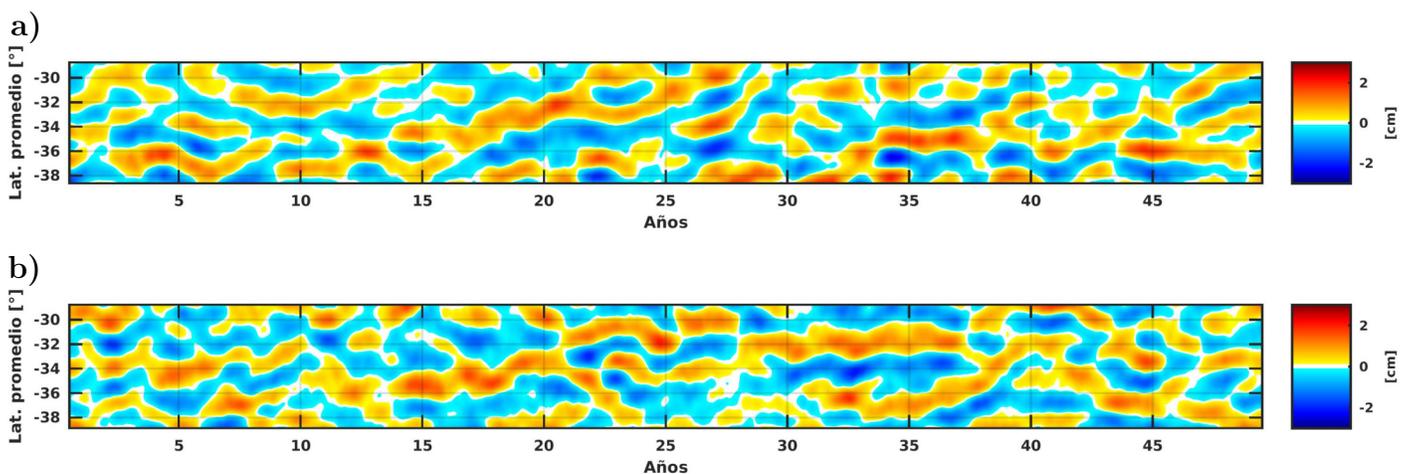


Figura 4.23: Diagramas Hovmöller de SLA ROMS filtrada para secciones a) Oeste de baja frecuencia (media móvil de 1 año), b) Este de baja frecuencia, con una inclinación de  $-4^\circ$ .

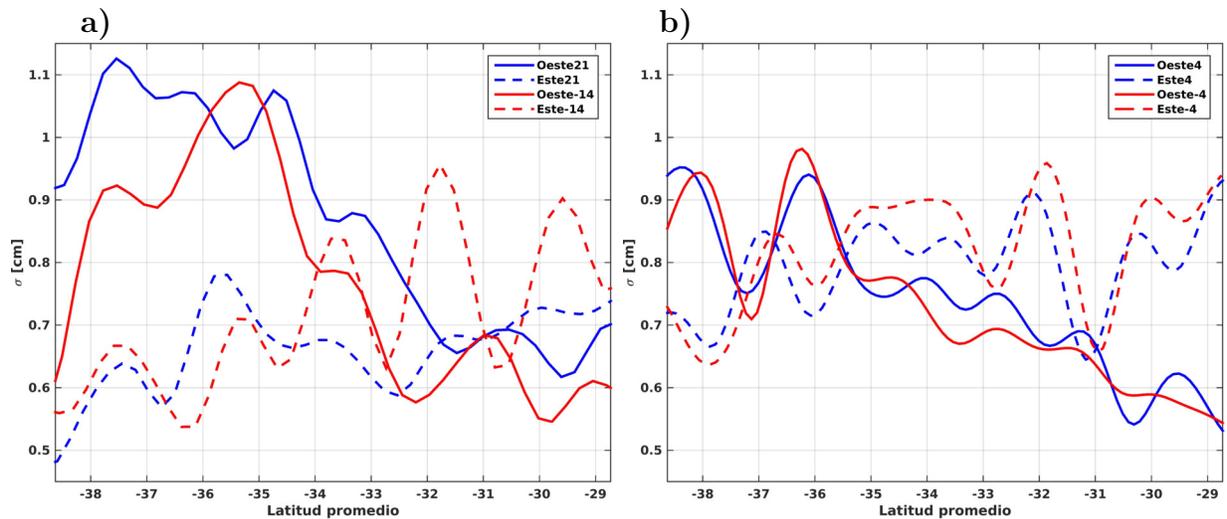


Figura 4.24: Desviación estándar por latitud promedio para diagramas Hovmöller de SLA para a) AVISO (Fig. 4.20 y 4.21) y b) ROMS (Fig. 4.22 y 4.23).

#### 4.4.1. Polaridad

AVISO y ROMS presentan una correspondencia notablemente buena entre estriaciones transientes y anomalía de polaridad de remolinos (Fig. 4.25, 4.26 y 4.27) similar a lo que ocurre en las estriaciones estacionarias. La mayor parte de los valores de correlación para ambos conjuntos de datos y secciones se encuentran sobre 0,55 y algunos alcanzan valores superiores a 0,8. Para AVISO con  $21^\circ$  se obtienen mejores correlaciones para la caja Oeste que la Este (Fig. 4.25), mientras que para  $-14^\circ$  se obtienen mejores correlaciones para la caja Este (Fig. 4.26), aunque las diferencias son mínimas. Para ROMS se observan valores más altos en la caja Este (Fig. 4.27).

Estos resultados, aparte de mostrar una clara alineación entre remolinos y estriaciones transientes, sugieren que existen 2 tipos distintos de alineaciones transientes de remolinos, al menos para AVISO, que juntos conforman el patrón espacial similar al de un tablero de ajedrez (Fig. 4.10). Por una parte se ven caminos preferidos por los remolinos con inclinación de  $-14^\circ$ , y éstos caminos se mueven hacia el polo (Fig. 4.26) con velocidades relativamente bajas ( $\sim -0.5^\circ \text{año}^{-1}$ ). Paralelamente se observa una alineación de remolinos, a medida que éstos se propagan hacia el oeste, con una inclinación de  $21^\circ$  y que se desplaza hacia el ecuador con velocidades mayores ( $1.4$  a  $2.8^\circ \text{año}^{-1}$ ). De éste modo los remolinos no sólo se moverían por caminos preferidos ( $-14^\circ$ ) sino que además se desplazarían por éstos más o menos alineados por polaridad, y con una inclinación de  $21^\circ$ . Para ROMS en cambio, sólo se observan caminos preferidos por los remolinos, con una inclinación de  $4^\circ$ , que a diferencia de los de AVISO se propagan hacia el ecuador con una velocidad similar en magnitud a la de AVISO ( $\sim 0.5^\circ \text{año}^{-1}$ ).

