

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA



DIVISIÓN DE OCEANOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

CIRCULACIÓN LAGRANGEANA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

OMAR QUETZALCÓATL GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

Ensenada, Baja California, México. junio del 2002

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA



DIVISIÓN DE OCEANOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

CIRCULACIÓN LAGRANGEANA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

OMAR QUETZALCÓATL GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

Ensenada, Baja California, México. junio del 2002

RESUMEN de la tesis de Omar Qutezalcóatl Gutiérrez Gutiérrez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANO-
GRAFÍA FÍSICA. Ensenada, Baja California, México, junio de 2002.

CIRCULACIÓN LAGRANGEANA EN EL
GOLFO DE CALIFORNIA.

Resumen aprobado por:



Dr. Silvio Guido Marinone M.

Director.

Se estudió la circulación lagrangiana superficial en el Golfo de California a escala estacional por medio de la advección numérica de partículas. Se realizaron experimentos con períodos mensuales y anuales de aproximadamente 660 partículas homogéneamente distribuidas en el golfo.

Se encontró circulación anticiclónica en la región norte de octubre a mayo y en la región central y sur en mayo y durante octubre y noviembre; en los meses de julio y agosto todo el golfo presentó circulación ciclónica. Esta circulación concuerda cualitativamente con lo observado con boyas de deriva por Lavín et al. (1997) y Palacios et al. (2002) en la región norte y por Emilsson y Alatorre (1997) en la región sur.

Se observó que en la región norte las partículas permanecen atrapadas por períodos mayores a 30 días y que existe aporte de partículas de el resto del golfo durante el período ciclónico de tal forma que el número de partículas se duplica. Durante el período anticiclónico las partículas escapan hacia el sur del golfo, sin embargo, la mayoría de éstas no lo abandonan y regresan a la región norte durante el período ciclónico. En el centro de la región norte existe un giro principal durante los períodos ciclónico y anticiclónico que atrapa partículas por más de 30 días en un radio menor a 50 km.

Se encontró que la región norte y central mantienen comunicación a lo largo del año solamente a través del canal entre Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón, excepto cuando la circulación es anticiclónica en todo el golfo (i.e., en los meses de octubre-noviembre y mayo). Por el contrario el Canal de Ballenas y la zona de Isla Tiburón atrapan partículas durante todo el año. Se encontraron giros menores en esta región cuando ocurren las transiciones y un giro permanente al sur de Isla Tiburón que atrapa partículas por más de 10 días en radios menores a 50 km.

En la región central y sur se encontró una zona de atrapamiento sobre la costa de Baja California donde las partículas recorren menos de 100 km en 30 días y de la cual las partículas solamente escapan durante el período anticiclónico. Por el contrario, la costa oriental del golfo es una zona de escape en la que las partículas recorren las distancias máximas en los tiempos mínimos.

Palabras claves: Golfo de California, circulación lagrangiana, zonas de escape y atrapamiento.

ABSTRACT of the thesis of Omar Qutezalcoatl Gutiérrez Gutiérrez, presented as partial requirement to obtain the degree of MASTER OF SCIENCE in PHYSICAL OCEANOGRAPHY.

Ensenada, Baja California, México, junio de 2002.

LAGRANGEAN CIRCULATION IN THE GULF OF CALIFORNIA.

The surface lagrangian circulation of the Gulf of California was studied by means of advection of particles. The advections were carried out for annual and monthly periods of about 660 particles homogeneously distributed over the gulf. It was found an anticyclonic circulation at the northern gulf from October to May and in the central and southern areas during May and from October to November; cyclonic circulation was found in the whole gulf from July to August. This circulation patterns agrees with direct measurements of drifters by Lavín et al. (1997), and Palacios et al. (2002) in the northern region, and by Emilsson and Alatorre (1997) at the southern one.

At the northern region the particles were found to remain trapped for more than 30 days. During the cyclonic period particles arrive from the rest of the gulf, doubling the number of particles. On the other hand, in the anticyclonic period the particles flow to the southern part of the gulf and to the Pacific Ocean. However the particles remains in the gulf and come back to the northern part during the cyclonic period. The principal gyre that appears at the center of northern gulf in both cyclonic and anticyclonic periods traps particles for more than 30 days in a radii of 50 km. At the central and southern regions of the gulf a trapping zone was found at the peninsula side, where the particles travel less than 100 km in 30 days; the particles just escape in the anticyclonic period. On the other hand, over the continental coast there is a escape zone where the particles travel the maximum distance in the minimum time.

Key words: Gulf of California, lagrangian circulation, escape and trapping zones.

A mis padres.

A Ana.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Guido Marinone, por su gran asesoría y la ayuda siempre proporcionada.

A los miembros del comité, formado por el Dr. Alejandro Parés Sierra y el Dr. Luis Calderón Aguilera, por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Al CICESE, por el apoyo brindado.

Al CONACyT, por su apoyo económico mediante la beca-credito de maestría y la beca de proyecto 35251-T

A Adán Mejía y Manuel Figueroa por ayudarme siempre en todo.

A David Rivas y Pedro Rosales por su ayuda, consejos, y sobretodo su amistad.

A todos mis compañeros y amigos en el departamento.

Índice General

I	Introducción	1
I.1	Objetivo	3
I.2	Organización	4
II	Modelos	5
II.1	Modelo Eulereano	5
II.2	Modelo Lagrangeano	6
II.3	Experimentos	7
III	Resultados y discusiones	8
III.1	Circulación estacional	8
III.1.1	Advecciones mensuales	9
III.1.2	Advecciones anuales	15
III.1.3	Tiempos de residencia y rutas principales en el GC.	19
III.2	Distribución de partículas en función del tiempo inicial	24
III.3	Cuantificación por áreas	27
III.4	Índices	30
IV	Conclusiones	48
 Apéndices		
A	Pruebas Preliminares	50
B	Fronteras	53
C	Advecciones	56

Índice de Figuras

1	El Golfo de California y su batimetría (en metros).	2
2	Regiones del golfo donde se presentan resultados integrados.	8
3	Trayectorias de partículas advectadas durante el mes señalado. Las posiciones iniciales son las mismas en los 12 casos y la fecha inicial corresponde al día primero de cada mes. Las flechas indican la dirección principal del flujo. . .	10
4	Trayectorias medidas con boyas de deriva por Lavín et al., (1997) y las calculadas numéricamente. a) Mediciones del 19 de febrero al 18 de abril de 1996. b) Trayectorias calculadas numéricamente durante el mes de marzo. c) Mediciones del 13 de septiembre al 9 de octubre de 1995. d) trayectorias calculadas numéricamente durante el mes de septiembre.	12
5	Evolución temporal de la posición de las partículas en el golfo en la fecha indicada. El tiempo inicial de la advección es el 1/1/2001. La longitud de las trayectorias es la recorrida por la partícula en los 5 días anteriores a la fecha iniciada. Las trayectorias de las partículas que iniciaron la advección en la región norte (o) son color negro, las que iniciaron en la región de las islas (+) son color verde, aquellas que iniciaron en la región central (◊) son azules y las que iniciaron en la región sur (★) son rojas.	16
6	Tiempos de residencia de las partículas en el golfo para la advección iniciada el 1 de julio del 2000. Las líneas son trayectorias de partículas representativas de las rutas principales. La escala de grises muestra el período de tiempo en el que las partículas abandonan el golfo. Los tonos más oscuros salen primero del golfo, mientras que los claros tardan más en salir.	20
7	Tiempos de residencia de las partículas en el golfo para la advección iniciada el 1 de enero del 2001. Las líneas son trayectorias de partículas representativas de las rutas principales. La escala de grises muestra el período de tiempo en el que las partículas abandonan el golfo. Los tonos más oscuros salen primero del golfo, mientras que los claros tardan más en salir.	22
8	Tiempos de residencia de las partículas en el golfo para la advección iniciada el 1 de abril del 2001. Las líneas son trayectorias de partículas representativas de las rutas principales. La escala de grises muestra el período de tiempo en el que las partículas abandonan el golfo. Los tonos más oscuros salen primero del golfo, mientras que los claros tardan más en salir.	23
9	Trayectorias de las partículas del 5 al 15 de enero del 2001. Se muestran los experimentos que iniciaron 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5 y 11.5 meses atrás. Las trayectorias de las partículas que iniciaron la advección en la región norte (o) son color negro, las que iniciaron en la región de las islas (+) son color verde, aquellas que iniciaron en la región central (◊) son azules y las que iniciaron en la región sur (★) son rojas.	25
10	trayectorias de las partículas del 5 al 15 de julio del 2001. Se muestran los experimentos que iniciaron 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5 y 11.5 meses atrás. Las trayectorias de las partículas que iniciaron la advección en la región norte (o) son color negro, las que iniciaron en la región de las islas (+) son color verde, aquellas que iniciaron en la región central (◊) son azules y las que iniciaron en la región sur (★) son rojas.	26

11	Histograma con la distribución original de partículas en el golfo por regiones. RN indica la región norte, RI la región de las islas, RC la región central y RS la región sur y tienen inicialmente 148, 174, 212 y 127 partículas respectivamente.	28
12	Histograma del número de partículas en el golfo por regiones para los experimentos del a) 1º de abril y el b) 1º de octubre. Los histogramas corresponden al último día de cada mes. En cada histograma la primer barra corresponde al número de partículas en la región norte, la segunda barra al número de partículas en la región de las islas, la tercera a la región central y la cuarta a la región sur. El código de colores es: partículas que iniciaron en la región norte son azul marino, las que iniciaron en la región de las islas son azul celeste, en la región central son amarillas y las que iniciaron en la región sur son rojas.	29
13	Ejemplos de trayectorias hipotéticas que poseen algunas características que se pudieran encontrar en las advecciones analizadas. a) Ejemplo de trayectorias y las distancias calculadas, b) Trayectoria atrapada en un giro, en la que se esperan valores de $\alpha \rightarrow 0$ y de $\gamma \rightarrow 1$. c) Trayectoria recta en la que $DN=DM\sim DR$. $\alpha \rightarrow 0$ y $\gamma \rightarrow 1/\pi$. d) Trayectoria en la que DR es grande y $DN\sim DM$ y son pequeños por lo que α pudiera tender a 0 y γ también pudiera tender a 1.	31
14	Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de enero. a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.	33
15	Índices calculados para el mes de enero a) α y b) γ .	34
16	Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de mayo a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.	36
17	Índices calculados para el mes de mayo a) α y b) γ .	37
18	Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de junio a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.	38
19	Índices calculados para el mes de junio a) α y b) γ .	39
20	Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de julio a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.	41
21	Índices calculados para el mes de julio a) α y b) γ .	42

22	Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de septiembre. a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.	43
23	Índices calculados para el mes de septiembre a) α y b) γ	44
24	Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de noviembre a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.	45
25	Índices calculados para el mes de noviembre a) α y b) γ	46
26	Las matrices A y B se construyen con los 4 elementos de u y v más cercanos a la posición de la partícula. El punto en ambas matrices representa la posición de la partícula, es en ese punto donde es necesario conocer la velocidad. . . .	53
27	Caso en que la frontera ocupa dos celdas de las matrices A y B	54
28	Caso en que la frontera ocupa tres celdas de las matrices A y B	54
29	Caso en que la frontera ocupa una celda de las matrices A y B y la partícula se encuentra en la celda opuesta a la frontera.	55
30	Caso en que la frontera ocupa una celda de las matrices A y B y la partícula se encuentra frente a la frontera.	55

Índice de Tablas

I	Experimentos realizados. La barra gris muestra la distribución temporal de las advecciones anuales. Mientras que el primer recuadro de cada barra corresponde a las advección es mensuales	7
II	Esquema de la circulación general del golfo para las regiones indicadas. ○ circulación ciclónica; ○ circulación anticiclónica; T transiciones y las flechas indican la dirección dominante del flujo.	14
III	Las pruebas preliminares realizadas	52

I Introducción

El Golfo de California (GC) está localizado en la costa noroeste de México (fig. 1), mide aproximadamente 1100 km de largo y 150 km de ancho. Hacia el norte es somero (~ 120 m de profundidad) aunque contiene algunas cuencas profundas (e.g., Cuenca Delfín donde se alcanzan ~ 600 m). Al centro se encuentran algunas islas, las mayores son Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón, canales estrechos y cambios abruptos en la batimetría. El sur del golfo es más profundo y abundan las cuencas entre 1000 y 3000 m.

La mayor parte de las características de la circulación en el GC han sido obtenidas de simulaciones numéricas, pues las mediciones reales no abundan. A continuación se presenta una breve exposición acerca de las características de la circulación en el golfo. La circulación en el GC se debe principalmente a la acción del Océano Pacífico (OP) en la boca del golfo, dejando en segundo término la acción del viento y de los flujos de calor a través de la superficie (Ripa 1990, 1997).

Al norte del golfo las simulaciones numéricas muestran un giro ciclónico en verano (junio a septiembre) y anticiclónico en invierno (noviembre a abril) (Beier, 1997; Beier y Ripa, 1999; Marinone, 2002)

Beier (1997) predijo largos períodos de no comunicación entre la región al norte y al sur de la zona de las islas. Marinone (2002), muestra la presencia de un giro anticiclónico sobre la cuenca de San Pedro Mártir durante todo el año.

La zona al sur de las islas es la menos estudiada; las estimaciones de la deriva de barcos indican flujos superficiales de salida durante el invierno y de entrada en verano, lo que requiere flujos en dirección opuesta en las capas subsuperficiales para conservar masa. Marinone (2002) encontró flujos semejantes y los atribuye a la acción del viento.

La información antes mencionada es de carácter eulereano, es decir, proporciona información de la variación de la corriente en determinados puntos a través del tiempo.

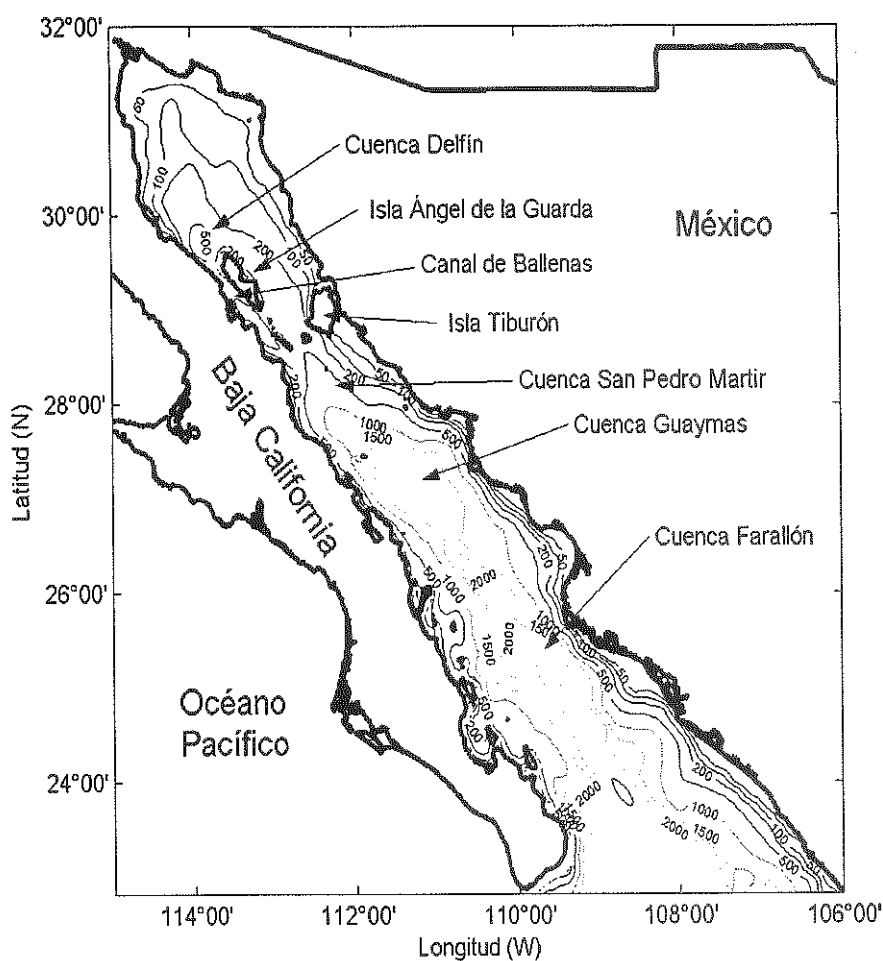


Figura 1: El Golfo de California y su batimetría (en metros).

La información de los procesos de transporte dominados por la advección como el origen, rutas y destino de las partículas suspendidas o disueltas en el agua del mar la proporciona la circulación lagrangiana.

En el GC la circulación lagrangiana ha sido estudiada de forma numérica por Velasco y Marinone (1999), con un modelo no lineal, integrado en la coordenada vertical, forzando con la componente de la marea M2 y un viento estacional de amplitud máxima de 5 ms^{-1} . Mostraron que el giro en la región norte atrapa partículas por períodos

mayores a dos meses y en la región sur, los flujos a lo largo de la costa advectan partículas cientos de kilómetros. Experimentalmente la circulación lagrangiana ha sido estudiada por Lavín et al. (1997) y Palacios et al. (2002) en la región norte y por Emilsson y Alatorre (1997) en la región sur.

Lavín et al. (1997) y Palacios et al. (2002), colocaron trazadores lagrangianos al norte del golfo en la zona profunda y observaron giros que coinciden con lo predicho por las simulaciones numéricas. Palacios et al. (2002) también con mediciones de correntímetros en esta zona describió el ciclo anual que consiste de un giro ciclónico de junio a septiembre y otro anticiclónico de noviembre a abril y transiciones con duración de 3 a 4 semanas. Emilsson y Alatorre (1997) observaron, usando trazadores lagrangianos, un giro ciclónico situado aproximadamente sobre cuenca Farallón. Sin embargo, el modelo numérico usado por los primeros es sencillo y los trazadores colocados por los últimos son pocos y en zonas localizadas, de tal forma que no nos permiten conocer los detalles de los procesos antes mencionados en todo el golfo.

I.1 Objetivo

En este trabajo se estudió la circulación lagrangiana estacional del GC de forma numérica, para lo cual se calcularon trayectorias de partículas distribuidas en el golfo por medio de integración numérica de los campos de velocidad obtenidos de una simulación eulereana.

