

TESIS defendida por
Julio César Figueroa González
y aprobada por el siguiente comité:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Co-Director del Comité

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Co-Director del Comité

Dr. Julio Candela Pérez
Miembro del Comité

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Miembro del Comité

Dr. José Rosario Gallardo López
Miembro del Comité

Dr. Luis Zavala Sansón
Coordinador del Programa en
Oceanografía física

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla
Director de Estudios de Posgrado

Febrero de 2006

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA**



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

**CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN LA REGIÓN COSTERA DE
ROSARITO A SAN DIEGO, UTILIZANDO RADARES DE ALTA
FRECUENCIA**

TESIS

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

JULIO CÉSAR FIGUEROA GONZÁLEZ

Ensenada, Baja California, México. Febrero de 2006.

RESUMEN de la tesis de Julio César Figueroa González, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANO-
GRAFÍA FÍSICA. Ensenada, Baja California, México. Febrero de 2006.

CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN LA REGIÓN COSTERA DE ROSARITO A
SAN DIEGO, UTILIZANDO RADARES DE ALTA FRECUENCIA.

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Co-Director de tesis

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Co-Director de tesis

Se establecen patrones de circulación superficial en la región fronteriza México-Estados Unidos de Norte America, con base en mediciones de corrientes inferidas utilizando radares de alta frecuencia. Se utiliza un conjunto de cuatro sistemas de radares de alta frecuencia, con los cuales se obtienen series horarias de las corrientes superficiales de la región en cuestión, en el período de septiembre de 2002 a noviembre de 2003. El flujo medio muestra una estructura paralela a la costa con dirección sur. El análisis armónico de los datos de corrientes superficiales reveló que la marea representa hasta un 35 % de la variabilidad del flujo. Los residuales fueron examinados con la técnica de funciones empíricas ortogonales conjuntas. El modo más energético explica el 43 % de la varianza del residual y establece variaciones meridionales de la corriente superficial en periodos de 9 y 18 días.

La región de estudio también se caracteriza por la presencia de eventos Santa Ana. Se analizaron dos eventos que se desarrollaron en marzo y octubre de 2003. La influencia de la condición en las corrientes superficiales durante marzo fue notoria cerca de la costa debido a que en mar abierto el flujo medio fue más importante. Sin embargo, en octubre la condición fue notoria en toda la zona de estudio, esto se debió a que existieron corrientes con dirección norte.

Palabras clave: *corriente costera, evento Santa Ana, radar de alta frecuencia.*

ABSTRACT of the thesis of Julio César Figueroa González, presented as partial requirement to obtain the degree of MASTER OF SCIENCES in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California, Mexico. February of 2006.

SURFACE CIRCULATION IN THE COASTAL REGION OF NORTHWEST
BAJA CALIFORNIA USING HIGH FREQUENCY RADARS.

Surface current data has been acquired using four HF radar sites to establish surface current patterns around the Mexican-USA coastal water. The data has been acquired from September 2002 to November 2003. The mean flow was parallel to the coast, in Southward direction. The tidal analysis explained 35 % of the variability on the surface current. The residual was study using Empirical Orthogonal Functions. The first mode represents the mean flow variations and explain 43 % of the residual variance, and it establish meridian variations in periods of 9 and 18 days.

The region also presents Santa Ana winds events. We analyses two of these events, one recorded during March and the other during October of 2003. The influences of the Santa Ana wind events from March were notorious near the coast. However the October events were well observed on the currents and also there was a notorious Northward flow.

Key words: *coastal current, Santa Ana wind event, HF radar.*

AGRADECIMIENTOS

Al comité evaluador de esta tesis, conformado por: Dr. Francisco Ocampo Torres, Dr. Reginaldo Durazo, Dr. Julio Candela Pérez, Dr. Manuel López Mariscal y Dr. José Rosario Gallardo, ¡gracias por sus valiosas sugerencias y sobre todo su dedicación!.

Al Dr. José Luis Ochoa de la Torre y al Dr. Julio Sheinbaum Pardo, por sus asesorías.

Al programa de Maestría en Oceanografía Física de la División de Oceanología del CICESE.

Al CONACyT, por su apoyo económico mediante la beca-crédito de Maestría No. 171687.

Al proyecto CONACyT Corrientes y Oleaje en el Golfo de Tehuantepec (COGOTE), clave U40822-F.

Al proyecto interno UABC Circulación y Dinámica en la franja costera entre Rosarito y Tijuana, Baja California, programa 1359.

Por las facilidades otorgadas para la operación de la estación de radar HF en la Isla Coronado Sur, se agradece a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), permisos DFSEMARNAT-SGPA-ENS-1526/04, DFSEMARNAT-SGPA-ENS-00033/2002, DFSEMARNAT-SGPA-ENS-0607/03, y a la Secretaría de Gobernación (SEGOB), permisos DICOPPU/211/2492/05, DICOPPU/211/1543/03 y UG/211/2640/02.

A mis compañeros y amigos del Departamento de Oceanografía Física. ¡GRACIAS ...!

Contenido	Página
I. Introducción	1
I.1. Antecedentes	3
II. Descripción del área de estudio y de los datos obtenidos	5
II.1. Datos utilizados	5
III. Métodos de análisis	10
III.1. Elipse de variabilidad	10
III.2. Análisis armónico de series de corrientes	11
III.3. Espectros cruzados, coherencia y admitancia	12
III.4. Funciones empíricas ortogonales	14
IV. Resultados	16
IV.1. Velocidad del Viento	16
IV.2. Corrientes medidas con perfiladores acústicos	21
IV.3. Comparación de las corrientes medidas (PA-RAF)	25
IV.4. Campo medio de corrientes superficiales	27
IV.5. Flujo medio mensual de la corrientes superficiales	30
IV.6. Análisis armónico de las corrientes superficiales	47
IV.7. Análisis de las corrientes superficiales residuales por funciones empíricas ortogonales	50
IV.8. Condición Santa Ana	55
V. Discusión	61
VI. Conclusiones	67

Contenido (continuación)	Página.
Apéndices	68
A. Radar de alta frecuencia: estimación de corrientes superficiales.	68
Referencias	75