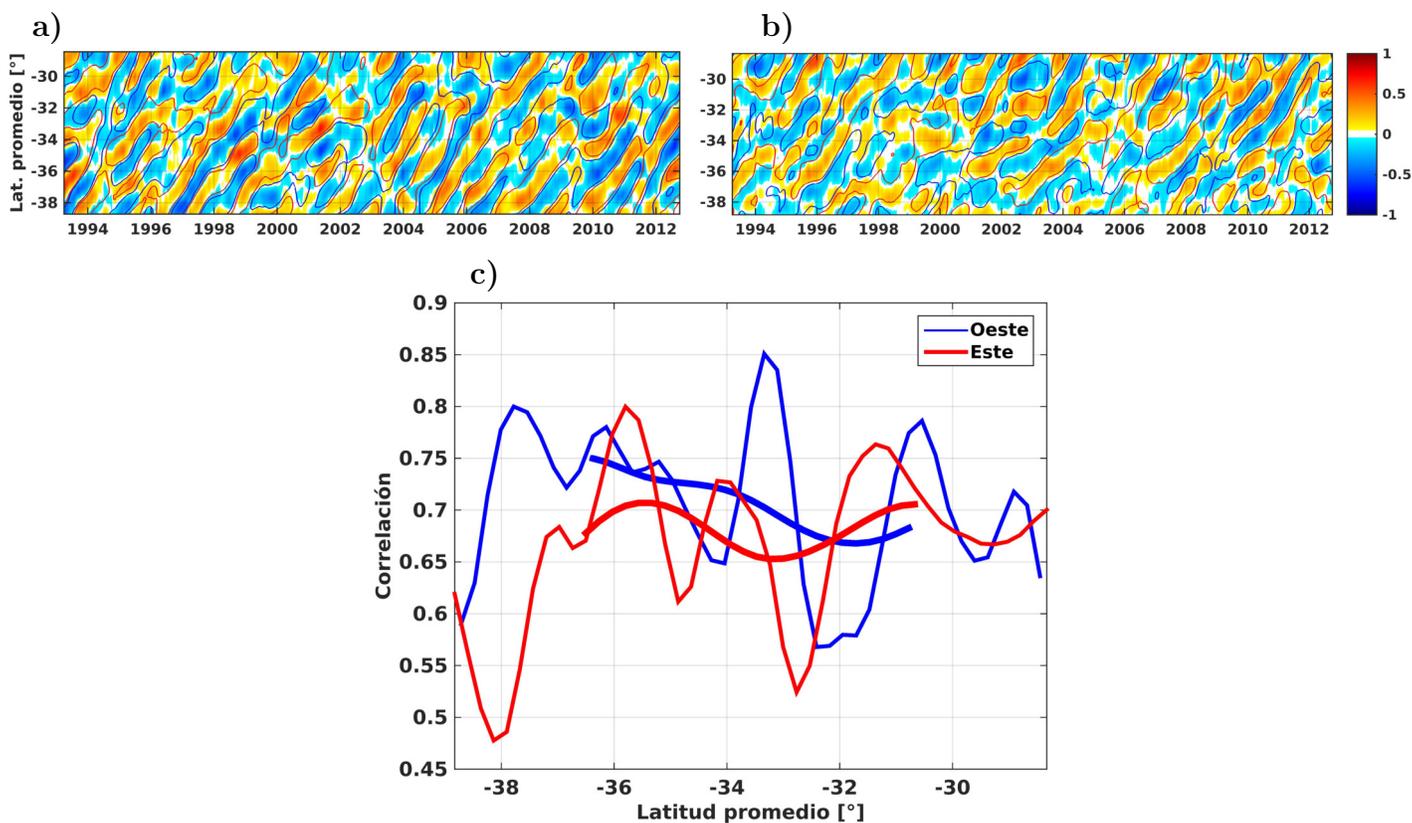


Figura 4.25: Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de remolinos AVISO (en colores) comparado con SLA AVISO filtrada (en contornos) con ventana móvil de 181 días para regiones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $21^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación.

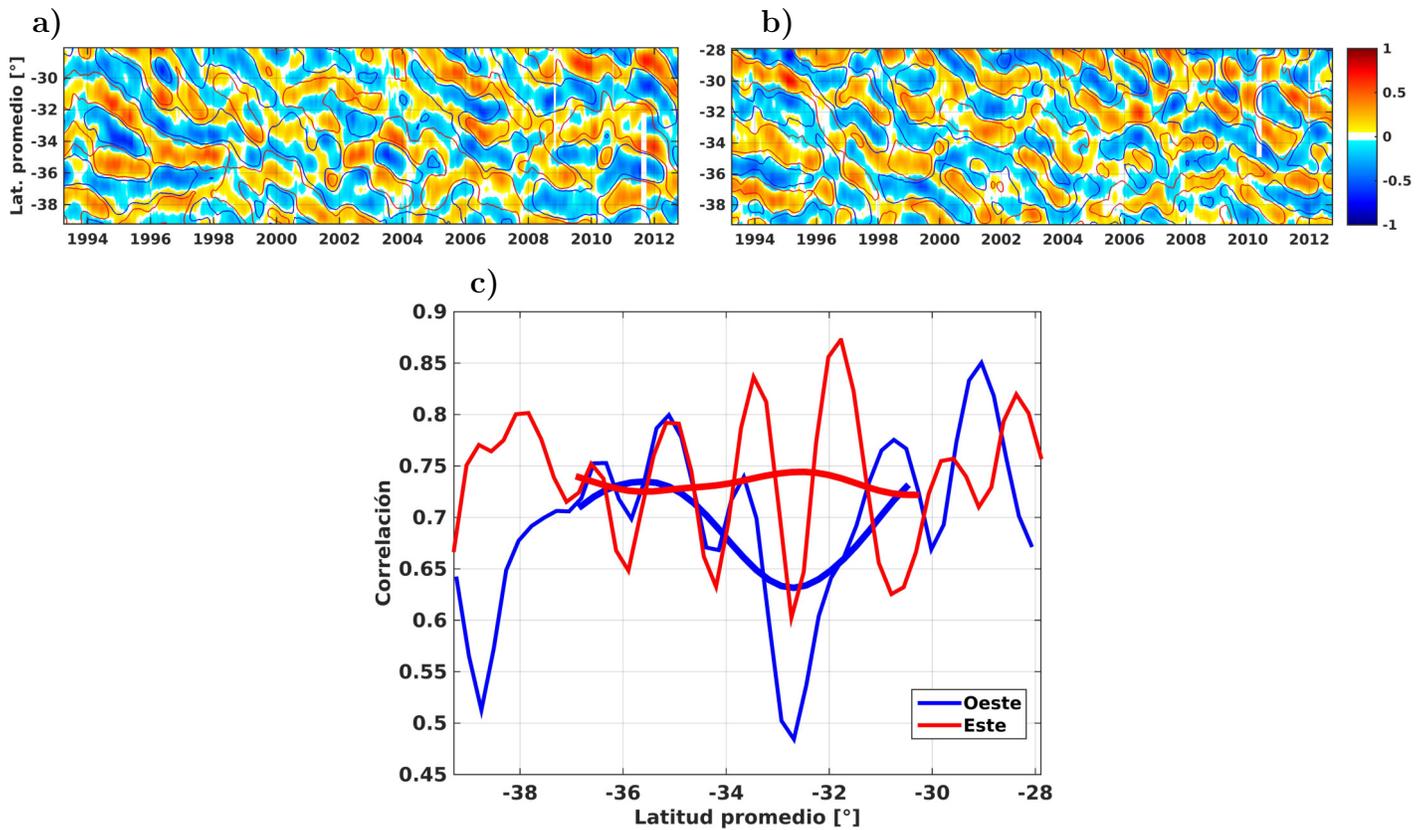


Figura 4.26: Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de remolinos AVISO (en colores) comparado con SLA AVISO filtrada (en contornos) con ventana móvil de 181 días para regiones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $-14^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación.

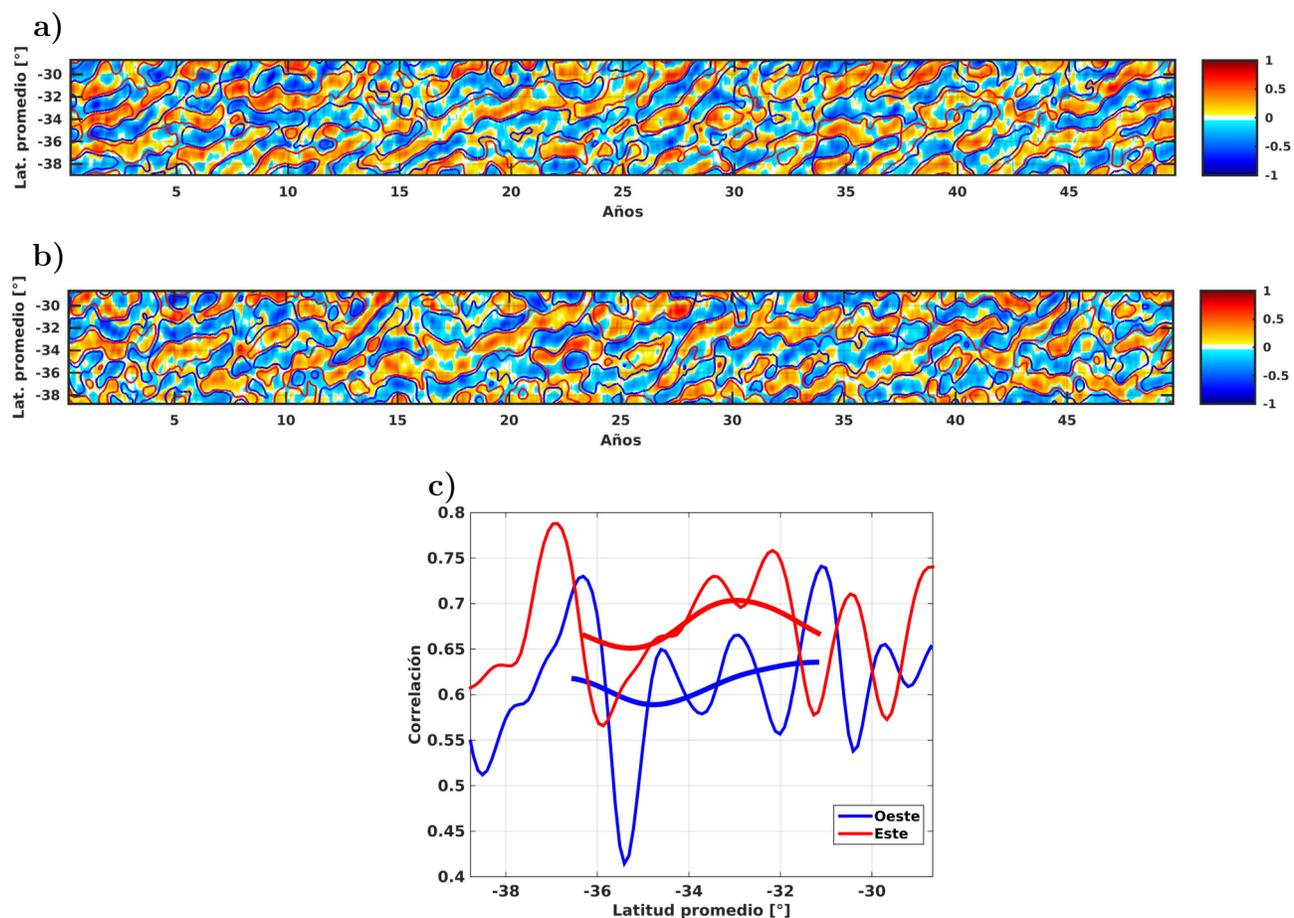


Figura 4.27: Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de remolinos ROMS (en colores) comparado con SLA ROMS filtrada (en contornos) con ventana móvil de 181 días para regiones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $4^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación.

