

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**Conectividad tridimensional durante verano en el Norte del Golfo de
California**

Tesis

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

Presenta:

Carolina Montaña Cortés

Ensenada, Baja California, México,
2015

Tesis defendida por

Carolina Montaña Cortés

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Silvio Guido Lorenzo Marinone
Moschetto

Director del Comité

Dr. Oscar Velasco Fuentes

Miembro del Comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

Coordinador del Posgrado en
Oceanografía

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Mayo, 2015

Resumen de la tesis que presenta Carolina Montaña Cortés como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Conectividad tridimensional durante verano en el Norte del Golfo de California

Resumen elaborado por:

Carolina Montaña Cortés

Los estudios de conectividad en el Golfo de California (GC) son una herramienta importante para mejorar el aprovechamiento y manejo de sus recursos naturales. Este trabajo tuvo como objetivo estudiar la conectividad tridimensional en el Norte del Golfo de California (NGC) durante un mes representativo de verano, ya que es la temporada con mayor desove de especies marinas. Para ello, se advectaron partículas infinitesimales durante ocho semanas sobre un campo de corrientes tridimensional generado por el modelo numérico HAMSOM. Los resultados mostraron que Canal de Ballenas (CB) presentó la mayor variabilidad vertical en cuanto al desplazamiento de partículas, debido a la presencia de zonas de divergencia y convergencia en las diferentes profundidades de la columna de agua. Por otro lado identificamos al Alto Golfo (AG) como el área con mayor retención de partículas (>90%), puesto que la corriente costera continental restringió la salida de partículas en esa área. En contraparte el área con mayor dispersión de partículas fue el Norte de Isla Tiburón (NIT), dado que la corriente costera continental transportó la mayoría de sus partículas hacia el norte (~80%). La localidad que mostró mayor tendencia a captar partículas provenientes de las diferentes provincias del NGC fue Remolino Estacional (RE), esto debido a que el remolino (ciclónico en verano) se caracteriza por ser una zona de atrapamiento. Por lo tanto, observamos que la corriente costera continental y el remolino estacional dominan sobre los patrones de conectividad en el NGC. Por último, proponemos un bosquejo de dichos patrones de conectividad.

Palabras clave: **Conectividad tridimensional, Norte del Golfo de California, retención, dispersión, corriente costera continental, remolino estacional.**

Abstract of the thesis presented by Carolina Montaña Cortés as a partial requirement to obtain Master degree in Science in Physical Oceanography

Three-dimensional connectivity during summer on the Northern Gulf of California

Abstract by:

Carolina Montaña Cortés

Connectivity studies in the Gulf of California (GC) are an important tool to improve the use and management of natural resources. This work aimed to study the three-dimensional connectivity in the Northern Gulf of California (NGC) for a representative summer month because it is the spawning season of most of the marine species. For that, infinitesimal particles were advected for eight weeks on a three-dimensional currents field generated by the numerical model HAMSOM. The results showed that Ballenas Channel (CB) had the largest vertical variability on the movement of particles, due to the presence of areas of divergence and convergence at different depths in the water column. On the other hand, we identify the Upper Gulf (AG) as the area with greater retention of particles (> 90%), because the continental coastal current restricted the particles output in that area. In contrast the area with greater dispersion of particles was north of Tiburón Island (NIT), where the continental coastal current carried most of the particles to the north (~ 80%). The area that captured most of particles from different provinces of the NGC was Seasonal Eddy (RE), because the eddy (cyclonic in summer) is characterized as a zone of entrapment. Therefore, we note that the continental coastal current and the seasonal eddy dominated over the connectivity patterns in the NGC. Finally, we propose a sketch of these connectivity patterns.

Keywords: Three-dimensional connectivity, Northern Gulf of California, retention, dispersion, continental coastal current, seasonal eddy.

Dedicatoria

*A mi mamá por apoyarme en este largo camino, gracias.
Te quiero demasiado*

*A mamaby por el cariño incondicional y nunca dejar de
hacerme sentir como tu único sol. Te adoro*

*A los niños consentidos del hogar: Paloma,
Amparo, Mayari, Romina y Crispín*

A papito

Agradecimientos

Al Dr. Guido, por apoyarme y guiarme en este proyecto de tesis, así como mostrarme el interesante mundo de la conectividad. A los miembros de mi comité: Dr. Oscar y Dr. Gilberto, quienes contribuyeron, enormemente, al mejoramiento de la redacción de éste trabajo.

A David Rivas, por el gran aporte en la realización de mis mapas, mil gracias. A Ernesto, quien nos ayudó a desarrollar la página interactiva.

A CONACyT por la beca otorgada.

A mis compañeros de generación: Lenno B, Ros, Tenoché, La señora de las artesanías (Ixe), Jéctor, Javi, Nat y demás por haber pasado divertidos e inolvidables momentos.

A Helen, con quien pasé momentos muy divertidos y únicos, ¡nostalgia!. A Ramsex, Moink y Lennoviña por esas noches alocadas y divertidas, difíciles de reemplazar. Mis cuatro amores: Los quiero!!.

A mis amigas xalapeñas: Mi negrita Eli, Betty Boop, Rockisy Pepocksi, Lupich, Fabich, Phequi Phec, Ale, Pol, Marquich Bitch y Pearl, hicieron menos pesado el estar lejos de casa, darme apoyo en los momentos difíciles y los recuerdos inolvidables de nuestra amistad. Los adoro.

A mi má!! y mamaby, quienes siempre estuvieron al pie del cañón en este proceso de vida, las amo, adoro, quiero, respeto, son lo mejor que puedo tener. A papito, el abuelito que siempre me hacía repelar pero lo quiero con todo mi corazón. A Pollito Bollito, eres todo en un paquete: hermana, prima, amiga, psicóloga, te quiero. A Fer, eres mi hermanito menor, te quiero aunque no lo parezca. Ustedes y mi familia: GRACIAS

A Marco Fu por la paciencia, apoyo y las grandes ideas que salen de esa mente tan creativa. Te quiero mi compañero de alitas. Gracias infinitas.

Tabla de contenido

	Página
Resumen español	iii
Resumen inglés	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2. Área de estudio.....	2
1.3. Antecedentes.....	4
Capítulo 2. Metodología	7
2.1 Campos de velocidad Eulerianos.....	7
2.2 Dispersión de partículas.....	7
2.3 Conectividad tridimensional.....	8
2.3.1 Matrices de conectividad.....	9
2.3.2 Mapas de dispersión e histogramas de conectividad.....	11
Capítulo 3. Resultados y discusiones	12
3.1 Patrones de circulación.....	12
3.2 Conectividad verano.....	14
3.2.1 Matriz de retención.....	18
3.2.2 Matriz de máxima captación.....	37
Capítulo 4. Conclusiones	48
Lista de Referencias	49
Apéndice	53

Lista de figuras

Figura		Página
1	a) Localización del Golfo de California (GC). b) Batimetría del Golfo de California con las cuencas y umbrales que forman parte del Norte del Golfo de California (NGC). c) Áreas de conectividad que componen la zona de estudio, NGC (Tabla 2).	3
2	Matriz de conectividad seis semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 30 a 60 m. El porcentaje de conectividad se representa con la barra de colores. El significado de los acrónimos del eje vertical y horizontal se presenta en la Tabla 1. Las líneas quebradas agrupan a la región de la cabeza del golfo y las grandes islas. La línea diagonal simboliza el porcentaje de partículas ubicadas en la misma área de liberación o también llamado retención, la cual se resaltó con la flecha roja. Las flechas rojas que apuntan en dirección opuesta describen la dispersión de partículas. Los cuadros rojos presentan el mayor porcentaje de partículas atrapado por localidades vecinas al área de liberación.	10
3	Corrientes promedio para las doce capas del modelo correspondientes a los meses de julio-agosto.	13
4	Matriz de profundidad promedio para la región norte del GC a las ocho semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 0 a 10 m. La profundidad promedio se representa con la barra de colores. El eje vertical muestra las áreas de liberación y el horizontal las localidades de arriba, las líneas quebradas agrupan las áreas ubicadas en la zona más alta del golfo y las áreas de las grandes islas.	15
5	Matriz de desviación estándar para la región norte del GC a las ocho semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 0 a 10 m. La desviación estándar se representa con la barra de colores. El eje vertical muestra las áreas de liberación y el horizontal las localidades de arriba, las líneas quebradas agrupan las áreas ubicadas en la zona más alta del golfo y las áreas de las grandes islas.	17
6	Matriz de retención, la cual muestra el porcentaje de partículas localizadas en la diagonal de las matrices de conectividad de cada capa de liberación. En esta matriz no contempla el 5% o menores porcentajes de partículas.	18

7	Matriz de profundidad promedio asociada a la matriz de retención, la cual muestra la capa en la que se encuentra la profundidad promedio del porcentaje de partículas localizadas en la diagonal de las matrices de conectividad de cada capa de liberación.	19
8	Mapa de posición final de partículas liberadas en la primera capa de la localidad del Alto Golfo, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.	21
9	Mapa de posición final de partículas liberadas en la segunda capa de la localidad del Remolino Estacional, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.	23
10	Corte vertical entre la zona de las Grandes Islas (línea quebrada de color gris). La barra de colores representa a las corrientes con dirección hacia el norte (rojo) y hacia el sur (azul).	24
11	Mapa de posición final de partículas liberadas en la tercera capa de la localidad del Norte de Isla Tiburón, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.....	25

12	Corte vertical del norte del GC (línea quebrada de color gris). La barra de colores representa a las corrientes con dirección hacia el norte (rojo) y hacia el sur (azul).	26
13	Mapa de posición final de partículas liberadas en la cuarta capa de la localidad de los Remolinos Peninsulares, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.	27
14	Corte vertical de la región de los Umbrales (línea quebrada de color gris). La barra de color muestra la magnitud de la componente norte- sur de la velocidad.	28
15	Mapa de posición final de partículas liberadas en la primera capa de la localidad de los Umbrales, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.	29
16	Mapa de posición final de partículas liberadas en la décima capa de la localidad de los Umbrales, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.	30

- 17 Mapa de posición final de partículas liberadas en la cuarta capa de la localidad del Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 31
- 18 Mapa de posición final de partículas liberadas en la tercera capa de la localidad del Sonora, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 32
- 19 Mapa de posición final de partículas liberadas en la quinta capa de la localidad del Cuenca Delfín, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 33

- 20 Mapa de posición final de partículas liberadas en la segunda capa de la localidad del Ángel de La Guarda, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 34
- 21 Divergencia asociada al campo de corrientes para las diferentes capas de la localidad del Canal de Ballenas. Las áreas de liberación están delineada con color negro. La barra de colores de la derecha representa la magnitud del campo de corrientes y la barra de colores de la izquierda muestra los valores de la divergencia (rojo) y convergencia (azul). 35
- 22 Mapa de posición final de partículas liberadas en la segunda capa de la localidad del Canal de Ballenas, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 36
- 23 Matriz de máxima captación, en ella se muestra las celdas que presentaron el mayor porcentaje de partículas de cada renglón que conforma la matriz de conectividad. Los dígitos corresponden a la región que captó dicho porcentaje. No se toma la diagonal de la matriz. 38
- 24 Matriz de profundidad promedio asociada a la matriz de máxima captación, la cual muestra la profundidad promedio del máximo porcentaje de partículas atrapadas por las diferentes localidades del NGC. Estas localidades se representan con un dígito del 1 al 10, se presentan en el recuadro ubicado en la parte inferior de la figura. 39

- 25 Mapa de posición final de partículas liberadas en la sexta capa de la localidad del Remolino Estacional, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 40
- 26 Mapa de posición final de partículas liberadas en la séptima capa de la localidad de Ángel de La Guarda, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas. 41
- 27 Mapa de posición final de partículas liberadas en la cuarta capa de la localidad de Cuenca Delfín, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas..... 42

28	Mapa de posición final de partículas liberadas en la quinta capa de la localidad de los Umbrales, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.	43
29	Mapa del NGC con las rutas superficiales preferentes de las partículas, donde: 1. Corriente costera continental, 2. Remolino ciclónico y 3. Corriente del Canal de Ballenas.....	44
30	Mapa del NGC con las rutas profundas preferentes de las partículas, donde: 1. Corriente costera continental, 2. Remolino ciclónico, 3. Corriente del Canal de Ballenas, 4. Corriente ocasionada por la interacción entre la Isla Ángel de La Guarda y 5. Remolino anticiclónico.	46
A1	Imagen de la página de internet, con la pestaña de inicio seleccionada.	53
A2	Imagen de la página de internet, en la pestaña de Mapa Interactivo.	54
A3	Imagen de la página de internet, en la pestaña de Mapa Interactivo.	55
A4	Página de internet, pestaña seleccionada de Contacto.	56
A5	Página de internet, ejemplo de un mapa de posición final de partículas.	57
A6	Página de internet, ejemplo de un mapa de posición final de partículas.	58
A7	Página de internet, ejemplo de una matriz de conectividad.	59

A8	Página de internet, ejemplo de una matriz de profundidad promedio.	60
A9	Página de internet, ejemplo de una matriz de desviación estándar.	61

Capítulo 1. Introducción

Se conoce como conectividad al grado de intercambio de partículas entre áreas aledañas (Taylor *et al.*, 1993; With *et al.*, 1997; Tischendorf y Fahrig, 2000; Kindlammn y Burel, 2008). Su cuantificación es útil para conocer los patrones de dispersión de trazadores sujetos a la hidrodinámica del océano (Santiago, 2013). La trayectoria de estas partículas se puede obtener mediante observaciones o por modelos numéricos.

En el Golfo de California (GC) se encuentran las pesquerías más importantes de México (Arvizu-Martinez, 1987; Lluch-Cota, 2007), reservas ecológicas y Áreas Marinas Protegidas (AMP's) (Peguero-Icaza *et al.*, 2011) y una gran biodiversidad (Brusca, 2002). El aprovechamiento y buen manejo de los recursos del golfo usualmente involucra estudios de conectividad.

Los primeros resultados de la conectividad en el GC fueron inferidos, mediante el uso de modelos numéricos, a partir de patrones de circulación Lagrangiana (Velasco Fuentes y Marinone 1999; Marinone 2006; Gutiérrez *et al.*, 2004). Posteriormente, varios trabajos reportan la conectividad directamente (Marinone *et al.*, 2008; Peguero-Icaza, 2011; Marinone, 2012; Soria *et al.*, 2014; Santiago, 2013). En todos estos trabajos, con diferentes objetivos y definiciones de áreas de conectividad, los resultados son limitados a una descripción horizontal de la dispersión de partículas.

Con la finalidad de complementar los trabajos de conectividad en el GC, realizamos un estudio con énfasis en la variabilidad vertical de la conectividad para las diferentes áreas del golfo en la estación de verano. Este periodo presenta el mayor desove de especies comerciales en el GC (Marinone *et al.*, 2008; Sánchez Velasco *et al.*, 2009). Es por ello que los estudios de conectividad son importantes para conocer los patrones de dispersión de organismos marinos cuyo movimiento se rige por la hidrodinámica del océano. Dichos análisis proveen información útil para la toma de decisiones del manejo de pesquerías, establecimiento de áreas protegidas y zonas de veda, entre otros.

1.1 Objetivos

•GENERAL

–Estudiar la conectividad tridimensional en el Norte del Golfo de California (NGC) para un mes de verano

•PARTICULAR

–Hacer una página interactiva en línea que muestre mapas de conectividad y la posición final de partículas 2, 4, 6 y 8 semanas después de haber sido liberadas, para cualquier mes del año, en todo el Golfo de California

1.2 Área de estudio

El Golfo de California (GC) se localiza al noroeste del Pacífico Mexicano, es un mar alargado semicerrado de aproximadamente 1100 km de longitud y 150 km de ancho (Castro-Aguirre *et al.*, 1995; Avalos, 1998; Velasco y Marinone, 1999; Hernández-Ayón *et al.*, 2013) (Fig. 1). El golfo se divide en distintas regiones dependiendo de su batimetría (Lavín *et al.*, 1997b), en este trabajo lo dividimos en dos regiones: la región norte, la cual abarca desde el Delta del Río Colorado hasta la zona del Archipiélago o Grandes Islas (GI); y la región sur del golfo, esta zona comprende desde el límite de GI hasta la boca del golfo, y se localizan las cuencas más profundas: Cuenca San Pedro Mártir, Guaymas, del Carmen y Farallón.

La región de estudio fue el Norte del Golfo de California (NGC), la cual es una de las regiones más productivas (Arvizu-Martínez, 1987) de México, esto debido a su rica biodiversidad. En el NGC se encuentran tres áreas marinas protegidas y dos reservas de la biosfera (Marinone *et al.*, 2008), estas sirven para la conservación de especies marinas como para el beneficio de la pesquería.

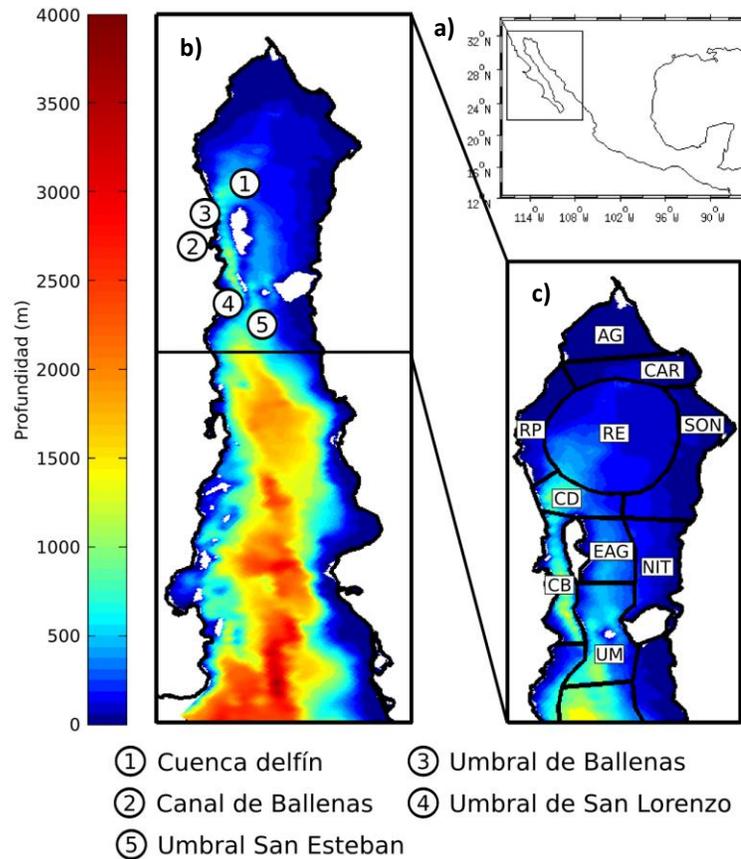


Figura 1. a) Localización del Golfo de California (GC). b) Batimetría del Golfo de California con las cuencas y umbrales que forman parte del Norte del Golfo de California (NGC). c) Áreas de conectividad que componen la zona de estudio, NGC (Tabla 2).

En esta región se encuentran las islas más grandes del país: Ángel de la Guarda e Isla Tiburón (Peguero-Icaza, 2008), y su batimetría se caracteriza por presentar umbrales y cuencas, la cuenca más profunda es Cuenca Delfín (800 m), ésta se conecta con Canal de Ballenas (1500 m). Este canal tiene dos umbrales, al norte (Canal de Ballenas) y sur (San Lorenzo); este último es el umbral más somero, con una profundidad alrededor de 400 m, al contrario de San Esteban que es el umbral más profundo (aproximadamente 600 m; fig. 1) (Badan-Dangon *et al.*, 1991; López *et al.*, 2006; López *et al.*, 2008; Sánchez-Velasco *et al.*, 2012; Hernández-Ayón *et al.*, 2013).

Los procesos dinámicos en el NGC están relacionados con agentes forzantes como: el viento, flujos a través de la superficie (calor y agua) (Lavín y Marinone, 2003), y la marea e intercambio de masa con el océano Pacífico. El comportamiento del viento presenta una fuerte variabilidad estacional con vientos del Sureste en verano y del Noroeste en primavera, otoño e invierno (Marinone y Lavín, 1997; Lavín y Marinone,

2003). La marea en el GC se describe casi en su totalidad por los siete principales armónicos de marea, M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 y P_1 (Marinone, 2003), lo que crean una marea de carácter mixto (diurna y semidiurna). Sin embargo en el NGC, las componentes de mareas dominantes son las semidiurnas (M_2 y S_2 ; Marinone y Lavín, 1997; Velasco y Marinone, 1999). El rango de marea de dichas componentes se amplifica de la boca del Golfo de California hasta la cabeza del Golfo de California, pasando por el punto anfidrómico virtual localizado en Santa Rosalía (Marinone, 1997; Marinone y Lavín, 1997). El GC continuamente intercambia propiedades con la atmósfera, a partir del flujo de momentum, lluvia y evaporación (Lavín *et al.*, 1997b). Este último es uno de los procesos más importantes de pérdida de calor en el GC, seguido por la radiación de onda larga, otro proceso del cual es responsable la evaporación es la alta salinidad en el NGC (Lavín y Marinone, 2003). La interacción del flujo inducido por estos agentes forzantes y la geometría del lugar producen la circulación en el NGC, y presenta un marcado comportamiento estacional (Lavín y Marinone, 2003).

1.3 Antecedentes

Para explicar la circulación en el NGC se han realizado estudios experimentales mediante la liberación de boyas en el NGC (Lavín *et al.*, 1997a) así como el análisis de corrientes geostróficas generadas a partir de datos hidrográficos históricos (Carrillo *et al.*, 2002). Estos estudios demostraron la presencia de un giro reversible estacional, el cual es anticiclónico de noviembre hasta abril, considerado como un giro de temporada invernal y ciclónico de junio a septiembre, giro de verano; y la temporada de transición, mayo y octubre (Lavín *et al.*, 1997a; Beier y Ripa, 1999; Velasco y Marinone, 1999; Carrillo *et al.*, 2002; Lavín y Marinone, 2003; Gutiérrez *et al.*, 2004). El entender dicha circulación es importante debido que ayuda a comprender los patrones de conectividad. Sin embargo, el conocimiento de esta información es una tarea difícil y costosa, por lo que los modelos numéricos se han convertido en una herramienta importante para ese tipo de estudios.

Más tarde Marinone (2003) adaptó el modelo tridimensional baroclínico HAMSOM al GC, forzándolo con marea, una climatología de vientos, flujos de calor y agua, y con la interacción con el Océano Pacífico. En este estudio se observó que el modelo

reproduce la estructura horizontal y vertical de la circulación estacional del GC. Para el caso de verano se encontró una corriente costera que entra al NGC por la zona de las grandes islas y posteriormente fluye por las costas de Sonora, la cual se integra al remolino ciclónico. Sin embargo para invierno la circulación se revierte, provocando un remolino anticiclónico.

A partir de los resultados numéricos generados por Marinone (2003) se realizaron los primeros estudios de conectividad en el NGC. Los cuales han sido planteados para diferentes objetivos, y por lo cual han sido aplicados en diferentes escalas de tiempo (semanas, meses, estaciones del año, etc.) y espacio (en alguna zona de GC o superficial). Marinone *et al.* (2008) realizaron un estudio en la región costera del NGC, la zona de análisis se dividió en 21 áreas del mismo tamaño, las cuales fueron limitadas hasta la isobata de 60m para la temporada de verano. Los resultados mostraron que la conectividad espacial tiene un comportamiento ciclónico donde las trayectorias de las partículas fueron debidas principalmente a la circulación de baja frecuencia, mientras que los movimientos oscilatorios debido a las mareas no influyen mucho.