Se determinaron las zonas donde las partículas son atrapadas, por dónde y cuándo escapan, tiempos de residencia y la distribución espacial y temporal de las partículas en el golfo. El conocer estos estadísticos es de gran utilidad en el estudio de dispersión de partículas en el océano, por ejemplo en caso de dispersión de larvas de organismos (Bartsch, 1993; Peterman et al., 1994) o la dispersión de contaminantes.

I.2 Organización

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma. En el capítulo II se exponen los modelos usados en la advección de las partículas y sus características y en el capítulo III se presentan los resultados de las advecciones realizadas, los índices calculados y el análisis de los resultados. Por último en el capítulo IV se presentan las conclusiones finales.

II Modelos

El proceso de obtención de las trayectorias de las partículas se inicia con una simulación con el modelo numérico HAMSOM, del cual se obtienen los campos eulerianos de velocidad instantánea para el dominio y el período de tiempo necesario para calcular las trayectorias. La advección de las partículas propiamente se realiza a *posteriori* integrando los campos de velocidad del modelo. De esta integración se obtienen las posiciones de cada partícula como función del tiempo, las cuales son almacenadas para su posterior análisis. A continuación se presenta una breve exposición del modelo euleriano así como los detalles del modelo de advección.

II.1 Modelo Euleriano

El modelo HAMSOM (Hamburg Shelf Ocean Model, por sus siglas en inglés) usado en el presente trabajo es tridimensional e integrado verticalmente en varias capas. Fue desarrollado por Bakhaus (1985) y adaptado por Marinone (2000) al Golfo de California.

El dominio del modelo usa una malla 'C' de Arakawa de 2.5' x 2.5' (3.9 x 4.6 km). En la coordenada vertical cuenta con 12 capas con profundidades nominales de 10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 350, 600, 1000 y 4000 m. El número de capas en cada nodo depende de la profundidad.

Las simulaciones se realizaron forzando el modelo con las 7 componentes más importantes de la marea (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1) y una variación estacional de temperatura y salinidad en la boca. En la superficie se fuerza con una variación estacional del viento de frecuencia anual y amplitud 5 ms^{-1} con dirección noroeste en verano y sureste en invierno y flujos de calor y agua dulce.

Las simulaciones partieron del reposo y una vez que el modelo alcanzó el equilibrio se tomaron los campos de velocidad de dos años consecutivos, con un intervalo de

tiempo de una hora. Una descripción más detallada del modelo puede encontrarse en Marinone et al. (1996) y Marinone (2002).

II.2 Modelo Lagrangeano

Las advecciones se realizaron integrando en el tiempo las ecuaciones de velocidad horizontal (u, v) de la primer capa, i.e.,

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (1)$$

y

$$\frac{dy}{dt} = v. \quad (2)$$

La integración numérica se realizó con el método Runge Kutta de 2º orden que mantiene un error de truncamiento del $O(\Delta t^3)$ (García, 1994) utilizando un Δt de 10 minutos. Al realizar la integración del campo de velocidades, las partículas no coinciden con los nodos donde se conocen las velocidades, por lo que éstas fueron calculadas por interpolación bilineal usando una submatriz con las 4 celdas más cercanas a la posición de las partículas. Para simplicidad de los cálculos, los valores de velocidad se interpolaron al centro de las celdas de malla. El paso de tiempo y los métodos de integración e interpolación se eligieron después de realizar pruebas de integración en campos de velocidad estacionarios donde las trayectorias son conocidas, estas pruebas se describen en el apéndice A.

Para evitar que las partículas crucen la frontera, se corrigen las submatrices antes de la interpolación espacial, de tal forma que en la costa la componente de velocidad perpendicular a ésta sea cero. Esto se logra, sustituyendo en las submatrices las celdas que corresponden a las fronteras con valores de velocidad de igual magnitud a la componente perpendicular a la costa pero con dirección opuesta. Los detalles de esta técnica se explican en el apéndice B.

III Resultados y discusiones

III.1 Circulación estacional

Para analizar la circulación estacional se realizaron advecciones mensuales y anuales. Las advecciones anuales se realizaron debido a que la frecuencia más baja usada como forzamiento del modelo es anual y para determinar cuál es la distribución de las partículas y las rutas que usaron para moverse durante este período. Las advecciones mensuales se analizan con la intención de describir el ciclo anual del golfo y comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con lo obtenido por mediciones experimentales realizadas por otros autores. Para sintetizar la información el golfo se dividió en 4 regiones (fig. 2): región norte [RN], región de las islas [RI], región central [RC] y región sur [RS].

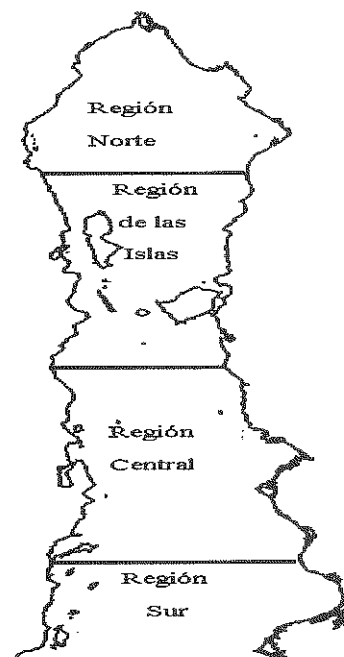


Figura 2: Regiones del golfo donde se presentan resultados integrados.

III.1.1 Advecciones mensuales

En la figura 3 se presentan las trayectorias mensuales de las advecciones realizadas. Las flechas oscuras fueron colocadas para indicar la dirección general de las partículas.

REGIÓN NORTE

La Region Norte (RN) está dominada por un giro anticiclónico de octubre a mayo (fig. 3) que coexiste con un segundo giro ciclónico menor en la costa de Baja California (BC). El giro principal se encuentra centrado en la región norte y se extiende hacia el sur hasta la Isla Ángel de la Guarda (IAG); sin embargo, éste no alcanza la costa de Baja California, debido a la influencia del giro ciclónico secundario mencionado antes. Entre IAG y la costa oriental del golfo (COG) las partículas se dividen en dos grupos, uno regresa a la RN y el otro escapa hacia la región sur (RS).

Durante julio y agosto la región norte presenta un giro ciclónico (fig. 3g, h) de forma elongada que ocupa toda la región. En la costa de BC ya no se encuentra el giro ciclónico cercano a la costa de BC que se observa en el período anticiclónico. También se observa la llegada de un gran número de partículas que provienen de las regiones más al sur y no se encuentran trayectorias hacia el exterior de esta región.

Las transiciones ocurren en los meses de junio y septiembre (fig. 3f, i). En la transición de junio las partículas disminuyen su velocidad hasta que su dirección es la opuesta con lo que se inicia la circulación ciclónica y con ésta la invasión de partículas desde la región central y sur. La transición de septiembre es distinta, ahora se observan dos giros ciclónicos de menores dimensiones, uno al noreste de IAG y otro más al norte cerca de cuenca Wagner.

Lavín et al. (1997) y Palacios et al. (2002), por medio de trazadores lagrangianos y mediciones de correntímetros (el segundo autor) realizadas entre 1995 y 1996, reportaron un ciclo anual semejante al encontrado aquí para un giro observado sobre la cuenca Delfín. Específicamente Palacios et al. (2002) describen en el ciclo un giro anticiclónico

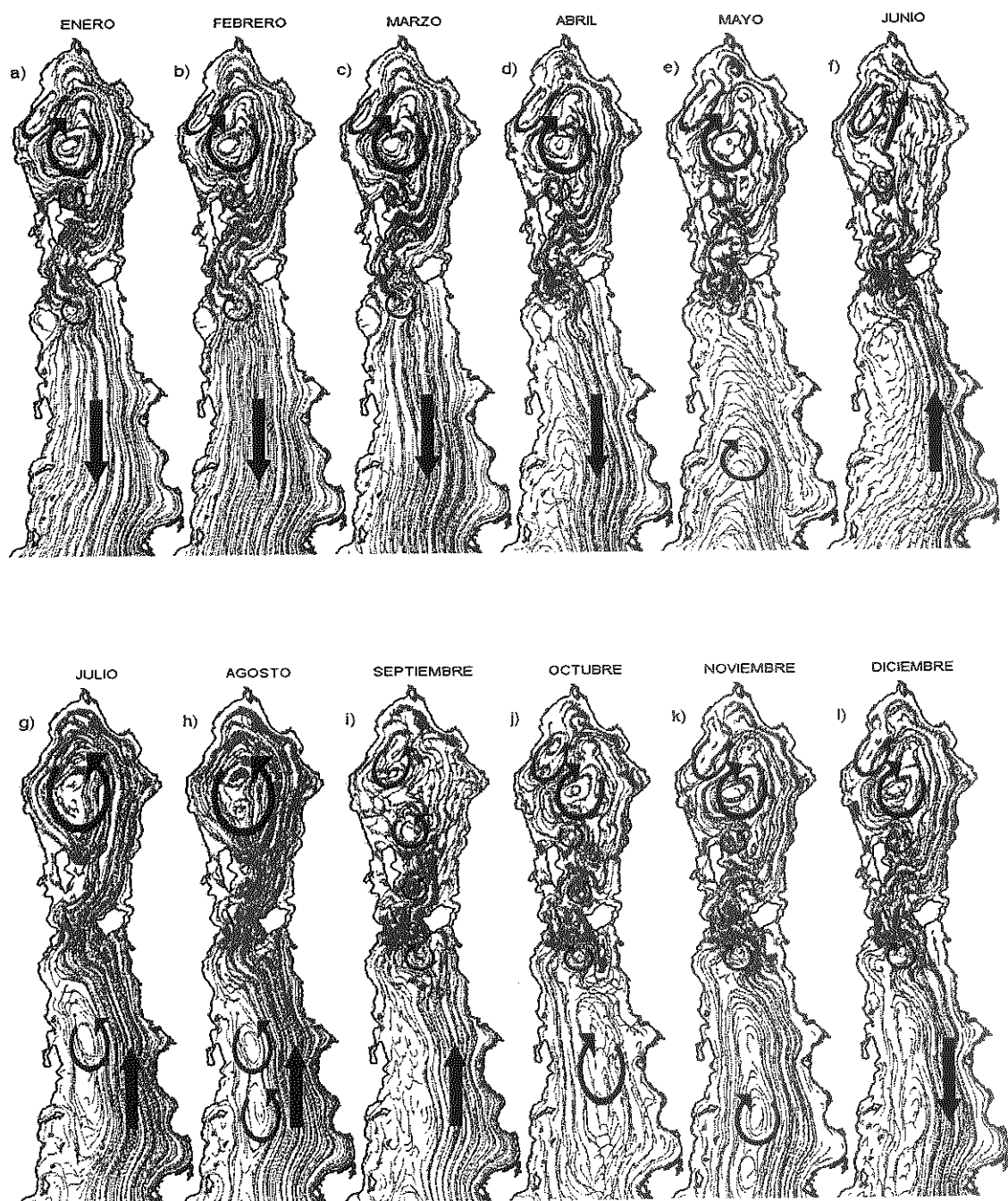


Figura 3: Trayectorias de partículas advectadas durante el mes señalado. Las posiciones iniciales son las mismas en los 12 casos y la fecha inicial corresponde al día primero de cada mes. Las flechas indican la dirección principal del flujo.

de mediados de octubre a mediados de abril, un giro ciclónico de mediados de mayo a finales de septiembre y transiciones en otoño desde finales de septiembre a mediados de octubre y en primavera desde mediados de abril a mediados de mayo.

Al comparar las trayectorias obtenidas por los autores anteriores y una las trayectorias calculadas para esta zona se encontraron grandes semejanzas sobre todo en las mediciones reportadas para el período de febrero a abril (fig. 4a, b). Este giro forma parte del período anticiclónico que abarca toda la región norte según se puede observar en la fig. 3b-d. En el caso del giro ciclónico reportado por estos autores entre agosto y septiembre, coincide con uno de los giros ciclónicos encontrados durante la transición de septiembre (fig. 4c, d), mientras que el período ciclónico encontrado aquí se encuentra entre julio y agosto (fig. 3.g-h).

REGIONES CENTRAL Y SUR

Las regiones central y sur presentan dos períodos anticiclónicos, uno extenso durante octubre-noviembre (fig. 3j, k) y el otro corto en mayo (fig. 3e) y sólo un período ciclónico en julio y agosto (fig. 3g, h) que coincide con el período ciclónico de la RN. Durante los meses de enero a marzo (fig. 3a-c) se encontró un flujo de partículas intenso hacia la boca, esto es debido al arrastre del viento que es máximo en esta época del año (Marinone, 2002). Un flujo semejante, pero en dirección opuesta, se observa entre junio y agosto, aunque sólo por el lado de la COG (fig. 3f-i) desplazando los giros hacia la costa de BC.

Durante el período de enero a marzo una gran cantidad de partículas de la región central y sur abandonan el golfo y coincide con la expulsión de partículas de la RN durante el período anticiclónico, por lo que se espera que el mayor número de partículas de la región sur, central e incluso de la RN abandonen el golfo, al contrario de los meses de junio y agosto cuándo las partículas son advectadas hacia la región norte.

Los períodos anticiclónicos de octubre a noviembre y el de mayo son distintos entre

si, pues mientras en el primero se observan algunos giros sobre las cuencas profundas causando que las partículas se desplacen alrededor de estos, en el segundo no existen estos giros por lo que las partículas se alejan de la costa de BC y se mueven hacia la COG (fig. 3e, j-k).

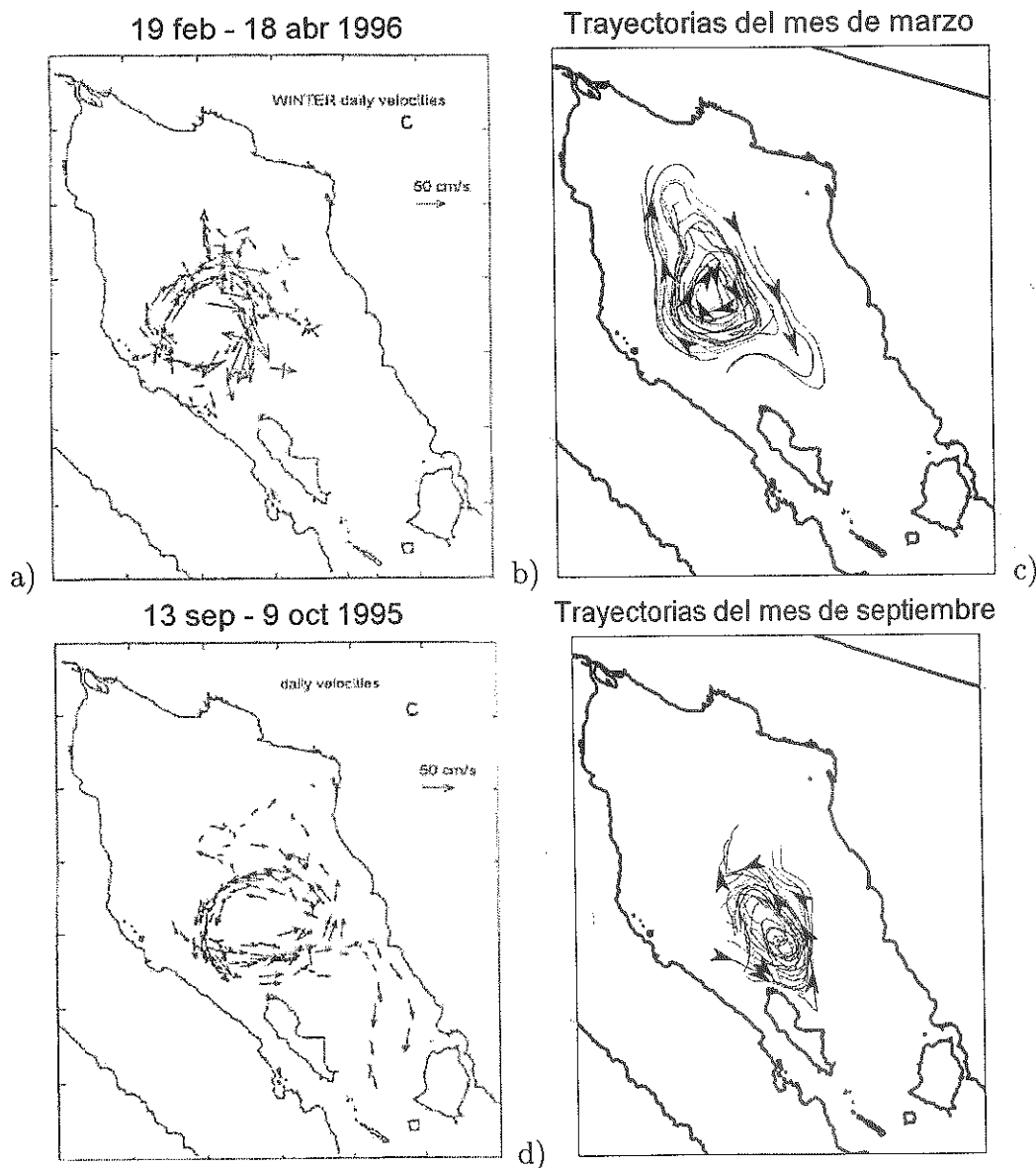


Figura 4: Trayectorias medidas con boyas de deriva por Lavín et al., (1997) y las calculadas numéricamente. a) Mediciones del 19 de febrero al 18 de abril de 1996. b) Trayectorias calculadas numéricamente durante el mes de marzo. c) Mediciones del 13 de septiembre al 9 de octubre de 1995. d) trayectorias calculadas numéricamente durante el mes de septiembre.

Los cambios entre períodos en esta región ocurren en diciembre, abril, junio y septiembre (fig. 3l, d, f, i). La característica principal de éstos períodos es el movimiento de partículas hacia el exterior del golfo por los primeros dos y hacia el interior por los últimos. Las partículas que describen estas trayectorias, se mueven rápido como las que ocurren en el período de escape entre enero y marzo, sin embargo en las transiciones las partículas sólo escapan por la COG mientras que en la costa de BC las partículas están quietas o se mueven muy lentamente en la dirección opuesta a la principal.

En ésta, la región sur del golfo se han reportado flujos de entrada/salida por la superficie en verano/invierno, con datos de deriva de barcos, lo cual coincide con lo obtenido aquí. Durante invierno un flujo intenso de partículas hacia el exterior (fig. 3a-c) y durante el verano hacia el interior, aunque principalmente por la COG (fig. 3f-i).