#### 4.4.2. Polaridad de generación interior

A diferencia de lo observado en cierta medida en las estriaciones estacionarias, en términos generales no hay correspondencia entre estriaciones transientes y anomalías de polaridad de generación oceánica. En comparación a la polaridad de remolinos éstos diagramas (Fig. 4.28, Fig. 4.29 y Fig. 4.30) son más ruidosos. Aunque en algunas partes se observa una relativa coherencia entre SLA y polaridad de generación de remolinos en otras partes los patrones pueden llegar a ser perpendiculares entre sí. Para AVISO  $21^\circ$  sólo se observan valores de correlación relativamente buenos (0.2 - 0.5) en la región Oeste entre  $34$  y  $38^\circ\text{S}$  (FST, Fig. 4.28.c), mientras que para AVISO  $-14^\circ$  las correlaciones en general tienden a ser un poco mayores (0.2 - 0.5) especialmente entre  $37$  y  $34^\circ\text{S}$  (FST) para la región Oeste y  $32^\circ\text{S}$  (ZTC) para la caja Este (Fig. 4.29.c). Para ROMS  $4^\circ$  prácticamente no existe correspondencia, con valores máximos de 0.25 para la zona Oeste en  $31$  y  $33^\circ\text{S}$  (Fig. 4.30.c). Estos resultados sugieren la existencia de distintos mecanismos de interacción entre estriaciones y remolinos para las estacionarias y transientes, ya que para las primeras la correspondencia entre estriaciones y polaridad de generación es más evidente que para las segundas. En éstas últimas se logra observar, en las correlaciones, cierta correspondencia al menos para AVISO, no así para ROMS.

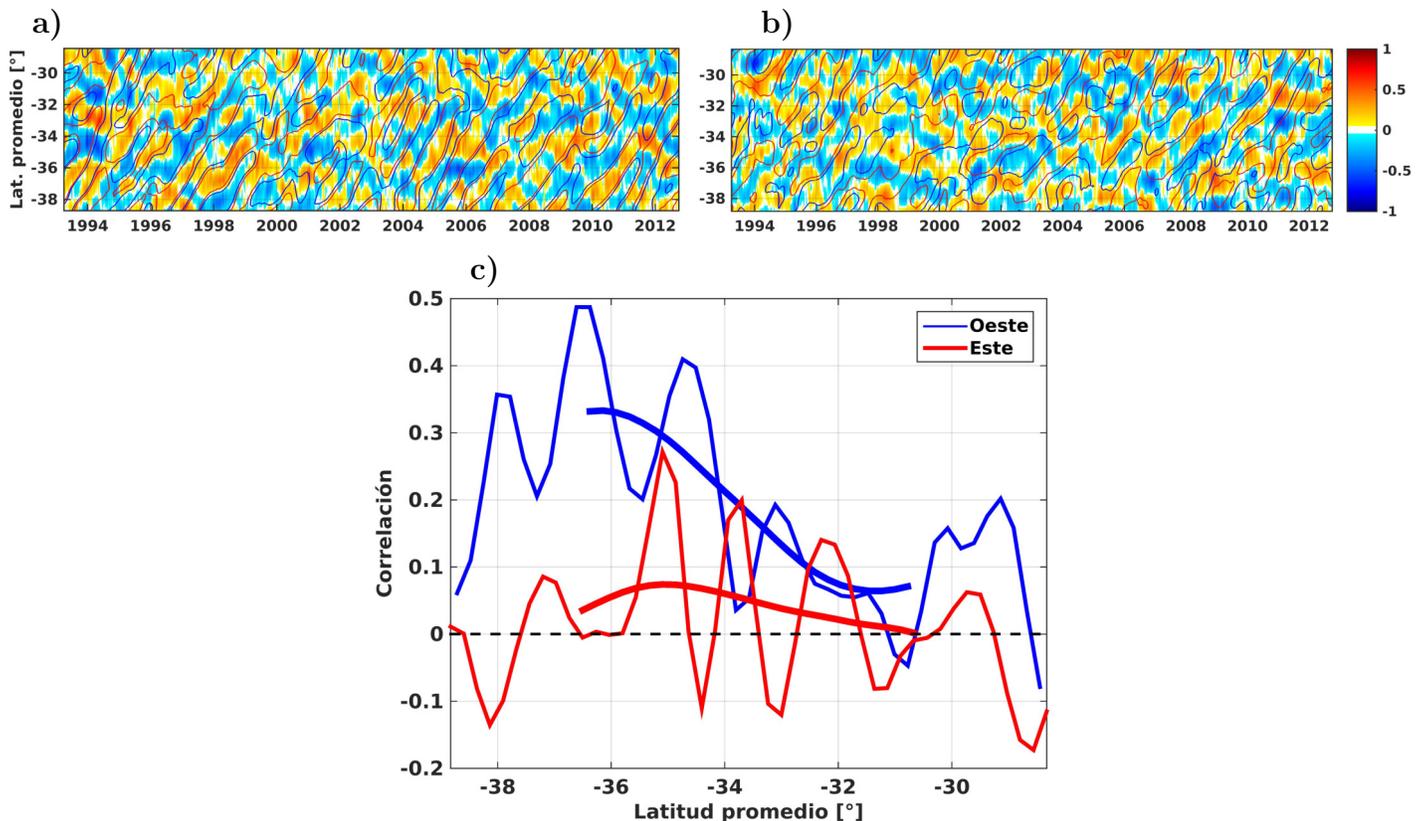


Figura 4.28: Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación de remolinos (en colores) comparado con SLA AVISO filtrado (en contornos) con ventana móvil de 181 días para secciones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $21^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y  $-0.25$  cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad de generación y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación.

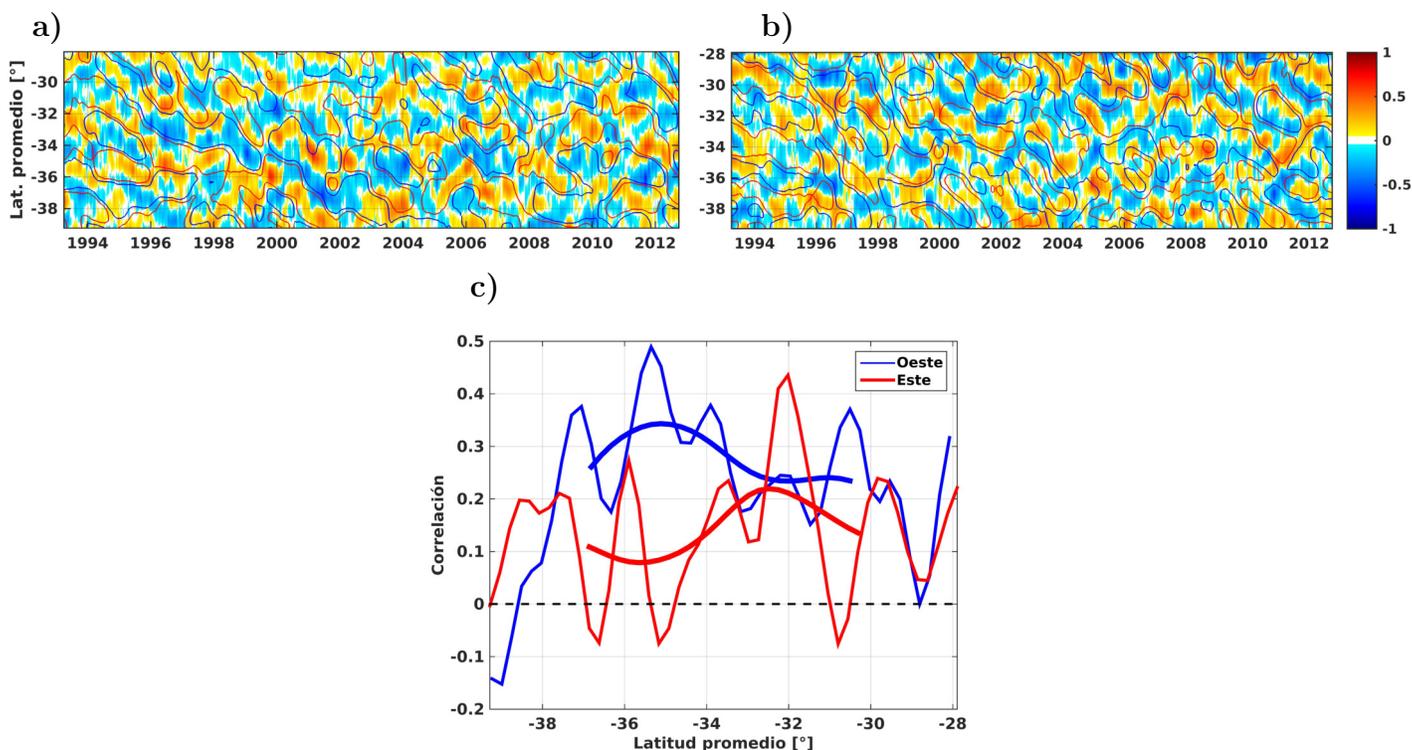


Figura 4.29: Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación de remolinos (en colores) comparado con SLA AVISO filtrado (en contornos) con ventana móvil de 181 días para secciones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $-14^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y  $-0.25$  cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad de generación y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación.