Otro tipo de estudio de conectividad en el NGC fue realizado por Peguero-Icaza *et al.* (2011), donde fueron determinadas áreas con base a la distribución de los diferentes ensamblajes de larvas de peces. Los resultados obtenidos describieron los cambios estacionales de las rutas de conectividad entre dichos ensamblajes. Estos sugieren que la mayor retención de larvas se dio en la temporada de verano, debido a la interacción de la corriente costera con dirección hacia el norte que transporta dichas larvas hacia el remolino ciclónico estacional. Más tarde Marinone (2012) analizó la conectividad en todo el GC, al cual lo dividió en 12 regiones por una inspección visual del campo típico de corrientes y algunas características locales. En este trabajo se demostró que el mayor tiempo de retención de partículas se ubicó en áreas pertenecientes al NGC, debido a la presencia del giro estacional. Mientras que la dispersión más grande de partículas se encontró en localidades ubicadas en la costa continental de la parte central y sur del GC, por tanto el potencial de conectividad es alto.

En un estudio más reciente, Santiago (2013) cuantificó la conectividad tridimensional en el GC, el cual fue dividido en 17 áreas definidas por el parámetro de Okubo Weiss, la geometría del flujo y la circulación general del golfo. Los resultados obtenidos mostraron que la conectividad entre las diferentes regiones del Golfo de California tiene un patrón estacional, consistente con el carácter de la circulación del golfo; sin embargo, para compactar la información se integró verticalmente el número de partículas.

De acuerdo a los trabajos citados anteriormente, los estudios de conectividad se han enfocado principalmente en una descripción horizontal, y son escasos los estudios que incursionan en la vertical. En este trabajo se propone analizar la conectividad tridimensional en el NGC, la cual explica detalladamente el destino de las partículas dentro de la columna de agua durante la temporada de verano.

Capítulo 2. Metodología

2.1. Campos de velocidad Eulerianos

Con la finalidad de conocer la conectividad en el GC, partículas infinitesimales fueron advectadas por un campo de velocidad Euleriano obtenido a partir del modelo baroclínico tridimensional HAMSOM adaptado al GC por Marinone (2003, 2008). Este modelo utiliza una malla de 0.83' x 0.83' (aproximadamente 1.3 x 1.5 km) en la horizontal y 12 capas en la vertical, con límites inferiores de 10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 350, 600, 1000 y 4000 m, que dependen de la profundidad en cada lugar. El modelo fue forzado en la boca del golfo por un campo climatológico de la hidrografía y las principales componentes de marea (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , M_f , M_{sf} , M_m) y en la superficie del golfo por una climatología del viento y flujos de calor y agua dulce (Marinone 2003, 2006, 2008; Marinone y Lavín 2005; Santiago 2013). Dicho modelo reproduce adecuadamente la hidrodinámica del Golfo de California, por lo cual ha sido utilizado en varios estudios lagrangianos y de conectividad (e.g., Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone *et al.*, 2008; Marinone, 2006, 2008, 2012; Marinone *et al.*, 2011; Santiago, 2013; Soria, 2014). Sin embargo, dado el forzamiento recién mencionado la variabilidad se restringe a las escalas temporales de la marea y a la estacional.

2.2. Dispersión de partículas

Podemos definir como dispersión de partículas al transporte de ellas de una posición inicial a otra, describiendo trayectorias, debido al flujo en que están inmersas. Las trayectorias de las partículas se calcularon con un método de advección a partir de un campo horario de velocidad Euleriana del modelo recién descrito y una contribución de la caminata aleatoria, la cual es relacionada con procesos de difusión turbulenta. Las posiciones de las partículas son calculadas con:

$$X(t + \delta \cdot t) = X(t) + X_a(t) + Rx\sqrt{6A_h\delta \cdot t} ,$$

$$Y(t + \delta \cdot t) = Y(t) + Y_a(t) + Ry\sqrt{6A_h\delta \cdot t} ,$$

y

$$Z(t + \delta \cdot t) = Z(t) + Z_a(t) + R_z \sqrt{6A_v \delta \cdot t + \delta \cdot t \partial A_v / \partial Z},$$

donde: X , Y y Z son las posiciones de las partículas en la dirección zonal, meridional y vertical, respectivamente; t es el tiempo. X_a , Y_a y Z_a son los desplazamientos obtenidos al integrar el campo de velocidad $V_a=(u, v, w)$, por medio del método de Runge Kutta de segundo orden en la horizontal y Euler en la vertical (Marinone 2008; Santiago 2013). La velocidad de la partícula en cada posición es calculada por una interpolación bilineal de los campos de velocidad instantánea del modelo numérico. R_x , R_y y R_z son variables aleatorias, las cuales varían entre 1 y -1, con media cero y desviación estándar de 1/3. A_h y A_v son los coeficientes de difusión turbulenta horizontal y vertical, respectivamente, y se toman del modelo numérico. A_h es constante y tiene un valor de $100 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. A_v varía espacial y temporalmente, y se toma del modelo numérico junto con los campos de velocidad y varía entre 0 a $0.03 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

2.3. Conectividad tridimensional

Para estudiar la conectividad en el Norte del Golfo de California se liberaron partículas infinitesimales el primer día julio, dentro de 10 de las 17 regiones en las que Santiago (2013, figura 1 y tabla 1) dividió el Golfo de California (horizontal) y en las diferentes capas que le corresponden a cada una de las regiones (vertical). La delimitación de las áreas se definió por el parámetro de Okubo Weiss, la geometría del flujo y la circulación general del golfo (Santiago, 2013). El número de partículas sembradas dependió directamente del tamaño de la provincia (para mantener la misma densidad de partículas).

Los resultados los presentamos en matrices de conectividad, profundidad promedio y desviación estándar, así como en mapas de posición final de partículas e histogramas del porcentaje de partículas correspondiente a las distintas áreas de arribo. Los resultados se obtuvieron para dos, cuatro, seis y ocho semanas después de su liberación. Estos los describimos a continuación.

Tabla 1. Nombres de las áreas que corresponden a la Región Norte del GC (Santiago, 2013)

Acrónimo	Nombre
AG	Ato Golfo
CAR	Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional
RP	Remolinos Peninsulares
RE	Remolino Estacional
SON	Sonora
NIT	Norte de Isla Tiburón
EAG	Ángel de la Guarda
CD	Cuenca Delfín
CB	Canal de Ballenas
UM	Zona de los Umbrales

2.3.1. Matrices de conectividad

Para cada uno de los periodos finales (dos, cuatro, seis y ocho semanas) cuantificamos las partículas que llegaron a las distintas regiones y las que regresaron o se mantuvieron en el área de liberación, el resultado lo mostramos en porcentajes. Para acomodar esa información utilizamos la matriz de conectividad, descrita como:

$$C_{ij}(t),$$

donde i es el eje horizontal, que define el área de llegada o destino final de las partículas, j es el eje vertical, que representa las provincias de liberación y t es la semana en la que se observa la posición de las partículas liberadas en julio.

La figura 2 es un ejemplo de la matriz de conectividad a las seis semanas de haber sido liberadas para el mes de julio en la capa de 30 a 60 m de profundidad. En el eje vertical están las 10 áreas de liberación y en el eje horizontal las 10 localidades de arribo de las partículas. Como ayuda, las líneas quebradas separan en distintos grupos el GC: la zona de las grandes islas (NIT, EAG, CB y UM) y al norte de estas (AG, CAR, RP, RE, SON y CD). La diagonal señala el porcentaje de partículas que terminan dentro del área de liberación, el cual en este trabajo se refiere como áreas de retención. Por último, la barra de colores da el porcentaje de partículas. La

sumatoria de los porcentajes ubicados en cada uno de los renglones de la matriz reproduce el porcentaje total de liberación de cada área, excepto cuando las partículas salen del dominio del modelo. Por claridad, las celdas con menos del 5% de partículas fueron excluidas de las matrices.

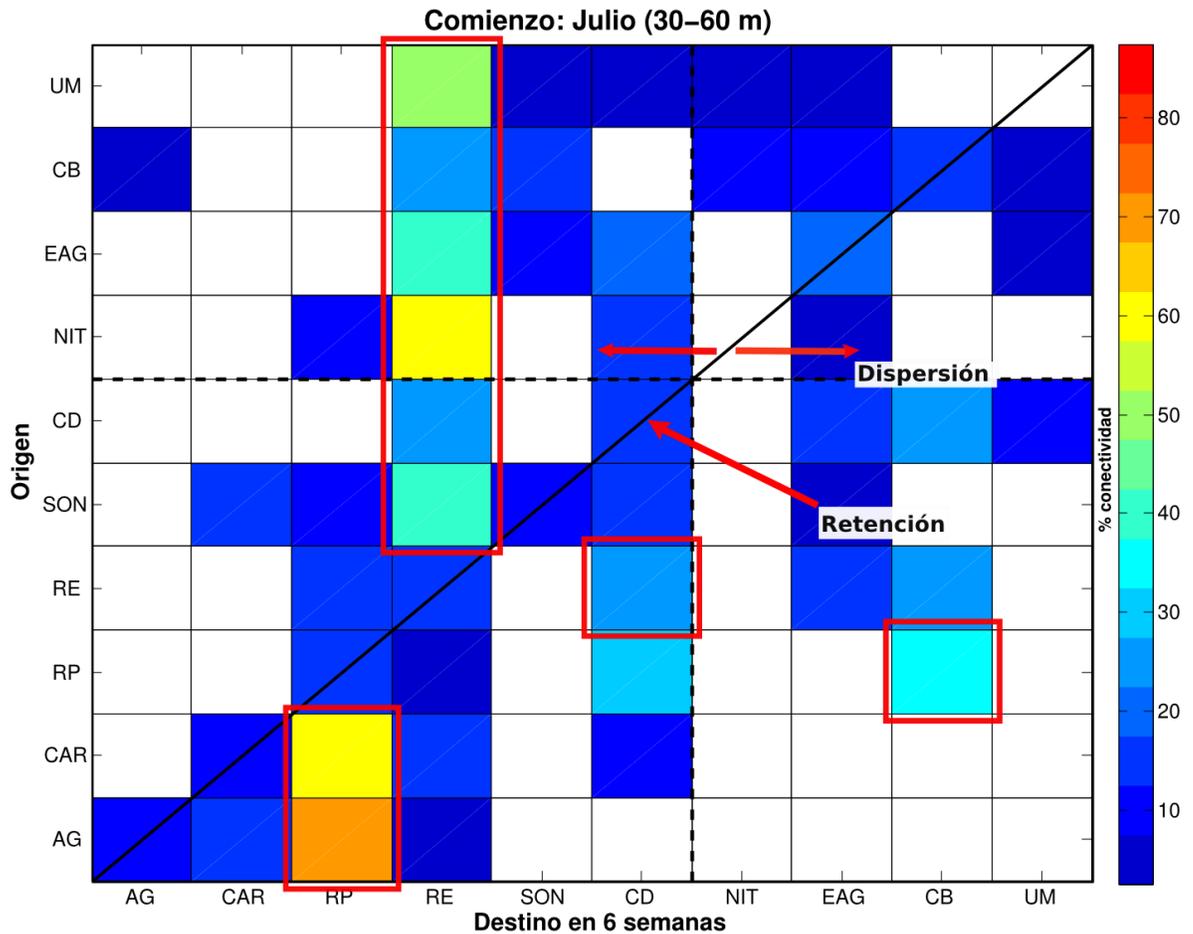


Figura 2. Matriz de conectividad seis semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 30 a 60 m. El porcentaje de partículas se representa con la barra de colores. El significado de los acrónimos del eje vertical y horizontal se presenta en la Tabla 1. Las líneas quebradas agrupan a la región de la cabeza del golfo y las grandes islas. La línea diagonal simboliza el porcentaje de partículas ubicadas en la misma área de liberación o también llamado retención, la cual se resaltó con la flecha roja. Las flechas rojas que apuntan en dirección opuesta describen la dispersión de partículas. Los cuadros rojos presentan el mayor porcentaje de partículas atrapado por localidades vecinas al área de liberación.

Por lo tanto, cada matriz de conectividad contiene la siguiente información:

- por renglón encontramos el destino final de las partículas a partir del área de liberación, que incluye a partículas que salieron y regresaron a la misma localidad de liberación, así como el porcentaje dispersado a otras provincias, este último porcentaje se llamó **dispersión**

- por columna vemos las áreas de donde provienen las partículas para cada localidad
- en la diagonal cuantificamos las partículas que se quedaron o regresaron al mismo lugar de liberación, en este trabajo lo referimos como **retención**
- del porcentaje dispersado en cada renglón registramos una celda que atrapa el mayor porcentaje de partículas, a lo que denominamos la **máxima captación**

Asociado a las matrices de conectividad, calculamos el promedio y la desviación estándar de las partículas que llegaron a cada una de las distintas celdas de la matriz. A partir de la información extraída de las matrices de conectividad, generamos matrices de retención y máxima captación. Esto último lo explicamos en la sección de resultados.

2.3.2. Mapas de posición final de partículas e histogramas de conectividad

Con la finalidad de complementar los resultados de las matrices de conectividad, profundidad promedio y desviación estándar, utilizamos mapas con la posición geográfica final de las partículas a los diferentes tiempos (dos, cuatro, seis y ocho semanas) y con un código de color la profundidad en la que se ubicó cada partícula. Así mismo, empleamos histogramas para mostrar los porcentajes de conectividad de una localidad con las restantes que conforman el NGC.

Como consecuencia de este trabajo, generalizamos la metodología de tal manera que utilizamos las 17 localidades del golfo y los 12 meses del año para crear una página interactiva (Apéndice I). En ella se visualizan todos los resultados anteriormente explicados.

Capítulo 3. Resultados y discusión

En este capítulo presentamos el estudio de la conectividad para un verano típico, en el cual elegimos la climatología de un mes representativo de esta estación del año: julio.

3.1. Patrones de circulación.

Para tener un mejor entendimiento de la conectividad entre las regiones que conforman el Norte del Golfo de California, fue necesario que identificáramos sus principales patrones de la circulación para esta época del año. En la figura 3 presentamos a las corrientes promedio del periodo de julio y agosto para cada una de las capas del modelo, realizamos el promedio entre esos dos meses debido a que queremos observar los patrones dominantes de las corrientes a la octava semana después de haber sido liberadas el primer día de julio.

Como se muestra en la figura 3, observamos una corriente ancha e intensa sobre la costa continental, la cual es percible hasta los 30 metros. Debido a que entre la isla Ángel de la Guarda e isla Tiburón se encuentra un canal estrecho, esta corriente presentó sus valores máximos en esa zona. Posteriormente, al dirigirse hacia el norte del golfo e interactuar con un giro ciclónico localizado al norte de la isla Ángel de la Guarda, esta corriente disminuyó su rapidez.

Del lado de la península de Baja California encontramos una corriente intensa y angosta con dirección hacia el Alto Golfo, la formación de esta corriente la relacionamos principalmente con la presencia del viento sobre la costa de la península.

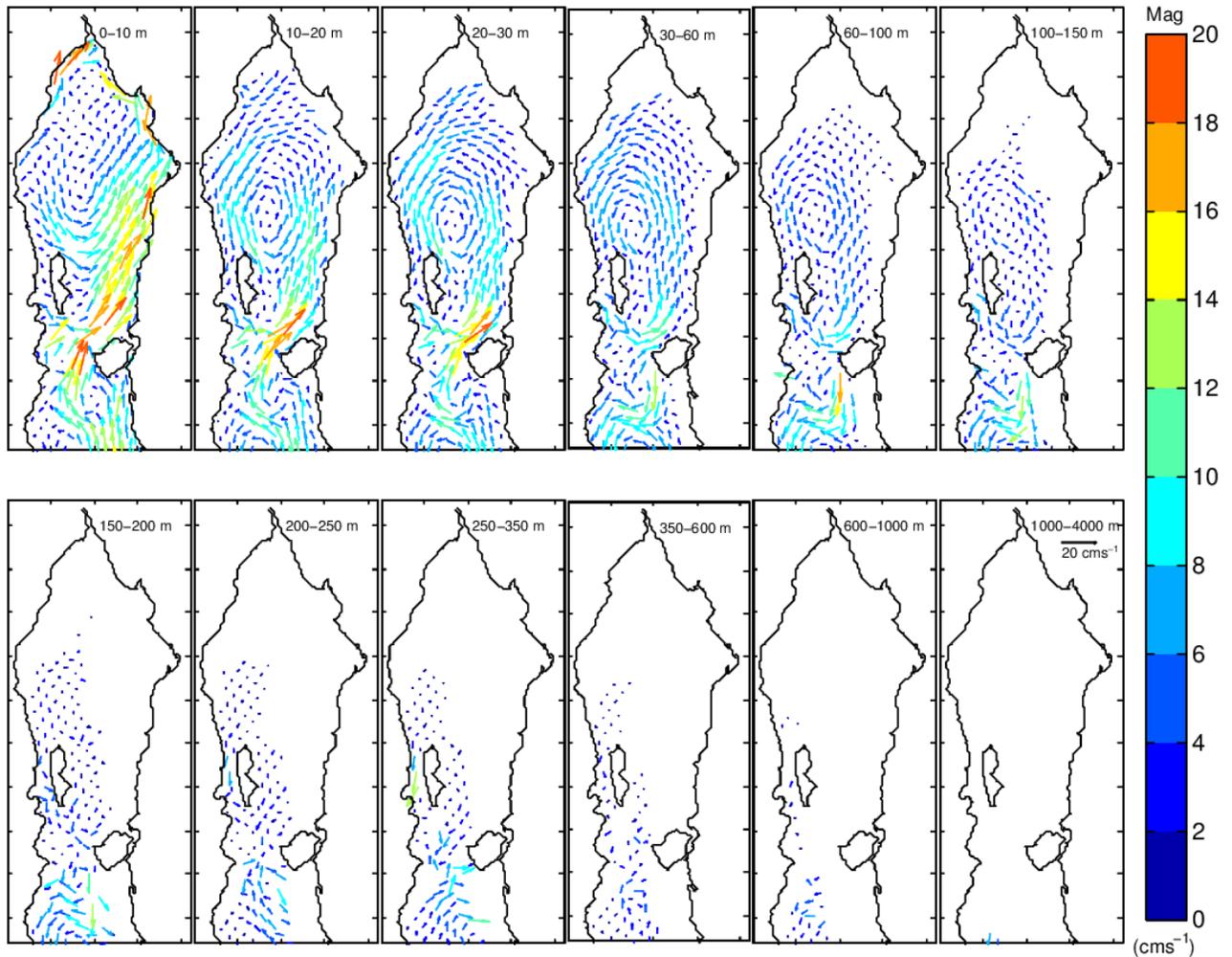


Figura 3. Corrientes promedio para las doce capas del modelo correspondientes a los meses de julio-agosto

La presencia de este remolino es característico de la temporada de verano (Lavín *et al.*, 1997a; Beier y Ripa, 1999; Carrillo *et al.*, 2002), el cual se forma por la interacción de los agentes forzantes: Viento, mareas, el océano Pacífico y flujos de calor y agua (Marinone 2003). El remolino ciclónico adquirió una forma más organizada de la segunda capa (10-20m) a la sexta capa (100-150m); la magnitud de las corrientes disminuyó con la profundidad. Las corrientes ubicadas al oeste del remolino presentaron una bifurcación al interactuar con la isla Ángel de la Guarda. Esta bifurcación generó dos patrones de circulación hacia el sur, uno muy variable entre la península y la isla Ángel de la Guarda y otro al este de dicha isla integrándose a la corriente continental. Este comportamiento trajo como consecuencia la formación de un remolino de menor tamaño en la región sureste de la isla Ángel de la Guarda.

Este remolino presentó una estructura más simétrica entre los 100-150 m de profundidad.

3.2. Conectividad verano

A continuación mostramos algunos ejemplos de las matrices de conectividad, profundidad promedio y desviación estándar.

Tomamos como ejemplo la matriz de conectividad correspondiente a la octava semana después de haber liberado partículas el primer día del mes de julio en la capa de 0 a 10 m (Fig. 4). En la diagonal de esta matriz, observamos la mayor retención en el Alto Golfo (AG, >90%) y el Remolino Estacional (RE, ~50%), en cada uno de los renglones encontramos a las áreas que presentaron la máxima captación (recuadros rojos), de las cuales las que más tuvieron comunicación con la mayoría de las áreas del NGC fueron: AG, RE y Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional (CAR). Es importante mencionar que el transporte de partículas fue casi en su totalidad hacia el norte de las islas, esto lo observamos por la delimitación de las líneas quebradas (izquierda de la diagonal). Sin embargo, el Canal de Ballenas (CB) fue la única provincia que retuvo y dispersó partículas dentro de la región de las islas (EAG y UM, recuadro azul).

Para complementar el estudio de conectividad en el NGC utilizamos la matriz de la profundidad promedio (Fig. 5), ya que con esta matriz conocemos la localización de las partículas en la vertical. La mayoría de las partículas dispersadas así como las ubicadas en las celdas que presentaron el porcentaje de máxima captación (recuadros rojos) se encontraron a profundidades menores a los 50m, mientras que las partículas que están dentro de su misma área de liberación (diagonal) se ubican a profundidades superficiales (<20m) con excepción de CB, ya que en esta localidad las partículas retenidas se encontraron a profundidades mayores a los 160m. Mientras que las partículas que CB transportó hacia EAG y UM se mantienen entre los 60 y 80 m de profundidad (recuadro azul).

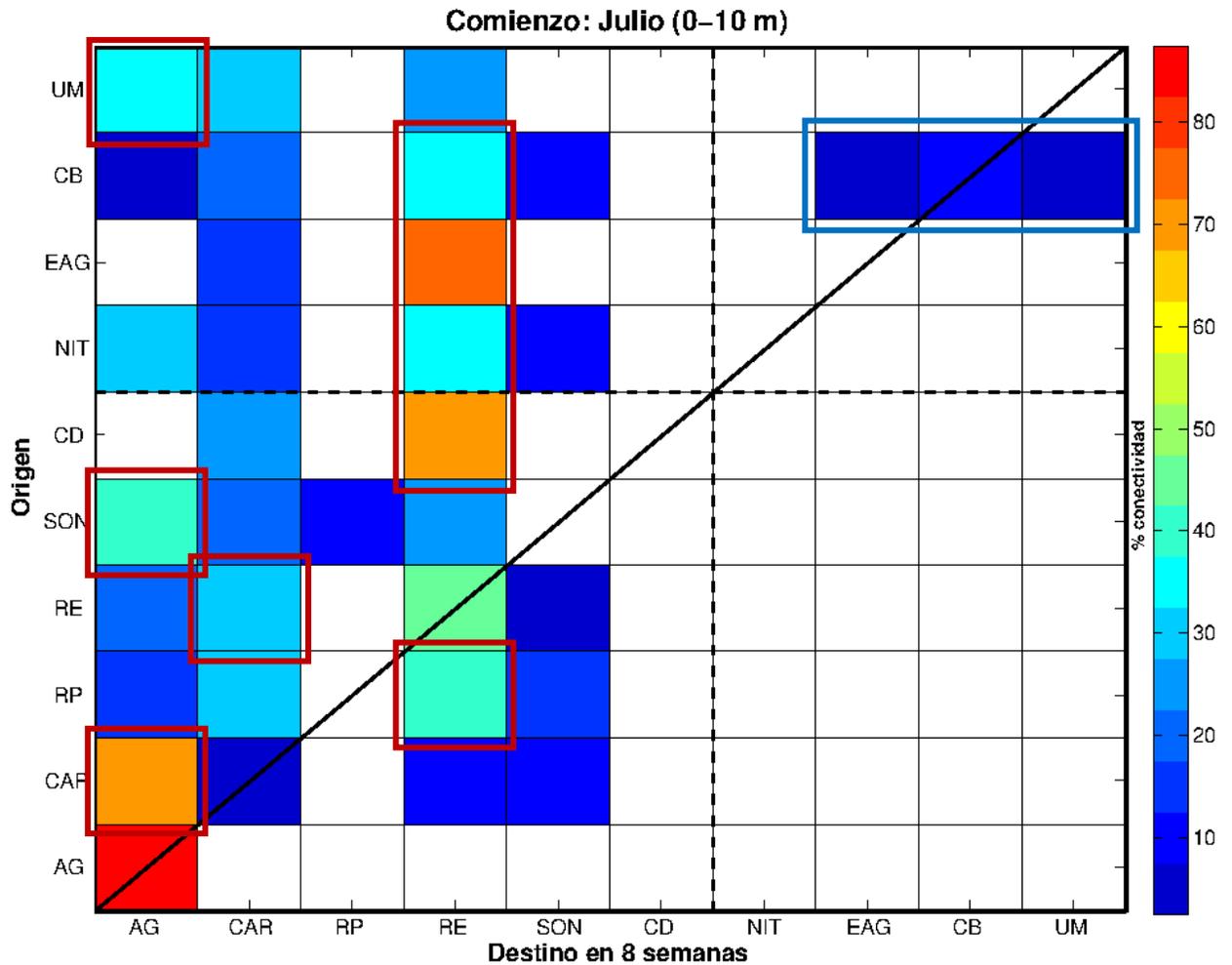


Figura 4. Matriz de conectividad para la región norte del GC a las ocho semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 0 a 10 m. El porcentaje de partículas se representa con la barra de colores. El eje vertical muestra las áreas de liberación y el horizontal las localidades de arribo, las líneas quebradas agrupan las áreas ubicadas en la zona más alta del golfo y las áreas de las grandes islas.