Índice de figuras

Página

1. Región costera fronteriza México - E. U. A. Se muestran la localización de los radares de alta frecuencia (Point Loma, Imperial Beach, Rosarito e Islas Coronado) y los arcos de circunferencia muestran la cobertura (~ 30 km) de cada uno de ellos. Los contornos representan las isobatas a 10 m, 50 m, 100 m, 500 m y 1000 m de profundidad. Los cuadros en color azul representan los puntos de malla espaciados cada 3 km x 3 km. PA significa perfilador acústico y muestra los sitios donde fueron anclados al fondo. 6
2. Base de datos utilizada para la estimación de corrientes superficiales. El período de mediciones comprende del 24 de septiembre de 2002 al 30 de noviembre de 2003. Las flechas indican el primer día de cada mes. 7
3. Elementos de una elipse. Semieje mayor M , semieje menor m , ángulo de rotación respecto del este θ_E con rotación antihoraria (+) y horaria (-), vector promedio $Pm(\bar{u}, \bar{v})$ y origen O 11
4. Elipse componente para los datos de viento de la estación Rosarito. Período del 7 de marzo al 25 de mayo y del 17 al 31 de octubre de 2003. Los datos correspondientes a condición Santa Ana se muestran en color: rojo (28 al 31 de marzo), verde (abril 8) y azul (21 al 28 de octubre). El vector medio es (\bar{u}, \bar{v}) , los semi-ejes son M y m , y θ_E el ángulo de inclinación de la elipse respecto al cero matemático. El sentido de los vectores de viento es referido a la convención meteorológica. 17
5. Espectros rotacionales de las series de viento, marzo–mayo de 2003. Las bandas de mayor concentración de energía son la sinóptica, diurna y semidiurna. Se utilizó una ventana Hanning de 15 días para suavizar el espectro. Sp significa rotación ciclónica (+) y Sn se refiere a rotación anticiclónica (-). Cp y Cn representan la coherencia cuadrada para los Sp y Sn respectivamente. 18
6. Variación diurna del viento típica de cada mes. Las mediciones (cada 5 minutos) fueron suavizadas con un filtro horario y estandarizadas a series horarias. El período de mediciones comprende los años de 1998 a 2001, los periodos donde no se tiene información fueron reemplazados por la media temporal. El eje horizontal representa las horas a lo largo del día y el eje vertical de la izquierda (derecha) establece la dirección (rapidez). Se aprecia la influencia estacional en la rapidez del viento. 20

Índice de figuras (continuación)

Página

7.	Elipse de variabilidad de las velocidades superficiales de los dos perfiladores acústicos instalados. La profundidad mencionada es la profundidad promedio a la cual se mantuvieron las celdas durante el período de mediciones. La celda más superficial se mantuvo a 4 m por debajo de la superficie.	21
	(a). PA 687. Variabilidad de los datos a ~ -4 m	21
	(b). PA 691. Variabilidad de los datos a ~ -4 m	21
8.	Componentes de marea diurna y semidiurna para los datos de corrientes de los PA 687 y 691. El PA 687 se instaló en la zona de las islas, en tanto que el PA 691 se instaló frente a Rosarito. Se observa una estructura barotrópica en los semi-ejes mayores.	23
	(a). M_2	23
	(b). S_2	23
	(c). K_1	23
	(d). O_1	23
9.	Coefficientes de rotación $\frac{m}{M}$ de las elipses de las componentes diurnas (K_1 y O_1) y semidiurnas (M_2 y S_2).	24
	(a). M_2	24
	(b). S_2	24
	(c). K_1	24
	(d). O_1	24
10.	Dispersion de las mediciones del RAF. a) Mediciones del RAF próximas al PA 691, período de muestreo del RAF: septiembre del 2002 a noviembre de 2003; b) similar a (a) pero para el período del PA (28 de diciembre de 2002 al 02 de abril de 2003). La corriente promedio presenta dirección sur.	25

Índice de figuras (continuación)

Página

11. Comparación de datos de corrientes obtenidos con el RAF y el PA 691 dentro del período del 28 de diciembre de 2002 al 02 de abril de 2003. a) Componente zonal de la corriente. b) Componente meridional. Los datos son mediciones horarias, todas las frecuencias mayores a 1/3 cph fueron removidas, para efecto de suavizado. 26
12. Coeficiente de correlación vectorial. a) correlación con un desfase de ± 24 horas. b) Ángulo medio entre las series del radar y del PA de -13° . Desfase positivo significa que la primer serie (RAF) antecede a la segunda (PA). 26
13. Campo medio de corrientes superficiales. Estructura con dirección sureste y magnitud del orden de 12 cm/s. El campo medio fue calculado en el período de septiembre de 2002 a noviembre de 2003 a partir de datos horarios. 27
14. Errores promedio asociados a mediciones de los RAF. b) Incertidumbre en la estimación de los datos radiales, b) Error medio de la geometría de los datos radiales utilizados. El periodo comprende de septiembre de 2002 a noviembre de 2003. 29
15. Campo medio de la corriente superficial para el mes de septiembre de 2002. El flujo presenta dirección sur y tiende a cruzar entre las islas y la costa. Se observa intensificación del flujo al sur oeste de las Islas Coronado. 31
16. Similar a la fig. 15, pero para el mes de octubre de 2002. 32
17. Similar a la fig. 15, pero para el mes de noviembre de 2002. Se refleja la poca cantidad de datos para realizar el promedio. 33
18. Similar a la fig. 15, pero para el mes de diciembre de 2002. Se caracteriza por un meandro que llega perpendicular a la costa y al alinearse a la línea de costa fluye al sur. 34
19. Similar a la fig. 15, pero para el mes de enero de 2003. 35
20. Similar a la fig. 15, pero para el mes de febrero de 2003. 36

Índice de figuras (continuación)

Página

21.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de marzo de 2003. La corriente promedio se intensifica, sobre todo en la porción oeste del area de estudio. El debilitamiento del flujo cercano a la costa se debió a los vientos Santa Ana.	37
22.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de abril de 2003.	38
23.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de mayo de 2003.	39
24.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de junio de 2003.	40
25.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de julio de 2003. Flujo homogéneo.	41
26.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de agosto de 2003. Se presenta una intensificación de las corrientes en las inmediaciones del vertedero de la Cd. de Tijuana.	42
27.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de septiembre de 2003. Se presenta una intensificación de las corrientes en las inmediaciones del vertedero de la Cd. de Tijuana.	43
28.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de octubre de 2003. El flujo es bastante débil, respecto al año anterior. Posiblemente ocasionado por los vientos Santa ana.	44
29.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de noviembre de 2003.	45
30.	Similar a la fig. 15, pero para el mes de diciembre de 2003.	46
31.	Porcentaje de la varianza total explicada por el análisis armónico de la marea.	47
32.	Estructura espacial de las elipses de la componente de marea Lunar-solar diurna, K_1 . El sentido de rotación de las elipses de los RAF y PA es el mismo.	48
33.	Estructura espacial de las elipses de la componente lunar diurna de la marea, O_1 . El sentido de rotación de las elipses de los RAF y PA es el mismo.	48
34.	Estructura espacial de las elipses de la componente de marea lunar semi-diurna, M_2	49