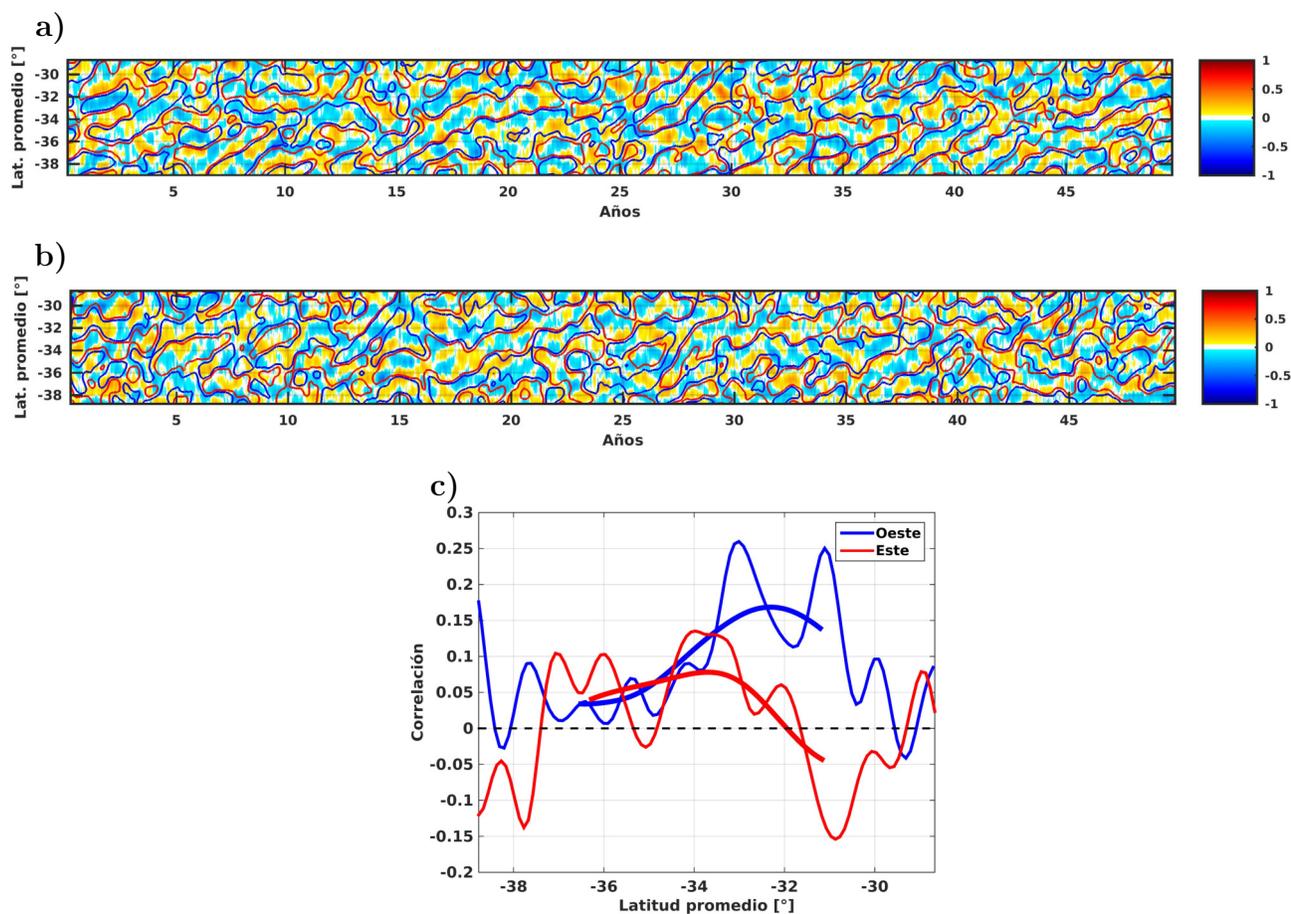


Figura 4.30: Diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación de remolinos (en colores) comparado con SLA ROMS filtrado (en contornos) con ventana móvil de 181 días para secciones a) Oeste y b) Este y con una inclinación de  $4^\circ$ . Contornos rojos y azules representan isolíneas de 0.25 y -0.25 cm, respectivamente. c) Correlación por latitud entre diagramas de polaridad de generación y SLA. Curvas gruesas muestran tendencia de la correlación.

## 4.5. Estriaciones y generación costera de remolinos

Dentro del dominio de estudio la principal fuente de generación de remolinos se ubica en la zona costera (Fig. 3.5). Dentro de ésta misma podría originarse, al menos en parte, el patrón de estriaciones si es que existieran zonas preferidas de generación por polaridad. Para AVISO y ROMS se observa que efectivamente existe una generación diferida meridionalmente de remolinos de acuerdo a su polaridad (Fig. 4.31) (e.g entre 27.5 y 30 °S en AVISO y entre 28 y 30 °S en ROMS) también visibles en la Fig. 4.32.a. Además, en ROMS existe una preferencia zonal de generación por polaridad: entre 24 y 30 °S la mayoría de los anticiclónicos se generan apegados a la costa mientras los ciclónicos más alejados de ésta. Entre 30 y 34 °S los anticiclónicos se mantienen cerca de la costa y los ciclónicos no muestran preferencia. De 34 °S hacia el polo los anticiclónicos se generan más afuera de la costa mientras que los ciclónicos principalmente cerca de la costa, pero además entre 35 y 37.5 °S existe una generación importante de éstos más lejos de la costa que los anticiclónicos. Es posible que esto no sea visible en AVISO debido al aumento del error en la costa para mediciones de altimetría. La generación costera en ROMS podría estar asociada a la Corriente Subsuperficial Perú-Chile (Hormazabal et al. 2013) presente en el talud y a la Corriente Costera Perú-Chile (Aiken et al., 2008) que se intensifica en la costa.

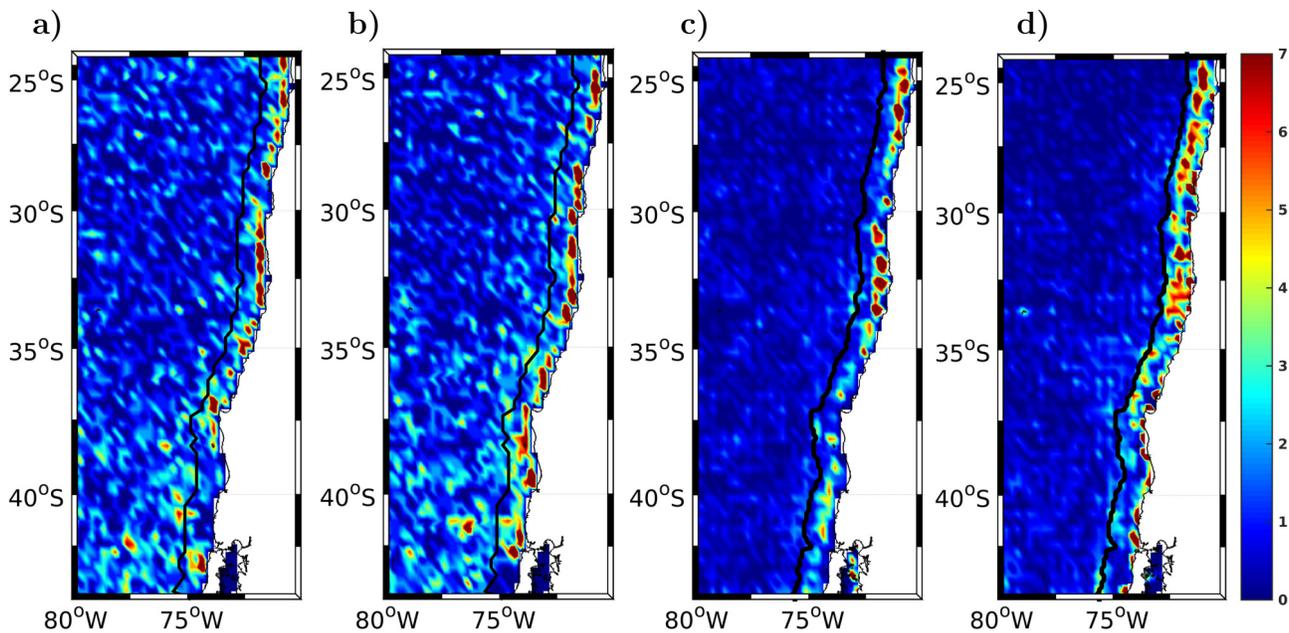


Figura 4.31: Generación costera de remolinos de AVISO a) anticiclónicos y b) ciclónicos, y de ROMS c) anticiclónicos y d) ciclónicos. La línea negra representa el límite de la banda costera utilizada para calcular los perfiles y diagramas Hovmöllers de generación costera. Sólo se consideran remolinos pertenecientes a trayectorias de mínimo 28 semanas de duración. La generación de ROMS está planteada en la misma grilla que AVISO y dividida por 2.5 para que sean comparables.

Para estudiar cómo se relacionan estas zonas preferidas de generación con las estriaciones, se comparan con los diagramas Hovmöller y perfiles de las estriaciones. A las estriaciones transientes se les compara con la anomalía de la polaridad de generación costera, mientras que a las estacionarias con la generación total en la costa.