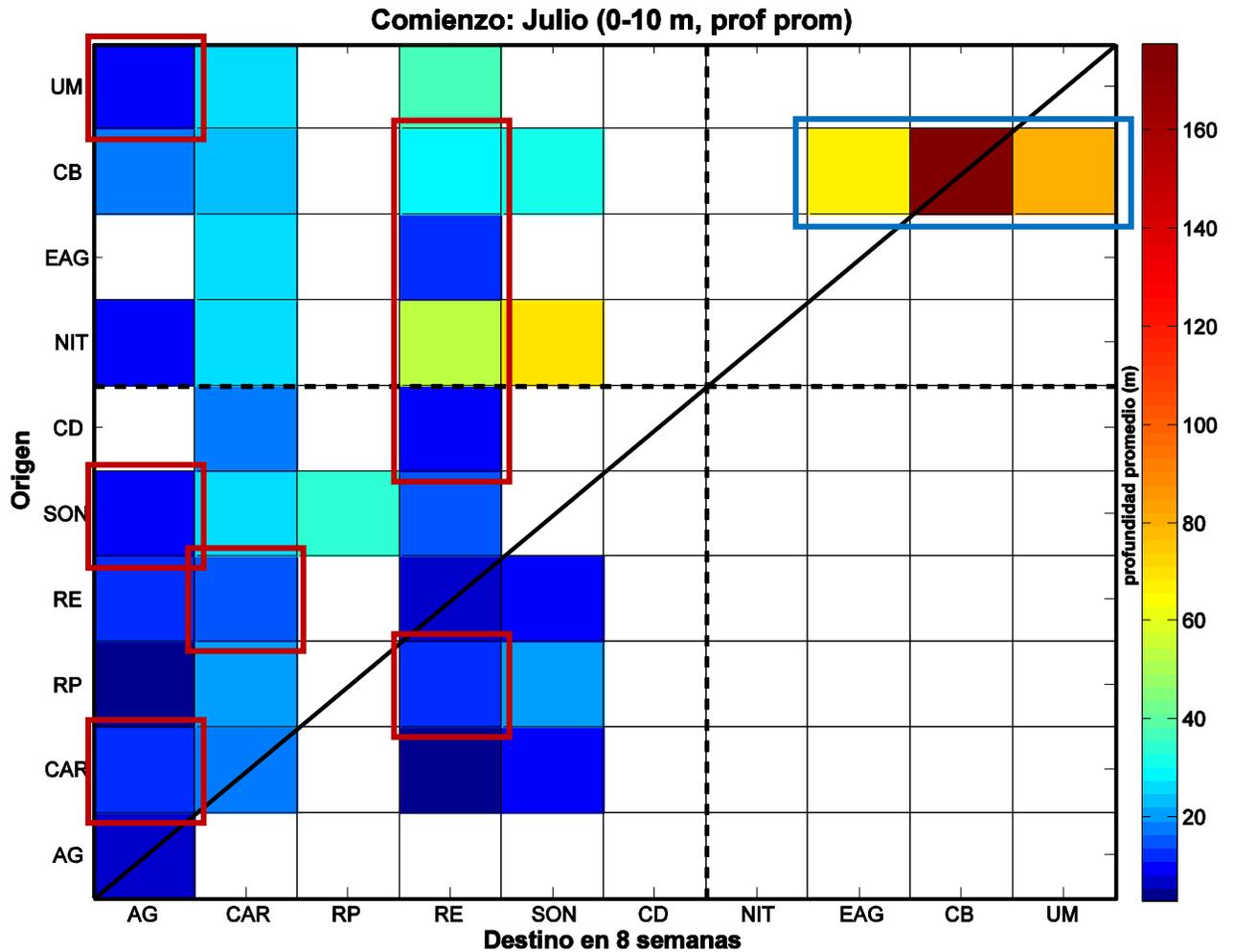


Figura 5. Matriz de profundidad promedio para la región norte del GC a las ocho semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 0 a 10 m. La profundidad promedio se representa con la barra de colores. El eje vertical muestra las áreas de liberación y el horizontal las localidades de arriba, las líneas quebradas agrupan las áreas ubicadas en la zona más alta del golfo y las áreas de las grandes islas.

Otra matriz complementaria es la de desviación estándar, donde observamos la variación de la profundidad de las partículas con respecto a su profundidad promedio (Fig. 6). En esta matriz encontramos que la mayor desviación estándar se encuentra en las partículas retenidas en Canal de Ballenas (CB, >220m) y en las que el flujo transportó hacia Ángel de la Guarda (EAG) y los Umbrales (UM), entre los 60 y 110m (recuadro azul). Mientras que en las partículas ubicadas dentro de la cabeza del GC presentaron fluctuaciones menores a los 40m. Este resultado lo relacionamos a que CB es una región de mucha mezcla vertical tanto por mareas como por la circulación producida por corrientes de gravedad, y el consecuente afloramiento que ocurre en esa zona (López *et al.* 2006,2008; Marinone, 2012)

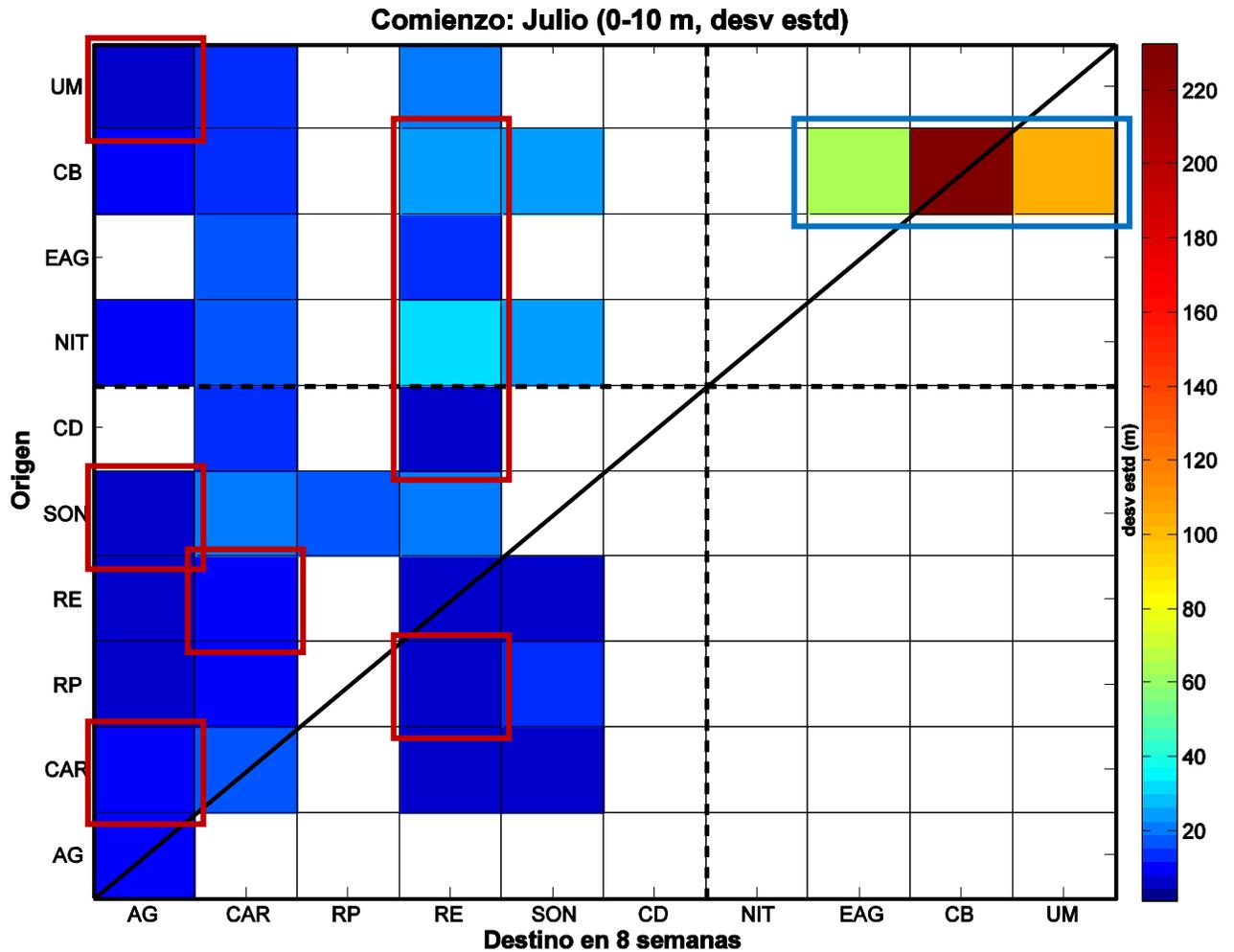


Figura 6. Matriz de desviación estándar para la región norte del GC a las ocho semanas después de haber sido liberadas el primer día del mes de julio en la capa de 0 a 10 m. La desviación estándar se representa con la barra de colores. El eje vertical muestra las áreas de liberación y el horizontal las localidades de arribo, las líneas quebradas agrupan las áreas ubicadas en la zona más alta del golfo y las áreas de las grandes islas.

En lugar de que presentáramos todas las matrices de conectividad, una para cada capa de liberación (11) y para cada uno de los tiempos finales (4), elegimos extraer de ellas, sólo para el caso de la octava semana, i) la diagonal, la cual representa la retención de partículas y ii) la máxima captación, que en este estudio llamamos así al mayor porcentaje de partículas atrapado por una área cualquiera para cada localidad de liberación, esto lo observamos en cada renglón de la matriz de conectividad. Estos dos puntos los agrupamos en matrices llamadas de retención y máxima captación, respectivamente.

3.2.1. Matriz de retención

La matriz de retención hace referencia al porcentaje de partículas que permanecieron o regresaron dentro del área de liberación (Fig. 7), cuya información la extrajimos de la diagonal de la matriz de conectividad. En el eje horizontal y vertical denominamos el área y la capa de liberación de partículas, respectivamente. Cada renglón de la matriz corresponde a la diagonal de una matriz de conectividad. Para complementar los resultados de la retención, generamos otra matriz en la que indicamos la profundidad promedio dónde se localizaron las partículas retenidas al finalizar las 8 semanas de advección (Fig. 8). Estas matrices se deben de leer conjuntamente para comprender mejor la ubicación en la vertical y el porcentaje de conectividad.

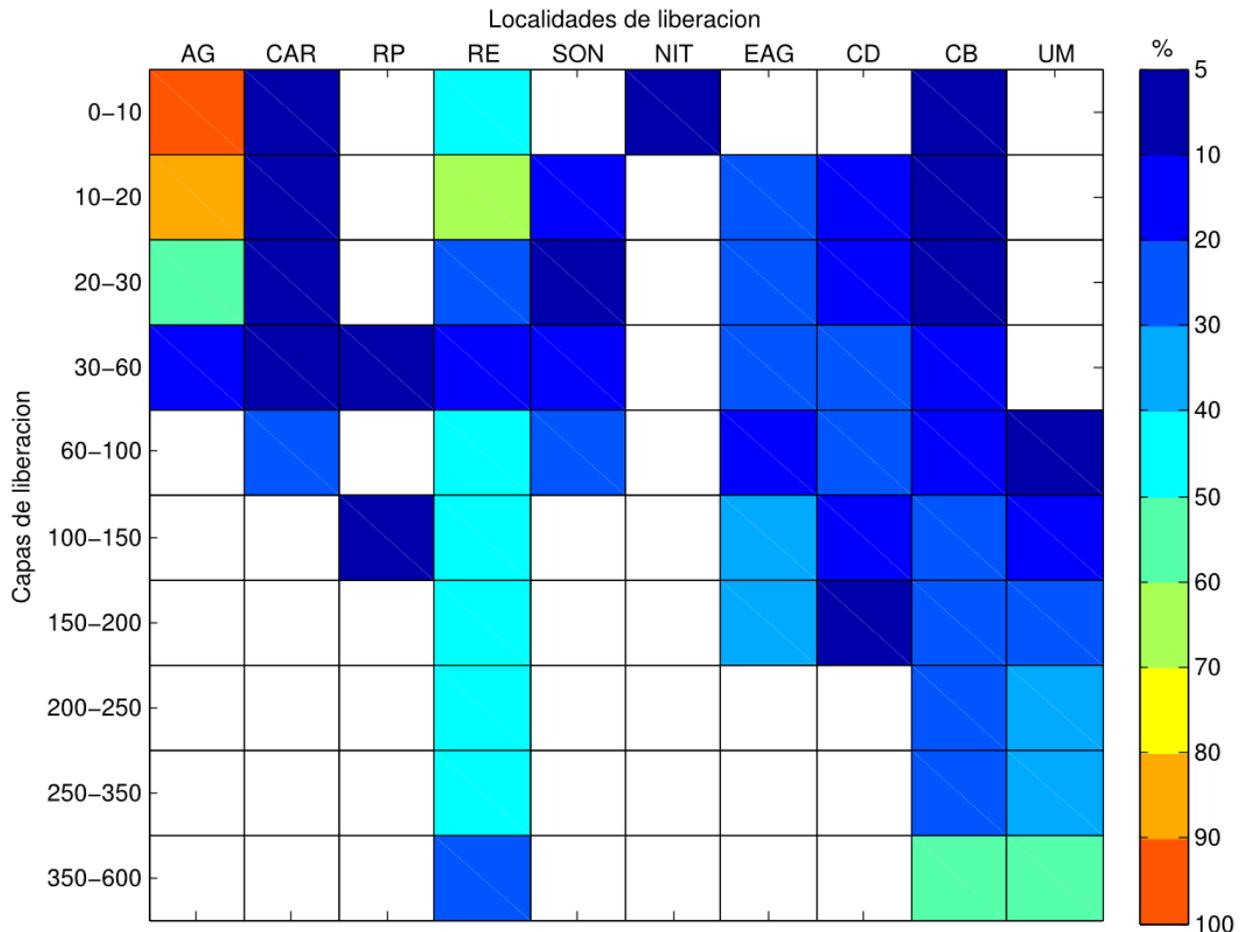


Figura 7. Matriz de retención, la cual muestra el porcentaje de partículas localizadas en la diagonal de las matrices de conectividad de cada capa de liberación. En esta matriz no contempla el 5% o menores porcentajes de partículas.

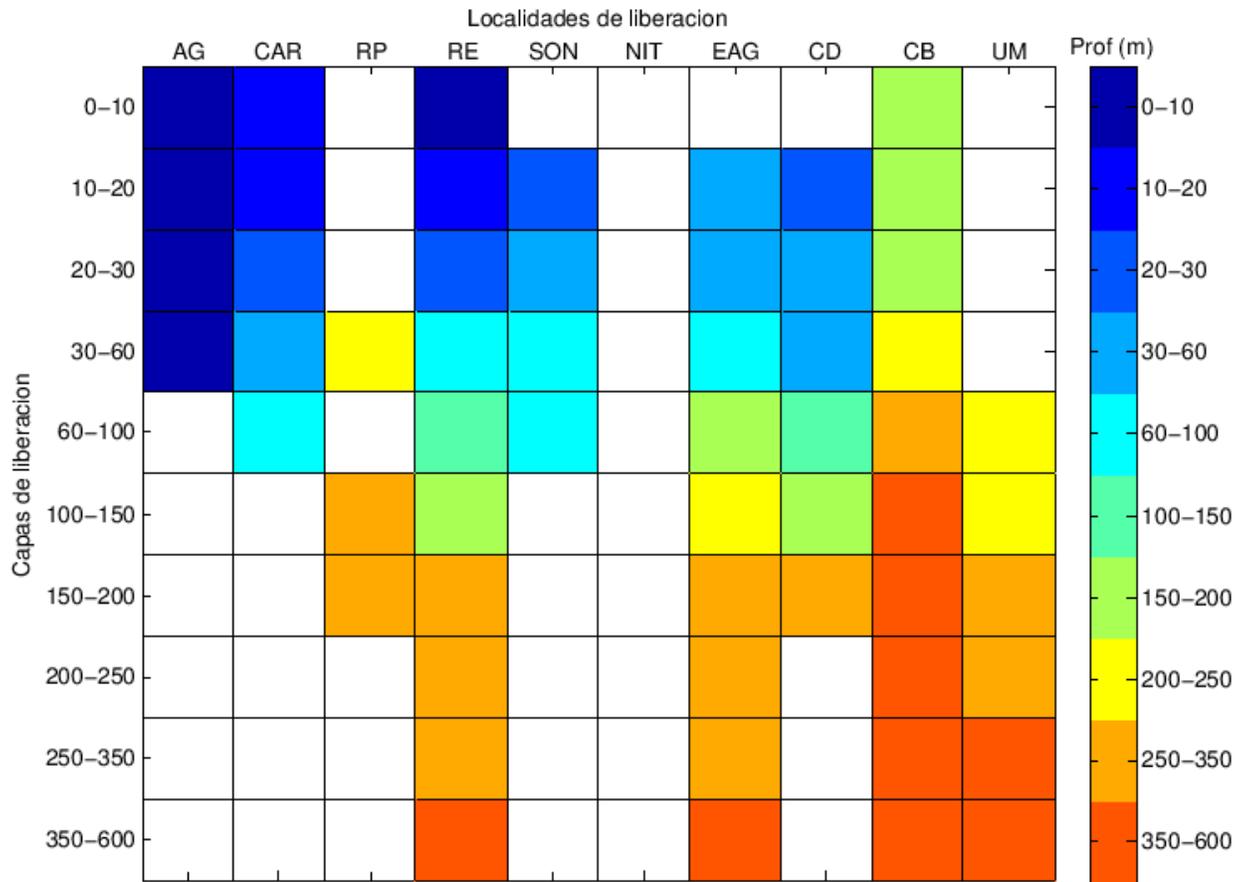


Figura 8. Matriz de profundidad promedio asociada a la matriz de retención, la cual muestra la capa en la que se encuentra la profundidad promedio del porcentaje de partículas localizadas en la diagonal de las matrices de conectividad de cada capa de liberación.

De las figuras 7 y 8 y con ayuda del patrón de dispersión de partículas a lo largo de las ocho semanas, destacamos cuatro casos distintos (Tabla 2). Los cuales describimos a continuación.

Tabla 2. Descripción de los diferentes casos de la matriz de retención.

Caso	Localidades	Descripción
1) Mayor retención	Alto Golfo (AG) Remolino Estacional (RE)	Áreas con mayor porcentaje de retención en la mayoría de sus capas de liberación
2) Zonas de transición	Norte de Isla Tiburón (NIT) Remolinos Peninsulares (RP) Umbrales (UM) Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional (CAR) Sonora (SON)	Localidades donde el mayor porcentaje de partículas escapan del área de liberación, debido a que la circulación transporta la mayoría de las partículas hacia otras áreas.
3) Áreas de retorno	Cuenca Delfín (CD) Ángel de la Guarda (EAG)	El porcentaje liberado de partículas sale y regresa al área de liberación.
4) Alta Variabilidad	Canal de Ballenas (CB)	Las partículas retenidas se ubicaron en profundidades mayores de las que fueron liberadas

1) Mayor retención

Alto Golfo (AG)

El Alto Golfo fue el área que presentó el mayor porcentaje de retención (>90%) en toda la zona de estudio concluidas las ocho semanas (Fig. 7). Este comportamiento fue más marcado en las dos primeras capas de dicha región, sin embargo en las capas restantes el porcentaje retenido fue menor al 60%. Esto lo relacionamos a que la corriente costera continental, la cual se dirige hacia el norte del golfo, restringe la salida de partículas (Santiago, 2013), así como a la presencia de corrientes de menor

intensidad y un giro anticiclónico (Fig. 3), lo que causan un atrapamiento de partículas por más de un mes (Marinone *et al.*, 2011; Marinone, 2012). Por otra parte, el mayor porcentaje de partículas retenido en las diferentes capas lo encontramos en la primera capa (Fig. 8), la cual corresponde al intervalo de la superficie libre y los diez metros.

Por otro lado observamos que un porcentaje menor al 5% de partículas salieron de AG, las cuales fueron atrapadas principalmente por el Remolino Estacional (RE), Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional (CAR) y los Remolinos Peninsulares (RP) (Fig. 9). El transporte de partículas hacia dichas localidades lo vinculamos a la presencia de corrientes de menor intensidad con dirección hacia el sur del área.

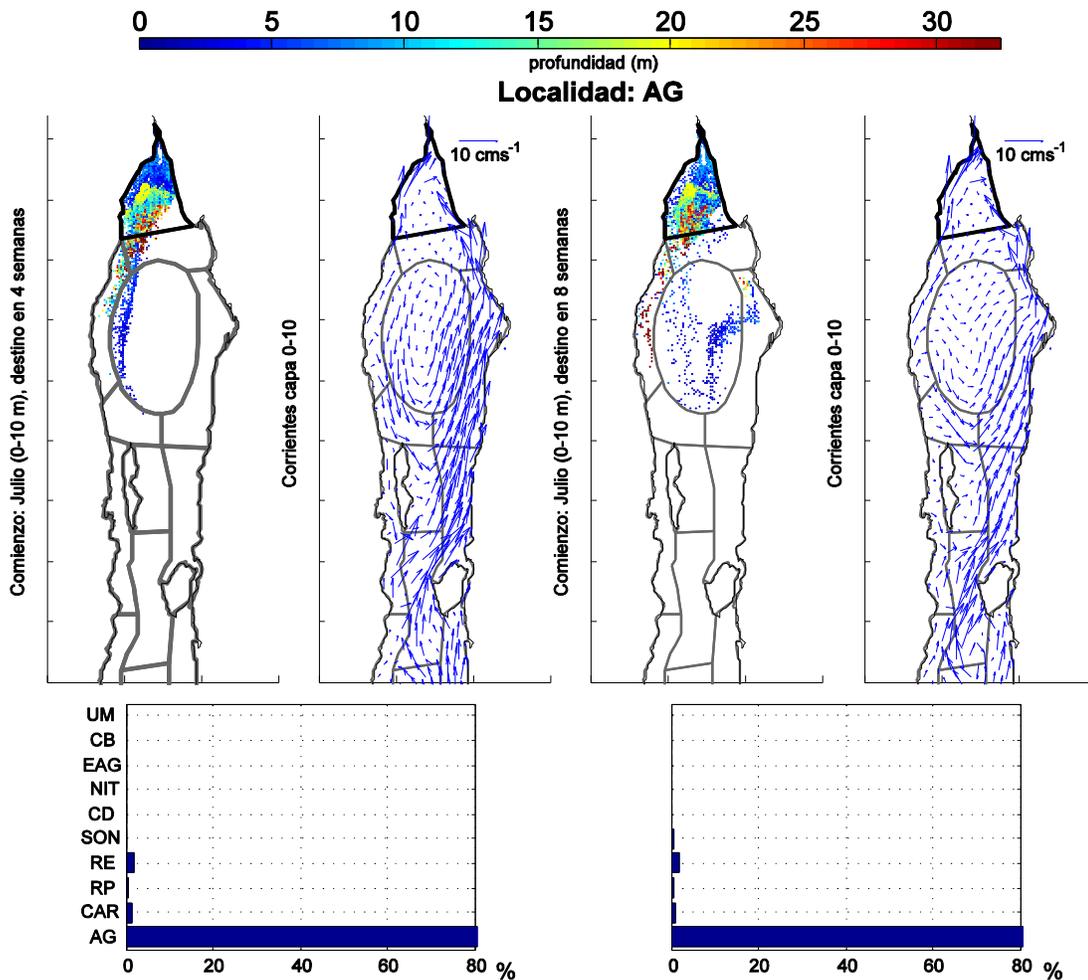


Figura 9. Mapa de posición final de partículas liberadas en la primera capa de la localidad del Alto Golfo, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

Remolino Estacional (RE)

Otra región que presentó un alto porcentaje de retención fue RE, ya que más del 40% de las partículas liberadas se quedaron atrapadas en esta zona (Fig. 7). El alto porcentaje de retención ocurrió debido a la presencia del remolino estacional ciclónico, que ocupa la mayor parte de la cabeza del golfo (Fig.3); el cual propició una zona de atrapamiento de partículas por períodos de hasta dos meses (Velasco y Marinone, 1999; Gutiérrez *et al.*, 2004).