Emilsson y Alatorre (1997) reportaron trayectorias obtenidas con 4 crucetas de deriva liberadas frente a Bahía de La Paz en el mes de agosto de 1978 y observaron que estas describían un giro ciclónico. Esta zona se encuentra cercana a la frontera abierta usada en las simulaciones, sin embargo un poco más al norte se encontraron un par de giros ciclónicos sobre las Cuencas de Guaymas y del Farallón en la misma época del año (fig. 3g-h). Giros semejantes, aunque anticlónicos, se encontraron en el mes de noviembre (fig. 3k).

REGIÓN DE LAS ISLAS.

La región de las Islas se caracteriza por tener canales estrechos y cambios drásticos en la batimetría (fig. 1) que inhiben la circulación en ciertas épocas. Beier (1997) encontró largos períodos de no comunicación entre la región norte y la central. En las advecciones realizadas aquí sí se encontró comunicación a lo largo del año sobre todo a través de los canales entre Isla Tiburón e Isla Ángel de la Guarda. Solamente cuando coinciden períodos ciclónicos (i.e., mayo y octubre) en ambas regiones la comunicación es mínima (fig. 3e, j). A través del canal de Ballenas (CB) el paso de partículas entre

RN y RC es mínimo. Para algunos meses incluso las partículas que inician dentro del canal no logran escapar.

Cuando coinciden transiciones en la RN y RC (fig. 3f, i) en la región de las islas se observa que las partículas se acumulan entre Isla Tiburón y la costa de BC. Se observan giros pequeños entre IAG y la COG sobre todo entre septiembre y noviembre (fig. 3i-k) y un giro anticiclónico durante todo el año al sur de Isla Tiburón.

La tabla II resume los distintos períodos de circulación para el GC. La región norte presenta circulación anticiclónica de octubre a mayo, ciclónica de julio a agosto y transiciones durante los meses de junio y septiembre. En la región centro y sur existen períodos anticiclónicos en mayo y de octubre a noviembre que coinciden con el inicio y final del período anticiclónico de la RN y el período ciclónico en julio y agosto que también coincide con el período ciclónico de la RN. Las transiciones ocurren en diciembre, abril, junio y septiembre, en las que domina la advección de partículas hacia la RN del golfo en las primeras dos y hacia el exterior del golfo en las últimas dos. En los meses de enero a marzo se presenta expulsión de partículas por la frontera abierta que coincide con el período anticiclónico de la RN. Esta información se encuentra resumida y esquematizada en la tabla II.

Tabla II: Esquema de la circulación general del golfo para las regiones indicadas. \circlearrowleft circulación ciclónica; \circlearrowright circulación anticiclónica; T transiciones y las flechas indican la dirección dominante del flujo.

REGIÓN	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S
NORTE	\circlearrowright	\circlearrowright	\circlearrowright	\circlearrowright	\circlearrowright	\circlearrowright	\circlearrowright	\circlearrowright	T	\circlearrowleft	\circlearrowleft	T
CENTRO Y SUR	\circlearrowright	\circlearrowright	T↓	↓	↓	↓	T↓	\circlearrowright	T↑	\circlearrowleft	\circlearrowleft	T↑

III.1.2 Advecciones anuales

De las advecciones mensuales conocemos cuándo y cómo son los períodos ciclónicos, anticiclónicos y las transiciones, sin embargo, dadas las escalas del forzamiento, la circulación tiene un período máximo anual. Así que seguir las partículas por un año nos permite encontrar cuáles son las rutas principales, su destino final (después de un año) y determinar dónde están las principales zonas de atrapamiento y escape.

Para identificar las partículas según la región en que iniciaron la advección a lo largo del año, éstas se etiquetaron con \circ , $+$, \diamond y \star , en las figuras y en el texto como PN, PI, PC y PS como las partículas que iniciaron en la RN, RI, RC y RS, respectivamente.

A continuación se presenta la descripción de la advección que inició el 1 de enero del 2001 (fig. 5), y que concluye el 31 de diciembre del mismo año (ver tabla I). En la figura la línea asociada a cada partícula representa la trayectoria recorrida por éstas en los 5 días previos al tiempo indicado. La condición inicial de este experimento corresponde (tabla II) al período anticiclónico de la RN y al período de expulsión de partículas de la RC y RS. Durante el primer mes de advección (20 de enero, fig. 5a) las PN se mantienen girando en la RN y sólo las partículas cercanas a la costa se mueven hacia el sur. Frente a IAG el grupo se divide, las que se encuentran más cercanas a la costa escapan hacia el sur mientras que el resto se mantiene en el giro de esta región. En la región central y sur las partículas se mueven de manera casi uniforme hacia la boca del golfo.

Durante los siguientes meses la RN mantiene atrapadas a las PN y de la RC hacia el sur continúan saliendo partículas por la boca. El 10 de febrero (fig. 5b) las PN que escaparon alcanzan la RI y la mayoría de las PI se encuentran en la región central. El máximo desplazamiento (~ 250 km) alcanzado por las partículas es en la COG y el mínimo (~ 100 km) hacia la costa de BC, de tal forma que la COG comienza a quedarse sin partículas.

Para el 24 de marzo (fig. 5c) las PC y PI abandonan el golfo y sólo permanecen

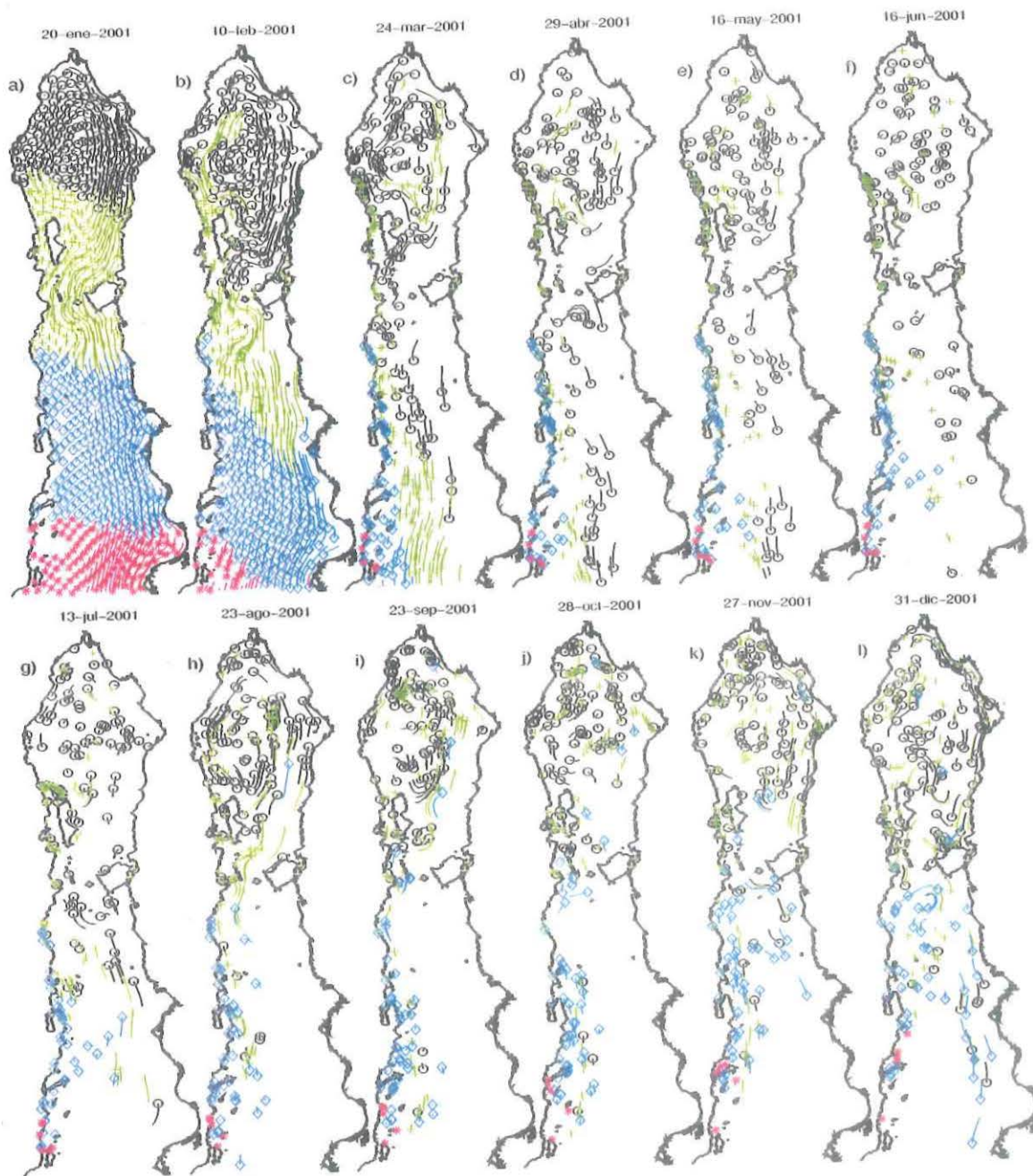


Figura 5: Evolución temporal de la posición de las partículas en el golfo en la fecha indicada. El tiempo inicial de la advección es el 1/1/2001. La longitud de las trayectorias es la recorrida por la partícula en los 5 días anteriores a la fecha indicada. Las trayectorias de las partículas que iniciaron la advección en la región norte (o) son color negro, las que iniciaron en la región de las islas (+) son color verde, aquellas que iniciaron en la región central (◊) son azules y las que iniciaron en la región sur (*) son rojas.

algunas atrapadas a la costa de BC, también las PN que escaparon de la RN alcanzan la región sur. Para entonces la RN, que mantiene también algunas PI, expulsa muy pocas partículas, y en la COG no queda ninguna de las partículas inicialmente liberadas. A principios de abril (no se muestra) este último pequeño grupo de PN llegan a la RC y para el 29 de abril (fig. 5d) se dispersan ocupando el centro de la región.

Aún cuando el mes de mayo sigue teniendo características anticiclónicas las trayectorias son muy cortas y se mueven con desorden (16 de mayo, fig. 5e). En la región central, que también presenta características anticiclónicas, las PN que se encontraban dispersas se acercan a la COG, mientras que las PC y PI que se encontraban en la costa de BC se liberan y se dirigen lentamente al centro del golfo.

En la RN las partículas continúan disminuyendo la velocidad, hasta que el 16 de junio (fig. 5f), su velocidad es mínima y las trayectorias difíciles de apreciar. A partir de entonces en la RC sobre la COG, las PN son advectadas de regreso hacia la región norte. Mientras que en la costa de BC nuevamente las partículas se mueven con velocidades muy bajas.

Durante los primeros días de julio (13 de julio, fig. 5g) las PN rápidamente se ordenan y se mueven ciclónicamente en la RN, al mismo tiempo comienzan a llegar las PN que se encontraban en la RC y algunas PI, mientras que la RS se queda sin partículas, con el inicio de los períodos ciclónicos. En agosto (23 de agosto, fig. 5h) las partículas se agrupan en la RN, mientras que la RC se queda sin partículas a excepción de la costa de BC.

En septiembre (23 de septiembre, fig. 5i) nuevamente ocurre transición en todo el golfo (i.e., cambios en el sentido de los giros), con lo que en la RN las partículas se desordenan y forman tres giros menores, dos frente a IAG y uno sobre cuenca Wagner. Es hasta finales de octubre (28 de octubre, fig. 5j) cuando nuevamente las partículas en la RN forman un giro anticiclónico bien definido que ocupa toda la región.

En noviembre (27 de noviembre, fig. 5k) en la RN, igual que al inicio del experimen-

to, sólo escapan de la región las partículas más cercanas a la COG. La región central también se comporta de forma anticiclónica, con lo que las PC que permanecían en la costa de BC se mueven hacia la boca por la COG. Este proceso se mantiene hasta el final del experimento (31 de diciembre, fig. 5l).

De este experimento se puede resumir que la región norte y la costa de BC en la región central atrapan partículas. Que la región norte sólo libera algunas durante el período anticiclónico, éstas se acercan después a la COG por donde regresan en el mes de julio que corresponde al período ciclónico (tabla II), sólo muy pocas (17/148) PN alcanzan a cruzar la boca entre abril y mayo. También se observa que las partículas cruzan a la RC por los canales entre IAG e Isla Tiburón como se había notado en las advecciones cortas y que a través del CB no hay paso, de hecho en la parte norte de este canal se atrapan partículas durante el período anticiclónico y son liberadas entre julio y agosto (fig. 5). La zona de Isla Tiburón atrapa partículas durante todo el año, específicamente en el canal entre la isla y COG, sin embargo la causa pudiera ser que dentro del canal se cuenta con muy pocos puntos de malla y por lo tanto no se logre ajustar la frontera adecuadamente, por lo que el atrapamiento pudiera ser por causas numéricas.

La costa de BC en la región central también atrapa partículas que libera al final del experimento cuando mantiene circulación anticiclónica (fig. 5j-k). Por el contrario la COG es una zona de escape durante todo el año ya sea hacia el interior o exterior del golfo.

Esta descripción corresponde a sólo una de las doce advecciones anuales realizadas, en el resto las trayectorias son diferentes aún cuando los campos de velocidad instantánea usados en el cálculo son los mismos, en el CD anexo se encuentran las animaciones de las 12 advecciones realizadas. Las zonas de atrapamiento y de escape se mantienen en todos los experimentos, solamente varía la cantidad de partículas que pudieran tener, ya que esto depende de las condiciones iniciales del experimento, las cuales determinan

las rutas y destinos finales de las partículas que se muestran a continuación.

III.1.3 Tiempos de residencia y rutas principales en el GC.

Para observar las rutas y destinos finales de todos los experimentos se calcularon contornos del tiempo requerido para que las partículas abandonen el golfo y se buscaron patrones típicos entre las partículas dentro de estos contornos. Al observar los contornos se identificaron tres patrones diferentes, éstos se agruparon y se analizan en seguida.

El primero representa los cuatro experimentos iniciados entre el 1 de junio y el 1 de septiembre del 2000. Durante el inicio de éstos, la circulación es ciclónica en todo el golfo. La figura 6 muestra el experimento que inició el 1 de julio. En los primeros 3 meses del experimento sale del golfo un reducido grupo de partículas que se ubican en la RS por la costa de BC (fig. 6 línea roja). El siguiente grupo en abandonar el golfo lo hace 5 meses después de iniciado el experimento (entre diciembre y febrero). Este grupo se encuentra ubicado también en la RC en la costa de BC, es durante su recorrido en octubre y noviembre (período anticiclónico según la tabla II) cuando se acerca hacia la COG por donde salen del golfo. Este grupo está representado por la línea amarilla en la figura 6, que es la trayectoria de una partícula dentro de este grupo.

El resto de las partículas de la RC que abandonan el golfo lo hacen entre 8 y 10 meses después (entre marzo y mayo). Éstas viajan en el período ciclónico de julio-agosto, siguiendo la línea de COG hasta la región norte; se acumulan en la zona más al norte del golfo y a partir de octubre, en el período anticiclónico, regresan siguiendo la misma ruta hacia la región central y posteriormente abandonan el golfo. La línea verde (fig. 6) es una trayectoria que representa esta ruta.

Las partículas que se encuentran en la COG quedan atrapadas desde el primer mes de advección entre Isla Tiburón y la COG (trayectoria no mostrada en la figura).

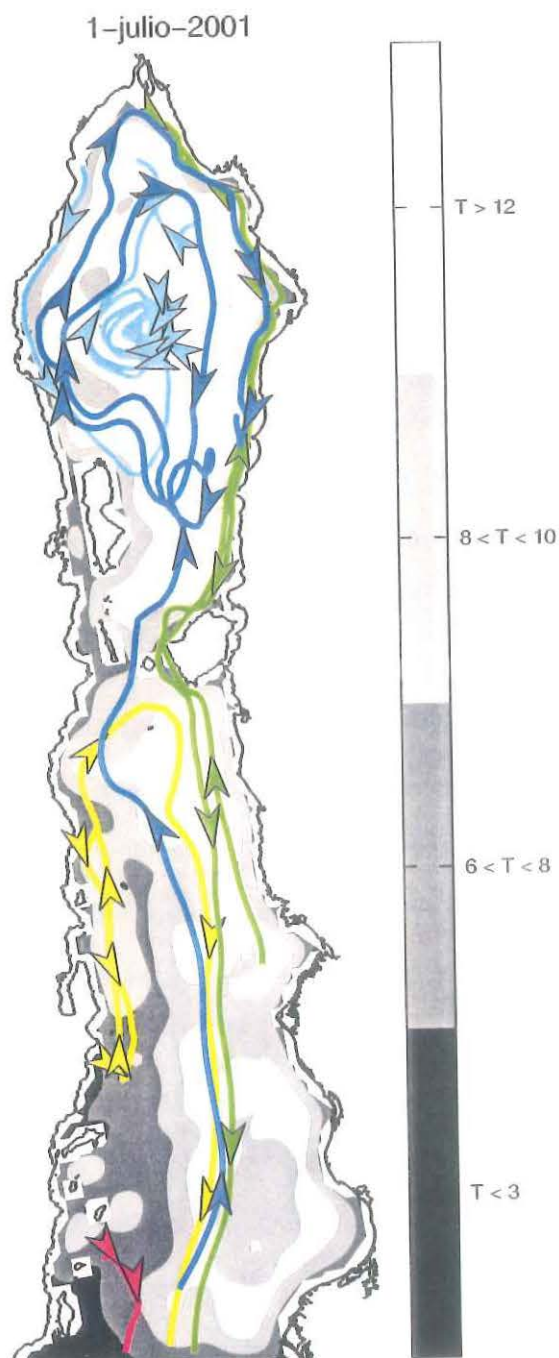


Figura 6: Tiempos de residencia de las partículas en el golfo para la advección iniciada el 1 de julio del 2000. Las líneas son trayectorias de partículas representativas de las rutas principales. La escala de grises muestra el período de tiempo en el que las partículas abandonan el golfo. Los tonos más oscuros salen primero del golfo, mientras que los claros tardan más en salir.

Algunos grupos reducidos de partículas en el centro de la región central alcanzan la RN donde permanecen atrapadas en el giro principal por el resto del experimento (ver línea azul en fig. 6), al igual que aquellas partículas que inician en la RN (fig. 6 línea azul celeste).