### 4.5.1. Estriaciones estacionarias

En los perfiles de polaridad de generación costera (Fig. 4.32.a) se observa que existen lugares preferidos de generación para AVISO y ROMS. Éstos tienen locaciones distintas y se ve mayor polarización en AVISO. Tanto para AVISO como para ROMS se desfazan los perfiles de estriaciones estacionarias en las regiones Oeste y Este, ya que si su origen estuviera en la costa, éste se ubicaría en donde la prolongación de la estriación hacia el Este se encuentre con la costa. Los desfases Oeste y Este para AVISO son de  $-2.54$  y  $-1.37$  ° (se mueven hacia el polo), respectivamente, y para ROMS son de  $-3.92$  y  $-2.23$  °, Oeste y Este, respectivamente. Aunque en AVISO el patrón costero y MDOT parecen tener componentes de número de onda similares no se observa correspondencia clara entre perfiles. ROMS por otro lado tampoco muestra una coincidencia entre perfiles y además parece tener valores de número de onda más altos en la costa. AVISO presenta correlaciones de  $-0.1$  para el Oeste y de  $-0.31$  para el Este, mientras que ROMS  $0.1$  para el Oeste y  $0.22$  para el Este.

En las Fig. 4.32.d y e se pueden ver los espectros de Fourier (en una dimensión) para perfiles de MDOT en regiones Este y Oeste y para la polaridad de generación costera. La transformada se aplicó a perfiles sin filtrar. Se observan picos para ambas regiones de MDOT,  $\sim 0.4$  °<sup>-1</sup> en AVISO y  $\sim 0.3$  °<sup>-1</sup> en ROMS, equivalentes a  $\sim 2.5$  ° y  $\sim 3.3$  ° en longitud de onda, respectivamente. Los valores de longitud de onda obtenidos son similares a los de los espectros en 2 dimensiones para MDOT (Fig. 4.7). Para AVISO se observa un pico en la curva de polaridad costera, de  $\sim 0.3$  °<sup>-1</sup> equivalente a  $\sim 3.3$  °, cercano a los picos de estriaciones. Ésto no se observa para ROMS, consistentemente con lo presentado en la Fig. 4.32.c.

Estos resultados indicarían que la polaridad de generación costera tiene componentes de número de onda similares a los de las estriaciones estacionarias en AVISO, sin embargo no se observa una correspondencia espacial entre los perfiles, por lo que un origen costero no es claro. Al mismo tiempo, se descartaría el origen costero para ROMS ya que en los espectros no se observan picos asociados a estriaciones en la generación costera ni se ve una correspondencia en latitud de los perfiles.

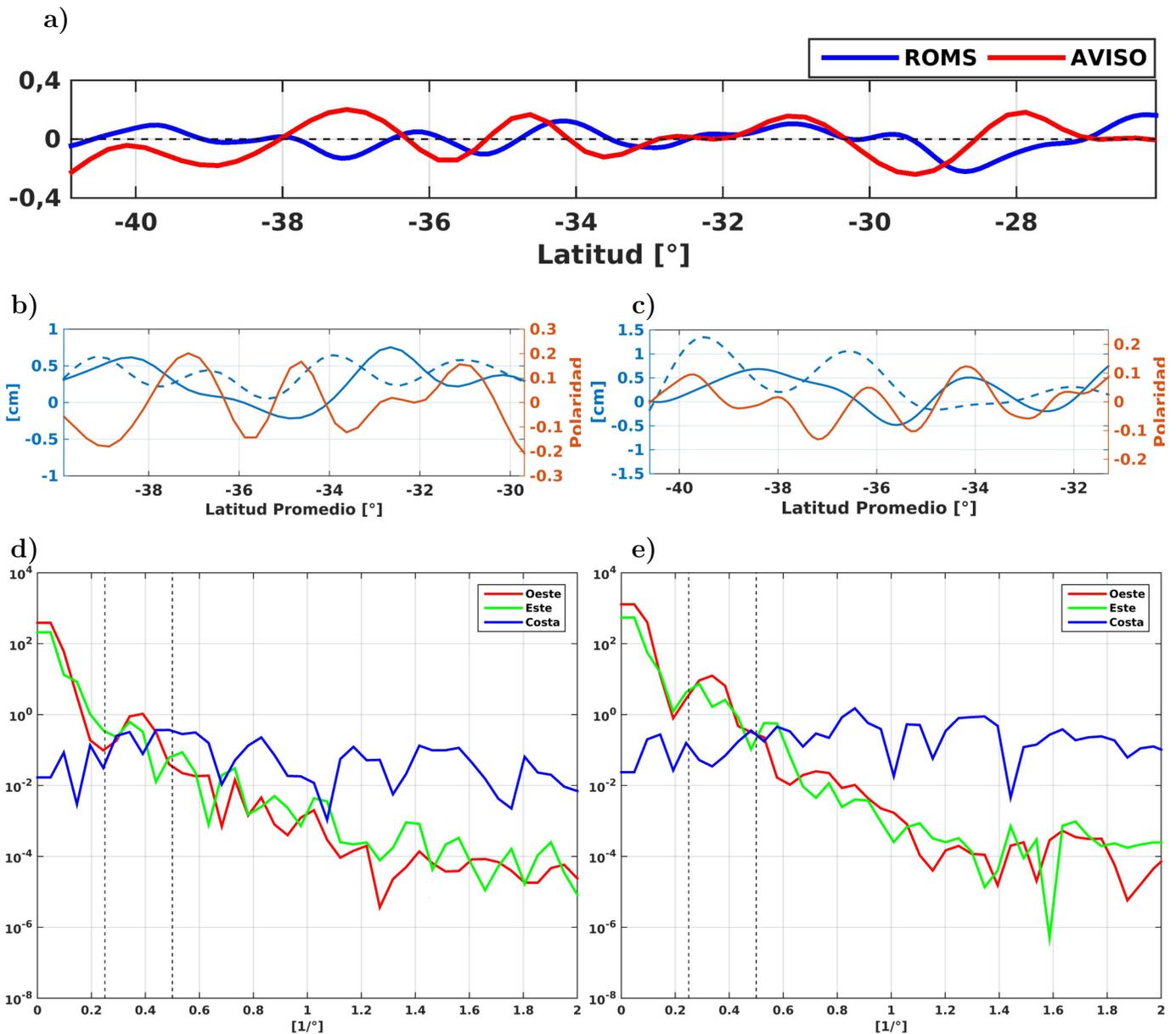


Figura 4.32: a) Perfiles meridionales de polaridad de generación costera filtrados para AVISO y ROMS. Perfiles de polaridad de generación costera filtrados (línea roja) comparados con perfiles de estricciones (MDOT o SSH promedio) en Oeste (línea azul segmentada) y Este (línea azul continua) filtrados para b) AVISO y c) ROMS. Las curvas de AVISO tienen un desfase meridional para Oeste y Este de  $-2.54$  y  $-1.37$   $^{\circ}$ , respectivamente, mientras que para ROMS son de  $-3.92$  y  $-2.23$   $^{\circ}$ , respectivamente. Espectros de perfiles de MDOT y SSH promedio y de perfil de polaridad de generación costera, en función del número de onda meridional, para d) AVISO y e) ROMS (sin filtrar). Líneas negras segmentadas indican rango aproximado correspondiente a estricciones estacionarias.

Para encontrar un nexo entre generación costera y estricciones estacionarias se compararon las componentes de longitud de onda meridionales de ambas, sin embargo, se debe tener en cuenta la cascada inversa de energía y considerar que puede haber transferencia de energía desde escalas espaciales más pequeñas a escalas más grandes, esto particularmente para los remolinos, en donde pueden existir es-

calas más chicas en la costa que en el interior debido a que éstos interactúan entre ellos al propagarse hacia el Oeste y aumentan de tamaño. Wang et al. (2012) mediante un modelo casi-geostrófico muestra estructuras más pequeñas en la costa que originan estructuras más grandes en el interior.

### 4.5.2. Estriaciones transientes

Los diagramas Hovmöller de anomalía de polaridad de generación costera son muy ruidosos tanto para AVISO como para ROMS (Fig. 4.33 y Fig. 4.34). Para AVISO, aunque no es obvio en la Fig. 4.33, se observa una propagación promedio hacia el polo de  $-0.7 \text{ }^\circ\text{año}^{-1}$  (Fig. 4.35) mediante la transformada de Radon aplicada con ventana móvil de 5 años. Para ROMS (Fig. 4.34), con anomalías más débiles, se puede ver propagación de patrones en algunos períodos, como entre el año 10 y 15 en donde se ve una zona de polaridad negativa desplazándose desde los  $\sim 36 \text{ }^\circ\text{S}$  hasta los  $\sim 32.5 \text{ }^\circ\text{S}$ , sin embargo, en general, la propagación no tiene un sentido predominante claro y posee una velocidad promedio de  $0.2 \text{ }^\circ\text{año}^{-1}$ , menor a la de AVISO.

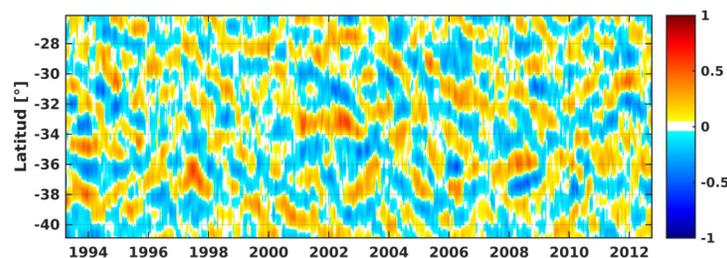


Figura 4.33: Diagrama Hovmöller de anomalía de polaridad de generación costera en AVISO.