En los histogramas de la figura 10 observamos que en la segunda capa (10-20 m) se retuvo entre el 60-70% de partículas, mientras que al concluir las ocho semanas

de advección las partículas no retenidas se dirigieron hacia el este y sur de RE, encontrándose principalmente en Sonora (SON) y Cuenca Delfín (CD). Este comportamiento se lo atribuimos a la interacción entre el remolino estacional y la corriente costera continental, que mantienen atrapadas la mayoría de las partículas entre la cabeza del golfo y en RE.

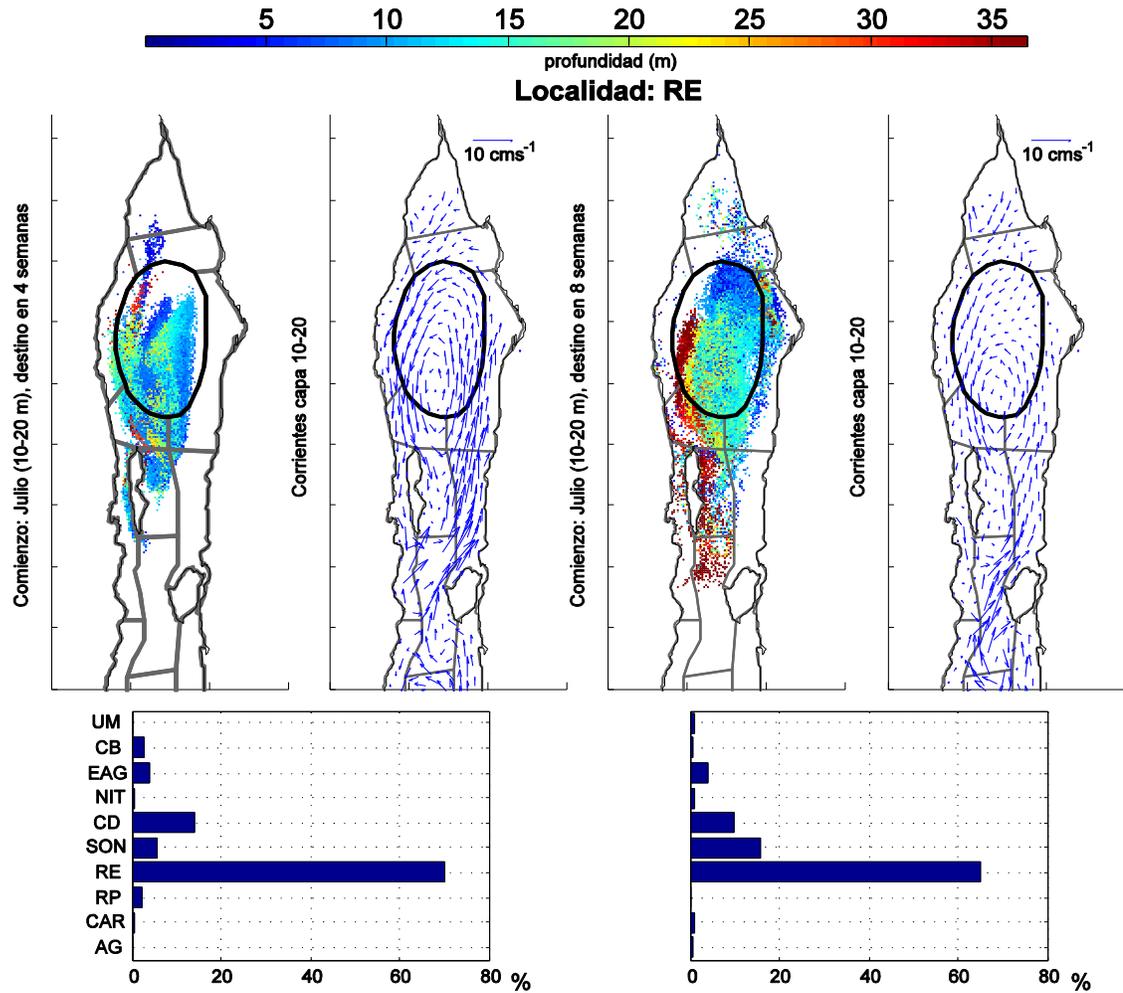


Figura 10. Mapa de posición final de partículas liberadas en la segunda capa de la localidad del Remolino Estacional, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

2) Zonas de transición

Norte de Isla Tiburón (NIT)

La región Norte de Isla Tiburón presentó porcentajes de retención menores al 5% en todas sus capas (Fig. 7). Este patrón lo encontramos fuertemente influenciado por la corriente costera continental con dirección hacia el norte del GC en toda la columna de agua (Fig. 11) y el incremento en la magnitud de dicho flujo, dicho aumento en la rapidez es provocado por la presencia de canales angostos así como cambios drásticos en la batimetría de la zona de las Grandes Islas (Gutiérrez *et al.*, 2004; Peguero-Icaza, 2011).

Sin embargo, la corriente que recorre en toda la columna de agua que corresponde a NIT fue parte de la corriente costera continental (Fig. 11), lo que trae como consecuencia que las partículas fueron transportadas hacia las áreas ubicadas al norte de NIT; como ejemplo, en los histogramas de la figura 12 observamos una mayor tendencia a dirigirse a el Remolino Estacional (RE) y los Remolinos Peninsulares (RP). Mientras que en los mapas de dispersión observamos que las partículas obedecen a la dirección que lleva la circulación ciclónica.

Por otro lado la corriente que recorre las grandes islas presentó flujos intensos y con dirección hacia el norte en capas superficiales, mientras que en capas más profundas se observó un cambio en la dirección del flujo, como observamos en la localidad de EAG (Fig. 11).

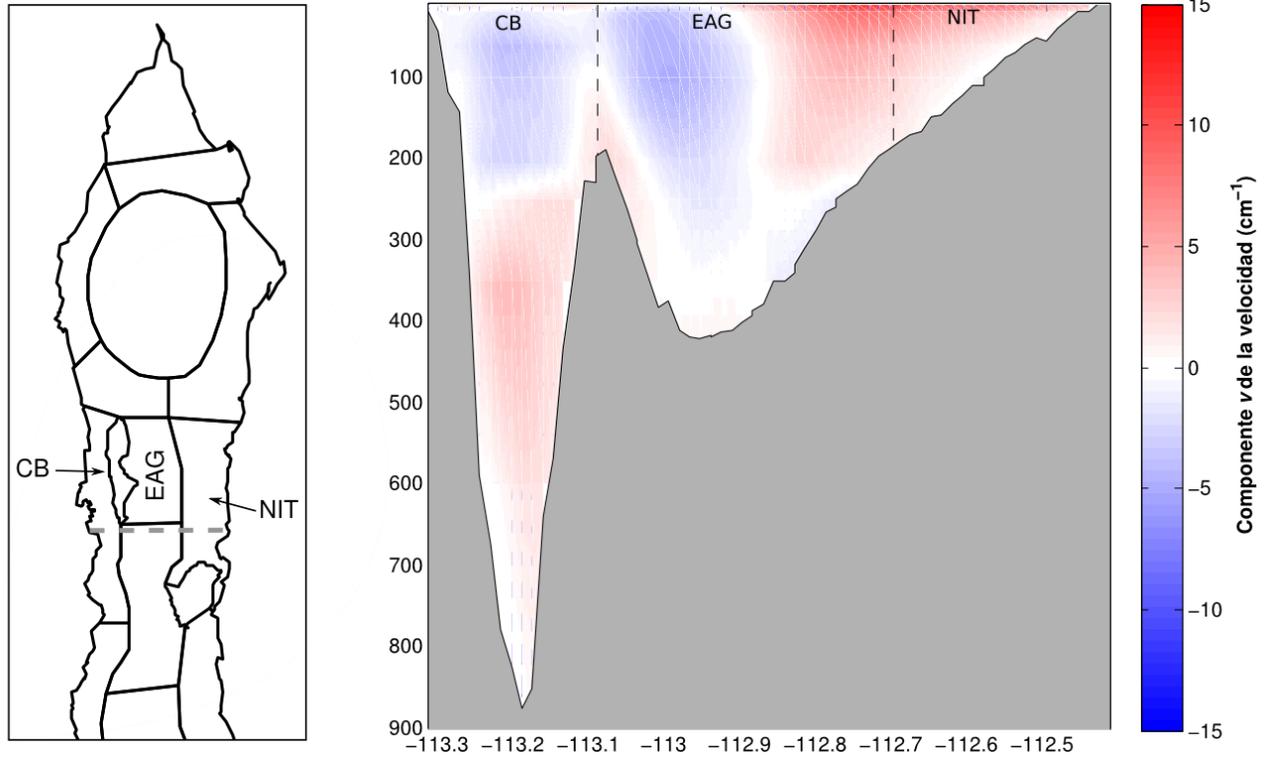


Figura 11. Corte vertical entre la zona de las Grandes Islas (línea quebrada de color gris). La barra de colores representa a las corrientes con dirección hacia el norte (rojo) y hacia el sur (azul).

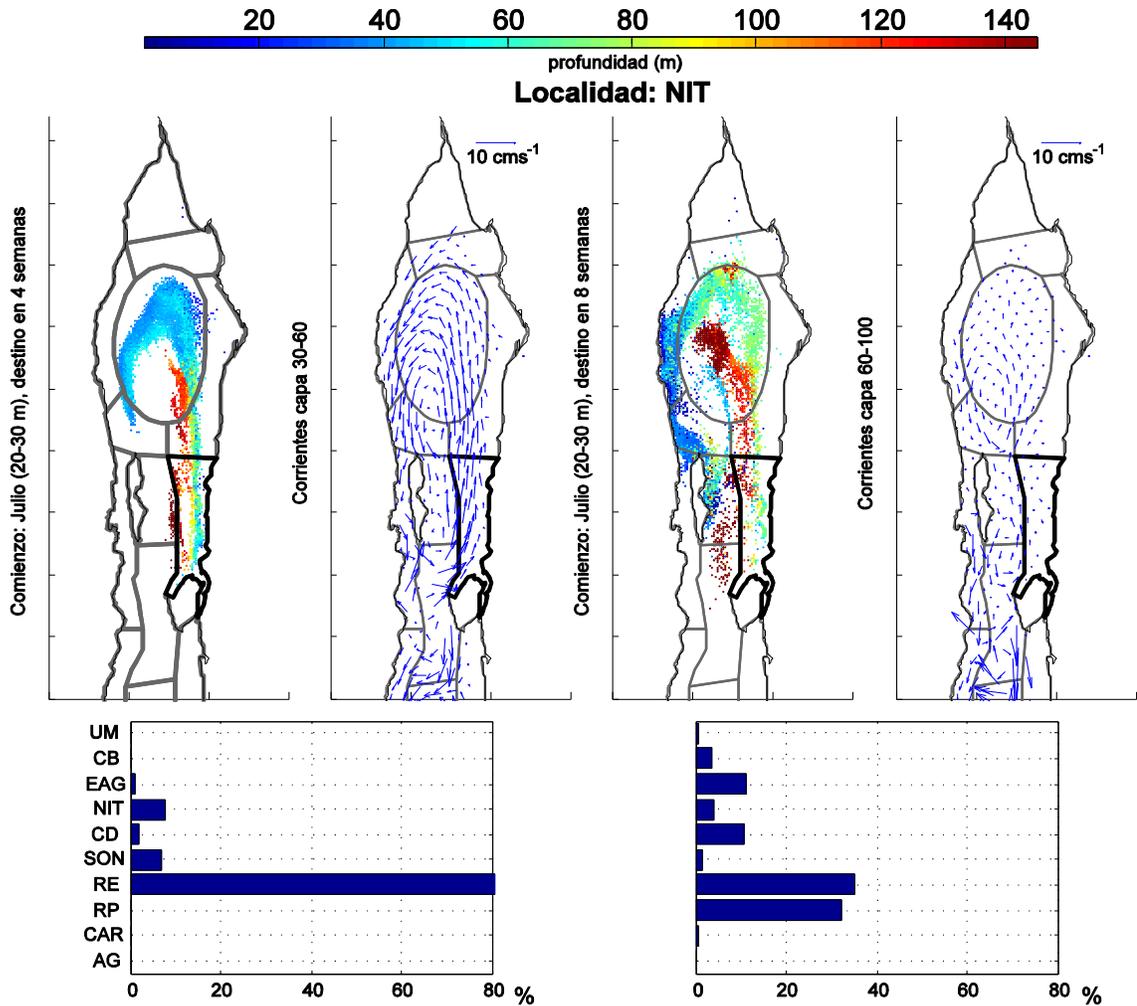


Figura 12. Mapa de posición final de partículas liberadas en la tercera capa de la localidad del Norte de Isla Tiburón, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

Remolinos Peninsulares (RP)

La localidad de los Remolinos Peninsulares presentó porcentajes de retención menores al 10% en todas sus capas (Fig. 7), por lo cual lo clasificamos como una zona de transición. Este patrón fue debido a que RP estuvo en contacto con la región oeste del remolino estacional (Fig. 13), donde encontramos corrientes con dirección hacia el sur entre los 20 y 70 metros (color azul) lo que propició transporte de partículas hacia el sur del golfo.

Por otro lado, es importante mencionar que al norte de la Isla Ángel de la Guarda se forma una bifurcación en la región suroeste del giro ciclónico, la cual crea una

corriente que entra en Canal de Ballenas (CB) y otra sigue la misma dirección del remolino (Fig. 3). Como consecuencia de ello, encontramos que las partículas que salieron de RP se dirigieron hacia el sur del golfo por CB, en esta localidad fue donde se ubicaron la mayoría de las partículas liberadas a profundidades mayores a los 150m (Fig. 14). Al cabo de la octava semana de advección, las partículas son alcanzadas por la corriente costera continental, y de esta forma regresaron a localidades ubicadas al norte de la zona de las Grandes Islas. Este comportamiento fue muy similar al reportado por Marinone *et al.* (2008), quienes liberaron partículas por el lado de la península de Baja California y estas regresaron al norte del golfo por el lado este del giro ciclónico; así como los estudios Lagrangianos realizados por Marinone *et al.* (2011), donde mostraron que las partículas ubicadas en la costa peninsular son arrastradas hacia el norte del golfo hacia la costa continental. Sin embargo, estos resultados sólo fueron superficiales y al compararlos con los nuestros para capas mayores a los 60m de profundidad, presentan un comportamiento similar.

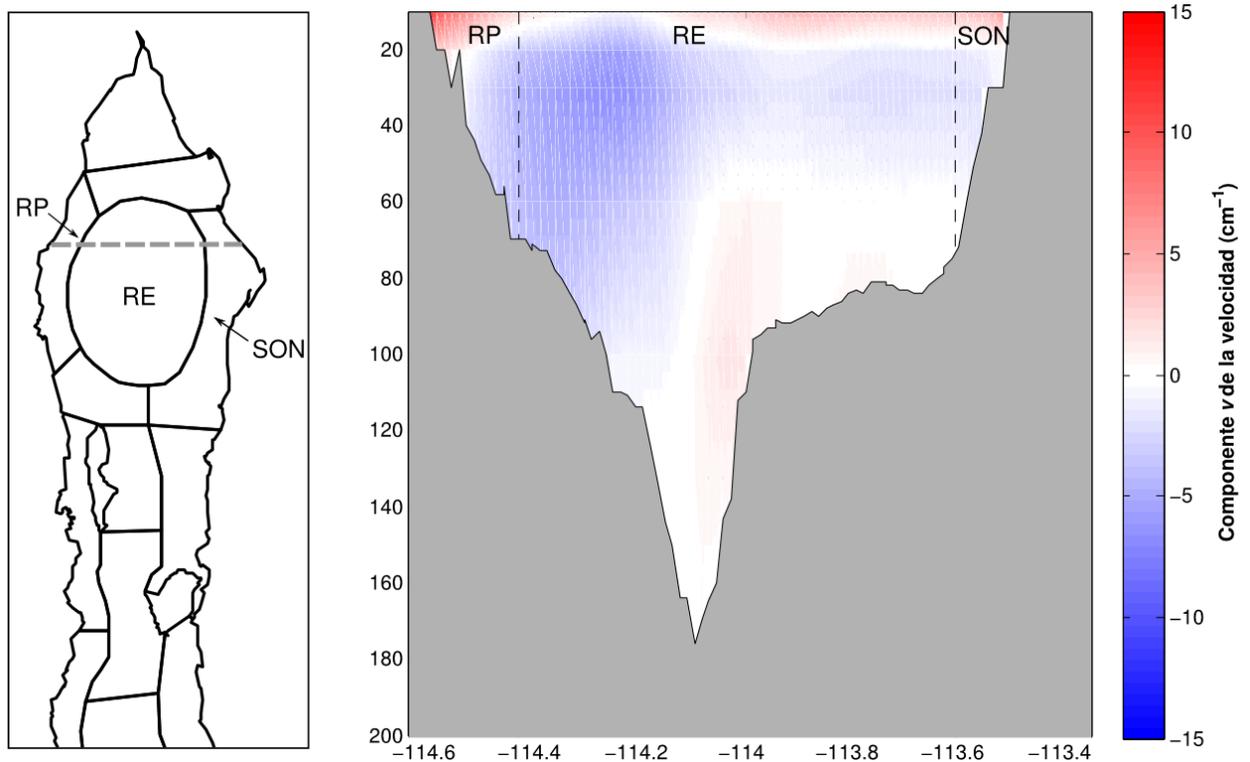


Figura 13. Corte vertical del norte del GC (línea quebrada de color gris). La barra de colores representa a las corrientes con dirección hacia el norte (rojo) y hacia el sur (azul).

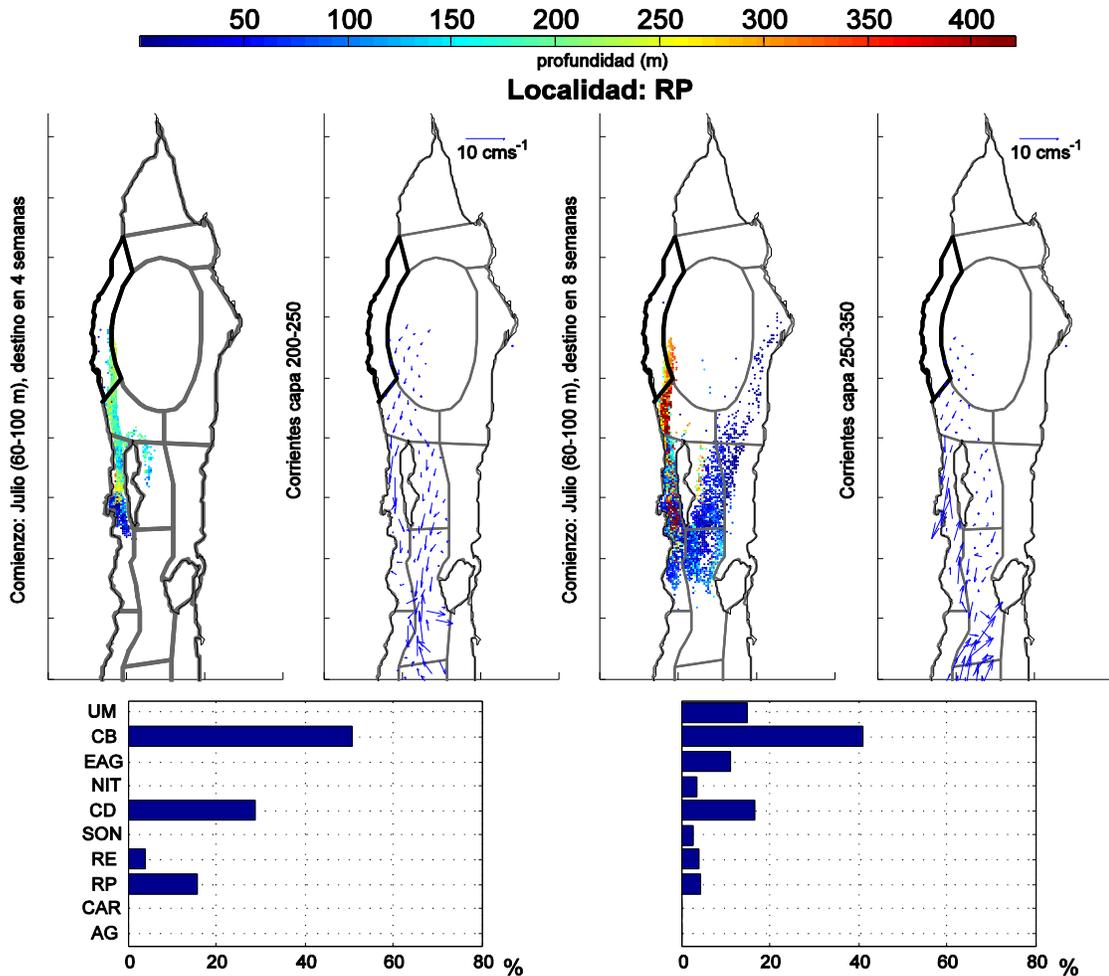


Figura 14. Mapa de posición final de partículas liberadas en la cuarta capa de la localidad de los Remolinos Peninsulares, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

Umbrales (UM)

La región de los Umbrales presentó un aumento gradual en la retención de las partículas con respecto a la profundidad. En las capas superficiales (0-60 metros) la retención fue menor al 5%, mientras que en capas de mayor profundidad (60-600 m) se retuvo ~60% de partículas (Fig. 7). Santiago (2013) mencionó que esta localidad fue una de las provincias que registró un alto porcentaje de retención (>30%); sin embargo, este resultado fue integrado en la vertical, lo cual no permitió observar la diferencia entre los distintos porcentajes de retención de cada una de las capas de UM.

Este comportamiento que obtuvimos fue un reflejo de un flujo predominante hacia el norte con un decaimiento de la velocidad en la vertical (Fig. 15), y su interacción con la batimetría. Tal patrón es consistente con la figura 16, donde se muestra que las partículas liberadas en la superficie son transportadas hacia la cabeza del golfo por la corriente costera continental. En cambio, las partículas liberadas en zonas de mayor profundidad presentaron una bifurcación vertical al interaccionar con la batimetría, lo que generó dos patrones de transporte de partículas. El primero con un flujo de partículas predominante hacia el fondo, donde la magnitud de las corrientes son menores ($<5 \text{ cm s}^{-1}$), lo que dio lugar a una mayor retención (Fig.17). El segundo patrón de transporte, mostró un flujo con un bajo porcentaje de partículas hacia la superficie, las cuales fueron arrastradas hacia el norte.

Cabe mencionar que esta área es la que conecta la parte norte del GC con la parte sur, por lo que presentó transporte de partículas hacia la cabeza del golfo como al sur (Fig. 16 y 17).