El segundo patrón incluye a los seis experimentos con tiempo inicial entre el 1 de octubre del 2000 y el 1 de marzo del 2001. La figura 7 corresponde al experimento con tiempo inicial el 1 de enero del 2001, es decir es el experimento descrito a detalle en la sección III.1.2 y en la figura 5. Se observa que las partículas cercanas a la COG en la RC abandonan el golfo durante los primeros 3 meses de advección siempre siguiendo la costa (fig. 7 líneas roja, amarilla y verde). La línea azul celeste representa las partículas que iniciaron sobre la costa en la región norte y que también siguen la COG y abandonan el golfo después de 3 y antes de 5 meses. Las partículas que iniciaron en la región norte y en la costa de BC en la región central permanecen en el interior del golfo hasta el final del experimento (fig. 7 líneas azul y magenta), quedando atrapadas en la región norte, o escapan a la región central para después regresar a la región norte.

En el tercer patrón se encuentran los dos experimentos restantes que inician el 1 de abril y 1 de mayo del 2001. Durante estos meses, el golfo tiene características anticiclónicas en la RN y en la RC va de transición a anticiclónico. La figura 8 muestra el experimento iniciado el 1 de abril del 2001 y se observa que el área donde se encuentran ubicadas las partículas que abandonan el golfo en menos de 2 meses está reducida al sur de la región central y la región sur. Las líneas amarilla y roja (fig. 8) representan las rutas que siguen estos grupos de partículas para abandonar el golfo. En este caso la mayoría de las partículas permanecen dentro del golfo o salen de éste hasta el período anticiclónico entre 10 y 12 meses después (fig. 8 línea verde), lo que resulta en un período promedio de permanencia en el golfo mayor a los 9 meses.

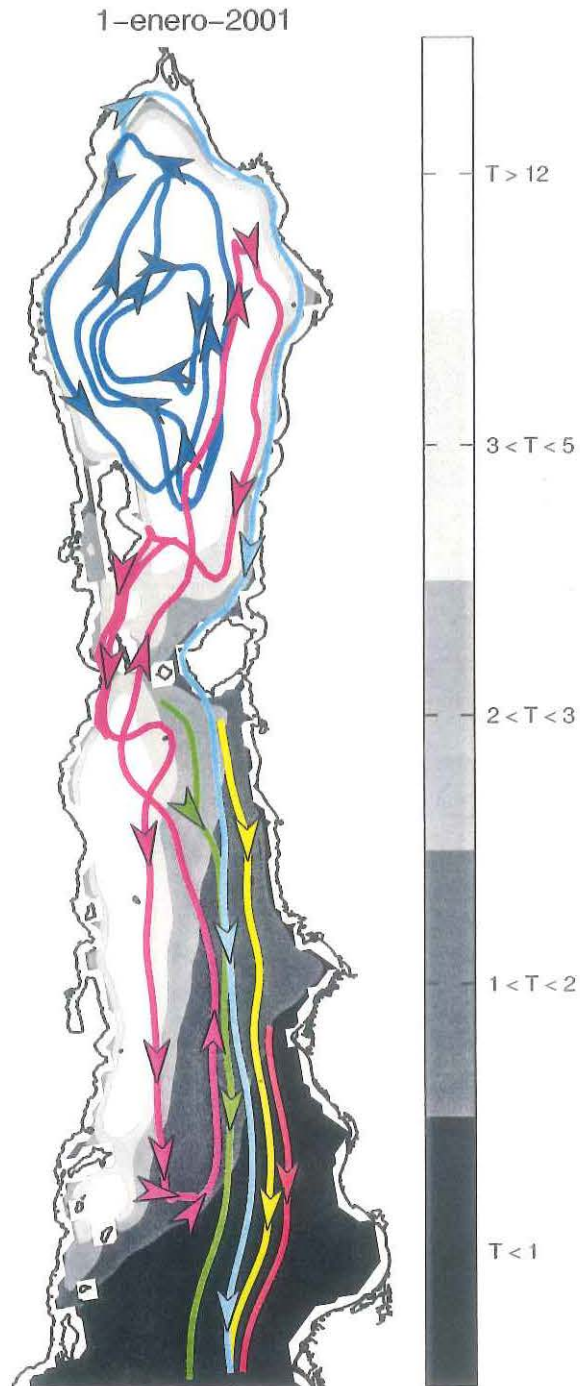


Figura 7: Tiempos de residencia de las partículas en el golfo para la advección iniciada el 1 de enero del 2001. Las líneas son trayectorias de partículas representativas de las rutas principales. La escala de grises muestra el período de tiempo en el que las partículas abandonan el golfo. Los tonos más oscuros salen primero del golfo, mientras que los claros tardan más en salir.

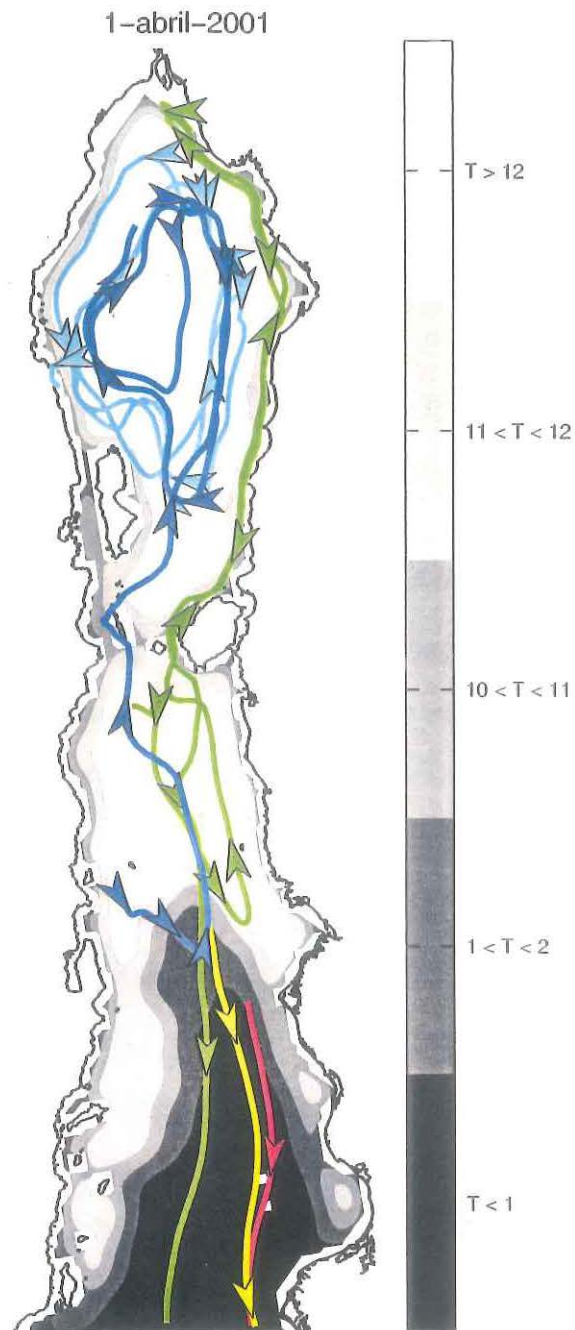


Figura 8: Tiempos de residencia de las partículas en el golfo para la advección iniciada el 1 de abril del 2001. Las líneas son trayectorias de partículas representativas de las rutas principales. La escala de grises muestra el período de tiempo en el que las partículas abandonan el golfo. Los tonos más oscuros salen primero del golfo, mientras que los claros tardan más en salir.

Las partículas que inician el experimento en la región central se mueven hacia la región norte (fig. 8 línea azul), aquellas partículas que se encuentran más cercanas a la COG, siguen paralelas a ésta y permanecen atrapadas en la proximidad de Isla Tiburón (IT) por el resto del experimento (estas trayectorias no se muestran en la figura). Las partículas que cruzan cercanas a IT siguen por la COG, permanecen atrapadas a ésta y después regresan por el mismo camino hacia la RC y el exterior del golfo (fig. 8 línea verde). Las partículas que cruzan cerca de IAG se incorporan al giro de la RN y permanecen ahí al menos hasta el final del experimento (fig. 8 línea azul). Por último, las partículas que inician en la RN en general se mantienen atrapadas en el giro de esta región (fig. 8 línea azul celeste) y sólo algunas escapan en el período anticiclónico entre diciembre y el final del experimento.

En esta sección se describieron los patrones más generales y repetitivos de las partículas dentro del golfo, sin embargo, como se mencionó anteriormente, todos los experimentos tienen diferencias importantes y las trayectorias mostradas no tienen valor estadístico. Es decir existen partículas dentro de cada contorno que no siguen estas trayectorias.

III.2 Distribución de partículas en función del tiempo inicial

En los experimentos realizados se colocaron un número limitado de partículas a un momento dado en todo el golfo y de ahí se distribuyen y mueven con las corrientes a que están sujetas. En realidad en el GC, a cada instante y en cada lugar tenemos una infinidad de partículas de agua que provienen de diferentes regiones y desde diferentes tiempos. Esto equivale a colocar una malla completa de partículas a cada paso de tiempo, lo cual si no es imposible, es muy costoso a nivel computacional. Sin embargo si graficamos las partículas de todos los experimentos para un tiempo dado en un mismo mapa tendríamos una distribución de partículas más completa y con partículas con historias diferentes.

En las figuras 9 y 10, se observa para las fechas 15 de enero y 15 de julio, respectivamente, la distribución de partículas en el golfo de seis de los doce experimentos. Se muestran los últimos 10 días de trayectorias de la advección de partículas iniciadas 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5 y 11.5 meses atrás. Con esta representación, para las mismas corrientes (5-15 de enero) observamos de donde provienen las partículas en función del tiempo.

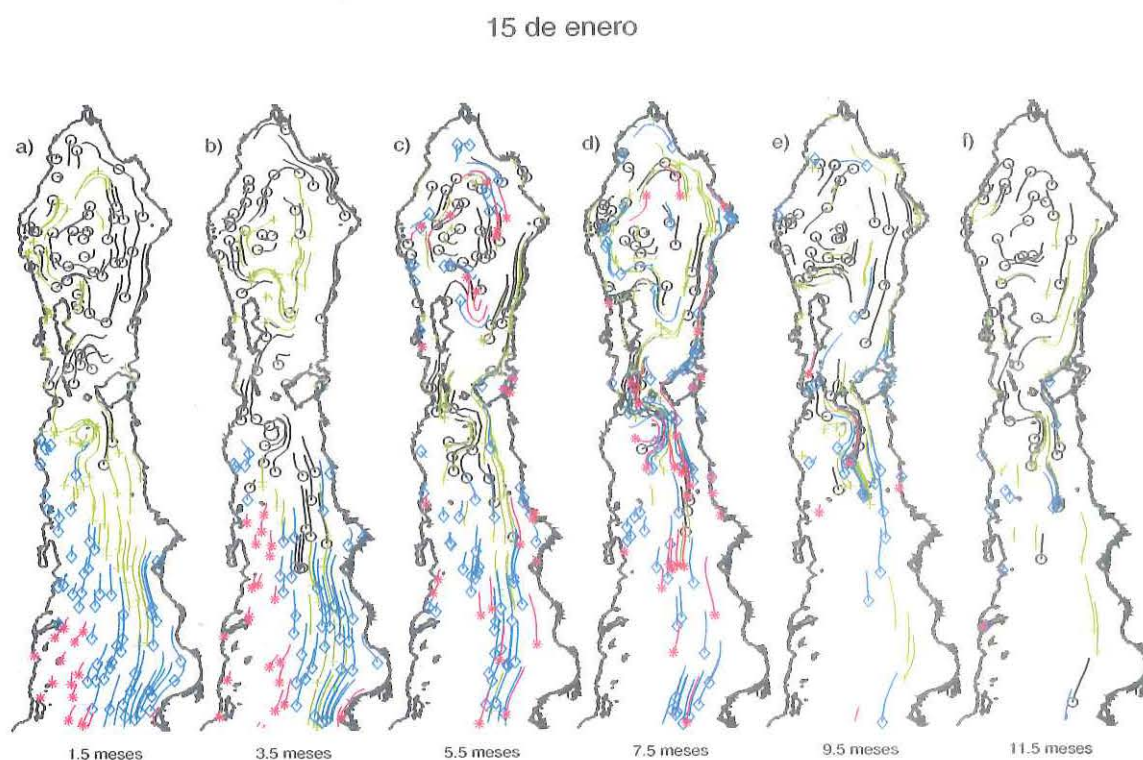


Figura 9: Trayectorias de las partículas del 5 al 15 de enero del 2001. Se muestran los experimentos que iniciaron 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5 y 11.5 meses atrás. Las trayectorias de las partículas que iniciaron la advección en la región norte (○) son color negro, las que iniciaron en la región de las islas (+) son color verde, aquellas que iniciaron en la región central (◇) son azules y las que iniciaron en la región sur (*) son rojas.

El 15 de enero corresponde al período anticiclónico de la RN y en la RC y RS al período en que las partículas son advectadas hacia el exterior del golfo (tabla II). En los 7 meses inmediatos anteriores encontramos el período ciclónico (tabla II) y los períodos en que las partículas de la RC son lanzadas hacia la RN (fig. 6), por esta razón

se observa una gran cantidad de partículas de todas las regiones (colores) distribuidas en todo el golfo al menos para los experimentos con menos de 7 meses de advección (fig. 9 a-d). En los casos de experimentos con más tiempo de advección se observa que la cantidad de partículas es mucho menor debido a que la advección incluye al menos una parte del período de enero a abril (fig. 7 y 8) cuando las partículas son lanzadas al exterior del golfo.

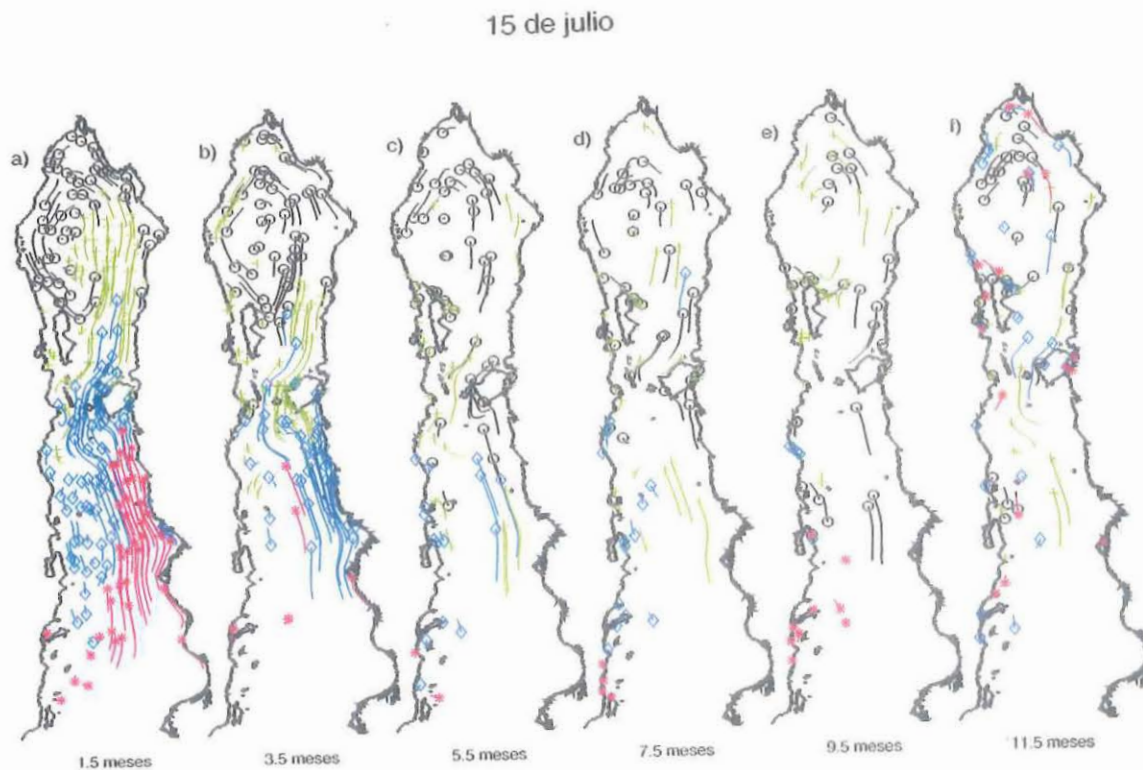


Figura 10: trayectorias de las partículas del 5 al 15 de julio del 2001. Se muestran los experimentos que iniciaron 1.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5 y 11.5 meses atrás. Las trayectorias de las partículas que iniciaron la advección en la región norte (o) son color negro, las que iniciaron en la región de las islas (+) son color verde, aquellas que iniciaron en la región central (◊) son azules y las que iniciaron en la región sur (*) son rojas.

El día 15 de julio del 2001 (fig. 10) que corresponde según la tabla II al período ciclónico en todo el golfo y los meses anteriores al período anticiclónico en la RN y de escape por la boca en la RC. En este caso un gran número de partículas abandona el golfo, lo cual se nota sobre todo en los experimentos con tiempos de advección mayores

a 3 meses (fig. 10 c-f). De aquí es posible determinar que las partículas que llegan a la RN durante el período ciclónico se encontraban en la RC o entraron al golfo en los 2 o 3 meses anteriores a este período (fig. 10).

III.3 Cuantificación por áreas

Sabemos que durante el período ciclónico las regiones central y sur advectan partículas hacia la RN y que es en el período anticiclónico cuando las partículas del golfo escapan hacia el exterior. Aquí se muestra el conteo de partículas de cada mes en cada región, para determinar la proporción de partículas que llegan o escapan de cada región, en los experimentos que inician el 1º de abril y el 1º de octubre. Estos experimentos iniciaron dos meses antes de los períodos ciclónico y anticiclónico respectivamente.

El total de partículas liberadas al tiempo inicial de cada experimento fue de 660, distribuidas como se muestra en la figura 11. Estas partículas durante el experimento se movieron y redistribuyeron dentro del golfo, en diferentes cantidades y también lo abandonaron. Los conteos se realizaron al final de cada mes por región, conservando la etiqueta de la región de origen de cada partícula, así para cada conteo, se presenta un histograma semejante a la figura 11 donde la primer barra indica el número de partículas en la RN, la segunda barra en la RI, la tercer barra en la RC y la cuarta barra en la RS. Cuando las partículas se mueven y cambian de región, entonces en esa nueva región aparecerá un segmento de barra con el color de partículas de otra región. Las partículas que iniciaron en la RN son el azul marino, el color azul claro las que iniciaron en la RI, el amarillo a las que iniciaron en la RC y el rojo a aquellas que iniciaron en la RS.