Índice de figuras (continuación)

Página

35. Estructura espacial de las elipses de la componente de marea solar semi-diurna, S_2 49
36. Espectro de potencias de las componentes principales multiplicadas por sus respectivos autovalores. Se realizaron particiones espectrales cada 3 meses, sin traslape espectral. La línea vertical indica el nivel de confianza al 95 %. 51
37. Espectro de potencias normalizado del rotacional de la velocidad del viento. El campo de velocidades se obtuvo de imágenes diarias de QuikSCAT para todo el año de 2003. La línea vertical indica el nivel de confianza al 95 %. Se compara con el modo 1 (multiplicado por sus unidades y normalizado). La energía entre el modo 1 y el rotacional del vector velocidad del viento es consistente a los 9 días. 51
38. Primer modo de oscilación de las corrientes superficiales de los RAF. Los vectores representan la variación espacial del modo, en tanto que la línea oscura de la derecha representa la variación temporal (componentes principales, CP) del campo espacial. Las flechas del eje de tiempo indican el primer día de cada mes. La estructura espacial muestra variaciones con dirección norte-sur. El primer modo explica el 43 % de la varianza del residual. 52
39. Similar a la figura 38, pero para el segundo modo. La estructura espacial muestra variaciones perpendiculares a la línea de costa, en tanto que la estructura temporal presenta periodos del orden de 3 meses y 15 días (Fig. 36). Se explica el 12 % de la varianza del residual. 53
40. Similar a la figura 38 pero para el tercer modo. La estructura espacial muestra un giro con centro al norte de Islas Coronado. Se explica el 10 % de la variabilidad del residual. 54
41. Corrientes superficiales durante una condición Santa Ana de marzo 2003. a) El registro meteorológico del Santa Ana se caracterizó por tres eventos (máximos en la rapidez del viento), las líneas verticales en gris muestran el inicio y máximo de un evento. b) Corrientes superficiales al inicio del evento. c) Corrientes superficiales cuando el Santa Ana fue máximo. 56
- (a). Registro meteorológico 56

Índice de figuras (continuación)

Página

(b). Inicio	56
(c). Máxima	56
42. Ejemplo de un campo de viento obtenido por el satélite QikSCAT para el 28 de marzo de 2003. Se destaca un campo de viento uniforme para dicho periodo.	57
43. Corrientes superficiales durante una condición Santa Ana de octubre de 2003. a) Registro meteorológico, el Santa Ana se detecta en Rosarito a partir del 25 de octubre. (b) y (c) son mapas de corrientes superficiales que muestran que el Santa Ana fue más intenso en la porción norte del area de estudio.	58
(a). Registro meteorológico	58
(b). Corrientes superficiales, ejemplo 1	58
(c). Corrientes superficiales, ejemplo 2	58
44. Condiciones promedio de la corriente superficial durante la condición Santa Ana de marzo y octubre de 2003. La influencia del evento Santa Ana de octubre es más evidente en la corriente superficial en comparación del evento de marzo.	59
(a). Marzo 2003	59
(b). Octubre 2003	59
45. FEOs de las corrientes superficiales en periodos de Santa Ana. Se muestran los 3 primeros modos. La estructura espacial es la misma para ambos eventos, sólo que la variación temporal (CP) cambia entre los eventos, panel inferior (superior) para marzo (octubre).	60
(a). modo 1	60
(b). modo 2	60
46. Espectro rotacional del viento. Se utilizó una ventana espectral de 3 meses con 8 grados de libertad. a) Boya ubicada 7.5 Km mar afuera frente al muelle de Scripps. b) Estación meteorológica en el muelle de Scripps. Destaca una banda muy energética en las 24 hrs.	63

Índice de figuras (continuación)

Página

47.	Esquematzación de las ondas de Bragg.	69
48.	Espectro Doppler de una señal recibida. Modificado de Paduan y Graber (1997)	69
49.	Estimación de corrientes superficiales con radares de alta frecuencia. . .	72
	(a). Componente radial de la corriente estimada por cada antena . . .	72
	(b). Forma gráfica de obtener vectores resultantes	72
	(c). Estimación de corrientes resultantes a partir de 2 sitios de observación	72
	(d). Corrientes resultantes	72
50.	Factor GDOP para dos sitios costeros. Se consideran los sitios de Point Loma e Imperial Beach. Variación a lo largo de la costa de la resolución (Sup. Izq.) y perpendicular (Sup. Der.). Estructura espacial de la resolución de las corrientes superficiales (Inf. Izq.). GDOP (Inf. Der.). Cortesía D. Barrick y E. Terril.	74
51.	Factor GDOP para tres sitios de radares HF. Se consideran los sitios de Point Loma, Imperial Beach e Islas Coronado. Variación a lo largo de la costa de la resolución (Sup. Izq.) y perpendicular (Sup. Der.). Estructura espacial de la resolución de las corrientes superficiales (Inf. Izq.). GDOP (Inf. Der.). Cortesía D. Barrick y E. Terril.	74

Índice de tablas

Página

I.	Precisión de los parámetros físicos registrados por la estación y la boya meteorológica.	9
II.	Constituyentes diurnos y semi-diurnos de la marea.	12
III.	Definición de la coherencia y la admitancia.	13
IV.	Estadística de parámetros atmosféricos medidos.	17
V.	Parámetros de las componentes de marea diurnas y semidiurnas obtenidos mediante datos de nivel del mar. Localidad Ensenada, B. C. Se compara con las mediciones de los PA.	22
VI.	Estadística de la atmósfera de Rosarito bajo condición Santa Ana. . . .	55

I. Introducción

El estudio de la dinámica costera fortalece la toma de decisiones importantes para la seguridad y la mejor planeación de los asentamientos costeros ante fenómenos oceánicos y atmosféricos como marejadas, ciclones, oleaje de tormenta y condiciones Santa Ana por mencionar algunos. La circulación en la franja costera oceánica (o cerca de la plataforma continental) es inducida en cierta medida por la marea, los cambios en la profundidad, los gradientes de densidad y el esfuerzo del viento.

Ciertamente, la medición de los diferentes fenómenos en la superficie del océano permite un mejor estudio de procesos como el intercambio de calor, deriva superficial, mejores condiciones de frontera para el desarrollo de modelos numéricos, derrame de hidrocarburos y contaminantes, manejo de contingencias y navegación (Neal, 1992; Bjorkstedt y Roughgarden, 1997; Paduan y Graber, 1997; Prandle, 1997).