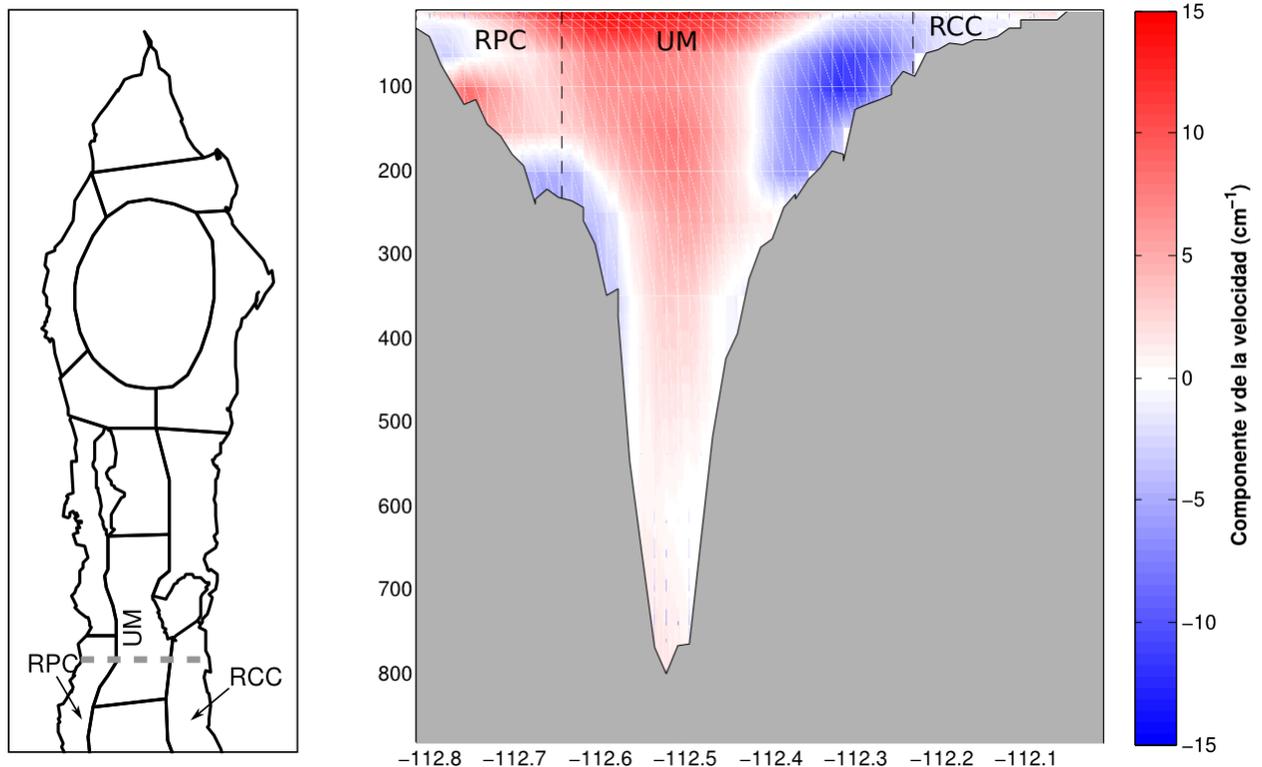


Fig. 15. Corte vertical de la región de los Umbrales (línea quebrada de color gris). La barra de color muestra la magnitud de la componente norte- sur de la velocidad.

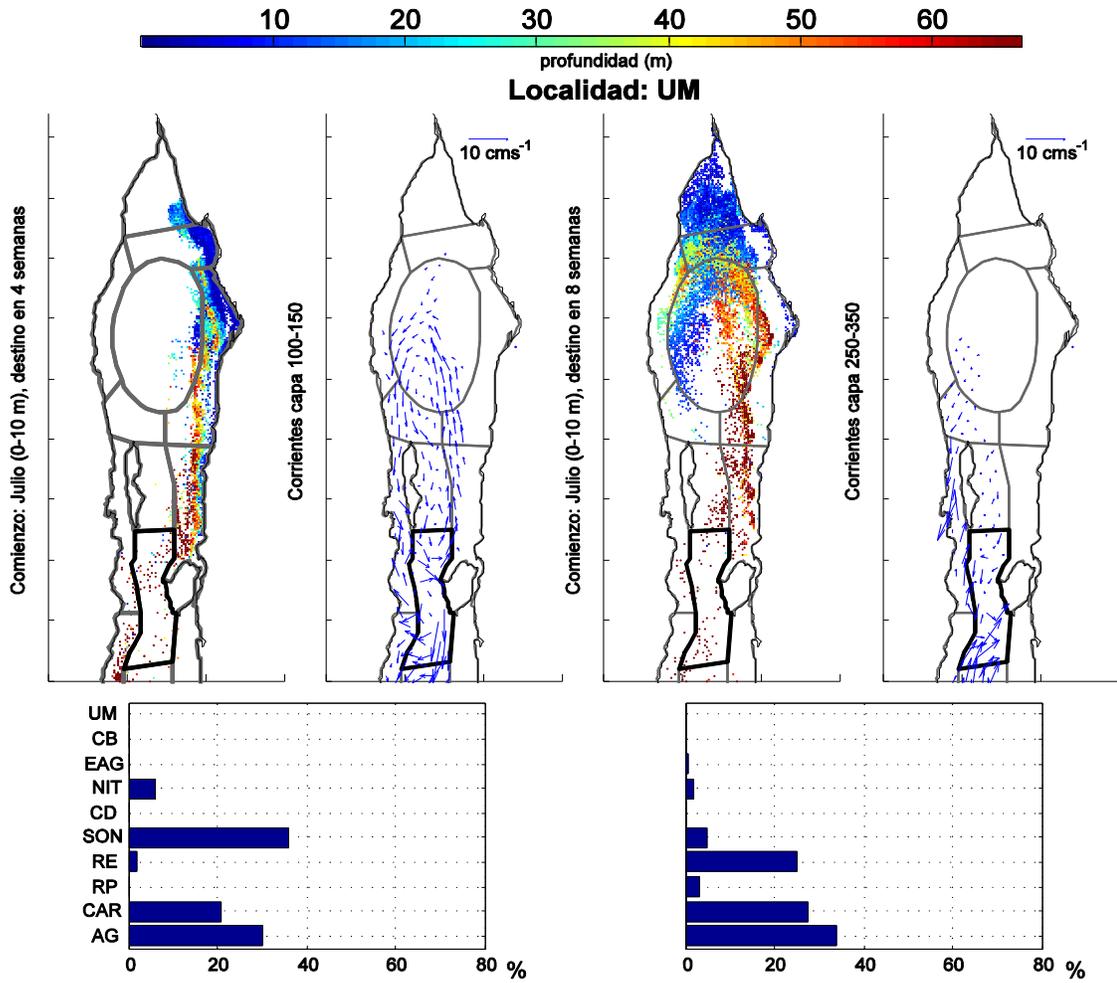


Figura 16. Mapa de posición final de partículas liberadas en la primera capa de la localidad de los Umbrales, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

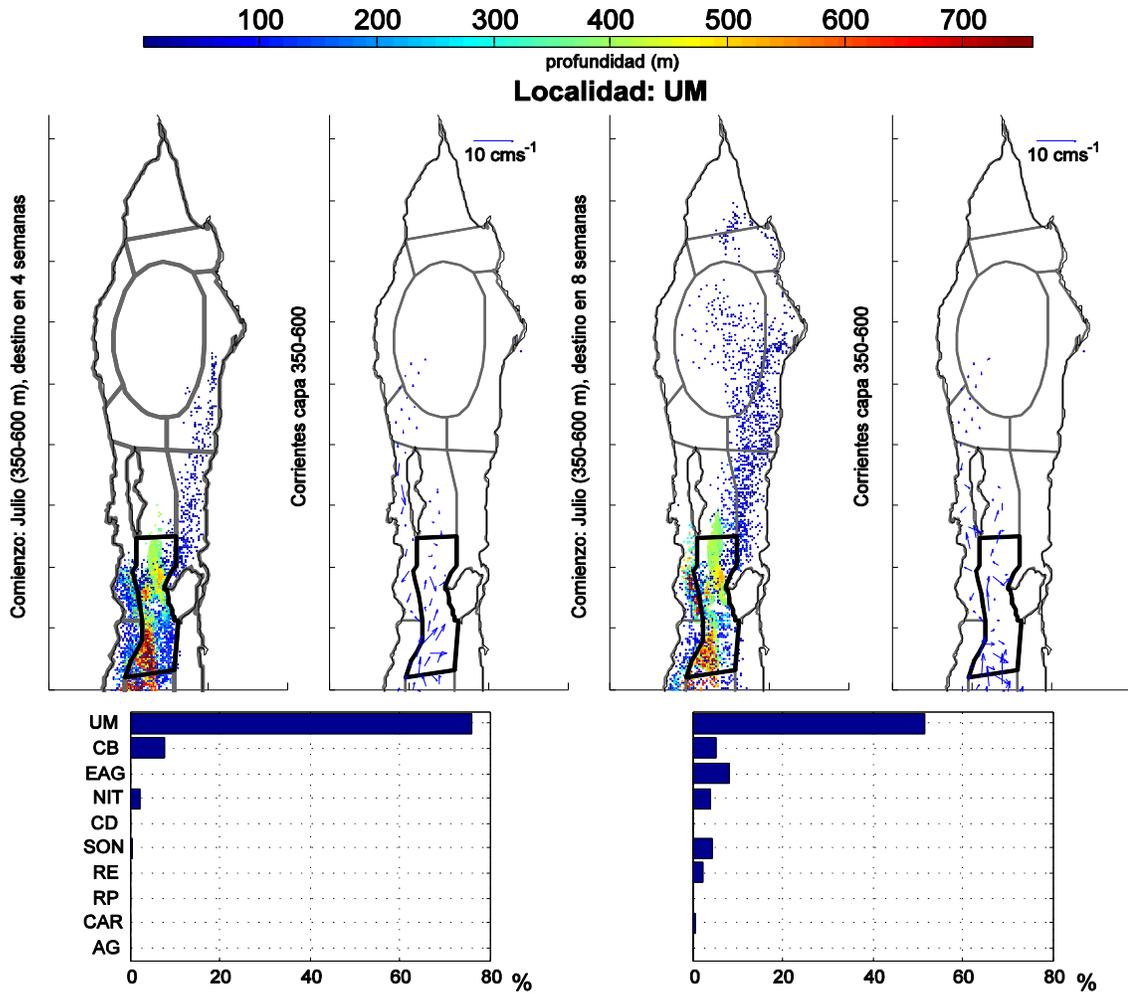


Figura 17. Mapa de posición final de partículas liberadas en la décima capa de la localidad de los Umbrales, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional (CAR) y Sonora (SON)

La localidades de CAR y SON presentaron porcentajes bajos de retención (~15%) en la mayoría de sus capas (0-60 m; fig. 7), esto debido a que la mayoría de las partículas son transportadas hacia otras provincias por el remolino ciclónico y la corriente costera continental (Fig. 18 y 19).

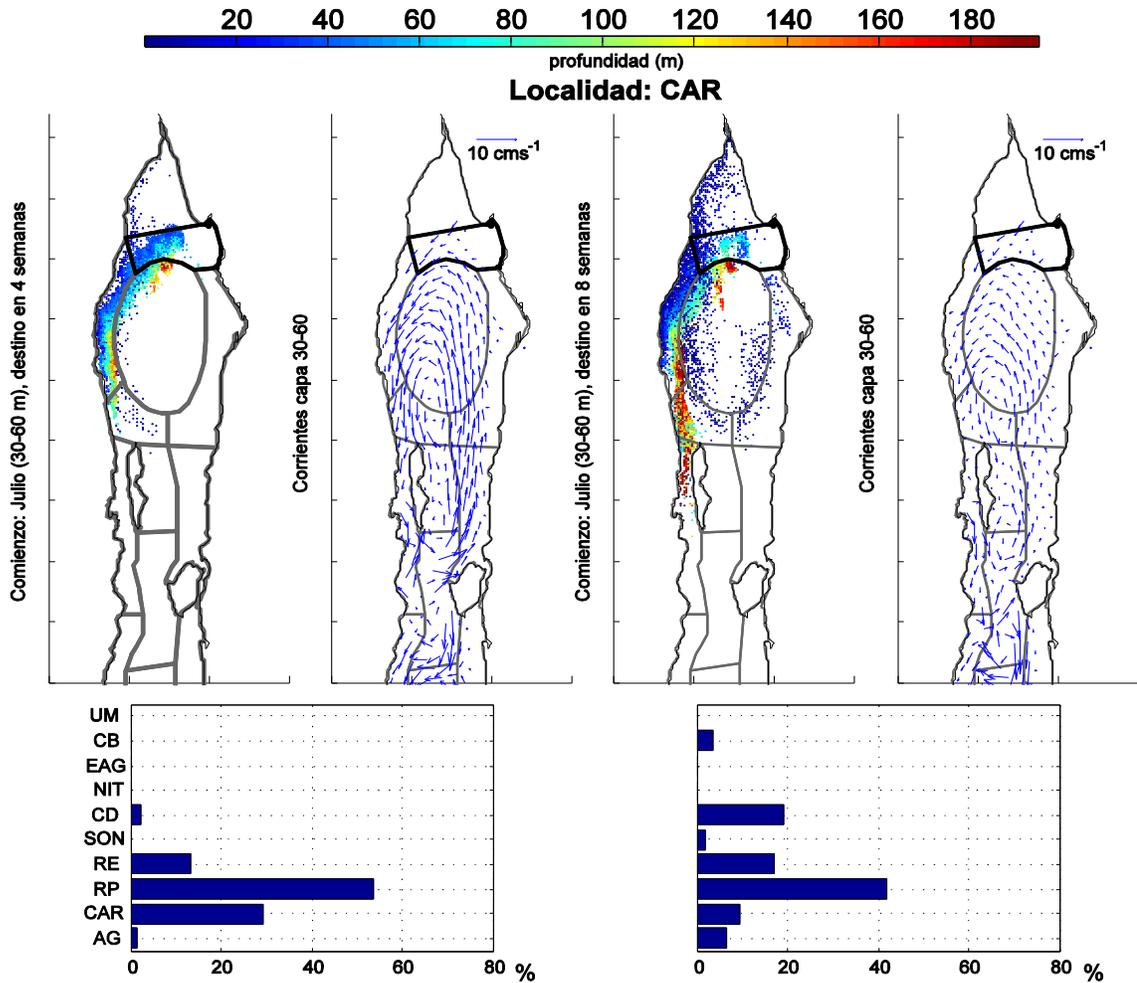


Figura 18. Mapa de posición final de partículas liberadas en la cuarta capa de la localidad del Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

La localidad SON se caracteriza por presentar fuertes corrientes estacionales ($>10\text{cm s}^{-1}$; Marinone 2012), por lo que el poco porcentaje de partículas retenidas en esta localidad se debió a que la mayoría de las partículas fueron arrastradas por la corriente costera continental para después ser interceptadas por el remolino estacional. Esto provocó a la cuarta semana de advección la mayoría de las partículas se encontraran en RE, mientras que a la octava semana se observó más dispersión en las partículas y se dirigieran a RE, RP y CD, entre otras localidades (Fig. 19).

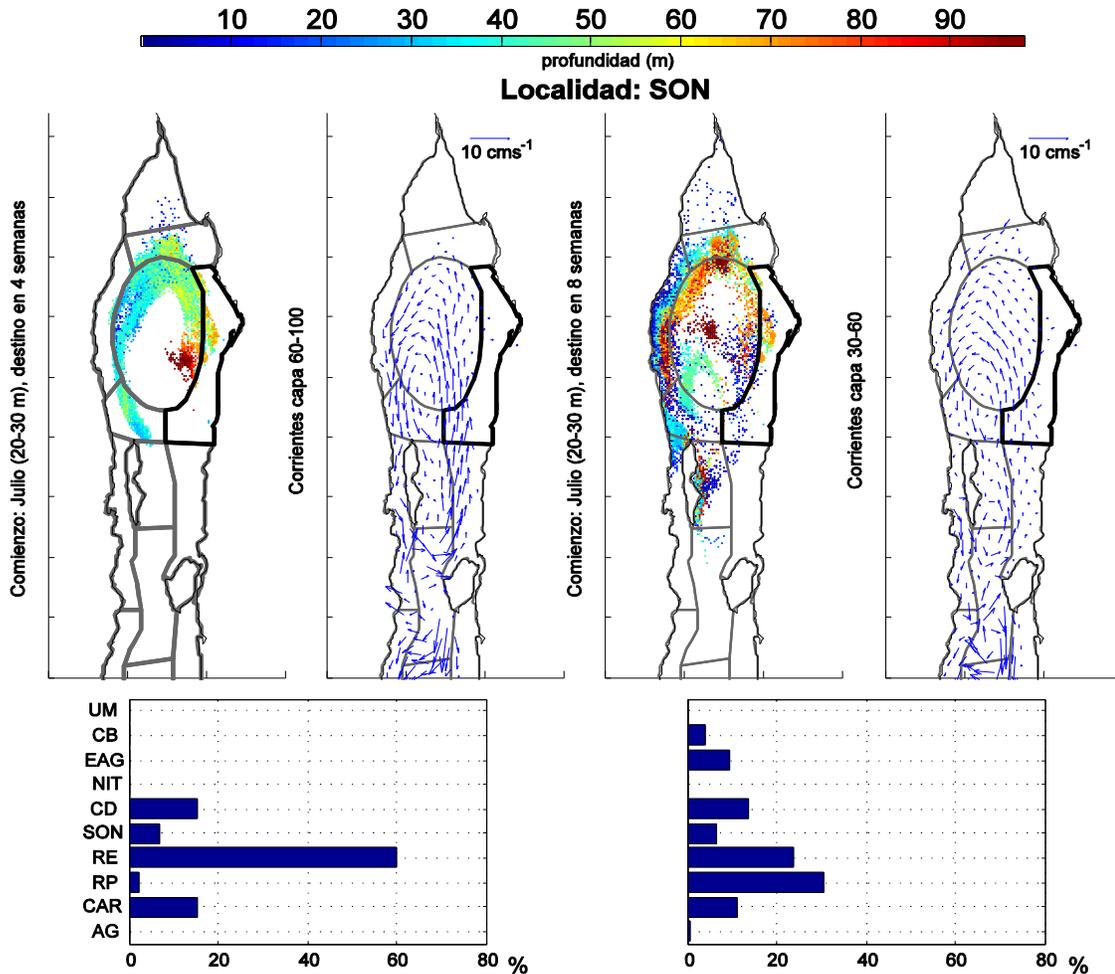


Figura 19. Mapa de posición final de partículas liberadas en la tercera capa de la localidad del Sonora, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

3) Áreas de retorno

Ángel de La Guarda (EAG) y Cuenca Delfín (CD)

EAG y CD las clasificamos como zonas de retorno debido a que las partículas liberadas salieron de la localidad y regresaron a la zona donde fueron sembradas. En el caso de CD las partículas se dirigieron hacia la corriente que entra en Canal de Ballenas (CB), con dirección hacia el sur del golfo, sin embargo al término de la isla Ángel de la Guarda las partículas se incorporaron a la corriente con dirección hacia la cabeza del golfo (Fig. 19). De esta manera las partículas a la octava semana regresaron al área de liberación, como se muestra en los histogramas.

Por otro lado, la corriente que predominó en EAG fue la corriente costera continental, la cual se dirigió hacia la cabeza del golfo y se incorporó al remolino ciclónico. Este patrón provocó el retorno de las partículas a EAG al término de las ocho semanas, esto se apreció claramente en los histogramas y los mapas de dispersión de la figura 20.

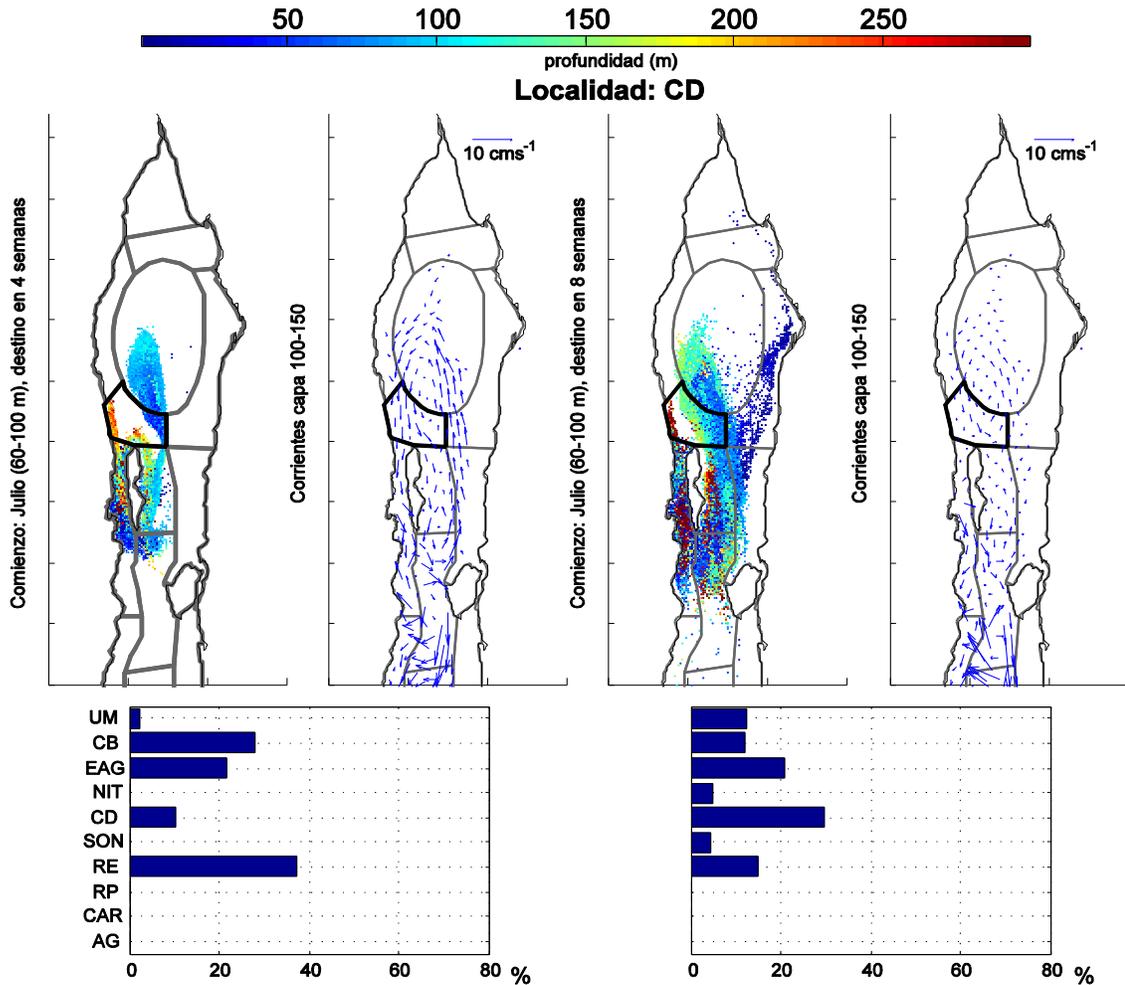


Figura 19. Mapa de posición final de partículas liberadas en la quinta capa de la localidad del Cuenca Delfin, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