El experimento del 1 de abril (fig. 12a) inicia al final del período anticiclónico de la RN (tabla II) antes de entrar al período ciclónico de julio y agosto. Durante estos meses se observa el arribo de partículas a la región norte de las regiones más al sur del golfo. Durante los primeros tres meses del experimento ocurren pocos cambios,

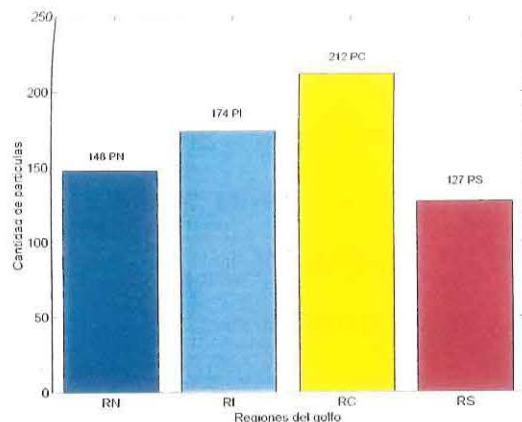


Figura 11: Histograma con la distribución original de partículas en el golfo por regiones. RN indica la región norte, RI la región de las islas, RC la región central y RS la región sur y tienen inicialmente 148, 174, 212 y 127 partículas respectivamente.

solamente las partículas se dispersan un poco y alcanzan a llegar a las regiones vecinas. En junio se observa el primer cambio en el que la región sur lanza las partículas hacia la región central. En la región de las islas y norte se nota el aumento de partículas de 174 a 231 y 148 a 187 respectivamente. En los meses siguientes (agosto, septiembre y octubre) se encuentran los máximos en la RN (311 partículas), de las cuales el 20% son partículas provenientes de la región central y sur, la región norte y de las islas aportan un 40% cada una.

Después de octubre el número de partículas en la RN comienza a disminuir tal que para diciembre se ha quedado la cantidad inicial de partículas y al final del experimento en marzo hay menos de 50 partículas. Mientras la RN es desalojada, la barra de la región centro y sur comienza a crecer por el paso de las partículas hacia el exterior del golfo. Este proceso en que las partículas salen del golfo se aprecia mucho mejor en el experimento del 1 de octubre.

El experimento del 1 de octubre (fig. 12b) inicia justo antes del período anticiclónico (tabla II), por lo que se espera tener el máximo de partículas en el golfo antes de iniciar el proceso en que son lanzadas al exterior en los meses siguientes. La expulsión de las

partículas comienza desde diciembre y es drástica en los dos o tres meses siguientes. El 30% (46/148) de las PN alcanza la región central en enero, el 12% (18/148) la región sur en febrero y el 8% (12/148) abandona el golfo en este mismo período. Las partículas de la región de las islas se separan en tres grupos de ~ 50 partículas cada uno al menos al inicio, uno permanece en la región, otro se mueve a la RN y el último a la RC, el cual escapa por la boca entre diciembre y febrero. La región central mantiene el número inicial de partículas durante los primeros dos meses con aporte de partículas de las regiones al norte, sin embargo de tener 223 partículas (0 PN, 52 PI, 122 PC y 49 PS) en noviembre decae a 122 (46 PN, 15 PI, 37 PC y 24 PS) en enero es decir un

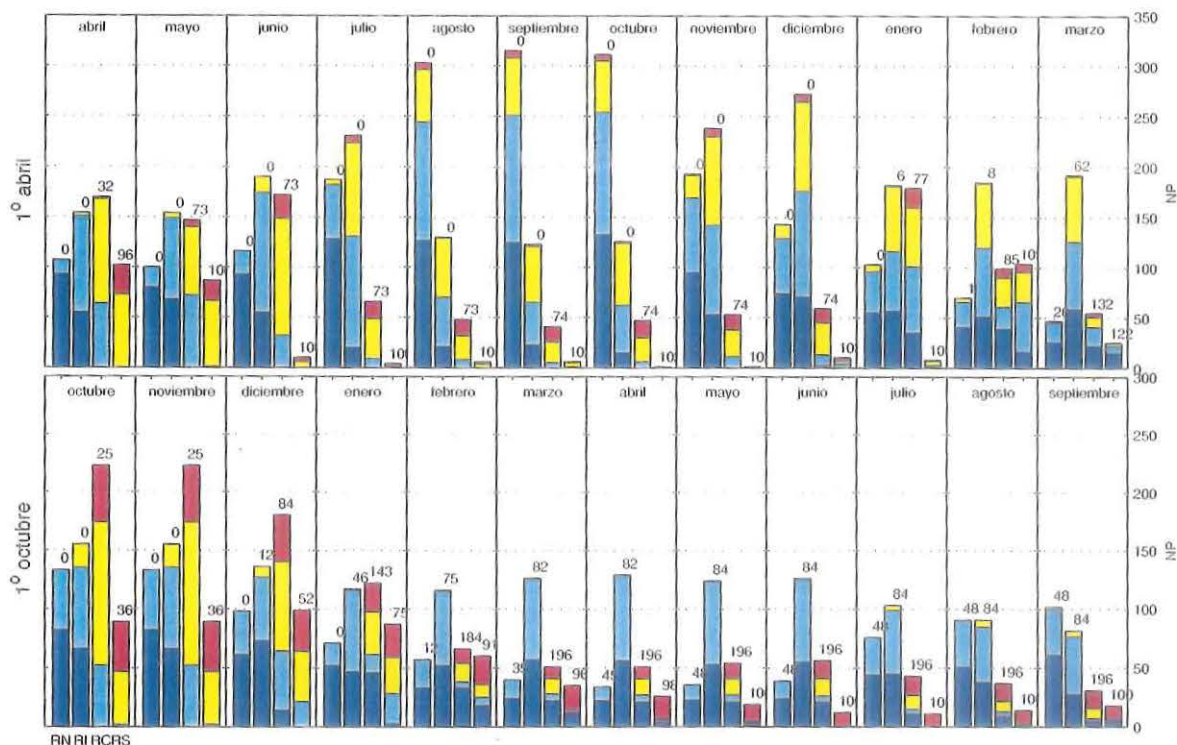


Figura 12: Histograma del número de partículas en el golfo por regiones para los experimentos del a) 1^o de abril y el b) 1^o de octubre. Los histogramas corresponden al último día de cada mes. En cada histograma la primer barra corresponde al número de partículas en la región norte, la segunda barra al número de partículas en la región de las islas, la tercera a la región central y la cuarta a la región sur. El código de colores es: partículas que iniciaron en la región norte son azul marino, las que iniciaron en la región de las islas son azul celeste, en la región central son amarillas y las que iniciaron en la región sur son rojas.

54 % en dos meses y llega a 66 (33 PN, 5 PI, 16 PC y 12 PS) en febrero (menos del 30 % del número original de partículas, sin embargo la cantidad de PN aumenta de tal forma que son las más abundantes).

En ambos experimentos se observa que la región de las islas atrapa partículas durante todo el año, esto también fue observado antes en la sección 3.1.2 donde se observó que el Canal de Ballenas atrapa partículas prácticamente todo el año, además que el número de partículas mostrado por la barra puede estar sobrestimado debido a las partículas que son atrapadas en IT.

III.4 Índices

En las secciones anteriores se mostró el patrón general de la circulación estacional que describen las partículas, el intercambio entre regiones, las rutas principales, así como las zonas donde son atrapadas. Con esta misma información, es decir, con las trayectorias de las partículas en función del tiempo podemos calcular información más concreta a manera de índices. Los distintos índices calculados son:

- Distancia Neta (DN): Corresponde a la distancia vectorial que existe entre la posición inicial y final de la partícula.
- Distancia Recorrida (DR): Es la integral de línea de toda la trayectoria. Esta distancia también se calculo filtrando la marea de las trayectorias.
- Distancia máxima (DM): Corresponde a la máxima distancia alcanzada por las partículas con respecto a la posición inicial.
- Tiempo máximo (TM): Es el tiempo al que se alcanza DM.
- Tiempo de Escape (TE): Es el tiempo que requiere una partícula para abandonar un area circular de radio R. Se calcularon TE para valores de R=50, 100 y 150 km.

- $\alpha = \frac{DN}{DR}$: permite determinar si en una región determinada las trayectorias son cerradas o abiertas. Una trayectoria cerrada es aquella en la que su posición final es muy cercana a la posición inicial. Si α tiende a cero (uno) significa que las trayectorias de dicha región son cerradas (rectas).
- $\gamma = \frac{DR}{\pi DM}$: En el caso hipotético de una trayectoria que describa una circunferencia, DR sería igual al perímetro y DM al diámetro de la misma. Al normalizar con π , entonces γ tiende a 1 para trayectorias circulares. Este índice permite discriminar entre aquellas partículas que están atrapadas en un giro y aquellas que no. Para calcular este índice, se utilizó DR sin marea.

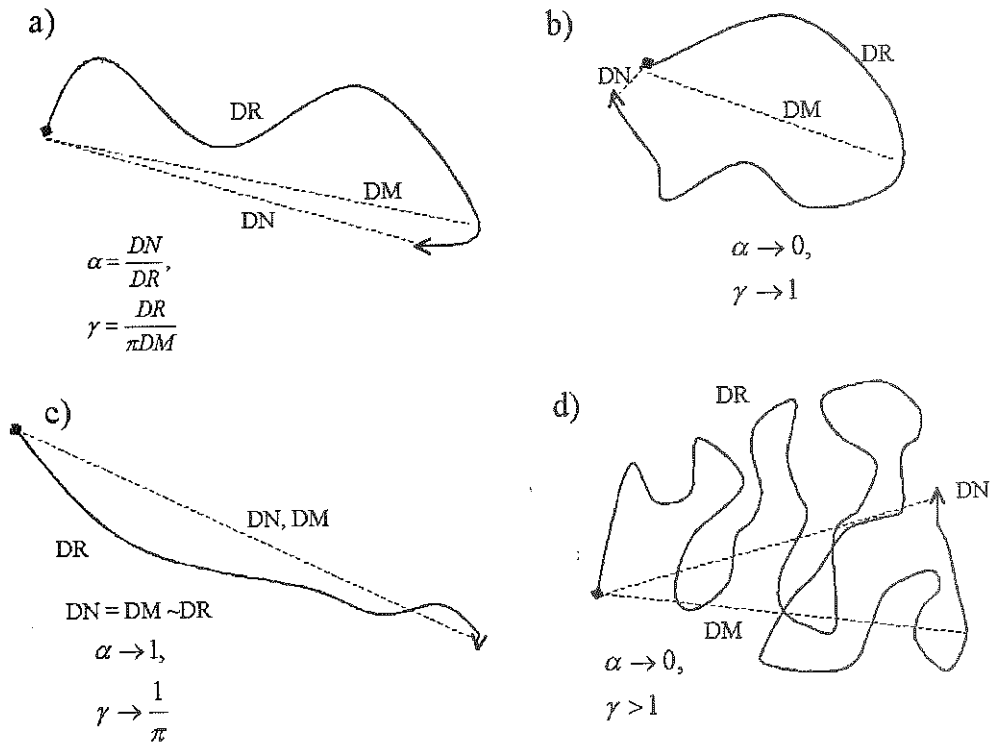


Figura 13: Ejemplos de trayectorias hipotéticas que poseen algunas características que se pudieran encontrar en las advecciones analizadas. a) Ejemplo de trayectorias y las distancias calculadas, b) Trayectoria atrapada en un giro, en la que se esperan valores de $\alpha \rightarrow 0$ y de $\gamma \rightarrow 1$. c) Trayectoria recta en la que $DN = DM \sim DR$. $\alpha \rightarrow 0$ y $\gamma \rightarrow 1/\pi$. d) Trayectoria en la que DR es grande y $DN \sim DM$ y son pequeños por lo que α pudiera tender a 0 y γ también pudiera tender a 1.

Todos los índices fueron calculados con las advecciones mensuales y se asignaron a las posiciones iniciales de las partículas. Por esta razón se debe tener cuidado al interpretar estos resultados, pues representan la distribución espacial de una propiedad que pertenece a las trayectorias y no a un punto dado en el mapa. Algunos ejemplos de valores típicos para los índices se muestran en la figura 13.

Los índices α y γ presentan ciertos inconvenientes en su análisis pues los valores críticos pudieran ser obtenidos también con situaciones distintas a las referidas y podrían proporcionar información equivocada. Por ejemplo, α mantiene los límites bien acotados, sin embargo no es posible asegurar que un valor pequeño de α corresponde a una trayectoria cerrada, pues podría ser que DR fuera muy grande comparada con DN (fig. 13d). El caso de γ es aún más complejo, no hay acotamiento al valor máximo posible del índice. Además que las trayectorias aún cuando se encuentren en un giro, no necesariamente completarán una revolución, o incluso podrían realizar dos o más revoluciones. Por estas razones no es posible valerse solamente de algunos parámetros para determinar las características antes mencionadas y la caracterización de las distintas regiones debe basarse en el análisis conjunto de ellos.

La distribución de los índices es similar en los experimentos comprendidos en el período anticiclónico y ciclónico de la región norte, por esta razón solamente se muestran los índices calculados para alguno de los experimentos comprendidos en estos grupos.

Período enero-abril. Durante estos meses la región norte se encuentra en el período anticiclónico y la región central y sur con flujo al exterior y las figuras 14 y 15 muestran los índices calculados para el mes de enero. Las distancias recorridas (DR) por las partículas en este período están entre 600 y 200 km. En la RN las partículas cercanas a las costas excursionan más de 400 km, mientras que DN \sim 200 km en las costas y al centro se encuentran DN $<$ 50 km. En la región central encontramos máximos de DR (300 km) hacia la COG y menores hacia la costa de BC.

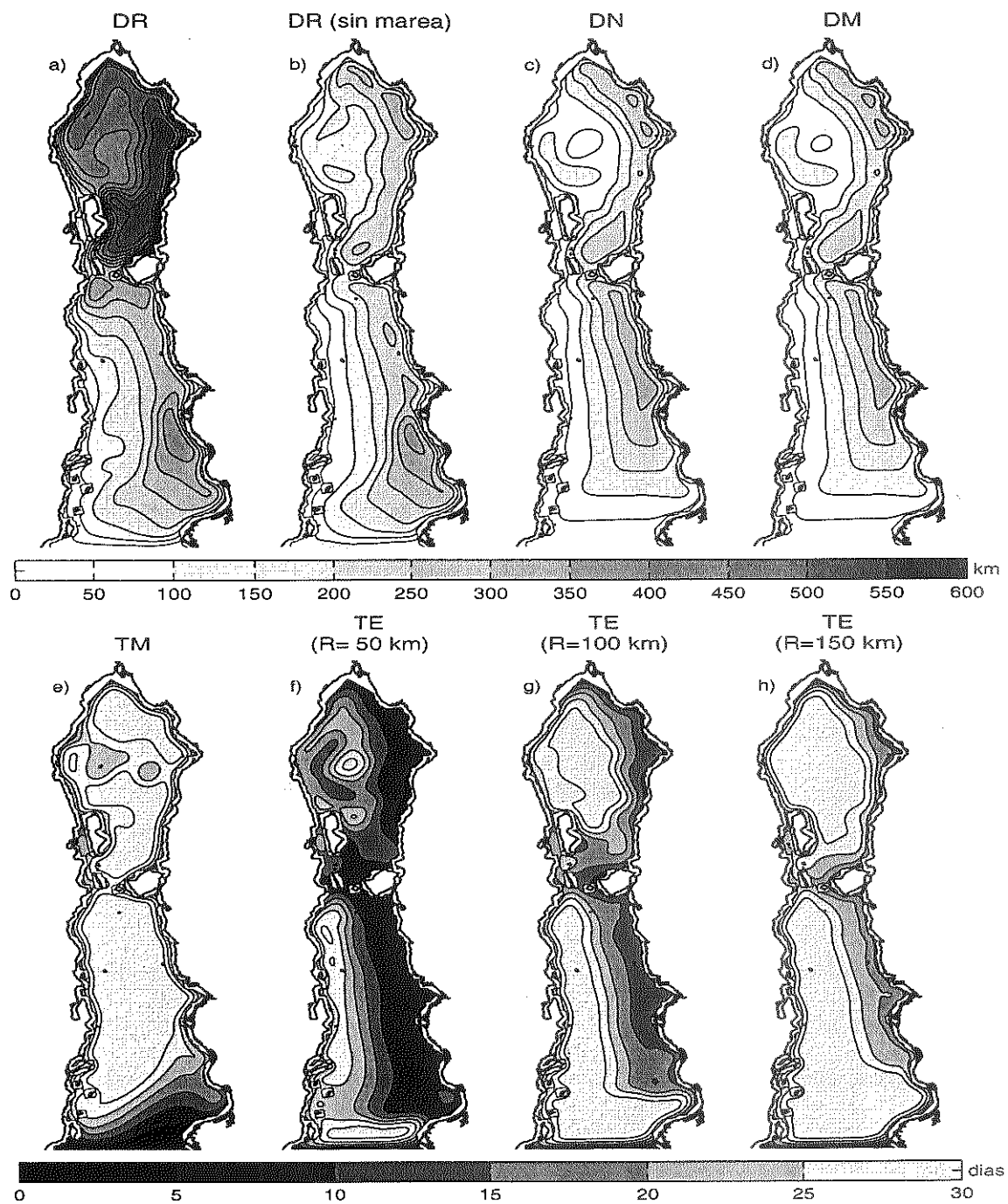


Figura 14: Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de enero. a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.

Si observamos DR sin la marea, encontramos que las distancias mínimas al centro de la región norte coinciden con los mínimos de DN. En la región central los valores de DR sin marea y con marea son muy semejantes lo que significa que la excursión de marea realizada por las partículas es casi nula en esta región.