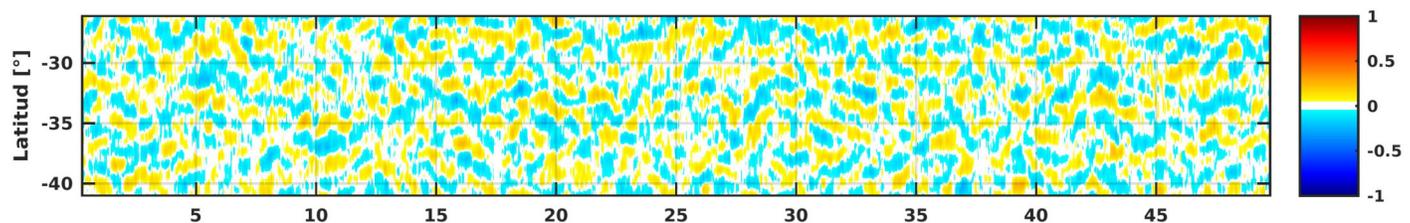


Figura 4.34: Diagrama Hovmöller de anomalía de polaridad de generación costera en ROMS.

Para AVISO (Fig. 4.35) la curva azul que define la velocidad de polaridad de generación tiene durante casi todo el período valores negativos (propagación hacia el polo), con un promedio de  $-0.7 \text{ }^\circ\text{año}^{-1}$ . La curva roja de  $21 \text{ }^\circ$  se mantiene con valores positivos (propagación hacia el ecuador) en ambas secciones y con mayores velocidades en el Oeste por sobre los  $2 \text{ }^\circ\text{año}^{-1}$ , descartando así que dichas estriaciones transientes pudieran ser producto de la generación costera. Contrapuesto es el caso de la curva negra de  $-14 \text{ }^\circ$  que en la mayor parte del período tiene velocidades hacia el polo en ambas secciones, con promedios de  $-0.4$  y  $-0.6 \text{ }^\circ\text{año}^{-1}$ , velocidades del mismo orden que la de generación costera, y por lo tanto teniendo posiblemente un origen costero.

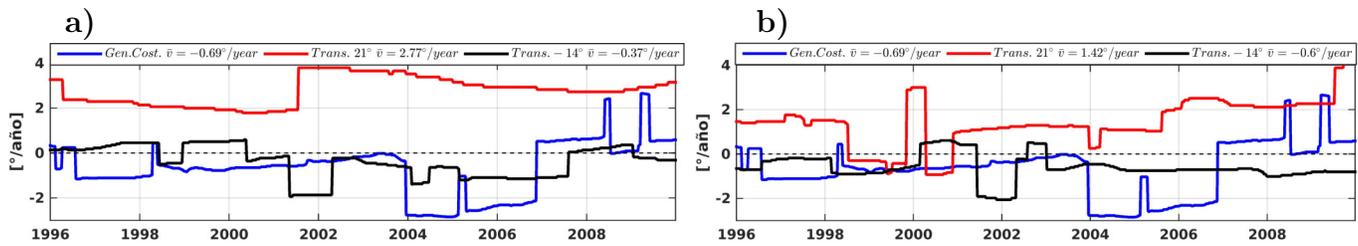


Figura 4.35: AVISO: Series de tiempo de velocidad meridional de la polaridad de generación costera (azul) y casi-meridionales de SLA filtrada (roja 21 ° y negra -14 °) para regiones a) Oeste y b) Este.

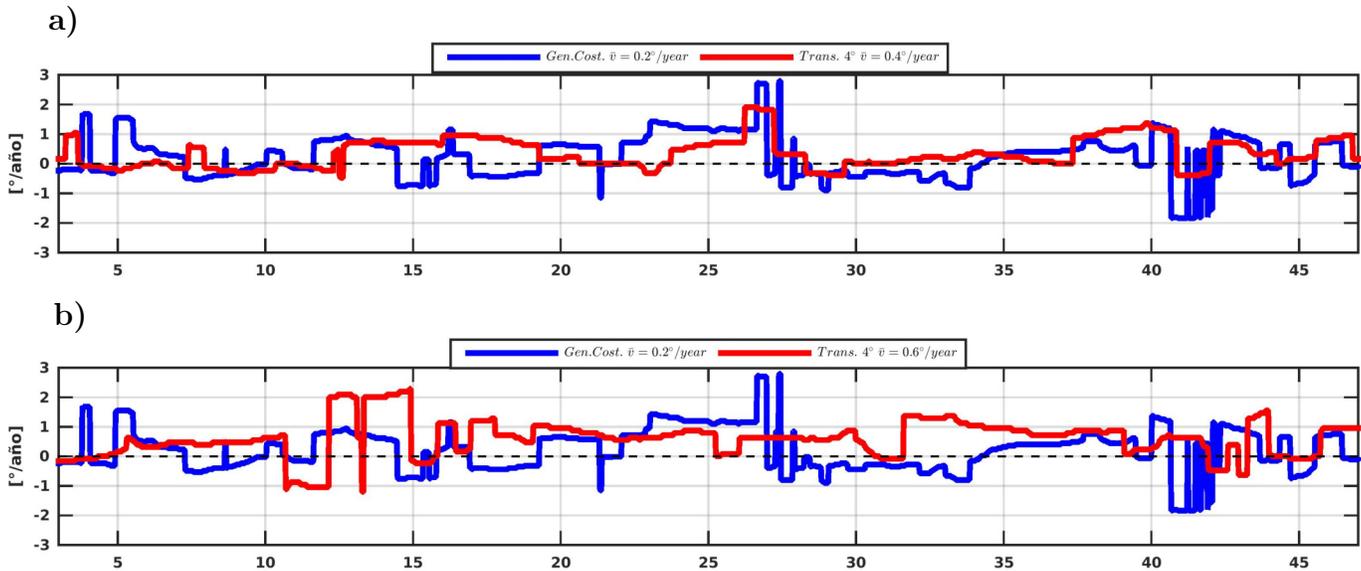


Figura 4.36: ROMS: Series de tiempo de velocidad meridional de la anomalía de polaridad de generación costera (azul) y casi-meridionales de SLA filtrada (roja 4 °) para regiones a) Oeste y b) Este.

En ROMS, como ya se mencionó, no existe una dirección predominante de propagación, el patrón de polaridad de generación oscila desplazándose hacia el ecuador y hacia el polo, lo que en general se ve bien representado por la curva azul de la Fig. 4.36. En ambas regiones de la Fig. 4.36 las curvas de velocidad de estriaciones muestran valores positivos en la mayor parte del período, y si bien el promedio de las velocidades costeras es positivo ( $0.2 \text{ }^\circ\text{año}^{-1}$ ), no existe una coincidencia clara entre curvas azul y roja ni en el este ni el oeste.

Para AVISO puede decirse que las estriaciones de baja frecuencia ( $-14^\circ$ ), independiente de la distancia a la costa podrían ser afectadas u originadas por la generación costera, mientras que ésta no parece tener ninguna influencia sobre las estriaciones de alta frecuencia ( $21^\circ$ ), las cuales tienen un posible origen oceánico, especialmente en la zona del FST. En ROMS no se observa ninguna coincidencia clara entre velocidad de estriaciones y de generación costera, descartándose un origen costero de estriaciones transientes.

Es importante destacar que si bien la transformada de Radon es una herramienta útil al momento de determinar orientación de patrones en distintos diagramas también está sujeta a un error importante,

ésto debido a que dentro de su funcionamiento al momento de definir máximos de un conjunto de valores se puede dar que existan 2 o más máximos muy cercanos en valor y en instantes de tiempo consecutivo “salte” de un máximo a otro. Es por esto que en las curvas de velocidad de propagación se ven cambios bruscos que claramente no son realistas. Ésto podría ser mejorado utilizando un criterio de modo que los valores de velocidad no varíen tan bruscamente entre tiempos consecutivos, un posible criterio a utilizar sería si el valor de velocidad obtenido en  $t_2$  es muy distinto al obtenido en  $t_1$ , el método corrija esto seleccionando un segundo máximo de varianza para  $t_2$  cuyo valor de velocidad no sea tan diferente al de  $t_1$ . Esto podría ser útil si en el futuro se desea estudiar más en detalle la relación entre generación costera y estriaciones transientes. No obstante de lo anterior, sigue siendo un método útil para estimar tasas de propagación en un período largo de tiempo poniendo, en este caso, más atención en sus tendencias de varios años que a valores instantáneos.

---

# Capítulo 5

## Conclusiones

En cuanto a los métodos utilizados, el algoritmo de detección y seguimiento muestra resultados en general robustos, tanto para AVISO como para ROMS, al mostrar características similares a los de Chelton et al. (2011). Tanto la simulación ROMS climatológica como los datos interanuales de altimetría muestran la existencia de estriaciones estacionarias y transientes en el Pacífico Sur frente a Chile. En el caso de las estacionarias, se observa que para ROMS éstas son más energéticas que las de AVISO, debido posiblemente al forzante climatológico o a la mayor resolución de la simulación. Las estriaciones en ambos conjuntos de datos decaen a una menor tasa a la propuesta por Schlax y Chelton (2008) y Buckingham et al. (2014) ( $\propto T^{-0,5}$ ) para un campo aleatorio de remolinos, sugiriendo la existencia de caminos preferidos. Se observa además que la orientación de éstas, Noroeste-Sureste, es la misma en ambos conjuntos de datos.