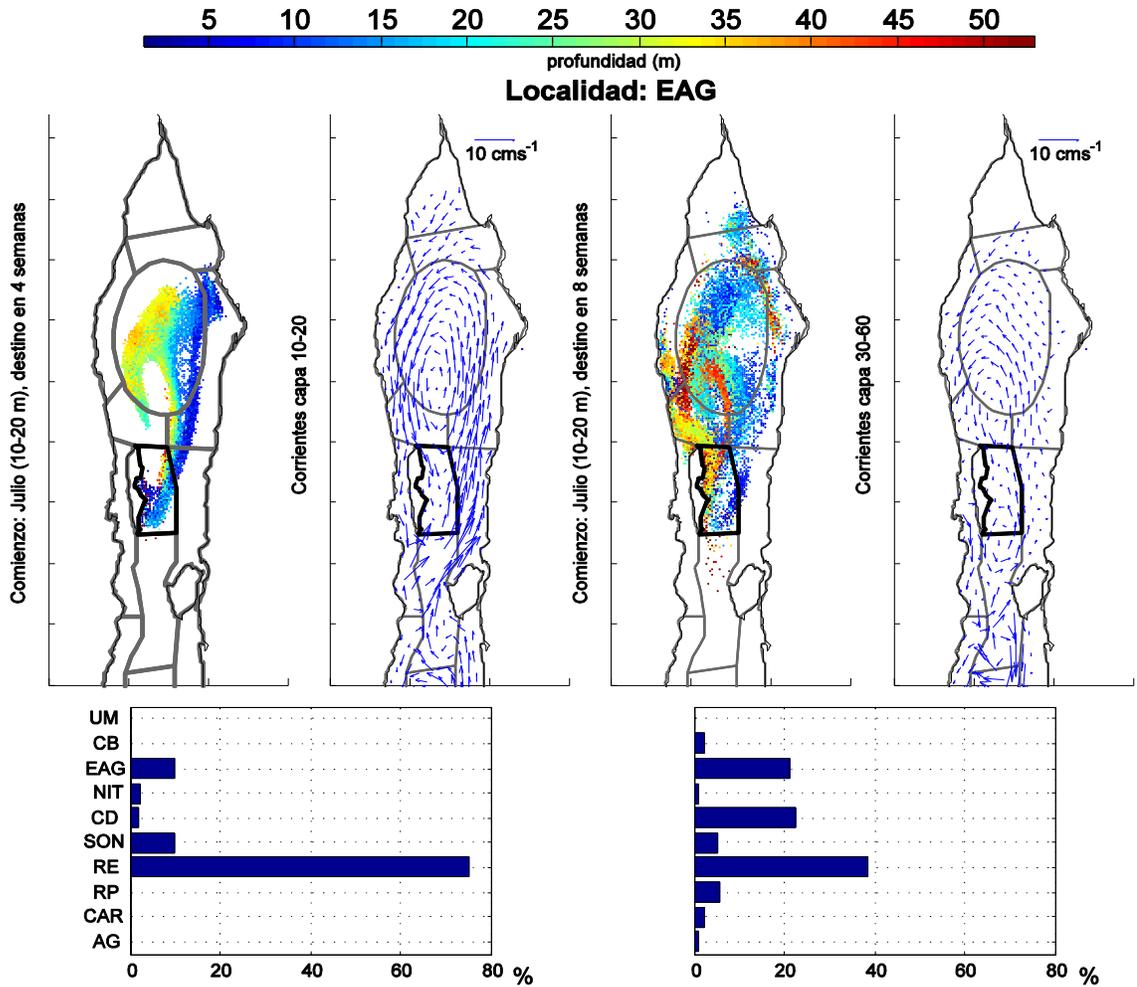


Figura 20. Mapa de posición final de partículas liberadas en la segunda capa de la localidad del Ángel de La Guarda, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

4) Alta variabilidad

Canal de Ballenas (CB)

El área Canal de Ballenas presentó un aumento gradual en cuanto a su porcentaje de retención (del 5% hasta 60%) con respecto a la profundidad (Fig. 7). El porcentaje retenido se encontró en zonas más profundas de las que fueron liberadas las partículas (Fig.8). Tal es el caso de las partículas liberadas en la primera capa (0-10m), que al término de la octava semana las ubicamos entre los 150-200 m de profundidad. Este comportamiento lo atribuimos a una mayor divergencia entre los 0-150m de profundidad frente a Bahía de los Ángeles y al sur de la isla Ángel de la

Guarda. Por continuidad la divergencia positiva generó un ascenso de agua alrededor de los 300 m, lo que fue consistente con una convergencia de agua en esa profundidad (Fig. 21), la cual generó flujos verticales. Esto fue reportado por López *et al.* (2006,2008) y reproducida por el modelo HAMSOM por Marinone (2008). La retención de partículas dentro de CB se asoció a la presencia de flujos débiles y remolinos pequeños en la columna de agua, tal como fue mencionado por Marinone *et al.* (2011) y Santiago (2013).

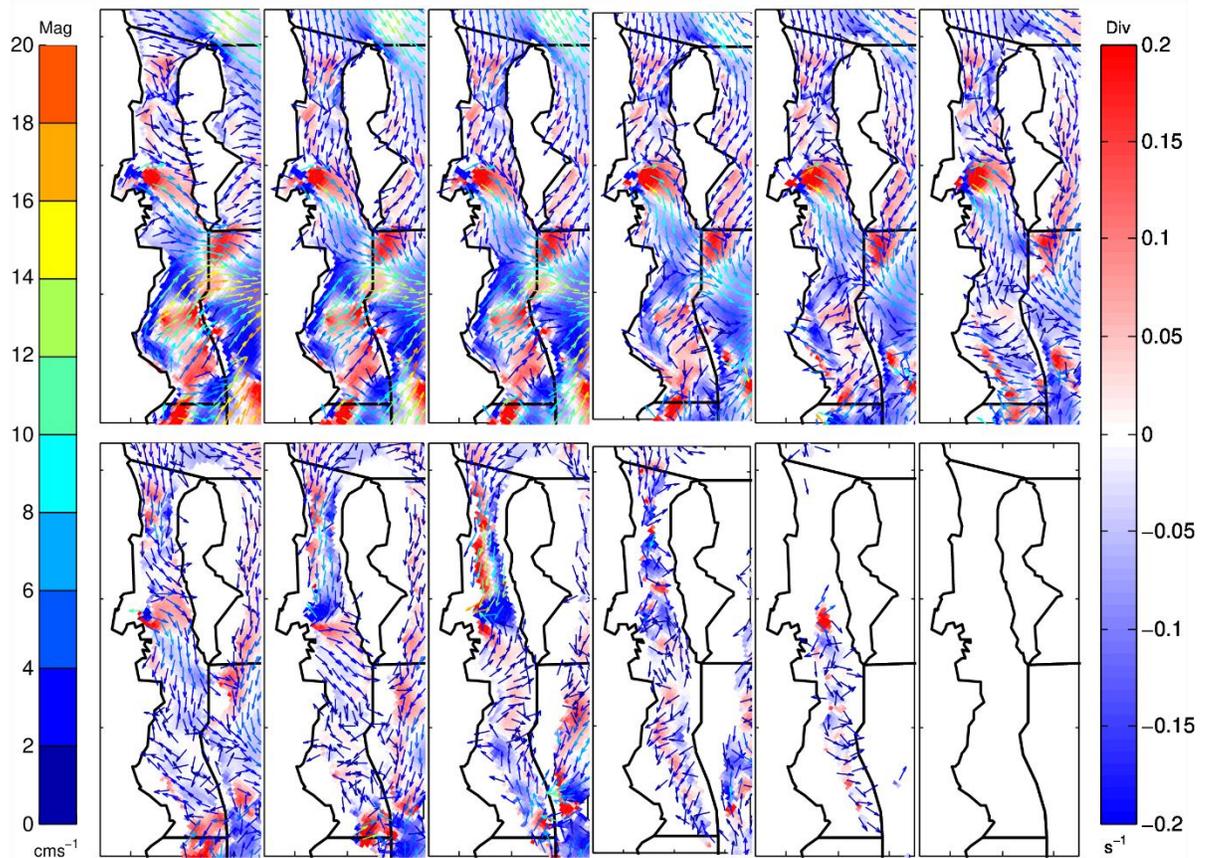


Figura 21. Divergencia asociada al campo de corrientes para las diferentes capas de la localidad del Canal de Ballenas. Las áreas de liberación están delineada con color negro. La barra de colores de la derecha representa la magnitud del campo de corrientes y la barra de colores de la izquierda muestra los valores de la divergencia (rojo) y convergencia (azul).

La figura 22, muestra el mapa de posición final de las partículas liberadas en Canal de Ballenas, en la segunda capa de liberación (10-20 m). En este mapa se observó que el mayor porcentaje de partículas no retenido se dirigió principalmente hacia SON y RE, al cabo de las cuatro semanas. Mientras que a la octava semana las partículas liberadas se dispersaron en las localidades que componen la zona de estudio, como se aprecia en el histograma de la figura 22.

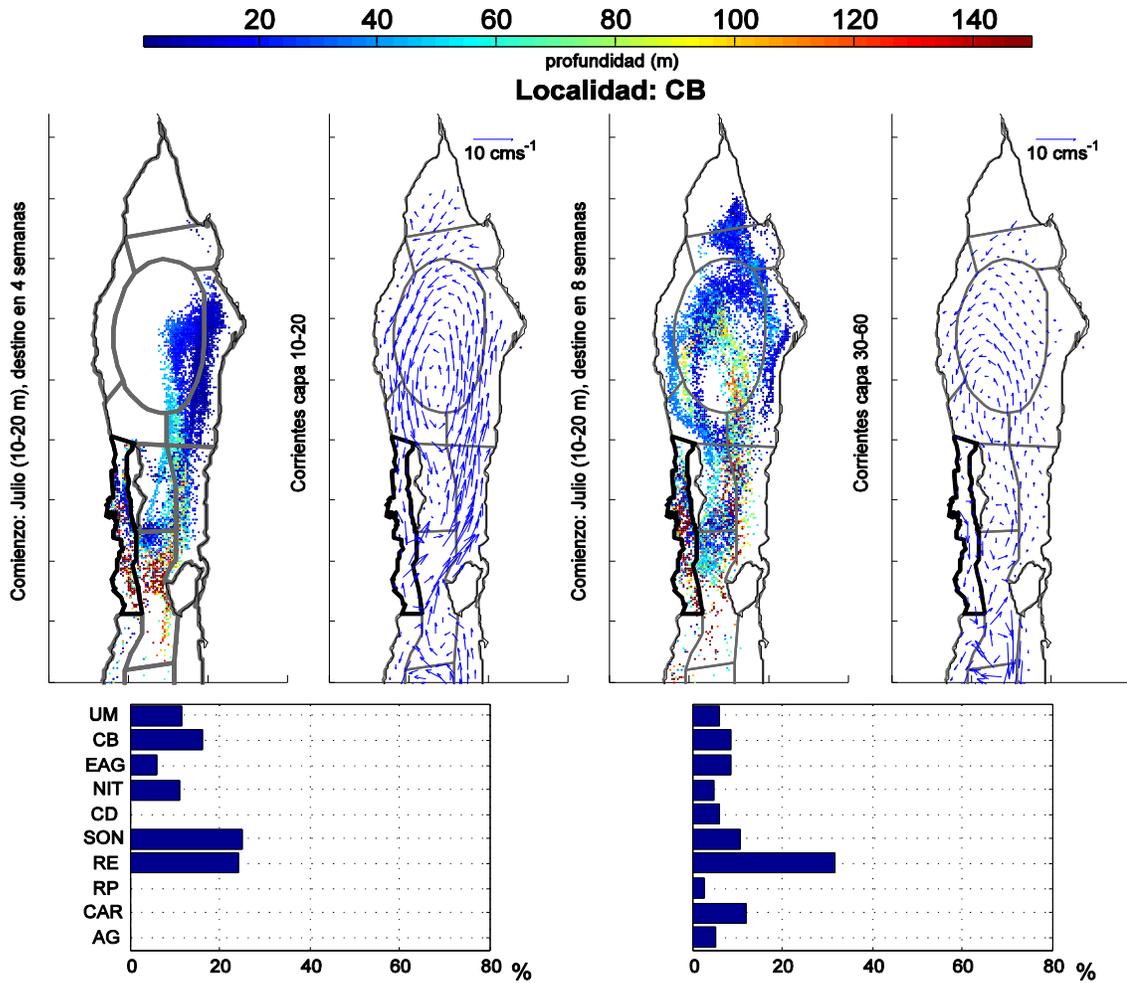


Figura 22. Mapa de posición final de partículas liberadas en la segunda capa de la localidad del Canal de Ballenas, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el porcentaje de partículas retenidas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

3.2.2. Matriz máxima captación.

Creamos una matriz de máxima captación con la finalidad de mostrar la región que atrapó el mayor porcentaje de partículas liberadas por cualquier área del NGC (Fig. 23). Esta matriz se compone de la celda que presentó el mayor porcentaje de partículas de cada renglón que conforma la matriz de conectividad, sin tomar en cuenta los valores ubicados en la diagonal. Por lo tanto a cada celda de esta matriz, le añadimos un índice que representa la localidad con la que tuvo el mayor porcentaje de conectividad. Por ejemplo, RE fue la localidad que atrapó el mayor porcentaje de las partículas liberadas en la capa superficial del NGC. Esto podemos observarlo en

el primer renglón de la matriz de máxima retención (Fig. 23), donde 5 de las 10 áreas de liberación terminan en RE. Como complemento de la matriz de máxima captación, adicionamos una matriz donde se muestra la capa en la que se localiza la profundidad promedio transcurridas las ocho semanas (Fig. 24).

En la matriz de máxima captación destacamos cuatro casos significativos, los cuales separamos en dos matrices para una mejor visualización (Fig. 23).

Caso 1 (Fig. 23a; línea naranja): Este caso muestra que el mayor porcentaje de las partículas liberadas por RE (>30%) se encontraron en la localidad de Cuenca Delfín (CD) a profundidades mayores de las liberadas (Fig. 23). Este patrón de dispersión fue debido a que durante julio y agosto el centro del remolino se ubicó entre las áreas de RE y CD (Fig. 3). Debido a que es un remolino ciclónico, este generó un mayor transporte hacia CD, donde encontramos corrientes de menor intensidad y con dirección al centro del remolino (Fig. 24). Este patrón es consistente entre los 30 y 600 m de profundidad.

Caso 2 (Fig. 23a; línea quebrada naranja): El mayor porcentaje de partículas (~20-40%) liberadas en las diferentes capas de Canal de Ballenas (CB) se dirigieron hacia la cuarta capa (30-60 m) de RE (Fig. 24). Este proceso podríamos asociarlo a la presencia de surgencias (Fig. 22), donde las partículas liberadas en capas profundas escapan por capas menos profundas (López *et al.*, 2006; Marinone, 2008) donde son arrastradas por la corriente costera continental.

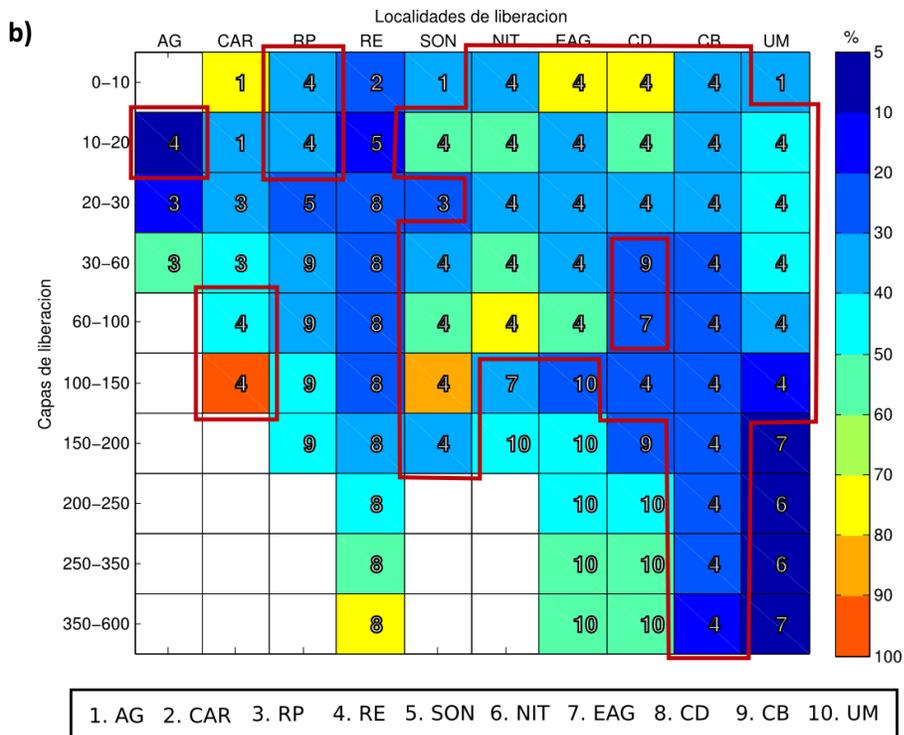
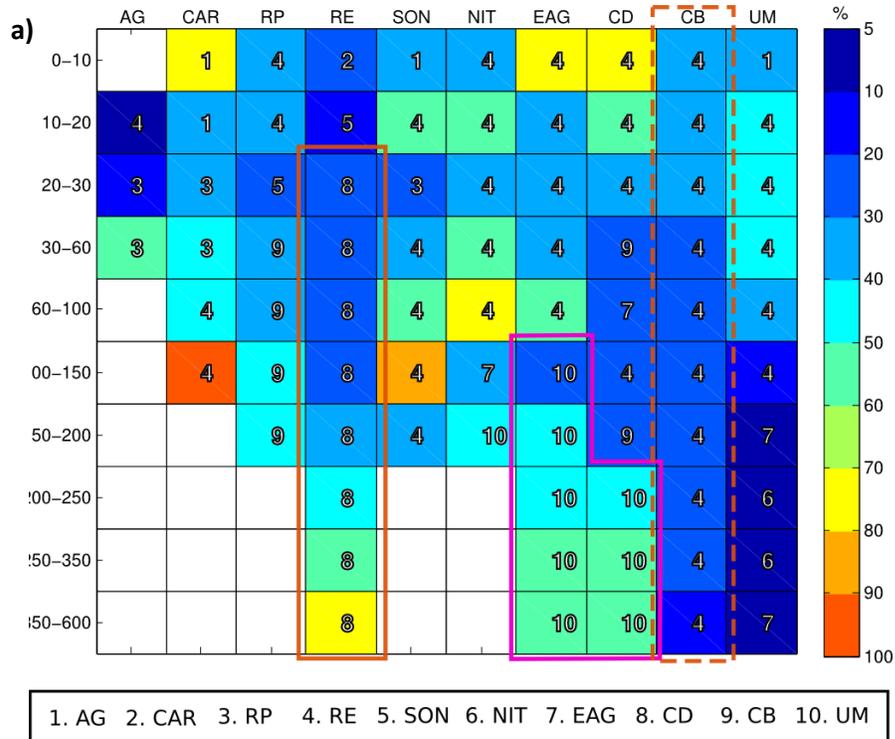


Figura 23. Matriz de máxima captación, en ella se muestra las celdas que presentaron el mayor porcentaje de partículas de cada renglón que conforma la matriz de conectividad. Los dígitos corresponden a la región que captó dicho porcentaje. No se toma la diagonal de la matriz. .

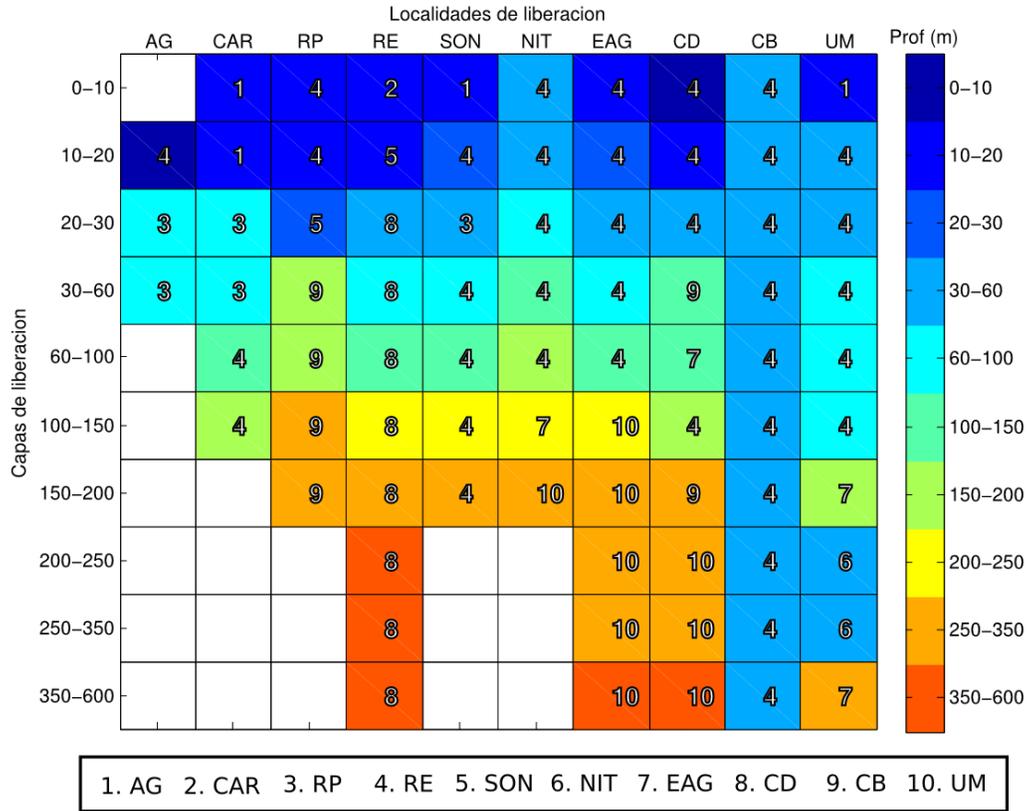


Figura 24. Matriz de profundidad promedio asociada a la matriz de máxima captación, la cual muestra la profundidad promedio del máximo porcentaje de partículas atrapadas por las diferentes localidades del NGC. Estas localidades se representan con un dígito del 1 al 10, se presentan en el recuadro ubicado en la parte inferior de la figura.

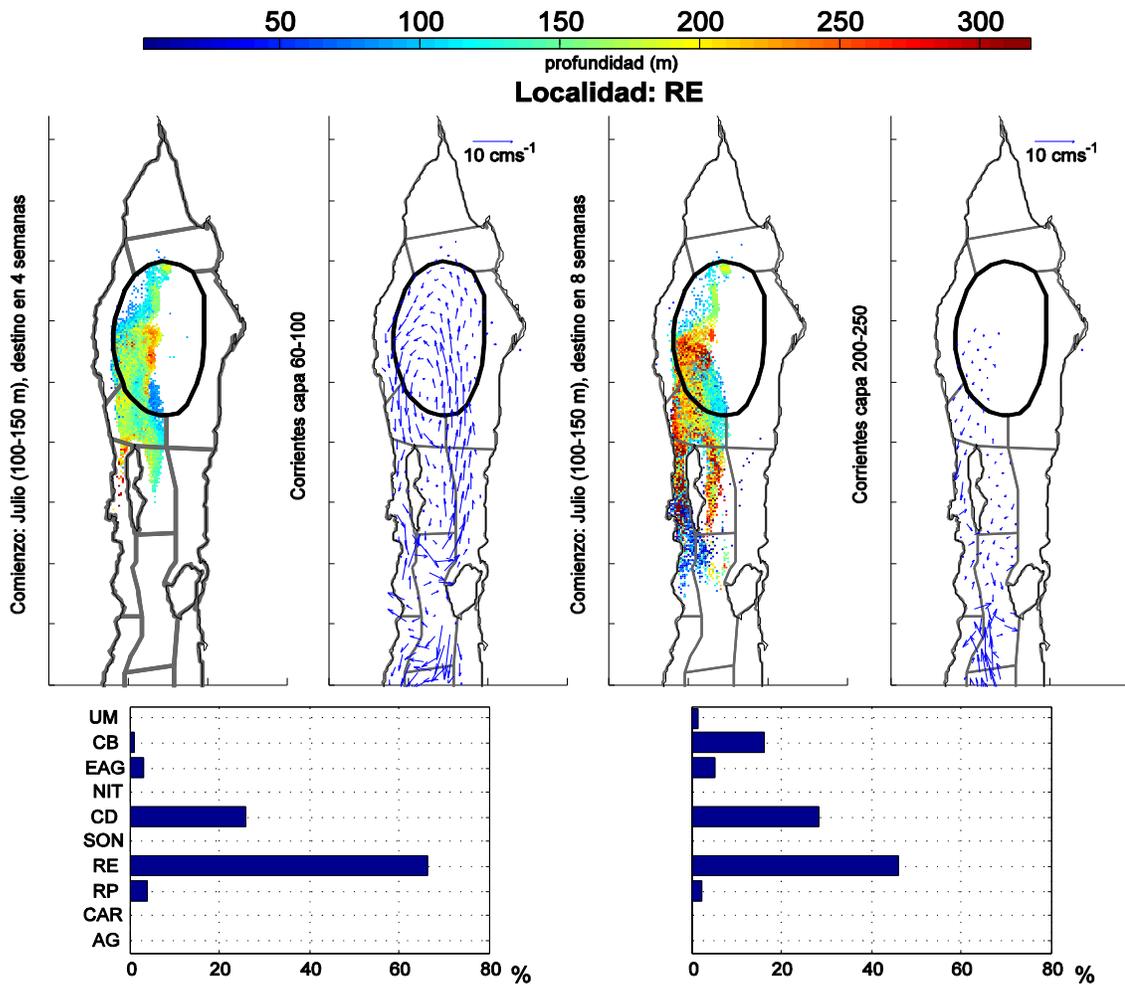


Figura 25. Mapa de posición final de partículas liberadas en la sexta capa de la localidad del Remolino Estacional, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

Caso 3 (Fig. 23a; línea morada): En esta delimitación agrupamos las capas de liberación más profundas (entre los 100-350 m de profundidad) de las localidades de CD y EAG, las cuales transportaron la mayoría de las partículas no retenidas hacia UM entre los 200 y 600 metros de profundidad (Fig. 24). Esto se vio propiciado debido a que las partículas liberadas en estas localidades fueron transportadas hacia el sur por una corriente localizada al este de la isla Ángel de la Guarda (Fig. 3) que alcanzó hasta los 350 m de profundidad (Fig.11). Al llegar al área de UM, esta corriente interactúa con la corriente del sur del golfo para generar un remolino anticiclónico, propiciando una zona de atrapamiento (Figs. 26 y 27; Marinone, 2003; Mateos *et al.*, 2006; Santiago, 2013).