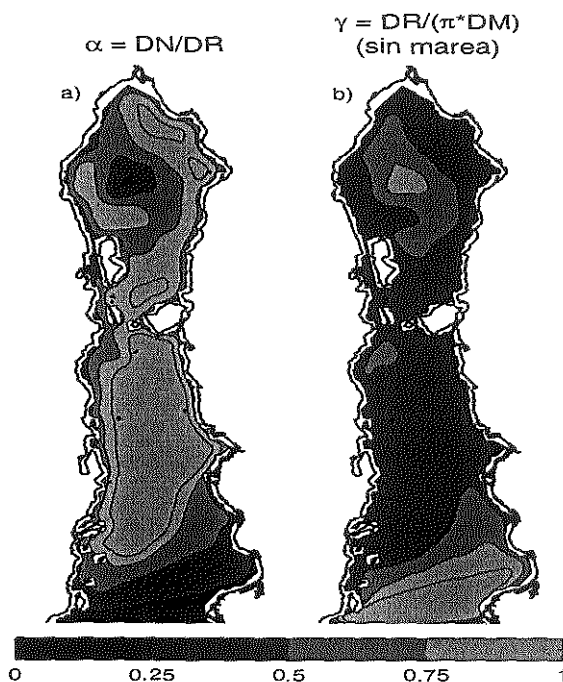


Figura 15: Índices calculados para el mes de enero a) α y b) γ .

Los contornos de distancia máxima (DM) son muy parecidos a los de DN, esto implica que las partículas continúan alejándose de su posición inicial después de un mes de advección. La DM se alcanza en $TM > 25$ días de advección, excepto en el centro de la región norte donde se alcanza en 20 días.

Los índices de TE muestran que en la COG las partículas escapan hasta 100 km en 15 días y sólo las zonas del centro del giro en la región norte y la costa de BC atrapan partículas (en un radio de 100 km) por 30 días.

El índice α (fig. 15) indica que en la región central y de las islas las trayectorias son abiertas ($\alpha \sim 1$ y $\gamma \sim 1/\pi$), mientras que en la región norte tiende a valores menores. Los mínimos se encuentran en el centro de la región ($\alpha < 0.25$), esto es que las tra-

vectorias de esta zona tienden a ser cerradas. γ tiene un comportamiento semejante, sin embargo, este índice nos proporciona más información acerca de la trayectoria. Los valores máximos de γ (~ 1) y los valores mínimos de α se encuentran en el centro de la región norte donde coinciden con el giro mostrado anteriormente en esta época del año, sin embargo sobre la costa de BC en la región norte donde se observa también un giro elongado (fig. 3a-c), solamente $\gamma > 0.75$ lo detecta o señala más claramente.

Período mayo. En este tiempo todo el golfo presenta circulación anticiclónica y los índices calculados para este período se muestran en las figuras 16 y 17. En este mes las DR son menores que en el período anterior, los valores máximos se encuentran para las partículas que inician en la región norte en la COG y en la región de las islas (DR ~ 400 km). Las DN son también menores que en el caso anterior (DN ~ 50 km). En la región central y sur DR < 200 km, pero en el centro de esta región DR sin marea, DN y DM presentan los máximos ~ 150 km y mínimos en las costas ~ 50 km.

Aunque los contornos de DM y DN, son muy semejantes, los contornos de TM presentan zonas en todo el golfo, sobre todo en el centro de la región norte, en la región de las islas y en la COG en la región central, en las que DM se alcanza 25 días. Estas zonas en la RN están asociadas a los giros que se observan en este mes (fig. 3e).

Para este período, las partículas no son capaces de escapar a $R > 100$ km aún en 30 días, incluso para $R = 50$ km, algunas zonas en el centro de la RN y las costas de la RC tampoco escapan. Solamente escapan algunas partículas que inician en el centro de la RC, frente a IAG y en la COG de la RN en ~ 10 días, es decir recorren $50/10$ km día⁻¹ (5.8 cm s⁻¹).

Los contornos de α (fig. 17) son complejos, encontrándose $\alpha < 0.5$ en la región de las islas, en la COG en la región central y sur y en la región norte cerca del alto golfo, mientras que valores cercanos a uno se observan en las costas de la RN y en gran parte de la región central y sur. Por último, el índice γ oscila entre 0.75 y 0.5, sin

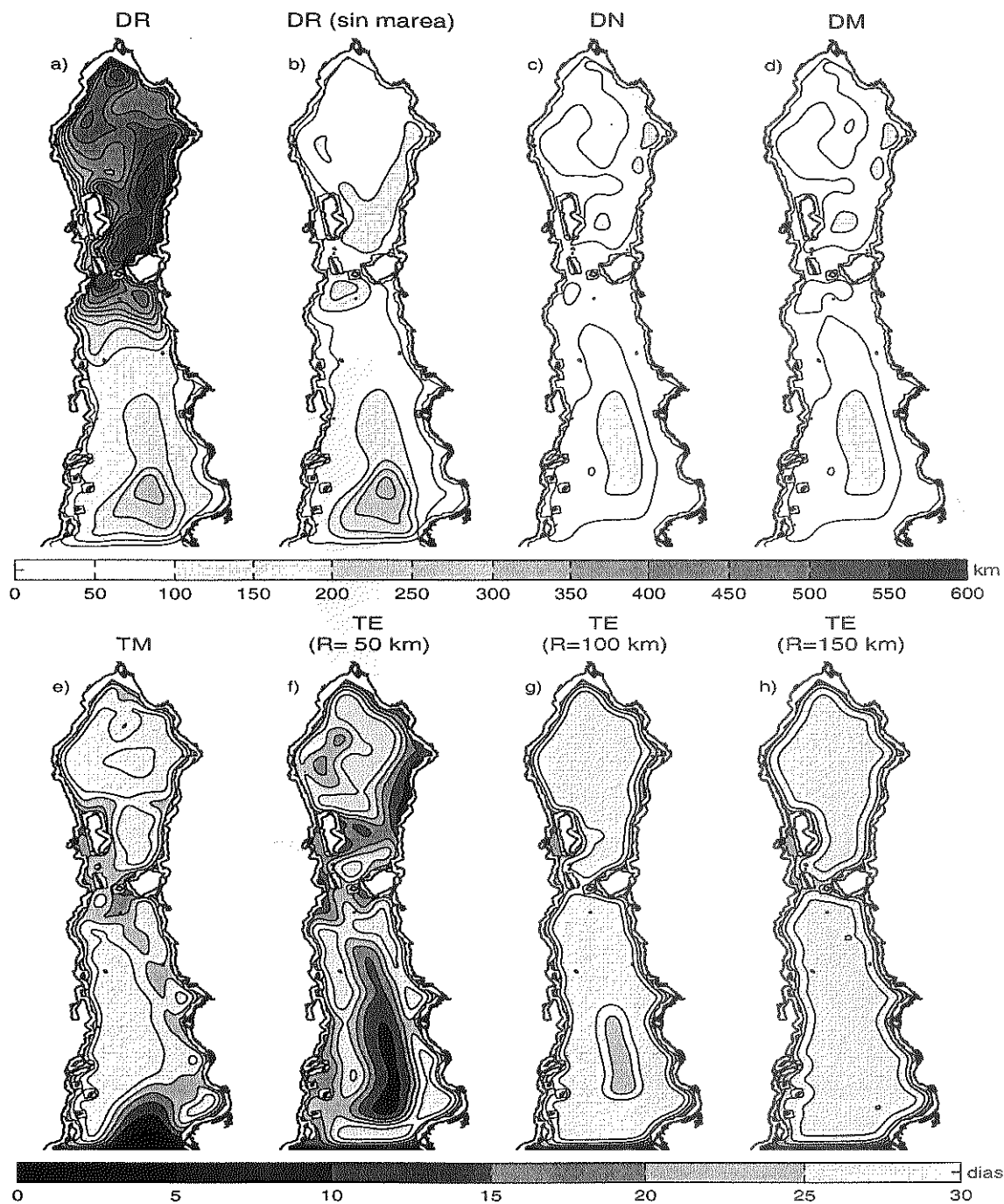


Figura 16: Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de mayo a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.

proporcionar información clara. Esto es evidencia de lo que se observó antes y a que aunque las partículas de la RN continúan moviéndose anticiclónicamente (tabla II) lo hacen lentamente, por lo que las distancias recorridas son mucho menores y el giro es menos evidente ante los índices.

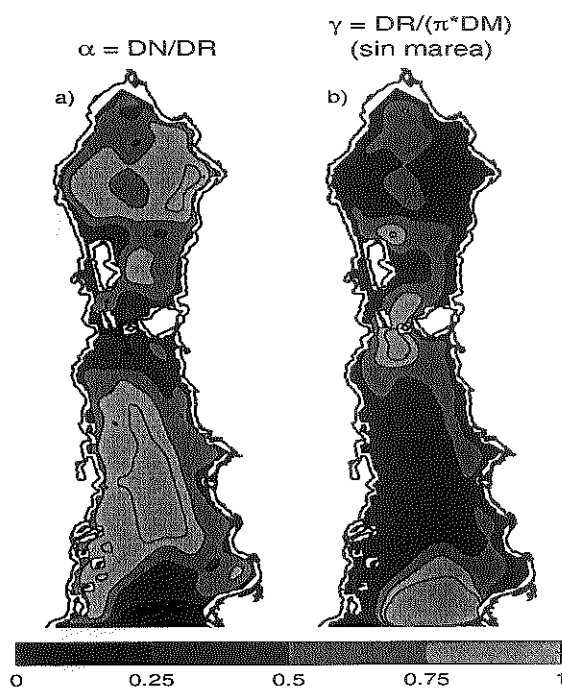


Figura 17: Índices calculados para el mes de mayo a) α y b) γ .

Período junio.

En este período el golfo se encuentra en la transición de anticiclónico a ciclónico. Las figuras 18 y 19 muestran los índices calculados para este período. Durante junio se encuentran $DR \leq 400$ km en la región de las islas y norte y $DR \leq 300$ km en la región central y sur, y estas son distancias menores a las encontradas en los dos períodos analizados anteriormente a excepción de la COG. Si eliminamos la marea, las DR sin marea máximas son menores a 200 km en la región central y sur en la COG y en la RN, las $DR < 100$ km. En la región norte DN y DM son aún menores a ~ 50 km, sólo en el centro de la región se encuentran valores mayores que 50 km. En esta región,

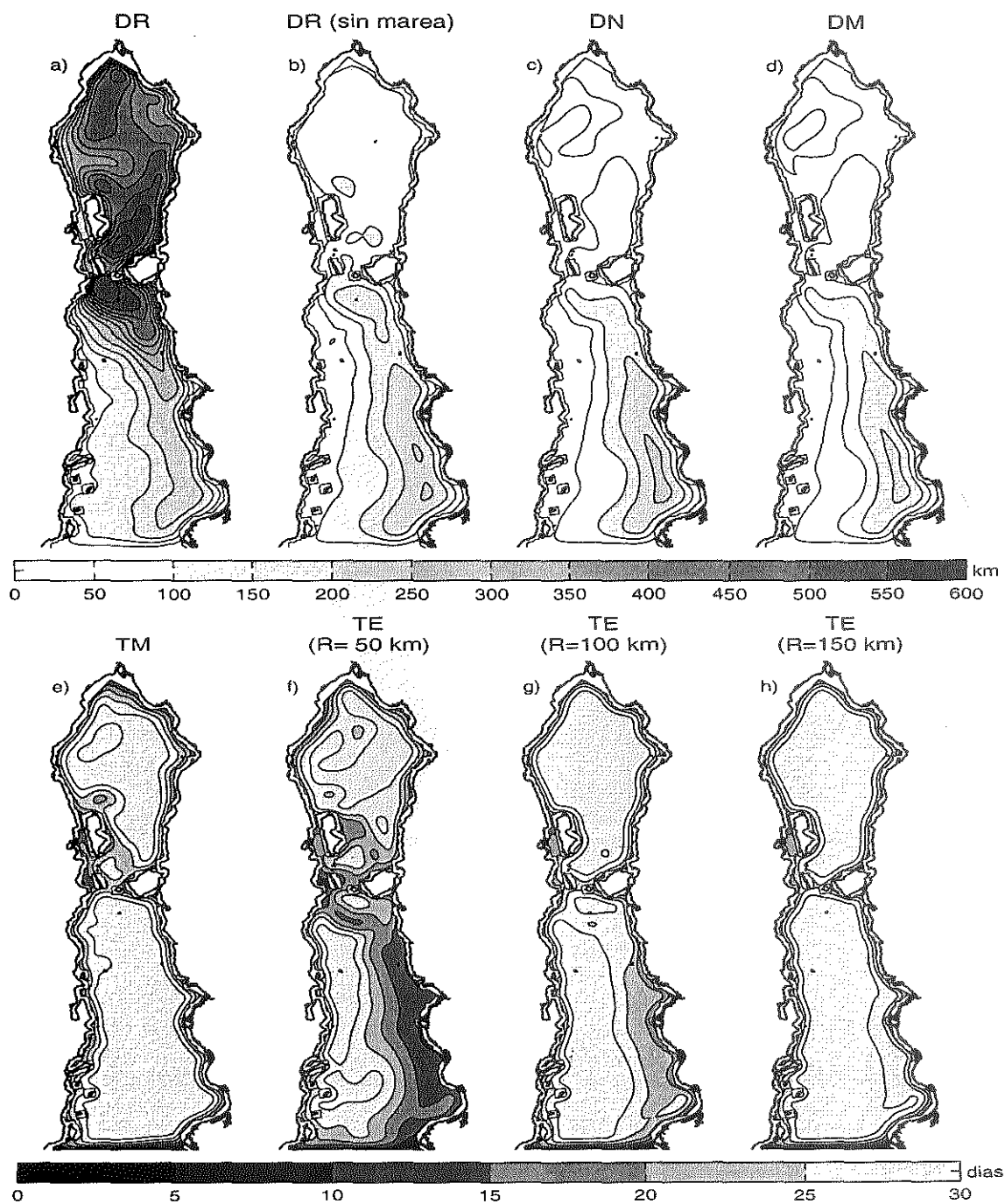


Figura 18: Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de junio a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.

para esta época del año, se observó una corriente que llevaba las partículas hacia al norte (fig. 3f), siguiendo la tendencia de este contorno. DN y DM son muy semejantes, con valores máximos en la COG, pero mucho menores a los encontrados antes (DN y DM \sim 200 km). En el mapa del TM se evidencia lo anterior, pues la DM siempre es alcanzada al final del período, es decir, en 30 días.

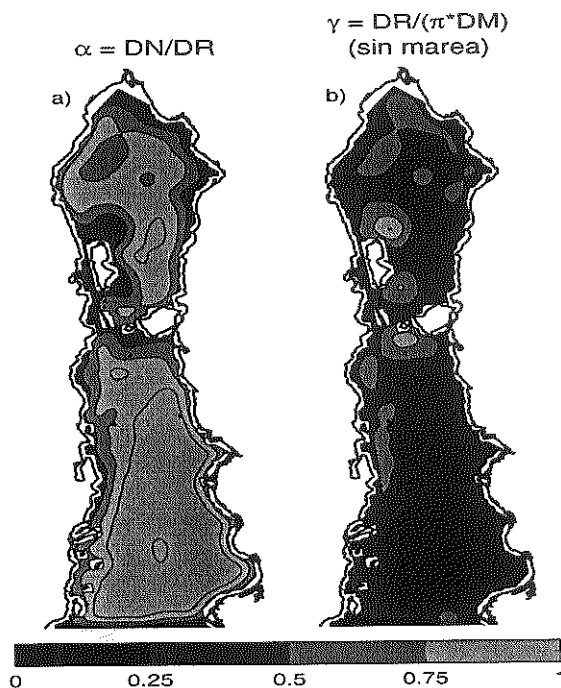


Figura 19: Índices calculados para el mes de junio a) α y b) γ .

Debido a que las distancias alcanzadas por las partículas son pequeñas, éstas no escapan de $R > 100$ km, salvo por aquellas que se encuentran en la COG en la región centro y sur. Con radios menores ($R = 50$ km), se observan algunas zonas donde las partículas escapan en menos de 15 días en la región de las islas y en la región norte.

Valores significativos de α y γ ($\alpha < 0.25$ y $\gamma > 0.75$) sólo se encuentran en zonas reducidas de la región norte en la costa y al norte de IAG. Debido a que también en este período las distancias netas y máximas son cortas, estos índices tienen ruido en la costa de BC en la región central, la figura 3f muestra trayectorias muy cortas en esa región.

Período de julio y agosto. En este período el golfo presenta características ciclónicas, los índices mostrados corresponden al mes de julio (fig. 20 y 21). Ahora en este período en el que las partículas ingresan a la región norte, se tienen nuevamente distancias recorridas grandes ($DR > 350$ km) en casi todo el golfo, excepto por la costa de Baja California donde las partículas recorren distancias menores ($DR < 150$ km). Al eliminar la marea las distancias recorridas disminuyen en la RN, sobre todo en el centro de la región, mientras que en la región central no hay muchos cambios.

Las DN y DM se mantienen muy similares con mínimos en el centro de la RN y en la costa de BC en la región central (~ 50 km), con máximos hacia la COG y región de las islas (~ 200 km). Esta similitud entre DN y DR, como en los casos anteriores, implica que después de un mes las partículas continúan alejándose de su posición inicial.

Los tiempos de escape nos dicen que las partículas de la región central hacia la COG escapan hasta 150 km (11.5 cm s^{-1}) en 15 días. La región norte del golfo ($R=150$ km) atrapa partículas en este período por más de 30 días y el centro de la RN también atrapa partículas por 30 días pero para $R=50$ km. La costa de BC en la región central atrapa partículas a $R=100$ km por más de 30 días también.

El índice α tiene valores cercanos a 1 en casi todo el golfo, con excepción del centro de la región norte donde $\alpha \leq 0.5$. En el caso de γ ocurre algo semejante, pues predominan los valores cercanos a $1/\pi$ y sólo se observan $\gamma \sim 1$ en la misma zona de la región norte, que coincide con la localización del giro ciclónico mostrado con anterioridad para esta época.