Para las estriaciones estacionarias de AVISO y ROMS se observa una clara correspondencia entre polaridad de remolinos y estriaciones. Sin embargo ésta es mejor en el Oeste incluyendo el Frente Sub Tropical (FST) mientras que en el Este se dá de mejor forma en torno a la Zona de Transición Costera (ZTC). En general, se puede decir que en donde los remolinos son más energéticos (FST, ZTC) tienen una mejor correspondencia con las estriaciones. Coherentemente con esto se observa que en la mitad Oeste es donde también existe una mejor correlación con la polaridad de nuevos remolinos formados en el océano interior, dando más sustento a la hipótesis de un mecanismo de retroalimentación: al existir remolinos más energéticos estos podrían contribuir a estriaciones más intensas y por ende a un mayor cizalle meridional que genere nuevos remolinos.

Pensando en un trabajo a futuro, si bien los resultados respaldan la idea de estriaciones estacionarias en la zona del Frente Subtropical sostenidas mediante nueva generación de remolinos, para que esto fuera más concluyente sería necesario cuantificar las inestabilidades baroclínicas y barotrópicas en la zona para probar si se observan bandas que coincidan con las crestas y valles de las estriaciones. Igualmente sería recomendable cuantificar qué proporción de las estriaciones estacionarias se debe a los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, similar a la metodología desarrollada por Buckingham y Cornillon (2013).

Para las estriaciones transientes se observan 2 tipos, los cuales tienen una alineación clara con la polaridad de remolinos de mesoescala. En el caso de AVISO, de acuerdo a un análisis espectral, estos 2 estarían presentes en imágenes instantáneas y juntos tendrían una forma similar a un tablero de ajedrez: por un lado, con un ángulo de  $-14^\circ$  (orientación noroeste-sureste) se verían como caminos preferidos de remolinos, que se propagan hacia el suroeste. Al mismo tiempo presentan una alineación noreste-suroeste de remolinos desplazándose hacia el noroeste, consistente con una dinámica de ondas de Rossby. Al observar las estriaciones en promedios anuales de SLA, las de  $21^\circ$  dejan de ser visibles mientras que las de  $-14^\circ$  se mantienen con una pequeña variación de su ángulo. Esto se debe a que al propagarse hacia el Oeste, las primeras se anulan mientras que las segundas se refuerzan, debido a sus correspondientes ángulos. ROMS sólo reproduce un tipo de estriación transiente con inclinación de  $4^\circ$  y propagación hacia el ecuador, sin embargo las velocidades no son del mismo orden que las de AVISO para estriaciones noreste-suroeste, sino hasta un orden de magnitud más bajas, similares a las de AVISO  $-14^\circ$ .

Schlax y Chelton (2008) sostienen que las estriaciones podrían ser un artefacto generado al promediar el paso de remolinos hacia el Oeste. No obstante, aplicaría solamente para estriaciones que tienen la misma orientación que las trayectorias de remolinos. Esto no es el caso para las estriaciones de AVISO con una inclinación de  $21^\circ$  (orientación noreste-suroeste) debido que al promediarlas en el tiempo éstas desaparecen como lo muestra el espectro de Fourier para promedios anuales. En base a eso puede decirse que se descarta que en particular éste tipo de estriaciones transientes sean artefactos. Para las estriaciones estacionarias la generación oceánica a lo largo de las mismas también descarta el mecanismo de Schlax y Chelton (2008).

En el caso de las estriaciones transientes no hay correlación clara con la polaridad de generación, con la excepción posible del FST, descartando que éste mecanismo de retroalimentación juegue un rol importante aquí.

En cuanto a la generación costera se comprueba que existen lugares preferidos de generación en la costa tanto para AVISO como para ROMS, y quitando la polaridad de generación promedio de todo el período se observan patrones de polaridad que se propagan meridionalmente. En AVISO esta propagación es hacia el sur prácticamente en todo el período y coincide aproximadamente con la velocidad de propagación de las estriaciones transientes de  $-14^\circ$ . Esto sugiere un posible origen costero para la generación de éstas. En cambio no se observa ninguna relación clara con las estriaciones de  $21^\circ$ . En ROMS se observa un desplazamiento del patrón costero cuya dirección varía en el tiempo con una velocidad promedio similar a la de las estriaciones, sin embargo no se observa una correspondencia clara con la velocidad de propagación de éstas. Para las estriaciones estacionarias en AVISO se observan lugares preferidos de polaridad en la costa que muestran longitudes de onda similares a las de MDOT pero éstos no muestran alineación meridional con las estriaciones, por lo que un origen costero no es claro. Para

ROMS no se observan correspondencias ni en ubicación ni longitud de onda entre estriaciones estacionarias y polaridad de generación costera, descartando a priori que dichas estriaciones se originen en la costa.

En términos generales, es importante destacar que las detecciones solamente se realizaron en superficie y por lo tanto en este estudio no se toman en consideración los remolinos intra-termoclina.

En resumen:

1. El primer objetivo específico (p.21) se cumple al igual que la primera hipótesis. En ROMS y AVISO existen estriaciones que al aumentar el período de tiempo en que se promedian no decaen con la tasa propuesta para un campo de remolinos aleatorio (Schlax y Chelton, 2008, Buckingham et al., 2014), por lo que éstas no serían sostenidas por un campo totalmente aleatorio, sino que son la firma de caminos preferidos de remolinos.
2. El segundo objetivo se cumple. En ambos conjuntos de datos se observan estriaciones estacionarias con orientación noroeste-sureste. En AVISO existen 2 tipos de estriaciones transientes, unas de alta frecuencia con orientación noreste-suroeste que se propagan hacia el ecuador y otras con orientación noroeste-sureste que se propagan hacia el polo. En ROMS sólo existe 1 tipo que se propaga hacia el ecuador con una orientación noreste-suroeste.
3. El tercer objetivo se cumple al igual que la segunda hipótesis. Las estriaciones en AVISO y ROMS están alineadas con bandas de remolinos polarizados, tanto en el caso estacionario como en el transiente.
4. Se cumple el cuarto objetivo y parcialmente la tercera hipótesis. Tanto en AVISO como en ROMS existe generación de nuevos remolinos en el océano abierto a lo largo de las estriaciones estacionarias, lo que sugiere un proceso de retroalimentación en donde el cizalle generado por las estriaciones generaría nuevos remolinos que contribuyen a éstas. No obstante, éste mecanismo parece no actuar de forma importante a lo largo de las estriaciones transientes en ambos grupos de datos.
5. El quinto objetivo se cumple al igual que la cuarta hipótesis planteada. Existen lugares preferidos, por polaridad, de generación en la costa, en ambos conjuntos de datos y de forma transiente y estacionaria. Las estriaciones transientes que se propagan hacia el polo en AVISO, podrían tener un origen costero mientras que las que se propagan hacia el ecuador no. Para las estacionarias no es claro. En ROMS el origen costero es descartado para las estriaciones estacionarias y transientes. Los resultados muestran que mecanismos como plumas  $\beta$  (Belmadani et al., 2013, Davis et al., 2014) o irradiación de inestabilidades de corriente de borde oriental (Hristova et al., 2008, Wang et al., 2012) sólo podrían jugar un rol importante en las estriaciones que se propagan hacia el polo en AVISO.

# Bibliografía

Aiken, C. M., M. I. Castillo y S. A. Navarrete, 2008: A simulation of the Chilean Coastal Current and associated topographic upwelling near Valparaíso, Chile. *Continental Shelf Research*, 28(17), 2371-2381.

Belmadani, A., N. A. Maximenko, J. P. McCreary, R. Furue, O. V. Melnichenko, N. Schneider, y E. Di Lorenzo, 2013: Linear wind-forced beta-plumes with application to the Hawaiian Lee Countercurrent. *Journal of Physical Oceanography*, 43(10), 2071-2094.

Belmadani, A., E. Concha, D. Donoso, A. Chaigneau, N. Maximenko y E. Di Lorenzo, 2015: Role of mesoscale eddies in the formation and persistence of oceanic striations in the eastern South Pacific off Chile. 11<sup>th</sup> International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Santiago, Chile.

Buckingham, C. E., y P. C. Cornillon, 2013: The contribution of eddies to striations in absolute dynamic topography. *Journal of Geophysical Research*, 118, 448 - 461, doi:10.1029/2012JC008231.

Buckingham, C. E., P. C. Cornillon, F. Schloesser y K. M. Obenour, 2014: Global observations of quasi-zonal bands in microwave sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119, 4840 - 4866, doi:10.1002/2014JC010088.

Cambon, G., K. Goubanova, P. Marchesiello, B. Dewitte, S. Illig y V. Echevin, 2013: Assessing the impact of downscaled atmospheric winds on a regional ocean model simulation of the Humboldt System. *Ocean Modeling*, 65, 11-24, doi:10.1016.j.ocemod.2013.01.007.