La información de corrientes superficiales ayuda en el estudio de los problemas oceanográficos relacionados con actividades humanas; sobre todo cuando la información se proporciona de manera sinóptica y lo antes posible, razones por las cuales los fenómenos oceanográficos y atmosféricos en la zona costera requieren del uso de nuevas tecnologías sensibles a los procesos que allí ocurren (Lipa y Barrick, 1983; Haus *et al.*, 1997; Paduan y Graber, 1997). Los sistemas basados en el corrimiento Doppler de un pulso electromagnético son cada vez más comunes, como el perfilador de corrientes ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) y el radar de alta frecuencia (RAF). El ADCP estima perfiles verticales de velocidad, mientras que el RAF provee mapas de corrientes superficiales que representan el movimiento del agua en los primeros metros de la superficie (Paduan y Cook, 1997; Paduan y Graber, 1997).

Entender la circulación costera mediante mediciones de corrientes superficiales requiere separar la contribución de los diferentes fenómenos físicos y con ello mejorar

la interpretación de los mecanismos de forzamiento y comprender la contribución de cada uno de ellos. Con este objetivo, instituciones a ambos lados de la frontera política entre México y E.U.A. han establecido un observatorio oceanográfico costero. El núcleo de este observatorio consiste de radares de alta frecuencia que proveen estimaciones de la corriente superficial.

Se analiza en el presente trabajo las mediciones de corrientes costeras superficiales, con el objeto de establecer patrones de circulación superficial. Se hace énfasis en la circulación generada por el forzamiento del viento, viento sinóptico brisa diurna y sobre todo la condición Santa Ana, la cual se manifiesta en un descenso de la humedad relativa y en vientos intensos provenientes de tierra (Sommers, 1978; Hu y Liu, 2003).

Otro fenómeno geofísico del que se desconoce su influencia en la circulación local es el Sistema de la Corriente de California (SCC). El SCC es un sistema de gran escala del cual se ha establecido una climatología del campo geostrófico (0/500 db ó 0/1000 db) y que comúnmente se extrapola a la zona costera (Lynn y Simpson, 1987; Durazo y Baumgartner, 2002). Sin embargo, se desconoce qué tan sensible es la zona de estudio a los procesos que acontecen en el SCC, es decir, ¿realmente se registran procesos como el giro de la cuenca de California y la corriente costera en las mediciones de corrientes superficiales?.

Las ideas anteriores motivan el planteamiento de la hipótesis de que la variabilidad de las corrientes superficiales en la región Rosarito–San Diego se atribuye principalmente a la variabilidad del viento.

Además de la importancia de los fenómenos geofísicos antes mencionados, el interés de dos naciones (México y E.U.A.) por entender la variabilidad del flujo superficial en la región fronteriza, es motivo suficiente para realizar el presente estudio. El conocimiento generado por este trabajo podrá ser utilizado como información de referencia en investigación básica en diferentes disciplinas y, por consiguiente, en la

adecuada toma de decisiones con diferentes propósitos.

I.1. Antecedentes

La importancia de la zona fronteriza México – Estados Unidos de Norte América radica en la cantidad de asentamientos humanos que alberga. Se han realizado diversos estudios, tanto de oceanografía de mar abierto para estudiar la dinámica del Sistema de la Corriente de California (SCC), así como de escalas locales y de corto plazo para estudiar la circulación y la calidad del agua.

Los estudios más generales de circulación oceánica (Sverdrup y Fleming, 1941; Hickey, 1979; Reeves *et al.*, 1983; Lynn y Simpson, 1987) muestran que la intensificación del SCC está controlada por los vientos del oeste. Además las corrientes geostróficas (0/500 db) presentan dirección sur y magnitudes entre 5 cm/s y 35 cm/s, siendo la media 17.5 cm/s. La corriente de California (CC) se manifiesta cerca de la costa en los meses de abril y mayo, es entonces cuando se elimina la contracorriente costera de California (CcC). Al final del verano y durante el otoño la CC es menos intensa, justo cuando la CcC se intensifica.

Concerniente a estudios de circulación en la zona destacan los siguientes trabajos. Hernández-Walls (1986) estudió la circulación inducida por viento y reporta para marzo de 1985 corrientes medidas (dos días de observaciones) del orden de 0.20 ± 0.035 m/s, en tanto que el modelo que utilizó reporta corrientes inducidas por viento (4 m/s) menores a 0.18 m/s. Alvarez *et al.* (1990) describen la circulación y dispersión de partículas con base en información de flotadores y un correntímetro (a 15 m de profundidad) utilizados en cinco campañas con duración de menos de cinco días cada una. Describen un flujo promedio de 0.20 m/s, paralelo a la costa con dirección SE y con inversiones durante el verano. Cabe mencionar que sólo se trabajó en condiciones de viento menor a 7 m/s, ya que el oleaje local dificultó el monitoreo de las boyas.

Algunos estudios sobre la variabilidad del viento en localidades más cercanas a la zona de estudio se reportan en (Reyes y Parés, 1983; Pavía y Reyes, 1983; Reyes *et al.*, 1983) para la Bahía de Todos los Santos (50 Km al sur). Se destaca un sistema sinóptico bien definido y un sistema de brisas, ambos sistemas son heterogéneos, sobre todo la brisa se ajusta a las condiciones de topografía local.

Sierra-Carrascal (2003) reporta que el sistema de brisas para el período de febrero a marzo del 2003 contribuye en un 5 % en la circulación costera, para ello utilizó información de corrientes medidas con sistemas de alta frecuencia.

Existen estudios de la calidad del agua en la zona fronteriza, para diferentes estaciones del año, así como para condiciones de flujo con dirección sur y con dirección norte (Segovia-Zavala *et al.*, 1995, 1998; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2004). Sin embargo, la información de circulación costera que se utiliza proviene de estudios puntuales de corto plazo, y el estudio de largo plazo utilizado es la climatología del SCC. Cabe mencionar que en los periodos de inversiones Segovia-Zavala *et al.* (1995) reportan plumas de contaminantes que por su estructura espacial no coinciden visualmente con las inversiones de flujo reportadas en Alvarez *et al.* (1990).

Respecto a la influencia de la condición Santa Ana en la atmósfera y a lo largo de la Península de Baja California y el oeste de E.U.A., existen varios trabajos (Sommers, 1978; Trasviña *et al.*, 2002; Hu y Liu, 2003; Mascarenhas *et al.*, 2003; Castro *et al.*, 2003; Parés-Sierra *et al.*, 2003). Se menciona que la temporada de los Santa Anas es de septiembre a abril de cada año, el mes con más Santa Anas registrados es diciembre. Cada año existen en promedio 20 eventos por temporada, con duración media de 1.5 días.