Período en septiembre. Este período corresponde a la transición de ciclónico a anticiclónico. Las figuras 22 y 23 muestran los índices calculados para este período. Las $DR \sim 400$ km en todo el golfo, sólo las partículas cercanas a la COG en la región central recorren distancias menores a 150 km. Al calcular DR sin marea, los valores encontrados para las partículas de la región norte disminuyen a $DR < 100$ km y en la

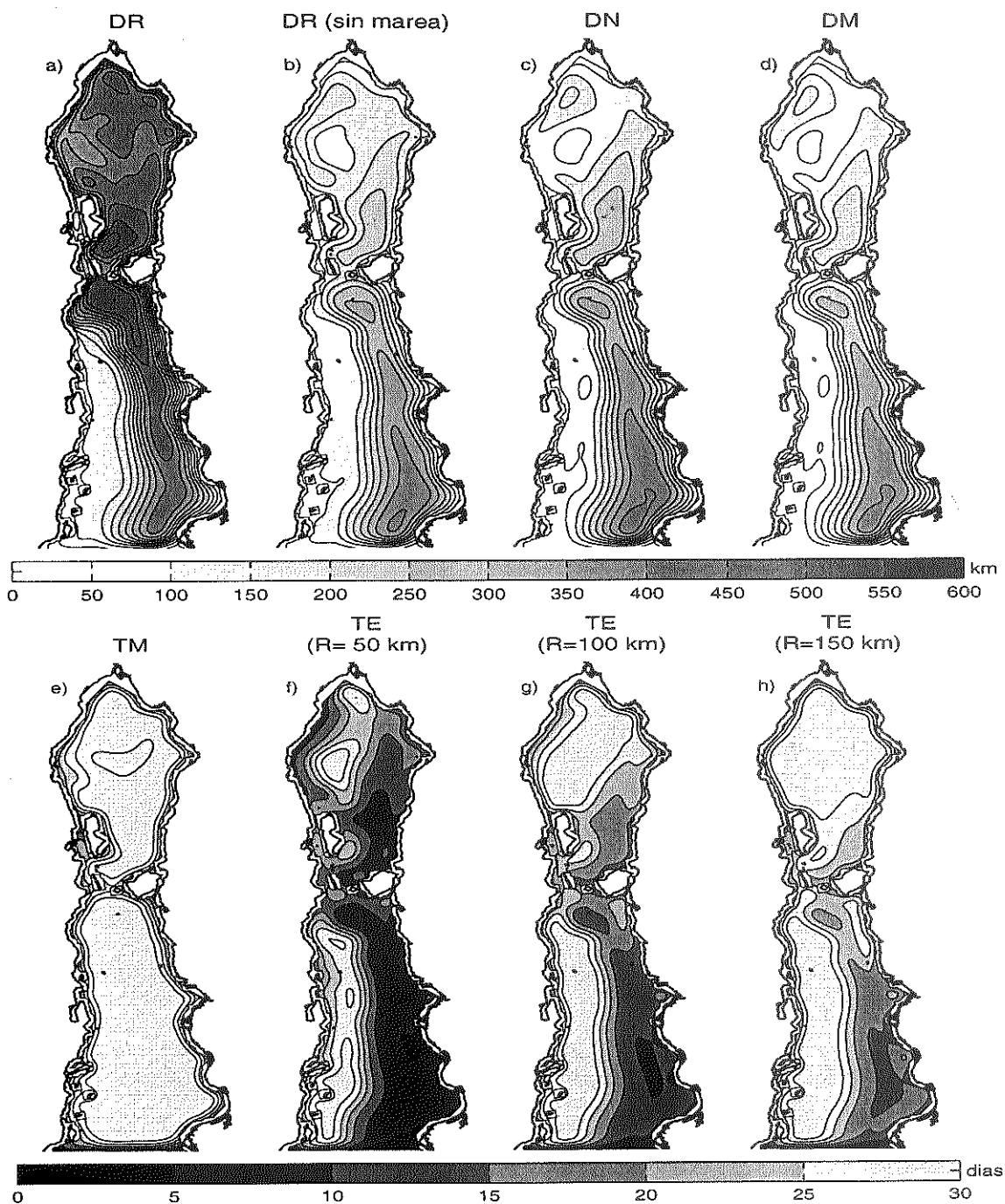


Figura 20: Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de julio a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.

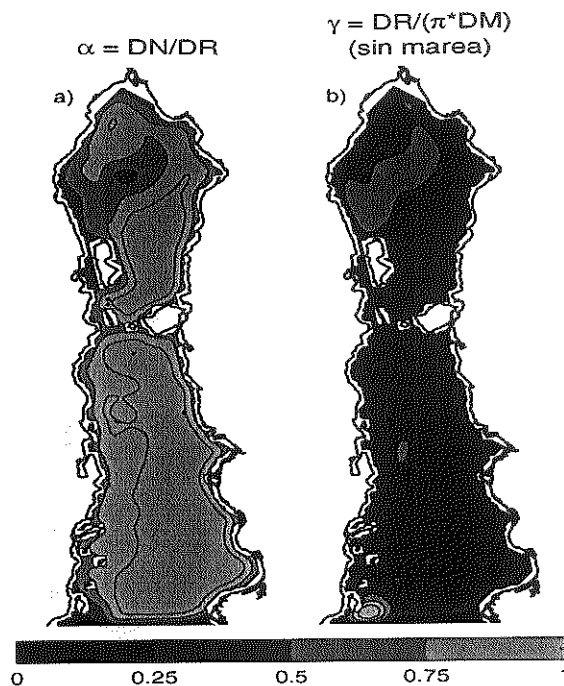


Figura 21: Índices calculados para el mes de julio a) α y b) γ .

región central y sur los valores conservan la misma distribución, aunque se reducen las distancias a la mitad.

La distancia neta y la distancia máxima presentan diferencias en la región norte ya que las DM se alcanzan a $TM \leq 25$ días en algunas zonas. La distribución de estos índices, al igual que en períodos anteriores, es muy semejante en las regiones de las islas, central y sur.

La RN atrapa partículas para $R=100$ km durante los 30 días ($\sim 3.9 \text{ cm s}^{-1}$) en la región de las islas y en la región central escapan partículas de la COG de $R=100$ km en 20 días. Cuando $R=50$ km prácticamente todas las partículas escapan en 15 días.

Para este período se observaron giros pequeños en la región de las islas y norte (fig. 3i), sin embargo α y γ no muestran evidencia clara de ellos a excepción del que se presenta al norte de IAG en la zona de Cuenca Delfín, donde $\alpha < 0.25$ y $\gamma > 0.75$. En el resto del golfo se observan valores altos de α y bajos de γ , que implican trayectorias rectas. En la zona de la costa de BC, en la región central, se encontraron valores de

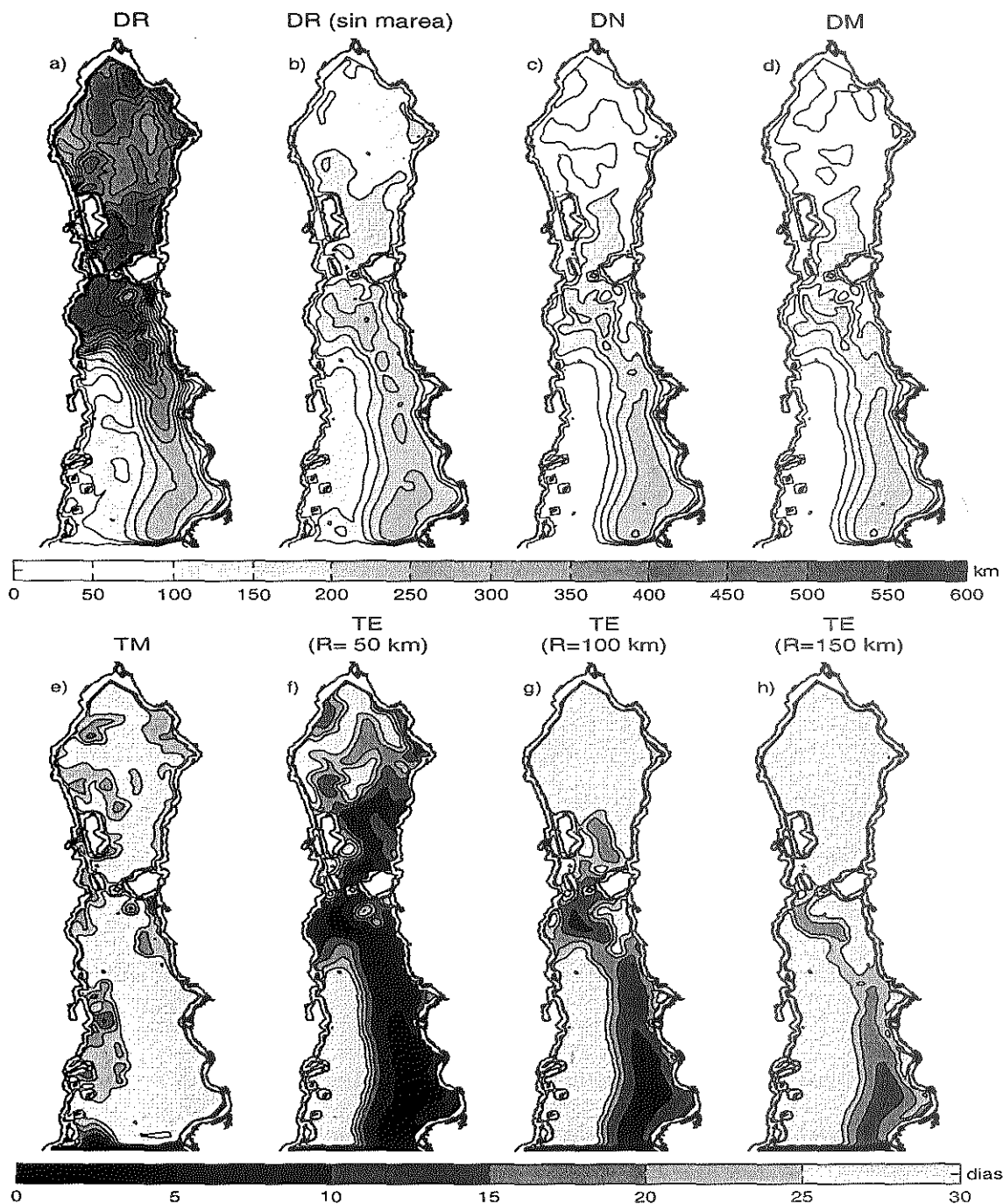


Figura 22: Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de septiembre. a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.

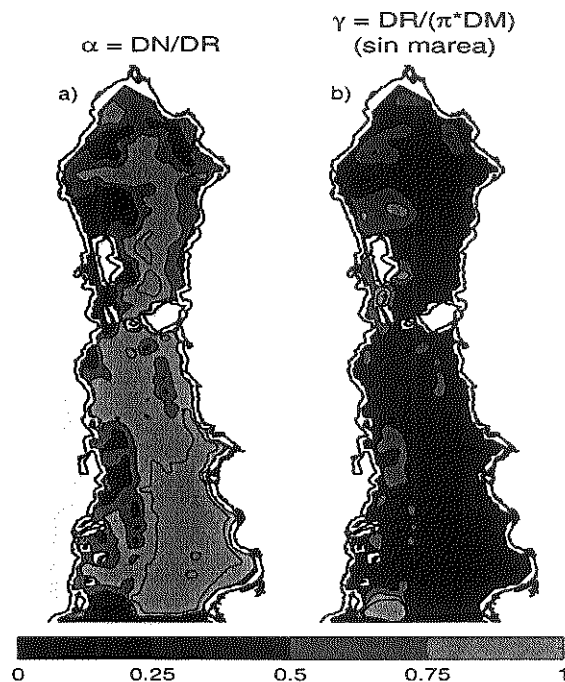


Figura 23: Índices calculados para el mes de septiembre a) α y b) γ .

α pequeños indicando trayectorias cerradas, sin embargo de la figura 3i y 5j se puede concluir que las partículas más bien se mueven muy poco y lentamente, lo cual también se observó en DR.

Período entre octubre y diciembre. Nuevamente estos meses corresponden a períodos anticiclónicos en ambas regiones del golfo. Las figuras 24 y 25 muestran los contornos de los índices calculados en el mes de noviembre. Los valores y distribución de los índices en la región norte durante este período es muy semejante al observado en el período de enero a abril, sin embargo en la región central y sur sí existen diferencias notables. Esto se puede inferir de la figura 3, pues mientras que en el caso de los meses de enero a abril (incisos a, b, c, d) las partículas de estas regiones se mueven hacia el exterior y durante los meses de octubre a diciembre (incisos j, k, l) se observan giros y flujo de partículas hacia el interior del golfo.

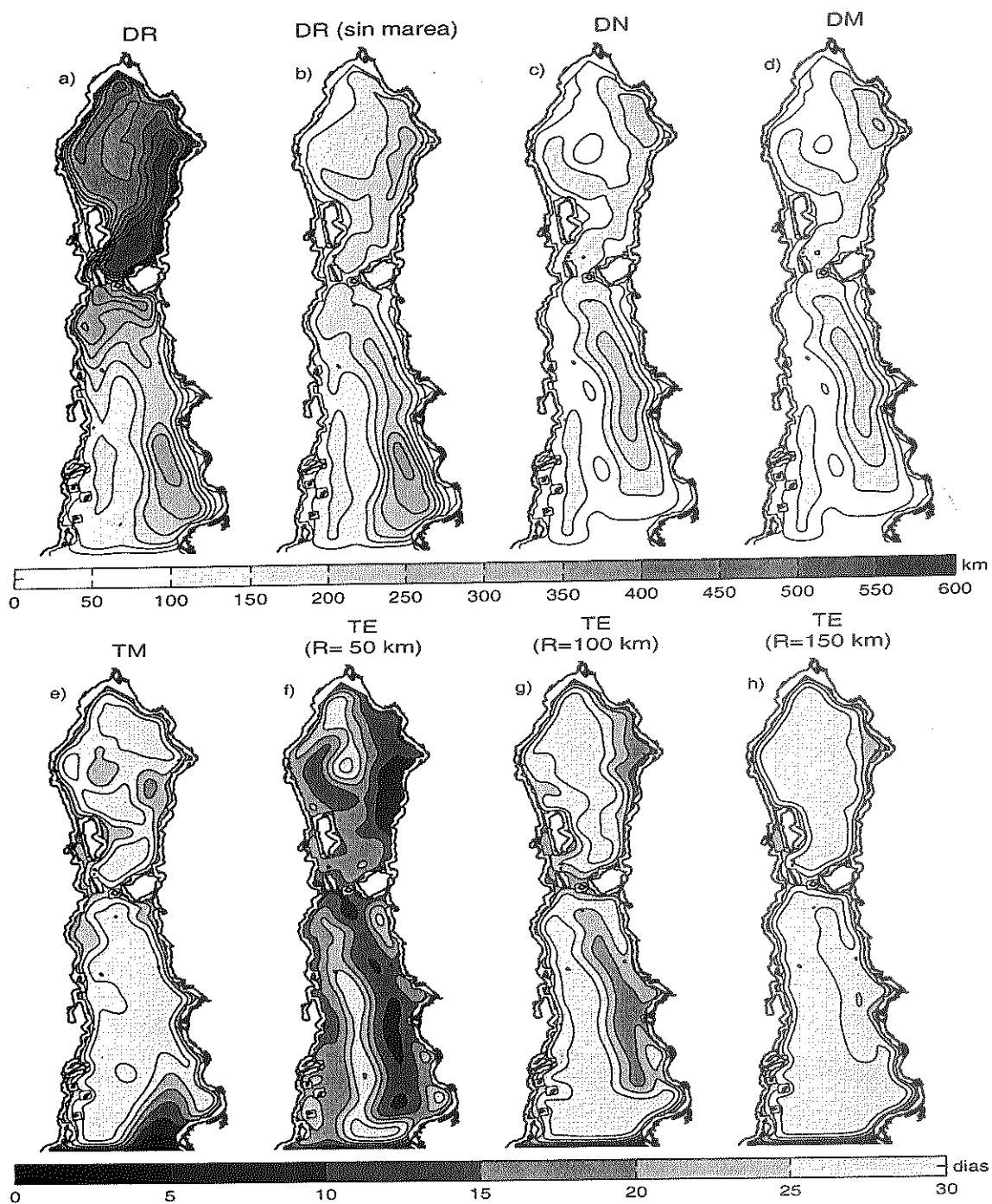


Figura 24: Distancias y Tiempos de escape calculados para el mes de noviembre a) Distancia recorrida (DR). b) Distancia recorrida sin marea. c) Distancia neta (DN). d) Distancia máxima. e) Tiempo al que se alcanza la distancia máxima (TM). Tiempos de escape (TE) para radios iguales a f) 50 km, g) 100 km y h) 150 km.

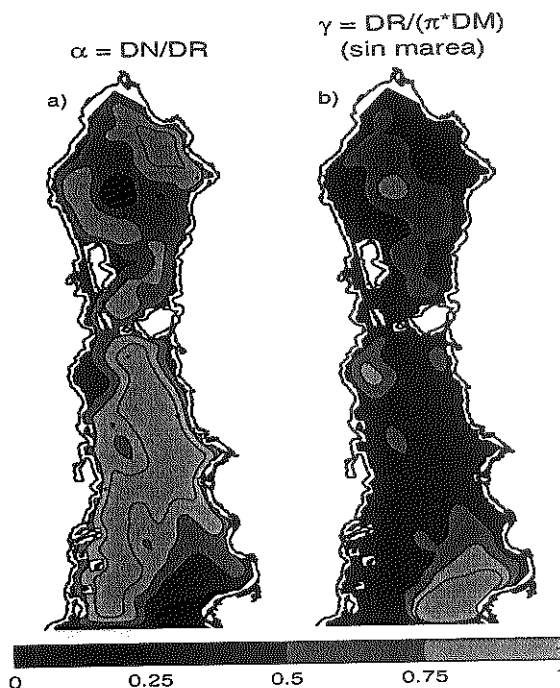


Figura 25: Índices calculados para el mes de noviembre a) α y b) γ .

Lo antes mencionado se nota al considerar DR, que en la región norte tiene valores altos (~ 400 km) igual que en el período de enero-abril, mientras que en la región central y sur se observan mínimos en el centro y costa de BC (~ 100 km) a diferencia del gradiente que se observaba en el período enero-abril (fig. 14a). Al eliminar la marea $DR \leq 200$ km con mínimos en el centro de la RN y RC (~ 50 km), las distancias máximas se alcanzan después de los 25 días, por lo que DN y DM son muy semejantes con valores muy bajos, menores a 150 km, a excepción de la COG, donde $DR \sim 250$ km.

Debido a que las partículas se mueven distancias cortas de su posición de origen, éstas no escapan a radios de 100 km a excepción de la COG, donde las partículas escapan en 20 días. En el centro de la RN y el eje central de la región central y sur se observan zonas donde las partículas permanecen atrapadas durante 30 días en $R < 50$ km, que coinciden claramente con los giros observados en este período.

Los valores mínimos de α están en el centro de la región norte ($\alpha \leq 0.25$). El resto del golfo tiene valores altos ($\alpha \geq 0.75$). Incluso en la región central donde se observan dos giros claramente durante el mes de noviembre (fig. 3k) no se observan valores pequeños de α puesto que las trayectorias no alcanzan a completar una revolución. El índice γ tampoco muestra evidencia de estos giros, pues los valores encontrados en esta zona no son diferentes a los encontrados en las zonas cercanas. Solo en la región norte se identifica claramente un núcleo en el centro de la región con valores de $\gamma \geq 0.75$.