Centurioni, L. R., J. C. Ohlmann y P. P. Niiler, 2008: Permanent meanders in the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 1690 - 1710, doi:10.1175/2008JPO3746.1.

Chaigneau, A., y O. Pizarro, 2005.a: Eddy characteristics in the eastern South Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 110, C06005, doi:10.1029/2004JC002815.

Chaigneau, A., y O. Pizarro, 2005.b: Surface circulation and fronts of the South Pacific Ocean, east of 120 °W. *Geophysical Research Letters*, 32(8).

Chaigneau, A., A. Gizolme, y C. Grados, 2008: Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, 79, 106 - 119, doi:10.1016/j.pocean.2008.10.013.

Chaigneau, A., G. Eldin, y B. Dewitte, 2009: Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992 - 2007). *Progres in Oceanography*, 83, 117 - 123, doi:10.1016/j.pocean.2009.07.012.

Challenor, P. G., P. Cipollini, y D. Cromwell. 2001. Use of 3D Radon transform to examine the properties of oceanic Rossby waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18:1558 - 1566.

Chelton, D. B., M. G. Schlax, R. M. Samelson, y R. A. De Szoeke, 2011: Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91, 167 - 216, doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.

Chen, R., G. R. Flierl, y C. Wunsch, 2015: Quantifying and Interpreting Striations in a Subtropical gyre: A spectral perspective. *Journal of Physical Oceanography*, 45, 387 - 406, doi:10.1175/JPO-D-14-0038.1.

Chen, R., y G. R. Flierl, 2015: The contribution of striations to the eddy energy budget and mixing: Diagnostic frameworks, and results in a quasi-geostrophic barotropic system with mean flow. *Journal of Physical Oceanography*, 45(8), 2095-2113.

Cushman-Roisin, B., y J. M. Beckers, 1994: *Introduction to Geophysical Dynamics*. 320 pp., Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Davis, A., E. Di Lorenzo, H. Luo, A. Belmadani, N. Maximenko, O. Melnichenko, y N. Schneider, 2014: Mechanisms for the emergence of ocean striations in the North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 41, 948–953, doi:10.1002/2013GL057956.

Galperin, B., H. Nakano, H.-P. Huang, y S. Sukoriansky, 2004: The ubiquitous zonal jets in the atmospheres of giant planets and Earth's oceans. *Geophysical Research Letters*, 31, L13303, doi:10.1029/2004GL019691.

Hormazábal, S., G. Shaffer, y O. Leth, 2004: Coastal transition zone off Chile, *Journal of Geophysical Research*, 109, C01021, doi:10.1029/2003JC001956.

Hormazábal, S., V. Combes, C. E. Morales, M. A. Correa-Ramirez, E. Di Lorenzo, y S. Nuñez, 2013: Intrathermocline eddies in the coastal transition zone off central Chile (31-41 S). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10), 4811-4821.

Hristova, H. G., J. Pedlosky, y M. A. Spall, 2008: Radiating instability of a meridional boundary current. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 2294-2307, doi:10.1175/2008JPO3853.1.

Ivanov, L. M., C. A. Collins, y T. M. Margolina, 2009: System of quasi-zonal jets off California revealed from satellite altimetry. *Geophysical Research Letters*, 36, L03609, doi:10.1029/2008GL036327.

Ivanov, L. M., C. A. Collins, y T. M. Margolina, 2012: Detection of oceanic quasi-zonal jets from altimetry observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29, 1111 - 1126, doi:10.1175/JTECH-D-11-00130.1.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, y D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437 - 471.

Kamenkovich, I., P. Berloff, y J. Pedlosky, 2009: Role of eddy forcing in the dynamics of multiple zonal jets in a model of the North Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, 39, 1361 - 1379, doi:10.1175/2008JPO4096.1.

Kamenkovich, I., I. I. Rypina, y P. Berloff, 2015: Properties and origins of the anisotropic Eddy-Induced transport in the north Atlantic, *Journal of Physical Oceanography*, 45(3), 778 - 791, doi:10.1175/JPO-D-14-0164.1.

Leth, O., y G. Shaffer 2001: A numerical study of seasonal variability in the circulation off central Chile, *Journal of Geophysical Research*, 106, 22,229 - 22, 248.

Maes, C., B. Blanke, y E. Martinez, 2016: Origin and fate of surface drift in the oceanic convergence zones of the eastern Pacific. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3398-3405.

Masumoto, Y., H. Sasaki, T. Kagimoto, N. Komori, A. Ishida, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma, y T. Yamagata, 2004: A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean-preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *Journal of the Earth Simulator*, 1, 35 - 56.

Maximenko, N. A., B. Bang, y H. Sasaki, 2005: Observational evidence of alternating zonal jets in the world ocean. *Geophysical Research Letters*, 32, L12607, doi:10.1029/2005GL022728.

Maximenko, N. A., O. V. Melnichenko, P. P. Niiler, y H. Sasaki, 2008a: Stationary mesoscale jet-like features in the ocean. *Geophysical Research Letters*, 35, L08603, doi:10.1029/2008GL033267.

Maximenko, N. A., O. V. Melnichenko, N. Schneider, E. Di Lorenzo, P. Niiler, J. Hafner, V. Combes y H. Sasaki, 2008b: Dynamic Study of Ocean Striations From Perspective of Satellite Altimetry, OSTST Meeting, Noviembre 10-15, 2008, Niza, Francia. Poster

Maximenko, N. A., O. Melnichenko, E. Di Lorenzo, A. Belmadani, y N. Schneider, 2013: Beta-plumes and origin of striated patterns in the ocean. *Actas de "20 Years of Progress in Radar Altimetry"*, Venecia, Italia, L. Ouwehand [Ed.], ESA SP-710, Febrero 2013.

Melnichenko, O. V., N. A. Maximenko, N. Schneider, y H. Sasaki, 2010: Quasi-stationary striations in basin-scale oceanic circulation: vorticity balance from observations and eddy-resolving model. *Ocean Dynamics*, 60, 653 - 666, doi:10.1007/s10236-009-0260-z.

Morrow, R., F. Birol, D. Griffin, y J. Sudre, 2004: Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies, *Geophysical Research Letters*, 31, L24311, doi:10.1029/2004GL020974.

Nakano, H., y H. Hasumi, 2005: A series of zonal jets embedded in the broad zonal flows in the Pacific obtained in eddy-permitting ocean general circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, 35, 474 - 488.

Okubo, A., 1970: Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep-Sea Research* 17, 445-454.

Pegliasco, C., A. Chaigneau, y R. Morrow, 2015: Main eddy vertical structures observed in the four major Eastern Boundary upwelling systems, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 120, 6008 - 6033, doi:10.1002/2015JC010950.

- Rhines, P. B., 1975: Waves and turbulence on a beta-plane. *J. Fluid Mech.*, 69, 417-443. 1994: Jets. *Chaos*, 4, 313-339.
- Richards, K. J., N. A. Maximenko, F. O. Bryan, y H. Sasaki, 2006: Zonal jets in the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33, L03605, doi:10.1029/2005GL024645.
- Richards, K. J., H. Sasaki, y F. Bryan 2008: Jets and waves in the Pacific Ocean. In *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, edited by K. Hamilton and W. Ohfuchi, 187 - 196, Springer, New York, New York.
- Risien, C. M., y D. B. Chelton, 2008: A Global Climatology of Surface Wind and Wind Stress Fields from Eight Years of QuikSCAT Scatterometer Data. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 2379 - 2413, doi:10.1175/2008JPO3881.1.
- Schlax, M. G., y D. B. Chelton, 2008: The influence of mesoscale eddies on the detection of quasi-zonal jets in the ocean. *Geophysical Research Letters*, 35, L24602, doi:10.1029/2008GL035998.
- Scott, R. B., B. K. Arbic, C. L. Holland, A. Sen, y B. Qiu, 2008: Zonal versus meridional velocity variance in satellite observations and realistic and idealized ocean circulation models. *Ocean Modeling*, 23, 102 - 112, doi:10.1016/j.ocemod.2008.04.009.
- Shchepetkin, A. F., y J. C. McWilliams, 2005: The Regional Oceanic Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modeling*, 9, 347 - 404.
- Souza, J. M. A. C., C. de Boyer Montégut, y P. Y. Le Traon, 2011: Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean, *Ocean Science*, 7, 317-334, doi:10.5194/os-7-317-2011, 2011.
- Taguchi, B., R. Furue, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, M. Nonaka, H. Sasaki, y W. Ohfuchi, 2012: Deep oceanic zonal jets constrained by fine-scale wind stress curls in the South Pacific Ocean: A high-resolution coupled GCM study. *Geophysical Research Letters*, 39, L08602, doi:10.1029/2012GL051248.
- Van Sebille, E., I. Kamenkovich, y J. K. Willis, 2011: Quasi-zonal jets in 3-D Argo data of the northeast Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 38, L02606, doi:10.1029/2010GL046267.
- Wang, J., M. A. Spall, G. R. Flierl, y P. Malanotte-Rizzoli, 2012: A new mechanism for the generation of quasi-zonal jets in the ocean. *Geophysical Research Letters*, 39(10).

Weiss, J., 1991: The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D* 48, 273–294.

Yi, J., Y. Du, Z. He, y C. Zhou, 2014: Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multicore structures from maps of sea level anomaly, *Ocean Science*, 10(1), 39 - 48, doi:10.5194/os-10-39-2014.