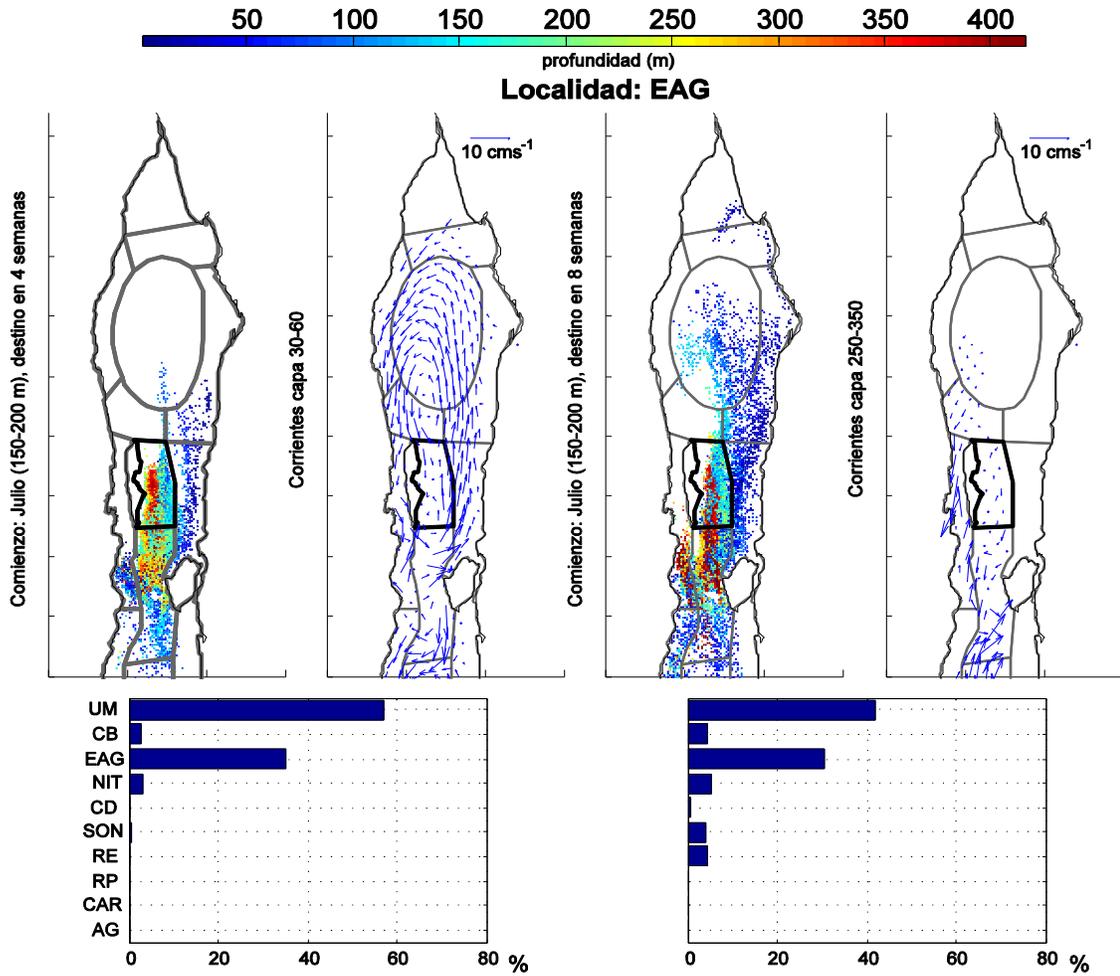


Figura 26. Mapa de posición final de partículas liberadas en la séptima capa de la localidad de Ángel de La Guarda, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

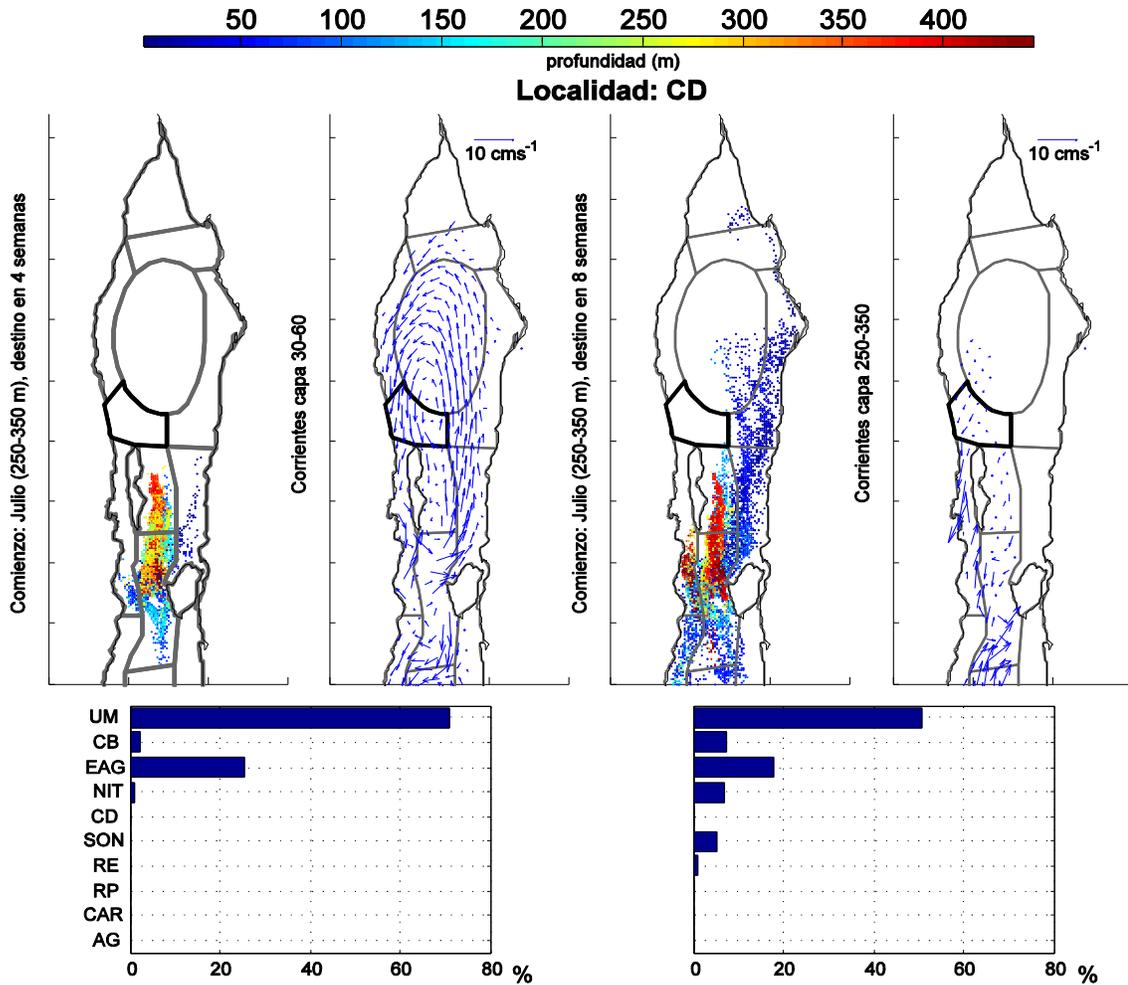


Figura 27. Mapa de posición final de partículas liberadas en la cuarta capa de la localidad de Cuenca Delfin, a la cuarta y octava semana después de la liberación. El área de liberación está delineada con color negro y las otras áreas de color gris. La barra de colores representa la profundidad en donde se encuentra cada partícula. El histograma presenta el porcentaje de partículas retenidas o trasladadas a otras regiones. Los mapas de corrientes corresponden a la capa en donde se concentra el mayor porcentaje de partículas dispersadas, a la cuarta y octava semana después de la liberación de partículas.

Así mismo UM mostró un patrón muy similar al de EAG y CD, sin embargo UM desde capas superficiales transporta porcentajes altos de partículas (Fig. 23) hacia áreas al norte de ésta, donde dichos porcentajes se encuentran principalmente en RE. Mientras se incrementó la profundidad las partículas se desplazaron hacia el sur del golfo, encontrándose en áreas ubicadas junto la costa peninsular. Este patrón no se observó directamente en la matriz de captación máxima, sino al comparar ésta con los mapas de dispersión e histogramas. Para demostrar dicho comportamiento se presentó la figura 28 con la mayoría de las localidades que conforman el GC, mientras que en el histograma se observa el porcentaje de partículas distribuidas hacia la cabeza del golfo como hacia el sur.

Después de estudiar el transporte de partículas con respecto a las corrientes predominantes durante la temporada de verano, propusimos un diagrama de conectividad superficial (fig. 28) y un diagrama de conectividad para zonas profundas (Fig.29), donde se muestran las posibles rutas que toman las partículas al interactuar con la circulación del NGC.

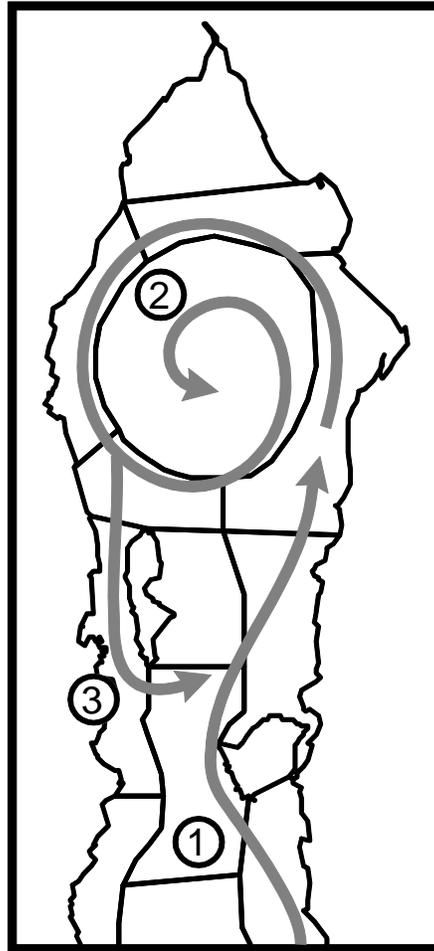


Figura 29. Mapa del NGC con las rutas superficiales preferidas de las partículas, relacionadas a las distintas estructuras de la circulación: 1. Corriente costera continental, 2. Remolino ciclónico y 3. Corriente del Canal de Ballenas.

La figura 29 muestra las rutas predominantes que toman las partículas después de su liberación, el número asignado corresponde a tres tipos de estructuras de la circulación que transportan partículas. Estas son:

1. Corriente costera continental, la cual proviene desde el sur de GC y entra por la zona de las Grandes Islas, donde aumentó su velocidad y transportó la mayoría de las partículas de la mayoría de las localidades que pertenecen a esa zona; UM, EAG y NIT. Dicha corriente al llegar a la cabeza del golfo, interactúa con:

2. El remolino ciclónico, donde la mayor parte de las partículas que eran transportadas por la corriente costera continental (SON) se ubican dentro del flujo del remolino, donde las partículas liberadas por las regiones que se localizan alrededor de éste (CAR, RP y CD) se dirigen principalmente hacia el centro del remolino (RE). Sin embargo, el remolino ciclónico interactúa con la isla Ángel de la Guarda y se forma una corriente.

3. Corriente del Canal de Ballenas (CB), la cual provoca un transporte de partículas con dirección hacia el sur de la cabeza del golfo. Al alejarse de la isla, la corriente es interceptada por la corriente costera continental (1) y conduce las partículas hacia el norte del golfo.

Por otro lado la siguiente figura muestra las trayectorias preferenciales a mayores profundidades de las partículas.

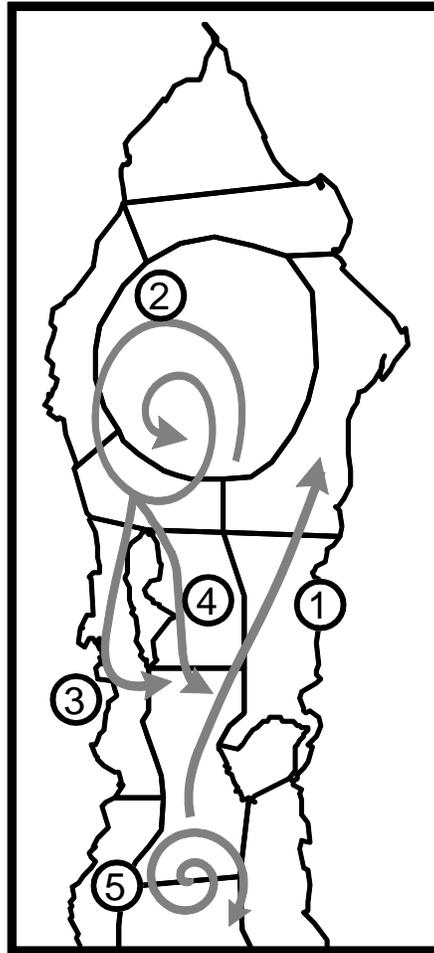


Figura 30. Mapa del NGC con las rutas superficiales preferentes de las partículas, relacionadas a las distintas estructuras de la circulación: 1. Corriente costera continental, 2. Remolino ciclónico, 3. Corriente del Canal de Ballenas, 4. Corriente ocasionada por la interacción entre la Isla Ángel de La Guarda y 5. Remolino anticiclónico.

Las rutas preferentes a los 60m de profundidad se muestran en la figura 29, donde los tres primeros patrones son similares al caso superficial (Fig.28) mientras que:

4. La corriente se forma por la bifurcación del flujo del remolino estacional y la ubicación de la isla Ángel de la Guarda. Esta transporta partículas provenientes de RE, CD o de cualquier localidad que se vea afectada por el giro reversible hacia la zona de las grandes islas. Sin embargo esta corriente se conecta con la corriente costera continental, la cual es más débil conforme aumenta la profundidad.

5. El giro que se ubica al sur de UM, en la cuenca de San Pedro Mártir, fue predicho por Marinone (2003) con el modelo numérico tridimensional HAMSOM, más tarde Mateos *et al.* (2006) lo describió a detalle. Este remolino transporta partículas hacia

la cabeza del golfo como hacia el sur de este, tal como se puede observar en la figura 16.

Capítulo 4. Conclusiones

La circulación en el NGC durante el verano se encuentra dominada principalmente por la interacción de la corriente costera continental y el remolino ciclónico estacional.

La corriente costera continental conecta las provincias de los Umbrales (UM), Ángel de la Guarda (EAG), Norte de Isla Tiburón (NIT) y Sonora (SON) con las localidades de la cabeza del golfo.

El remolino ciclónico estacional transporta las partículas de las localidades de Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional (CAR), los Remolinos Peninsulares (RP), Cuenca Delfín (CD) y las partículas que viajan por la corriente costera continental hacia el área de Remolino Estacional (RE).

Las matrices de retención y máxima captación cumplieron con la finalidad de realzar los patrones más importantes de entre todas las matrices de conectividad, tales como la localidad con mayor retención, mayor dispersión y mayor atrapamiento de partículas.

Las áreas que presentaron el mayor porcentaje de retención fueron Alto Golfo (AG) y RE, lo cual fue consistente en las diferentes capas.

RE es una zona de convergencia que tiende a atrapar partículas provenientes de las demás localidades que componen el NGC.

Consideramos a la localidad de NIT como la zona de mayor dispersión de partículas, debido a la influencia de la corriente costera continental sobre dicha área.

La provincia del UM mostró dos patrones de dispersión, las partículas liberadas en las capas superficiales (0-150m) son transportadas principalmente hacia el norte de GC; mientras que las partículas liberadas en capas profundas (150-600m) son transportadas hacia el sur del golfo. Por otro lado, al liberar partículas entre los 350-600m de profundidad, esta provincia presentó un porcentaje significativo de retención (~60%) y de atrapamiento de partículas provenientes de EAG y CD.

Las surgencias presentes en Canal de Ballenas (CB) fueron el medio por el cual las partículas fueron transportadas hacia capas superficiales, posteriormente estas partículas se dirigieron hacia la cabeza del golfo por la corriente costera continental.

Lista de referencias

- Arvizu-Martinez, J. (1987). Fisheries activities in the Gulf of California, Mexico. *CalCOFI Report*, Vol.: 28, 32-36.
- Avalos García, C. (2000). *Asociaciones de larvas de peces en el Golfo de California (Otoño 1997- Verano 1998)*. Tesis maestría en ciencias. Instituto Politécnico Nacional. 115p
- Badan Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M. A. y Winant, C. D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96, 16877–16896.
- Beier, E. y Ripa, P. (1999). Seasonal Gyres in the Northern Gif of California, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 302-311.
- Brusca, R. C. (Ed.) (2010). *The Gulf Of California: Biodiversity and Conservation*. Recuperado el 10 de Marzo 2014 de: <https://muse.jhu.edu/books/9780816502752>
- Carrillo, L., Lavín, M. F. y Palacios Hernández, E. (2002). Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine, coastal and shelf Science*, 54:157-173.
- Castro-Aguirre, J. L., Balart, E. F., Arvizu-Martinez, J. (1995). Contribución al conocimiento del origen y distribución de la ictiofauna del Golfo de California, México. *Hidrobiológica*, 5 (1-2), 57-78.
- Gutiérrez, O. Q., Marinone, S. G. y Parés Sierra, A., (2004). Lagrangian surface circulation in the Gulf of California from a 3D numerical model. *Deep-Sea Research Part II*, 51 (6–9), 659–672.
- Hernández-Ayón, J. M., Chapa-Balcorta, C., Delgadillo-Hinojosa, F., Camacho-Ibar, V. F., Huerta-Díaz, M. A., Santamaría-del-Angel, E., Galindo-Bect, S., Segovia-Zavala, J. A. (2013). Dinámica del carbono inorgánico disuelto en la región de las grandes islas del golfo de California: Influencia de las masas de agua. *Ciencias Marinas*, 39 (2), 183-201.
- Kindlmann, P., Burel, F. (2008). Connectivity measures: a review. *Landscape Ecol*, 23, 879-890. doi: 10.1007/s10980-008-9245-4.
- Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L. y Carrillo, L. (1997a). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 2298–2305.
- Lavín, M. F., Beier, E. y Badan, A. (1997b). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual, en: M. F. Lavín (Ed.). *Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía*, No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 141-171.

- Lavín, M.F. y Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. 173-204 pp. En: Velasco Fuentes, O. U., Sheinbaum, J. y Ochoa, J. (eds). *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Dordrecht. Kluwer.
- Lluch-Cota, S. E., Aragón-Noriega, E. A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Bautista-Romero, J. J., Brusca, R. C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández Aceves, G., Hendrickx, M. E., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M. F., Lluch-Belda, D., Lluch Cota, D. B., López-Martínez, J., Marinone, S. G., Nevárez-Martínez, M. O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C. A., Schwartzlose, R. A. y Sierra-Beltrán, A. P. (2007). The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73, 1-26
- López, M., Candela, J. y Argote, M. L. (2006). Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophysical Research Letters*, 33, L11603. doi:10.1029/2006GL025908.
- López, M., Candela, J. y García, J. (2008). Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 113. doi:10.1029/2007JC004575.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (1997). Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California, en: M. F. Lavín (Ed.). *Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía*, No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 113-139.
- Marinone, S. G. (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3325. doi:10.1029/2002JC001720.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2005). Tidal current ellipses in a three-dimensional baroclinic numerical model of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, 519–530. doi:10.1016/j.ecss.2005.03.009.
- Marinone, S. G. (2006). A numerical simulation of the two-and three-dimensional Lagrangian circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68, 93–100.
- Marinone, S. G. (2008). On the three-dimensional numerical modeling of the deep circulation around Ángel de la Guarda Island in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80, 430–434.
- Marinone, S. G., Ulloa, M. J., Parés Sierra, A., Lavín, M. F. y Cudney Bueno, R. (2008). Connectivity in the northern Gulf of California from particle tracking in a three-dimensional numerical model. *Journal of Marine Systems*, 71 (1-2), 149–158.

- Marinone, S. G., Lavín, M. F. y Parés Sierra, A. (2011). A quantitative characterization of the seasonal Lagrangian circulation of the Gulf of California from a three dimensional numerical model. *Continental Shelf Research*, 31, 1420-1426.
- Marinone, S. G. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 100, 133-141.
- Mateos, E., Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2006). Role of tides and mixing in the formation o fan anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep-Sea Research II* 53, 60-76.
- Peguero Icaza, M., Sánchez Velasco, L., Lavín, M. F., Marinone, S. G. y Beier, E. (2011). Seasonal changes in connectivity routes among larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Journal of Plankton Research*, 33(3), 517–533. doi:10.1093/plankt/fbq107.
- Sánchez Velasco, L., Lavín, M. F., Peguero Icaza, M., León Chávez, C. A., Contreras Catala, F., Marinone, S. G., Gutiérrez Palacios, I. V. y Godínez, V. M. (2009). Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, 29, 1697–1710.
- Sánchez Velasco, L., Lavín, M. F., Jiménez Rosenberg, Montes, J. M. y Turk Boyer, P. J. (2012). Larval fish habitats and hydrography in the Biosphere Reserve of the Upper Gulf of California (June 2008). *Continental Shelf Research*, 33,89–99.
- Santiago García, M. W. (2013). *La conectividad tridimensional en el Golfo de California, a partir de un modelo numérico*. Tesis maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 81 p.
- Soria, G., Torre-Cosio, J., Munguia-Vega, A., Marinone, S. G., Lavín, M. F., Cinti, A., Moreno-Báez, M. (2014). Dynamic connectivity patterns from an insular marine protected área in the Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 129, 248-258.
- Taylor, P. D., Fahring, L., Heneim, K. y Merriam, G. (1993). Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 68(3), 571-573.
- Tischendorf, L. y Fahring, L. (2000). On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 90, 7-19.
- Velasco Fuentes, O. U. y Marinone, S. G. (1999). A numerical study of the Lagrangian circulation in the Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 22, 1-12.
- With, K. A., Gardner, R. H. y Turner, M. G. (1997). Landscape connectivity and population distributions in heterogeneous environments. *Oikos*, 78, 151-169.