II. Descripción del área de estudio y de los datos obtenidos

La zona costera oceánica en estudio está comprendida por la región geográfica que cubren los radares de alta frecuencia (longitud: $117^{\circ} 30' W$ a $116^{\circ} 50' W$ y latitud: $31^{\circ} 5' N$ a $33^{\circ} 50' N$, Fig. 1). La costa se compone en su mayor parte por cantiles (5-10 m de altura), con alternancia de playas de bolsillo que presentan desde arenas finas hasta cantos rodados (Elizarrarás, 1986).

La plataforma tiene un ancho medio de 20 km y el quiebre se encuentra al oeste de las Islas Coronado, zona donde la pendiente del fondo llega a ser de 40 %. El suelo marino entre las islas y la línea de costa se encuentra a menos de 50 m de profundidad. En general, el suelo marino está compuesto de roca basáltica metamórfica, material no consolidado y arenas (Carrillo-Berumen, 1998).

El oleaje que arriba a esta zona presenta dos direcciones incidentes principales (NW y W) con alturas promedio de 1 a 2 m, sin embargo, se han registrado olas de tormenta con alturas significantes de 5m (Ramos-Rodríguez *et al.*, 2001).

II.1. Datos utilizados

Se inició en septiembre de 2002 el monitoreo continuo de la región oceánica frente a la costa entre Rosarito y San Diego. El monitoreo se basa en la utilización de radares de alta frecuencia (RAF), del tipo CODAR (Coastal Ocean Doppler Radar). Se genera información horaria de la componente de la corriente que se acerca o aleja del radar (componente radial) con espaciamiento de 1 km x 5° . Los datos se ajustaron a una malla regular de 234 puntos (Fig. 1), espaciada cada 3 km x 3 km. Se consideran en los análisis 171 puntos de malla que representan las series temporales con más del 80 % de datos, con lo que se descartan ciertos puntos en los extremos del área de trabajo,

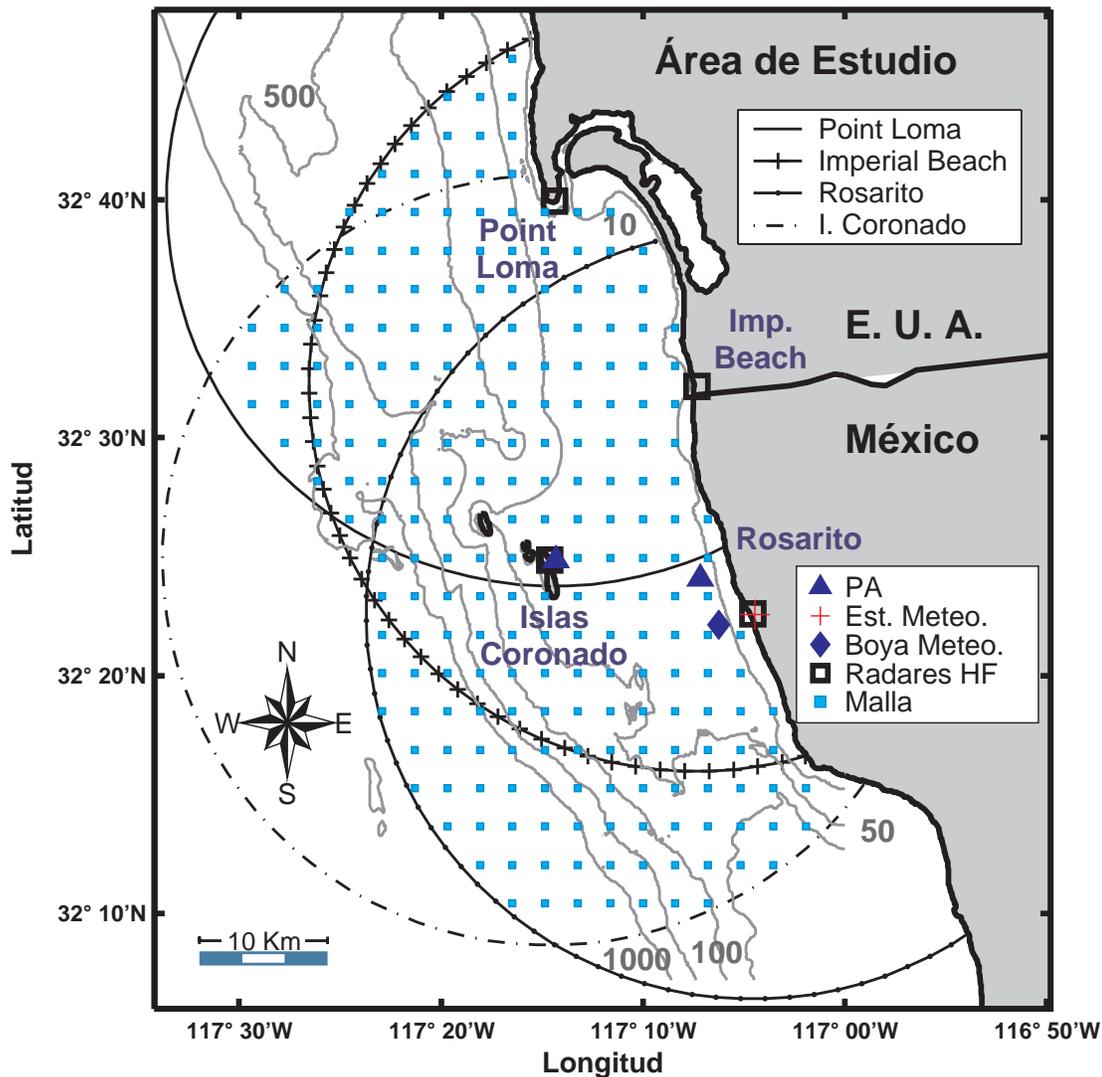


Figura 1: Región costera fronteriza México - E. U. A. Se muestran la localización de los radares de alta frecuencia (Point Loma, Imperial Beach, Rosarito e Islas Coronado) y los arcos de circunferencia muestran la cobertura (~ 30 km) de cada uno de ellos. Los contornos representan las isobatas a 10 m, 50 m, 100 m, 500 m y 1000 m de profundidad. Los cuadros en color azul representan los puntos de malla espaciados cada 3 km x 3 km. PA significa perfilador acústico y muestra los sitios donde fueron anclados al fondo.

los cuales no presentaron información confiable. El período de mediciones de los RAF considerado en el presente estudio es del 24 de septiembre de 2002 al 30 de noviembre de 2003. La base de datos disponible que se utilizó para estimar la corriente superficial se muestra en la figura 2.