IV Conclusiones

Se estudió la circulación estacional lagrangiana superficial en el Golfo de California por medio de la advección mensual y anual de partículas. En general la circulación en la región norte del golfo es anticiclónica de octubre a mayo y ciclónica en julio y agosto, dominada por un giro en el centro que ocupa toda la región. En la región centro y sur se observaron dos períodos anticiclónicos en mayo y de octubre a noviembre y un ciclónico en julio y agosto. Estos resultados concuerdan con las mediciones disponibles en la región norte de Lavín et al. (1997) y Palacios et al. (2002) y de Emilsson y Alatorre (1997) en la región sur

Se encontró que la región norte atrapa partículas por períodos mayores a 30 días ($R=150$ km). Durante la etapa ciclónica existe aporte de partículas desde las regiones al centro y sur del golfo, de tal forma que el número de partículas se puede incluso duplicar. El proceso opuesto se observa durante la etapa anticiclónica con partículas moviéndose hacia las regiones al centro, sur y exterior del golfo, sin embargo son pocas las partículas que salen del golfo y la mayoría continua en la región central cuando inicia el período ciclónico por lo que regresan a la RN. En los períodos ciclónicos y anticiclónicos se observa un giro en el centro de la región, que atrapa partículas por períodos mayores a 30 días en radios de 50 km.

La región de las islas atrapa partículas durante todo el año, específicamente en el Canal de Ballenas y en el Canal entre Isla Tiburón y la costa oriental del golfo. Sin embargo en este último canal pudiera ser debido a un problema en el esquema numérico, por lo que el intercambio de partículas entre la región norte y central ocurre por el canal entre Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón. La región norte y central se mantienen comunicadas la mayor parte del año a través de este canal excepto cuando la circulación es anticiclónica en todo el golfo. En esta zona se encontraron giros durante períodos cortos a lo largo de año principalmente cuando todo el golfo tiene circulación

ciclónica. También se observó un giro anticiclónico permanente al sur de Isla Tiburón que atrapa partículas por más de 10 días en un radio de 50 km.

La región central cercana a la costa de Baja California es una zona de atrapamiento durante todo el año, en la que las partículas recorren menos de 100 km en 30 días, de esta zona las partículas escapan solamente en el período anticiclónico. Contrariamente, sobre la costa oriental del golfo se encuentra una zona de escape, de donde provienen la mayoría de las partículas que llegan a la RN. En esta zona las partículas recorren 50 km en menos de 5 días cuando el flujo es hacia el exterior y cuando el flujo es hacia el interior hasta 150 km en 30 días. En esta zona se encontraron también los mayores desplazamientos, de hasta 300 km. En la zona de la costa de BC se encontraron giro ciclónicos en julio-agosto y anticiclónicos en noviembre.

por último se encontró que la marea no es un factor importante en la determinación de las trayectorias, ya que el residual de marea es pequeño comparado con la advección. Sin embargo, en las regiones norte y de las islas, la excursión de marea es mucho mayor que al sur del golfo, y esto se refleja en que las distancias recorridas con marea son dos o tres veces mayores que aquellas que no la contienen .

A Pruebas Preliminares

Las principales fuentes de error del modelo lagrangiano se deben al método de integración, el método de interpolación espacial y el paso de tiempo usado en la integración numérica. En esta sección se explica la forma en que se minimizaron estas fuentes de error.

Para resolver ecuaciones diferenciales del tipo (2) existen diversos métodos de integración, los cuales tienen una precisión limitada. En general mientras más precisión tiene el método mayor también es el tiempo requerido por el procesador para realizar la integración. Los métodos más recurridos para resolver estas ecuaciones son el método de Euler y los de Runge-Kutta de 2° y 4° orden (RK2 y RK4 respectivamente).

Ahora bien, independientemente de el método de integración y el paso de tiempo usado, es necesario conocer las componentes de velocidad en la posición de las partículas que en general no se encuentran en el centro de la malla. También existen varios métodos para lograr esto, desde lo más simple que consiste en tomar la velocidad de la celda, a interpolaciones más complejas. Aquí consideramos la interpolación lineal, bilineal y cúbica, puesto que métodos más complejos requieren de un tiempo de computo mayor y los resultados que se obtienen no son mejores.

Para evaluar tanto los distintos métodos de integración como de interpolación espacial se diseñaron distintas pruebas, en las que se calcularon trayectorias para partículas liberadas en campos de velocidad estacionarios en los que se conoce la solución analítica. Se eligió el campo

$$\begin{aligned} u &= -\alpha(y - 200), \\ v &= \alpha(x - 200), \end{aligned} \tag{3}$$

en donde $\alpha=2\pi/180 \text{ rev hr}^{-1}$. Esta función describe un giro ciclónico centrado en la coordenada $(x, y)=(200,200)$ en el que la velocidad crece linealmente con el radio. La

solución al sistema 3 está dada por

$$\begin{aligned}x(t) &= (x_o - 200) \cos(\alpha t) - (y_o - 200) \sin(\alpha t) + 200, \\y(t) &= (y_o - 200) \sin(\alpha t) + (x_o - 200) \cos(\alpha t) + 200\end{aligned}\quad (4)$$

y las trayectorias describen círculos. De esta forma es posible comparar los resultados analíticos y los numéricos. La mejor combinación de métodos se obtuvo en términos de el error final (E),

$$E = \sqrt{(x_f - x_o)^2 + (y_f - y_o)^2}, \quad (5)$$

que es simplemente la distancia entre la posición inicial y final de la trayectoria calculada por la integración numérica después de una revolución completa y del tiempo requerido por el procesador para realizar los cálculos numéricos.

Para realizar las pruebas se construyo una malla con celdas de 4 x 4 km con 400 nodos de tal forma que tuviera las características de la malla empleada por el modelo eulereano. La posición inicial de la partícula se eligió de tal forma que $|u| = 1.2 \text{ m s}^{-1}$. Las velocidades obtenidas por el modelo eulereano son menores a 0.5 m s^{-1} . Se realizaron integraciones con los métodos de Euler, RK2 y RK4, con pasos de tiempo $dt=2, 1, 1/2, 1/4, 1/6 \text{ hr}$ y también variando el método de interpolación entre lineal, bilineal y cúbico. En la tabla III se muestran los resultados obtenidos en términos de E y del tiempo de cálculo (T_c).

De la tabla III se puede observar que E no depende del método de interpolación espacial y que los mejores resultados se obtienen con el método de RK4 y el tiempo mínimo se logra usando la interpolación bilineal. La combinación de el método RK2, con interpolación bilineal y un $\Delta t= 10$ minutos proporciona resultados comparables a los obtenidos con RK4. Al comparar los resultados numéricos y los analíticos se encontró que la distancia entre ambas soluciones crece linealmente con el tiempo.

Ahora bien, estos resultados se obtienen al integrar un sistema estacionario, sin

Tabla III: Las pruebas preliminares realizadas

		Δt		2 hr		1 hr		1/2 hr (30 minutos)		1/4 hr (15 minutos)		1/6 hr (10 minutos)	
Integración	Interpolación	E (km)	Tc (seg)	E (km)	Tc (seg)	E (km)	Tc (seg)	E (km)	Tc (seg)	E (km)	Tc (seg)	E (km)	Tc (seg)
Euler	lineal	138.50	0.62	65.52	1.16	31.88	2.53	15.72	5.10	2.50	7.30		
	bilineal	138.50	0.06	65.52	0.11	31.88	0.22	15.72	0.44	2.60	0.66		
	cúbica	138.50	0.44	65.52	0.83	31.88	1.70	15.72	3.36	2.60	5.11		
Runge Kutta 2 orden	lineal	7.20	0.50	1.80	3.59	0.44	1.92	0.39	4.81	0.01	6.93		
	bilineal	7.20	0.06	1.80	0.11	0.44	0.22	0.08	0.44	0.01	0.72		
	cúbica	7.20	0.44	1.80	0.82	0.44	1.70	0.08	3.46	0.01	5.17		
Runge Kutta 4 orden	lineal	0.02	1.42	0.02	2.31	0.01	5.85	0.20	11.55	0.00	17.41		
	bilineal	0.02	0.17	0.02	0.33	0.01	0.36	0.00	1.26	0.00	1.92		
	cúbica	0.02	1.26	0.02	2.53	0.01	6.00	0.00	10.00	0.00	15.04		

embargo, los campos que se integraran en las advecciones son no-estacionarios, por lo que se realizó una siguiente prueba calculando trayectorias con las salidas del modelo a diferentes Δt . En teoría, si se usa un Δt menor que el necesario, las trayectorias obtenidas tendrían que ser idénticas, si esto no sucede, entonces es necesario reducir el Δt hasta encontrar uno que ya no cambie con respecto al anterior. Se compararon las trayectorias obtenidas con $\Delta t=30$ y $\Delta t=15$ minutos y se encontraron diferencias sobre todo en zonas donde los gradientes de velocidad son grandes. Repitiendo este proceso para $\Delta t=10$ y 5 minutos se llegó a la conclusión que 10 minutos son suficientes para no encontrar errores considerables.

B Fronteras

Cuando las partículas se acercan a la costa, es posible que sean arrojadas por el campo de velocidades fuera del dominio, para evitar que esto ocurra es necesario hacer que se cumpla la condición de frontera $\vec{u} \cdot \hat{n} = 0$.

En general la posición de las partículas no coincide con el centro de las celdas, por lo que como ya vimos es necesario interpolar la velocidad a la posición de las partículas (x_p, y_p) a cada paso de tiempo. Esta interpolación se realiza a partir de las submatrices **A** y **B** que se construyen con las 4 componentes de velocidad más cercanas a la posición de la partícula (fig. 26).

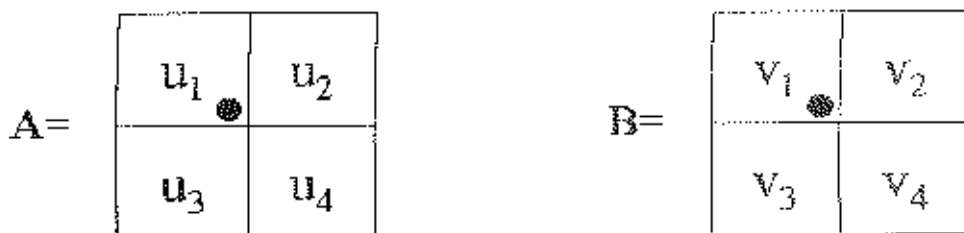


Figura 26: Las matrices **A** y **B** se construyen con los 4 elementos de u y v más cercanos a la posición de la partícula. El punto en ambas matrices representa la posición de la partícula, es en ese punto donde es necesario conocer la velocidad.

Cuando una partícula está cerca de alguna frontera, **A** y **B** contarán con uno o varios elementos marcados como tierra en las matrices. Estos elementos de las matrices no contienen valores de velocidad, por lo que, para construir la frontera, a estos elementos se les asigna una velocidad tal que se cumpla la condición antes señalada.

Existen diferentes situaciones de partículas acercándose a la frontera, la más simple es cuando la costa es meridional o zonal por lo cual son dos las celdas de **A** y **B** que están marcadas como tierra y obviamente hay que corregir aquella matriz que contenga la componente de velocidad perpendicular a la frontera, la componente paralela a la frontera en este caso no requiere de crear una frontera. La figura 27, muestra un ejemplo de esta situación, en la que el punto es una partícula acercándose a una costa meridional y la línea gruesa es la frontera que se requiere de construir.

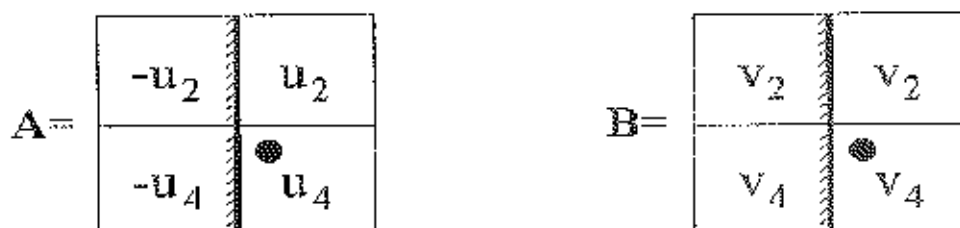


Figura 27: Caso en que la frontera ocupa dos celdas de las matrices A y B.

En los casos en que la frontera cruza A y B de forma diagonal resulta un poco más complicado construir la frontera. Cuando la frontera incluye tres elementos de la matriz, en cada matriz se construye la frontera de la componente perpendicular a esta. La figura 28 muestra un ejemplo en el que la partícula se acerca a una costa en la que 3 elementos de la matriz se encuentran fuera del océano y la forma en que ésta es corregida.

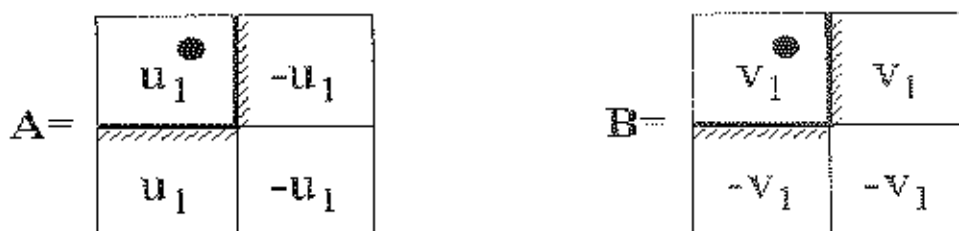


Figura 28: Caso en que la frontera ocupa tres celdas de las matrices A y B.

Por último el caso en que las fronteras en A y B están formadas por sólo un elemento de la matriz. En este caso para construir la frontera es necesario saber en cuál de las celdas se encuentra la partícula. Si la partícula se encuentra en la celda opuesta al elemento de tierra de A y B se le asigna el valor de la componente perpendicular a la costa con dirección opuesta (fig. 29). Sin embargo, si la partícula se encuentra en alguna celda contigua a la frontera, el caso se simplifica al primer caso explicado (fig. 30).

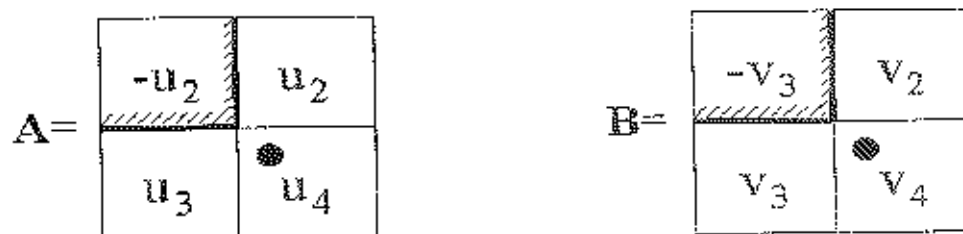


Figura 29: Caso en que la frontera ocupa una celda de las matrices A y B y la partícula se encuentra en la celda opuesta a la frontera.

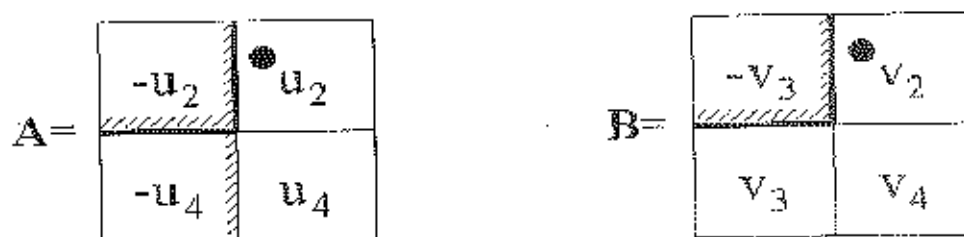


Figura 30: Caso en que la frontera ocupa una celda de las matrices A y B y la partícula se encuentra frente a la frontera.

C Advecciones

Anexo se encuentra un CD que contiene las animaciones de los 12 experimentos de adveccion anual de partículas señalados en la tabla I. Las partículas estan clasificadas segun la fig 2. En cada animación las trayectorias tienen la longitud alcanzada durante los 5 días anteriores a la fecha indicada en la animación.

Bigliografía

- Bartsch J., 1993. Application of a circulation and transport model system to the dispersal of herring larvae in the North Sea. *Continental Shelf Research*, **13**(12), 1335-1361.
- Beier E., 1997. A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, **27**, 615-632.
- Beier E., P. Ripa, 1999. Seasonal gyres in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, **29**, 305-311.
- Emilsson L., M.A. Alatorre, 1997. Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California, en *Contribuciones a la oceanografía física en México*, editado por M. F. Lavín, 173-182, Unión Geofísica Mexicana., Ensenada, B.C.
- García A.L. 1994. *Numerical methods for physics*. 368 pp. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Lavín M.F., R. Durazo, E. Palacios, M.L. Argote and L. Carrillo, 1997. Lagrangian observations of the circulation in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, **27**(10) 2298-2305.
- Marinone S.G., S. Pond and J. Fyfe, 1996. A Three-dimensional model of tide and wind-induced residual currents in the central strait of Georgia, Canada. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **43**,
- Marinone S.G., 2000. Corrientes de marea en el Golfo de California: Intercomparaciones entre modelos bidimensionales y tridimensionales con observaciones. *Ciencias Marinas*, **26**(2), 275-301.

- Marinone S.G., 2002. The mean and seasonal circulation in a three dimensional model of the Gulf of California. *J. Geophysical Research*, enviado.
- Palacios E. 2001. Circulación de la región norte del Golfo de California: estacional y anomalías. Tesis de Doctorado, CICESE.
- Palacios-Hernández E., M.F. Lavín y P. Ripa. 2002. The effect of the seasonal variations of stratification on the circulation of the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*,
- Peterman R.M., S.G. Marinone, K.A. Thompson, I.D. Jardine, R.N. Crittenden, P.H. Leblond and C.J. Walters, 1994. *Fisheries Oceanography*, 3:4, 221-235.
- Ripa P., 1990. Seasonal circulation in the Gulf of California. *Annales Geophysicae*, 8, 559-564.
- Ripa P., 1997. Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 597-614.
- Velasco O.U. y S.G. Marinone, 1999. A numerical study of the lagrangian circulation in the Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 22,, 1-12.