Apéndice. Página interactiva (<http://conectividad-dispersion.cicese.mx/>)

La página internet tiene como objetivo principal mostrar la comunicación entre las localidades que conforman el Golfo de California y su variación estacional. Ésta herramienta interactiva está constituida principalmente por tres secciones: Inicio, Mapa interactivo y Contacto, las cuales se pueden visualizar en dos idiomas: español e inglés (esta opción se ubica en la esquina superior derecha). A continuación se hará una descripción visual del sitio interactivo disponible en internet.

1. **Inicio** (Fig. A1). Esta sección presentamos una breve explicación de la metodología de los productos obtenidos, así como las opciones de visualización de los resultados presentados en la pestaña de Mapa Interactivo.

CICESE

Inicio Mapa Interactivo Contacto Eng

Conectividad y Dispersión en el Golfo de California

El propósito de esta página es presentar diferentes resultados sobre la dispersión de partículas a partir de 17 áreas distintas y la conectividad entre todas ellas, iniciando el día primero de cada mes. Todos estos resultados se presentan, a elección, a 2, 4, 6 y 8 semanas de liberadas.

La advección de partículas es efectuada con un esquema de advección/difusión por el campo de corrientes de un modelo de circulación tridimensional (HAMSOM) del Golfo de California. El modelo tiene una resolución horizontal de $\sim 1.3 \times 1.5$ km y 12 capas en la vertical. Es forzado por mareas, vientos y flujos de calor y agua estacionales en la superficie e hidrografía estacional en la boca del golfo.

El usuario tiene como opciones para visualizar resultados las siguientes:

1. Dispersión geográfica a partir de una de las regiones de origen y los histogramas de arribo a cada una de las regiones destino
2. Conectividad espacial entre las 17 regiones y la profundidad media y desviación estándar en la región destino

Para cada una de las elecciones anteriores se puede visualizar para las siguientes opciones:

- Mes inicial del año (12 meses)
- Capa inicial de liberación (1 a 12)
- Ver resultados a 2, 4, 6 y 8 semanas

ADVERTENCIA: Los resultados aquí presentados son cualitativos y no deben usarse como una pieza fundamental para la toma de decisiones. Asimismo, los resultados son representativos por variación estacional y de mareas únicamente, por lo que variaciones de otras frecuencias no se consideran.

Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, B.C. México. Teléfono: 01(646)175-05-00

Figura A1. Imagen de la página de internet, con la pestaña de inicio seleccionada

2. **Mapa interactivo** (Fig. A2). Opción dónde se elige para visualizar los resultados de conectividad y dispersión en el Golfo de California.

Figura A2. Imagen de la página de internet, en la pestaña de Mapa Interactivo.

Para mostrar las figuras, primero se debe seleccionar el **tipo de gráfica**: matriz o dispersión. Esta opción se encuentra en la parte superior central. A continuación se describieron detalladamente los dos tipos de figuras:

a) Matriz (Fig. A2):

Para este tipo de gráfica se debe de seleccionar el tipo de matriz a visualizar, **conectividad**, **profundidad promedio** o **desviación estándar**. Esta opción se ubica en la parte media central, debajo de esta opción se encuentra “datos”, la cual permite al usuario obtener la matriz de datos o números. Por consiguiente, las matrices se presentan para las 12 capas del modelo, todos los meses del año y a las dos, cuatro, seis y ocho semanas. En la parte superior derecha se encuentra las **opciones de liberación**, en las cuales se elige la profundidad, el mes y el tiempo final para obtener los resultados. Por último,

b) Dispersión (Fig. A3):

Primero se debe seleccionar el tipo de gráfica (dispersión) y en consecuencia, sobre el **mapa** ubicado en la parte superior izquierda se debe seleccionar el área sobre la que se desea trabajar. En este mapa se muestran las 17 regiones en las que se dividió el GC, cada una tiene su acrónimo. También se elige la profundidad y el mes de liberación. Sin embargo, para el caso del tiempo final los resultados se presentaran de dos maneras: particular, al elegir dos, cuatro, seis y ocho semanas; y general, al escoger “todos”, se muestra los cuatro resultados en una imagen. Por último, en la parte inferior izquierda se encuentra la opción de **información**, en ésta se ofrece el nombre completo y el número de capas del área seleccionada.

The screenshot shows the CICESE website's interactive map interface. At the top, there is a navigation bar with 'Inicio', 'Mapa Interactivo', and 'Contacto' tabs, and a language selector set to 'Eng'. The main content area is divided into several sections:

- Mapa:** A map of the Gulf of California with 17 regions labeled with acronyms: AG, CAR, RE, SON, RP, CD, EAC, NIT, CB, UM, RPC, RCC, CG, RPS, RCS, CF, and BP.
- Tipo de Gráfica:** Radio buttons for 'Matriz' and 'Dispersión' (selected). Buttons for 'Datos' and 'Graficar'.
- Opciones de Liberación:**
 - Región: A dropdown menu with an arrow pointing to the text 'Seleccionar un área del "Mapa"'. An arrow from the text points to the 'Región' dropdown.
 - Profundidad (mts): A dropdown menu set to '0-10' with an arrow pointing to the text 'Depende del área elegida'.
 - Mes: A dropdown menu set to 'Enero'.
 - Tiempo Final (semana): A dropdown menu set to '2' with an arrow pointing to a list of options.
- Gráfica:** A large empty box with the text '(Click para ampliar)'. To its right is a list of options: '2', '4', '6', '8', and 'Todas', grouped by a bracket and labeled 'Semanas:'.
- Información:** A box containing the text: 'Haz click sobre las zonas del mapa para indicar la región de liberación'.

At the bottom of the page, there is a footer with the address: 'Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, B.C. Mexico. Teléfono: 01(646)175-05-00' and a logo on the right.

Figura A3. Imagen de la página de internet, en la pestaña de Mapa Interactivo.

b) Contacto (Fig. A4), presenta a las personas involucradas en el desarrollo de la página en línea

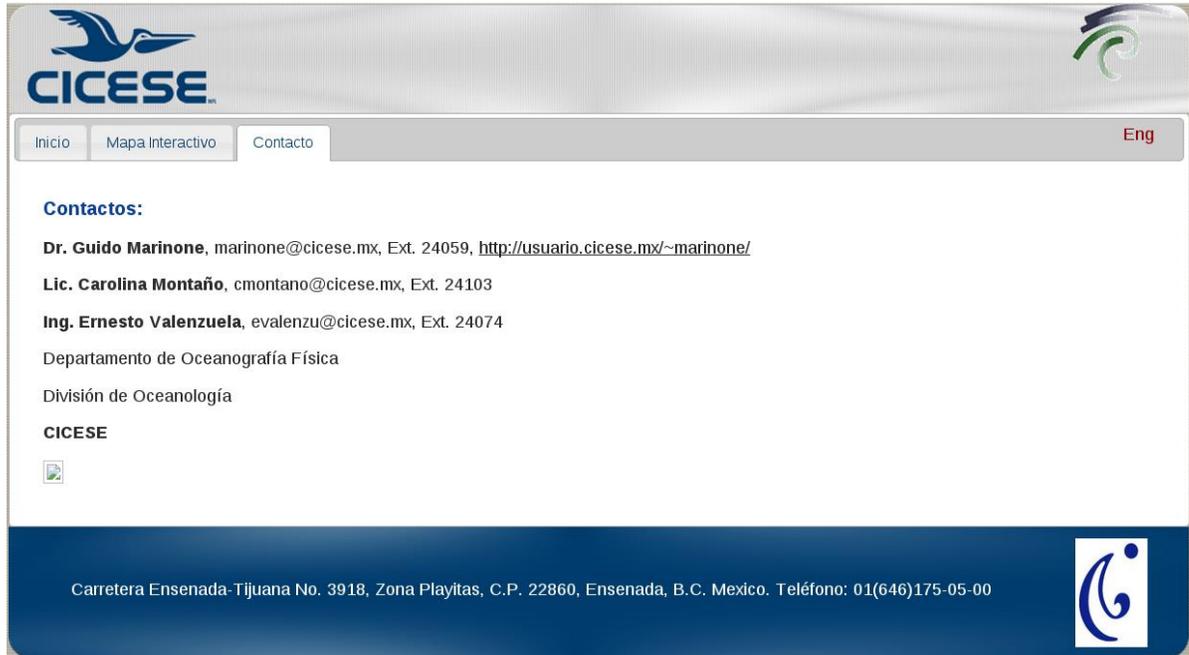


Figura A4. Página de internet, pestaña seleccionada de Contacto.

Con la finalidad de mostrar el manejo de la página, a continuación se presentan unos ejemplos de matrices y mapas de dispersión.

Primero seleccionamos el tipo de gráfica, en este caso fue dispersión (Fig. A5), luego el área Cuenca Farallón (CF) y la liberación de partículas en la última capa del modelo (1000 a 4000m) en el mes de abril. Elegimos el Tiempo Final a la sexta semana. En esta imagen observamos que la mayoría de las partículas se concentraron en la misma área de liberación, el cual se cuantificó en el histograma (~80%). La profundidad de las partículas se muestra variable, ya que la mayoría de éstas se encuentran entre los 1300 y los 1800 m de profundidad. CF se conecta principalmente con Cuenca Guaymas (~15%), RPS y RCS, lo cual se muestra en el histograma.

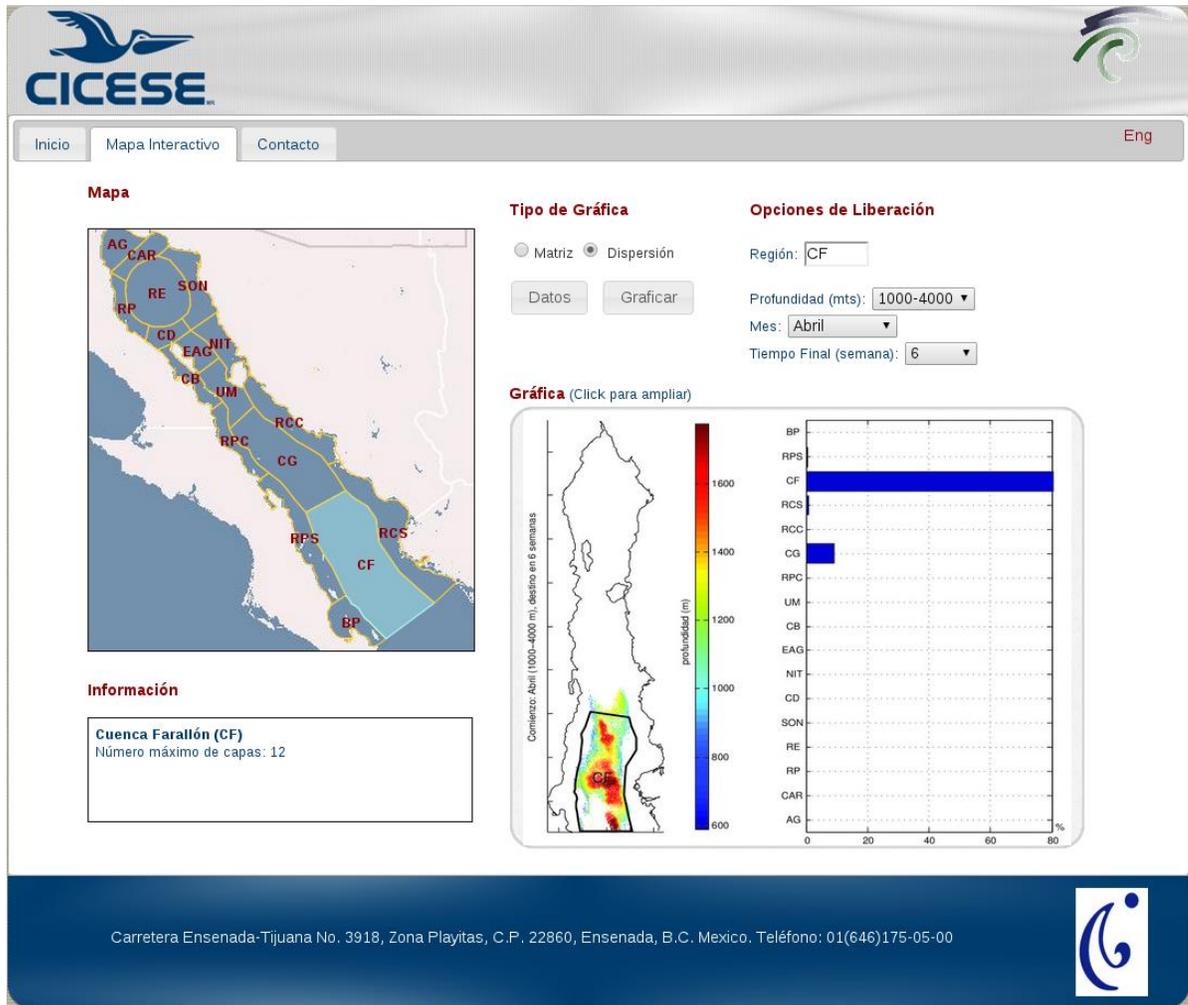


Figura A5. Página de internet, ejemplo de un mapa de posición final de partículas.

Otro ejemplo, conocer la dispersión de las partículas de la localidad de Región Continental Central (RCC, Fig. A6). La liberación de partículas fue a una profundidad entre los 100-150 metros para el mes de octubre. Se seleccionó obtener resultados a todos los tiempos después de haber sido advectadas. El transporte de partículas se presentó hacia el sur del GC siguiendo la costa continental, por lo que RCC se conecta con CG, RCS y CF. El porcentaje de partículas lo cuantificamos en los histogramas, donde observamos que RCS fue la localidad que atrapó la mayoría de las partículas liberadas (~60%), sin embargo al cabo de la sexta semana el porcentaje de partículas dispersadas disminuyó significativamente. Esto se debe a que la mayoría de las partículas escapan hacia el Océano Pacífico, lo que esta fuera del dominio del modelo.

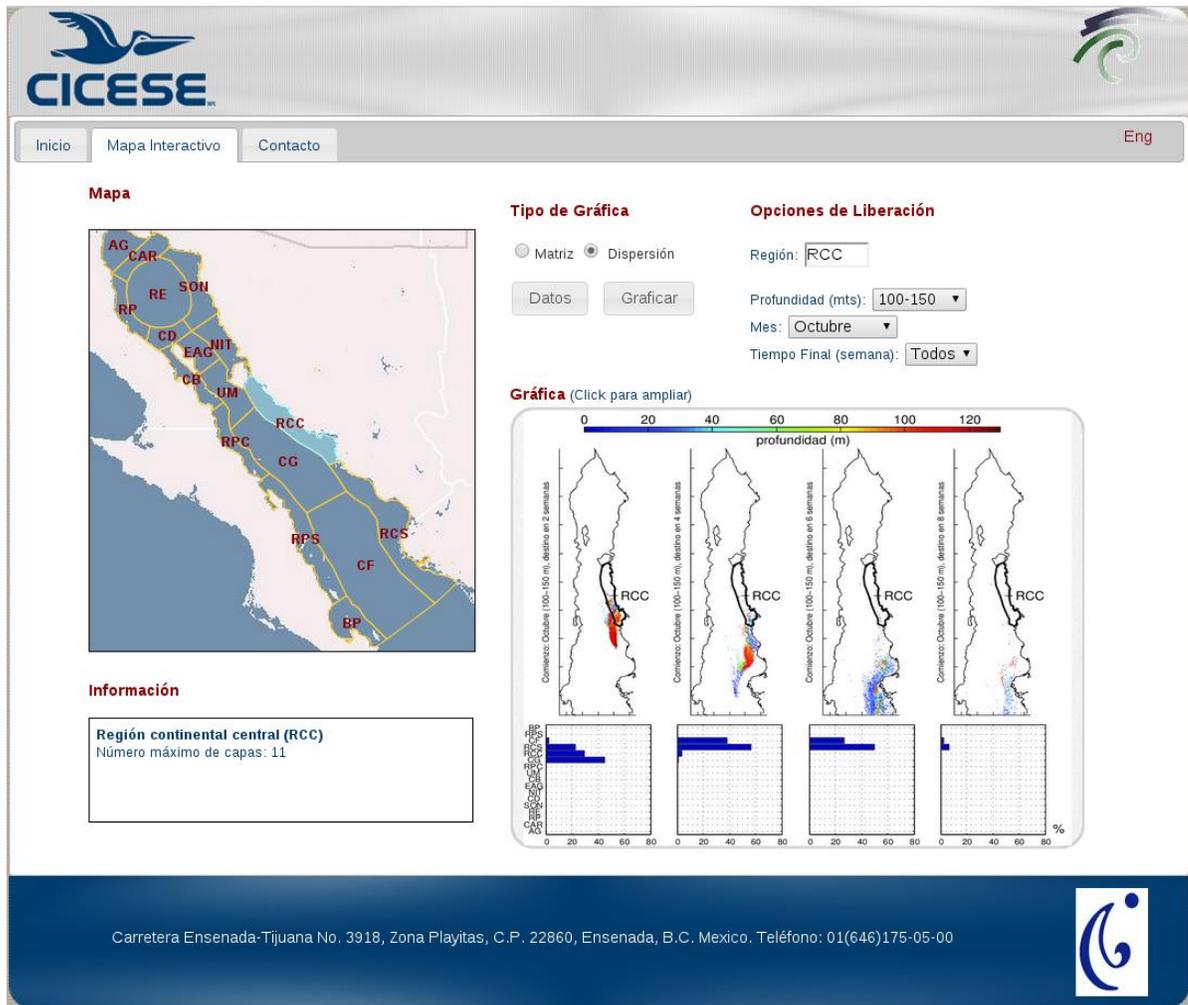


Figura A6. Página de internet, ejemplo de un mapa de posición final de partículas.

Por último, para analizar la conectividad en todo el Golfo de California se eligió el tipo de gráfica: Matriz de conectividad (Fig. A7). Posteriormente, seleccionamos el rango de profundidad de 250-350 metros en el mes de abril, a la sexta semana. En la matriz de conectividad observamos que la mayoría de las localidades de liberación retuvieron porcentajes altos de partículas (>35%), en especial RE, CG, RCS, CF y BP. Cabe resaltar que la mayoría de las provincias de liberación se conectaron con muy pocas localidades, por ejemplo RE y CF fueron las localidades que no dispersaron partículas hacia otras áreas. CB, UM y RPC fueron las áreas que más se conectaron con otras localidades, el intercambio de estas localidades fue entre áreas de la región de las grandes islas y el sur del golfo.

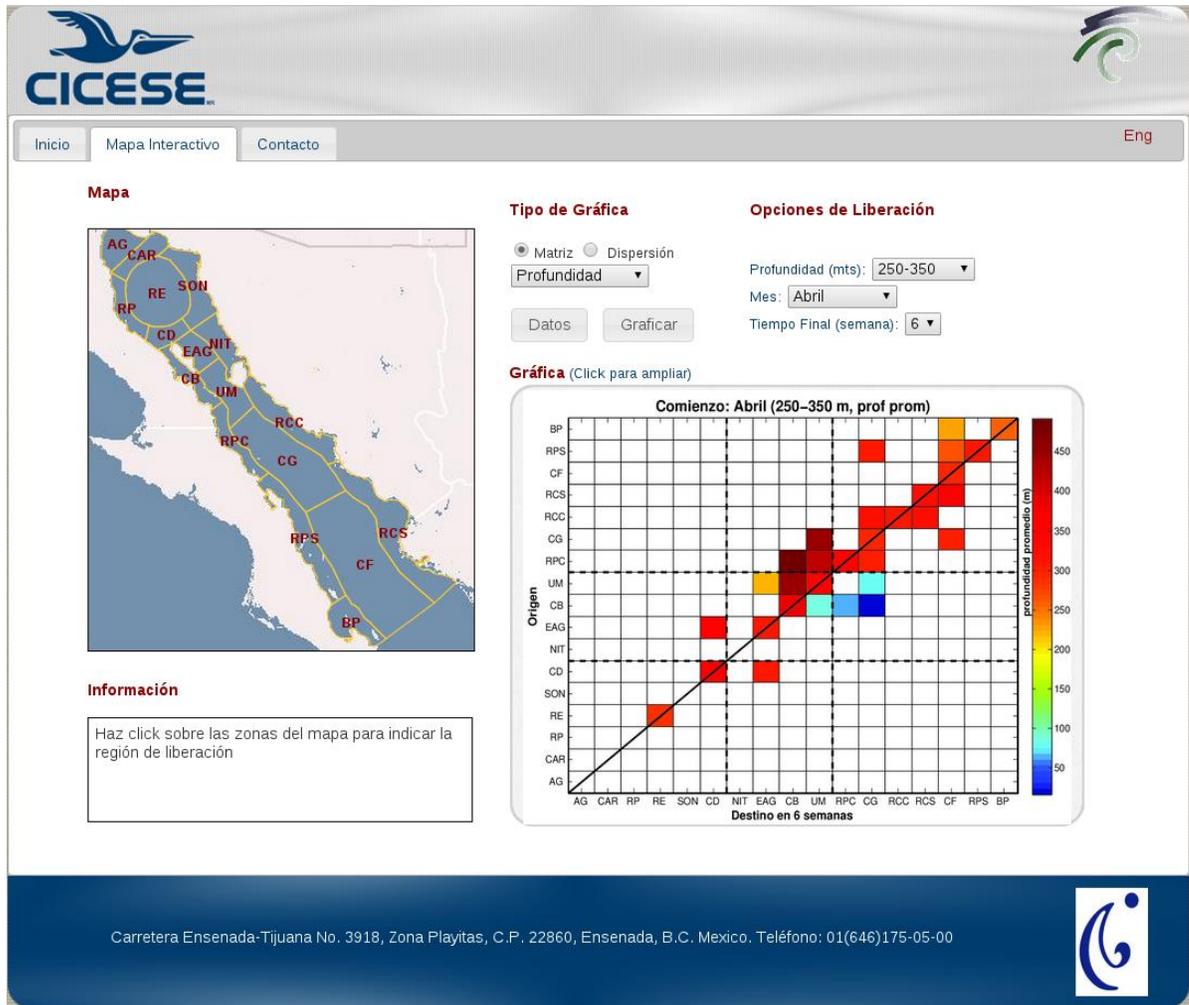


Figura A8. Página de internet, ejemplo de una matriz de profundidad promedio

Por otro lado, en la matriz de desviación estándar se presentaron valores menores a los 50 metros en la mayoría de las localidades de la región sur del CG (Fig. A9), CG, RCC, RCA, CF, RPS y BP. Mientras que los valores mayores de desviación estándar se encontraron en las partículas que llegaron a CB al igual que las que retuvo esta localidad (>300 m).

The screenshot displays the CICESE website interface. At the top left is the CICESE logo. Below it are navigation tabs: 'Inicio', 'Mapa Interactivo', and 'Contacto'. On the right, there is a language selector 'Eng'. The main content area is divided into several sections:

- Mapa:** A map of the Baja California Peninsula showing various coastal zones labeled with abbreviations: AG, CAR, RE, SON, RP, CD, EAG, HIT, CB, UM, RPC, RCC, CG, HPS, RCS, CF, and BP.
- Información:** A text box with the instruction: "Haz click sobre las zonas del mapa para indicar la región de liberación".
- Tipo de Gráfica:** Includes radio buttons for 'Matriz' (selected) and 'Dispersión', and a dropdown menu for 'Conectividad'.
- Opciones de Liberación:** Includes dropdown menus for 'Profundidad (mts): 250-350', 'Mes: Abril', and 'Tiempo Final (semana): 6'. There are also 'Datos' and 'Graficar' buttons.
- Gráfica:** A connectivity matrix graph titled 'Comienzo: Abril (250-350 m)'. The x-axis is labeled 'Destino en 6 semanas' and the y-axis is 'Origen'. Both axes list the zones from top to bottom: BP, RPS, CF, RCS, RCC, CG, RPC, UM, CB, EAG, NIT, CD, SON, RE, RP, CAR, and AG. A color scale on the right indicates '% conectividad' from 10 (blue) to 80 (red). The matrix shows a diagonal of high connectivity (red) and various off-diagonal values represented by different colors.

At the bottom of the page, there is contact information: "Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, B.C. Mexico. Teléfono: 01(646)175-05-00" and a logo on the right.

Figura A9. Página de internet, ejemplo de una matriz de desviación estándar