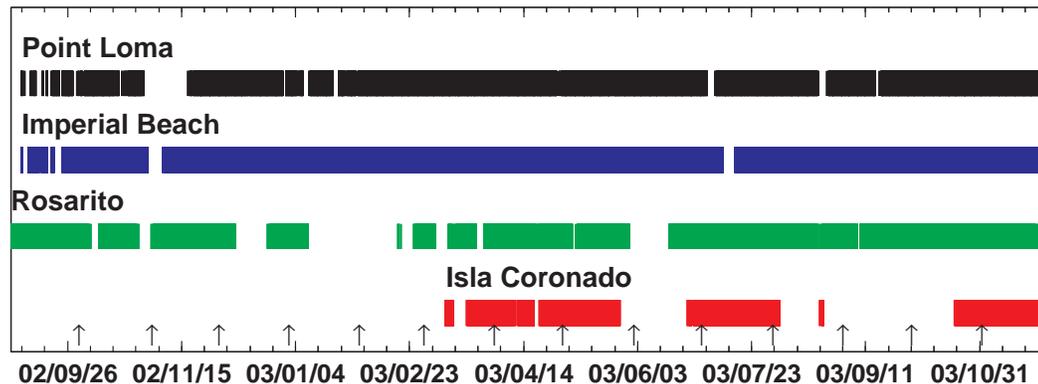


Figura 2: Base de datos utilizada para la estimación de corrientes superficiales. El período de mediciones comprende del 24 de septiembre de 2002 al 30 de noviembre de 2003. Las flechas indican el primer día de cada mes.

Los datos malos o valores NaN (Not a Number) en las series de tiempo son reemplazados por una interpolación lineal solamente para ser utilizados en el análisis armónico de la estimación de las componentes de marea (más adelante). Entiéndase por datos malos aquellos datos que cumplen los siguientes criterios: datos radiales que exceden 1.2 m/s, corrientes totales que exceden 1.5 m/s. Una vez realizado lo anterior, las series de tiempo de las 171 celdas fueron utilizadas en los análisis que se presentan en los siguientes capítulos.

Se obtuvieron perfiles de corrientes utilizando correntómetros acústicos instalados frente a Rosarito e Islas Coronado (Fig. 1). El perfilador acústico (PA) instalado frente a Rosarito se denomina PA 691 y se instaló a 19 m de profundidad, el período de mediciones abarca del 28 de diciembre de 2002 al 02 de abril de 2003 (95 días en total). El PA instalado en Islas Coronado es el PA 687 y se instaló en la cara este de las islas a 18 m de profundidad, del 28 de diciembre de 2002 al 29 de marzo de 2003 (91 días de mediciones). Ambos instrumentos fueron programados para medir las componentes zonal y meridional de las corrientes en 25 celdas de 1 m cada una, con

un intervalo de adquisición de datos de 30 minutos y un intervalo de muestreo de 1 minuto. La precisión horizontal de la corriente es de ± 1.5 cm. La celda más superficial que se considera en este trabajo, se mantuvo en promedio a 3.7 m por debajo de la superficie y la celda oscila con la superficie.

Los datos de viento provienen de 3 fuentes, medidos con una estación meteorológica (VAISALA–Maws201), una boya meteorológica (AANDERAA–CMB3280), y obtenidos del Instituto de Oceanografía SCRIPPS (por INTERNET). La estación meteorológica se instaló en los terrenos de PEMEX–Rosarito ($117^{\circ} 4.44'$ W y $32^{\circ} 22.56'$ N), a unos metros del RAF de Rosarito; en tanto que la boya meteorológica se instaló a 4 km al NW de este mismo radar. El anemómetro en tierra midió a 20 m de altura sobre el nivel medio del mar y el anemómetro en la boya se instaló a 1.5 m sobre la superficie marina; ambas series de datos fueron estandarizadas al nivel de 10 m, suponiendo condiciones de estabilidad neutra (Banke y Smith, 1971; Geernaert, 1999; Leal y Lavín, 2002; Lange *et al.*, 2004). Los coeficientes de arrastre fueron estimados de acuerdo a Smith (1980) y Wu (1980), con base en la magnitud de la velocidad del viento. La precisión de los instrumentos se describe en la Tabla I.

Tabla I: Precisión de los parámetros físicos registrados por la estación y la boya meteorológica.

Parámetros	Precisión
Estación meteorológica	
Rapidez del viento [m/s]	$(\leq 10) \pm 0.3, (> 10) \pm 2 \%$
Dirección del viento [$^{\circ}$ M]	± 3
Presión atmosférica [mb]	± 1
Temperatura del aire [$^{\circ}$ C]	± 0.2
Humedad relativa [%]	[HR] ± 2
Boya meteorológica	
Rapidez del viento [m/s]	± 0.3
Dirección del viento [$^{\circ}$ M]	± 5
Presión atmosférica [mb]	± 0.2
Temperatura del aire [$^{\circ}$ C]	T $\pm 0.1 \%$
Humedad relativa [%]	[HR] $\pm 2 \%$
Rapidez de la corriente [cm/s]	± 0.15
Dirección de la corriente [$^{\circ}$ M]	inclinación ($< 0.15^{\circ}$) ± 5 inclinación (15° a 35°) ± 7.5
Temperatura del agua [$^{\circ}$ C]	± 0.08
Tomado de los manuales y certificados de calibración de los instrumentos.	

III. Métodos de análisis

Se describen a continuación los métodos de análisis empleados en la presente tesis: la elipse de variabilidad, el análisis armónico, el análisis por espectros rotacionales y espectros cruzados. Finalmente se describe el análisis por funciones empíricas ortogonales.

III.1. Elipse de variabilidad

El cálculo de la elipse de variabilidad requiere de la estimación de los ejes principales, lo que permite rotar la orientación de los datos a un plano coordinado en función de la dirección de máxima variabilidad presente en los datos (Preisendorfer y Mobley, 1988). La rotación a ejes principales es una de las técnicas para obtener los parámetros de una elipse (Fig. 3) a partir de la matriz de covarianza (4) de las anomalías de los datos.

$$w(t) = u(t) + iv(t) \quad (1)$$

$$u'(t) = u(t) - \bar{u} \quad y \quad v'(t) = v(t) - \bar{v} \quad (2)$$

$$w'(t) = u'(t) + iv'(t) \quad (3)$$

donde: $i = \sqrt{-1}$, $w(t)$ es la serie temporal de velocidad expresada como número complejo con componente zonal $u(t)$ y meridional $v(t)$. El flujo medio se expresa mediante el campo de velocidad (\bar{u}, \bar{v}) , en tanto que $u'(t)$ y $v'(t)$ son las componentes de velocidad de las anomalías del flujo. Se deduce del análisis que

$$C_{uv} = (N - 1)^{-1} \sum_{n=1}^N [u'(t), v'(t)]^T [u'(t), v'(t)] \quad (4)$$

$$\theta_E = \frac{1}{2} \arctan[2C_{uv}(2, 1), (C_{uv}(1, 1) - C_{uv}(2, 2))] \quad (5)$$

$$w_r(t) = w(t) \exp(-i\theta_E) \quad (6)$$

donde: C_{uv} es la covarianza de la serie de tiempo, θ_E representa el ángulo de máxima variabilidad (orientación matemática) y $w_r(t)$ son los datos expresados en la dirección de su máxima variabilidad.

Los parámetros de la elipse son: un semieje mayor M , un semieje menor m , y su ángulo de inclinación θ_E respecto del este con rotación antihoraria o positiva. Los semiejes se obtuvieron mediante $M = \sqrt{C_{wr}(1, 1)}$ y $m = \sqrt{C_{wr}(2, 2)}$, siendo C_{wr} la matriz de covarianza de (6). Los datos que se encuentran dentro de la elipse se dispersan una desviación estándar con respecto al promedio $Pm(\bar{u}, \bar{v})$.

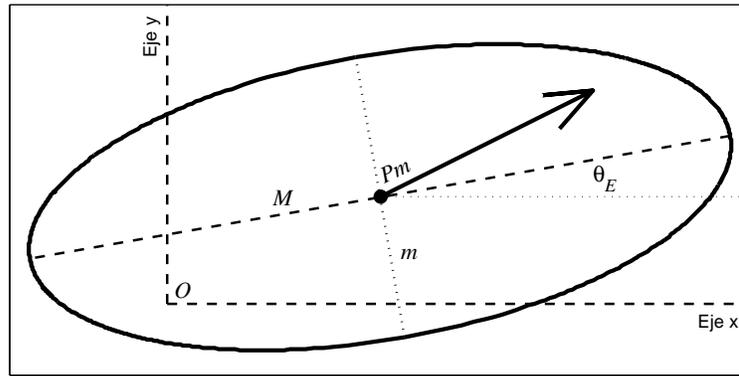


Figura 3: Elementos de una elipse. Semieje mayor M , semieje menor m , ángulo de rotación respecto del este θ_E con rotación antihoraria (+) y horaria (-), vector promedio $Pm(\bar{u}, \bar{v})$ y origen O .

III.2. Análisis armónico de series de corrientes

La técnica de análisis armónico (AA) realiza un ajuste de la marea por mínimos cuadrados, donde el modelo es una serie de armónicos para los cuales se determinan sus coeficientes a frecuencias específicas. Las frecuencias de los forzamientos, para el caso de las mareas, son principalmente de origen astronómicos y bien definidas; por lo cual se puede aplicar la técnica para encontrar la amplitud y fase de cada constituyente de marea en un registro de corrientes tan corto como sea posible (Tabla II).

El método de AA considera que la serie temporal de corrientes (1) se puede

descomponer en una suma de funciones senoidales (Godin, 1988) con una frecuencia astronómica específica; por lo que una serie temporal de corrientes se expresa como:

$$\begin{aligned} w(t) &= u(t) + iv(t) \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \cos(\zeta_k t - c_k) + i[b_0 + \sum_{k=1}^K b_k \cos(\zeta_k t - d_k)] + \xi_u(t) + i\xi_v(t) \end{aligned} \quad (7)$$

donde: k representa el k -ésimo constituyente de la marea con amplitud a_k y b_k , frecuencia conocida ζ_k y fases c_k y d_k . Las corrientes residuales se denotan como $\xi_u(t)$ y $\xi_v(t)$

Tabla II: Constituyentes diurnos y semi-diurnos de la marea.

Constituyente	Frecuencia [cph]	Comparación	Razón	Registro mínimo [h]
Semidiurna				
M ₂ Principal lunar	0.0805		1	13
S ₂ Principal solar	0.0833	M2	0.465	355
Diurna				
K ₁ Luni-solar	0.0418		0.584	24
O ₁ Principal lunar	0.0387	K1	0.415	328

Modificado de Emery y Thomson, 1998; pág 400.

Cada componente de marea estimada a partir de series vectoriales en la forma de (7), presenta una elipse (Fig. 3) por cada frecuencia de marea σ_k (ej.: M₂), además se estima la fase temporal ϕ respecto al meridiano de Greenwich. Los programas utilizados para realizar el el AA de la marea fueron implementados en MatLab por Pawlowicz *et al.* (2002).

III.3. Espectros cruzados, coherencia y admitancia

La técnica de los espectros cruzados permiten comparar dos series tiempo (w_1 y w_2) como se definen en (1) y evaluar el grado de similitud (*coherencia*) del movimiento, en las diferentes bandas de frecuencia (Gonella, 1972; Candela-Pérez, 1982; Godin,

1988; Emery y Thomson, 1998). El análisis de series de tiempo por espectros cruzados requiere del cálculo de las siguientes cantidades

$$S_{xy} = x^*(\sigma_j)y(\sigma_j) \quad (8)$$

$$S_{xx} = x^*(\sigma_j)x(\sigma_j) \quad (9)$$

$$S_{yy} = y^*(\sigma_j)y(\sigma_j) \quad (10)$$

donde: * representa el complejo conjugado, σ_j es la j -ésima banda de frecuencia. x y y representan la transformada de Fourier de dos series de tiempo.

La ecuación 8 define el espectro cruzado entre x y y , S_{xy} , siendo x la transformada de Fourier del forzamiento sobre la serie que representa a y , por ejemplo: dos series de corrientes en dos localidades. Las ecuaciones 9 y 10 representan los autoespectros S_{xx} y S_{yy} o espectros rotacionales (de potencia) para una serie vectorial (escalar). Se utiliza el método Welch (periodograma suavizado) en el cálculo de los espectros cruzados y autoespectros. Las particiones espectrales se suavizaron utilizando una ventana de Hanning (Emery y Thomson, 1998).

Tabla III: Definición de la coherencia y la admitancia.

Espectros escalares	
Coherencia	Admitancia
$C^2(\sigma_j) = \frac{ S_{xy}(\sigma_j) ^2}{S_{xx}(\sigma_j)S_{yy}(\sigma_j)} \quad (11)$	$H(\sigma_j) = \frac{S_{xy}(\sigma_j)}{ S_{xx}(\sigma_j) } \quad (12)$
Espectros vectoriales	
Coherencia	Admitancia
$C^2(\sigma_j) = \frac{ S_{xy}(\sigma_j) ^2}{S_{xx}(-\sigma_j)S_{yy}(\sigma_j)} \quad (13)$	$H(\sigma_j) = \frac{S_{xy}(\sigma_j)}{S_{xx}(-\sigma_j)} \quad (14)$

Modificado de Candela-Pérez (1982), pág 194.

La coherencia (tabla III) tiene valores entre 0 y 1, y su nivel de confianza del

95 % con probabilidad $\alpha = 1 - 0.95$ y con gl grados de libertad (Emery y Thomson, 1998; Thompson, 1979) esta dado mediante

$$\begin{aligned} C_{95\%}^2 &= 1 - \alpha^{\frac{2}{gl-2}} \\ &= 1 - 0,05^{\frac{2}{gl-2}} \end{aligned} \quad (15)$$

Se utilizan en este trabajo los niveles de confianza propuestos por Thompson (1979), dichos niveles de coherencia son consistentes con los expresados en (15).

La correlación total entre las series vectoriales se calcula a partir de la relación:

$$r_{xy}(\sigma_j) = \frac{|S_{xy}(\sigma_j) + S_{xy}(-\sigma_j)|}{[(S_x(\sigma_j) + S_x(-\sigma_j))(S_y(\sigma_j) + S_y(-\sigma_j))]^{1/2}} \quad (16)$$

donde: r está definida para $\sigma_j > 0$ con valores entre 0 y 1.

La admitancia (tabla III) indica la razón de cambio en la amplitud de la señal de una serie con respecto a otra en función de la frecuencia.

III.4. Funciones empíricas ortogonales

La técnica de funciones empíricas ortogonales (FEOs) permite sintetizar una serie de observaciones (escalares o vectoriales) en modos u ondas estacionarias que son ortogonales entre sí. Existe toda una variedad de técnicas para obtener las FEOs y la aplicación particular depende de los fenómenos físicos que se busquen aislar. El presente trabajo utiliza FEOs con base en la Descomposición en Valores Singulares o SVD (Hartmann, 2001). Dada una matriz \mathbf{A} de N series de anomalías de corrientes ($\xi_{u(t)}, \xi_{v(t)}$) organizadas en pares ordenados (*conjuntos*) para un mismo punto de observación (renglones) y realizaciones temporales (columnas). Las FEOs calculadas a partir de matrices ordenadas en la forma de (17) se conocen como *Funciones Empíricas Ortogonales Conjuntas*.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \xi_{u(t)11} & \xi_{u(t)12} & \xi_{u(t)13} & \cdots & \xi_{u(t)1t} \\ \xi_{v(t)11} & \xi_{v(t)12} & \xi_{v(t)13} & \cdots & \xi_{v(t)1t} \\ \xi_{u(t)21} & \xi_{u(t)22} & \xi_{u(t)23} & \cdots & \xi_{u(t)2t} \\ \xi_{v(t)21} & \xi_{v(t)22} & \xi_{v(t)23} & \cdots & \xi_{v(t)2t} \\ \xi_{u(t)31} & \xi_{u(t)32} & \xi_{u(t)33} & \cdots & \xi_{u(t)3t} \\ \xi_{v(t)31} & \xi_{v(t)32} & \xi_{v(t)33} & \cdots & \xi_{v(t)3t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{u(t)N1} & \xi_{u(t)N2} & \xi_{u(t)N3} & \cdots & \xi_{u(t)Nt} \\ \xi_{v(t)N1} & \xi_{v(t)N2} & \xi_{v(t)N3} & \cdots & \xi_{v(t)Nt} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Se aplica a (17) la técnica de descomposición en valores singulares o SVD

$$[USV] = SVD(A/\sqrt{N}) \quad (18)$$

Se extrae mediante (18) los patrones espaciales (autovectores o modos). Dichos modos se encuentran contenidos en el espacio columna de $U(2Nx2N)$, cada modo presenta su propia variación temporal la cual está dentro de $V(txt)$; los elementos de la diagonal principal de $S(2Nxt)$ contienen los valores singulares y su equivalencia con los autovalores es $\lambda = S^2$. Los modos se encuentran ordenados del más importante (explica el mayor porcentaje de la varianza) al menos importante. La matriz (17) se puede recuperar al calcular $A = USV^T$. Las FEOs se extraen de las matrices (U,S,V) de la siguiente manera:

$$F_1 = U_{N,t=1} S_{N=1,t=1} \quad y \quad CP_{F_1} = V_{N,t=1} \sqrt{N} \quad (19)$$

donde: F_1 es el modo más energético y representa una estructura que se comporta dependiendo de la variación temporal de las componentes principales (CP).

Las FEOs conjuntas capturan las variaciones en la componente zonal y meridional en un solo modo y se explica por solamente una varianza. El trabajo consiste en darle un significado físico a las estructuras aisladas en cada modo. Se calcularon las FEOS a los datos de corrientes residuales del análisis armónico, tanto para el caso general como para ciertos períodos en los que se presentaron condiciones de viento Santa Ana.

IV. Resultados

Primero se presentan las series temporales de viento para Rosarito y San Diego, con el objeto de mostrar las diferentes escalas de forzamiento atmosférico. A continuación se comparan las mediciones de las corrientes superficiales obtenidas con los radares de alta frecuencia (RAF) con las mediciones de los perfiladores acústicos (PA). También se analiza el campo medio de corrientes superficiales y las variaciones mensuales que existen en los campos. Posteriormente se describe la contribución de los principales constituyentes de la marea, obtenidos mediante análisis armónico de las corrientes (RAF y PA). Finalmente y como caso de estudio se analiza la influencia de los eventos Santa Ana (marzo, abril y octubre de 2003) en las corrientes superficiales.

IV.1. Velocidad del Viento

La variabilidad de la velocidad del viento en la zona se representa utilizando el método de la elipse de variabilidad (fig. 4). Se muestran eventos aislados (como la condición Santa Ana) que modifican el promedio, que decae a 1 m/s con dirección del NW.

La tabla IV contiene información de la estadística de las series de viento, así como de algunos parámetros atmosféricos. Se muestran las condiciones medias y extremas para el período de mayo a octubre de 2003, los máximos en la rapidez del viento ocurrieron durante las condiciones de Santa Ana. La estadística del viento en los periodos de Santa Ana se trata más adelante (tabla VI).

El análisis espectral de las series de viento (San Diego y Rosarito) se realizó mediante la técnica de los espectros rotacionales y los espectros cruzados. Se obtuvo la coherencia y la función de transferencia entre las series de velocidad del viento (Fig. 5). Las bandas de mayor concentración de energía del viento se muestran en la figura

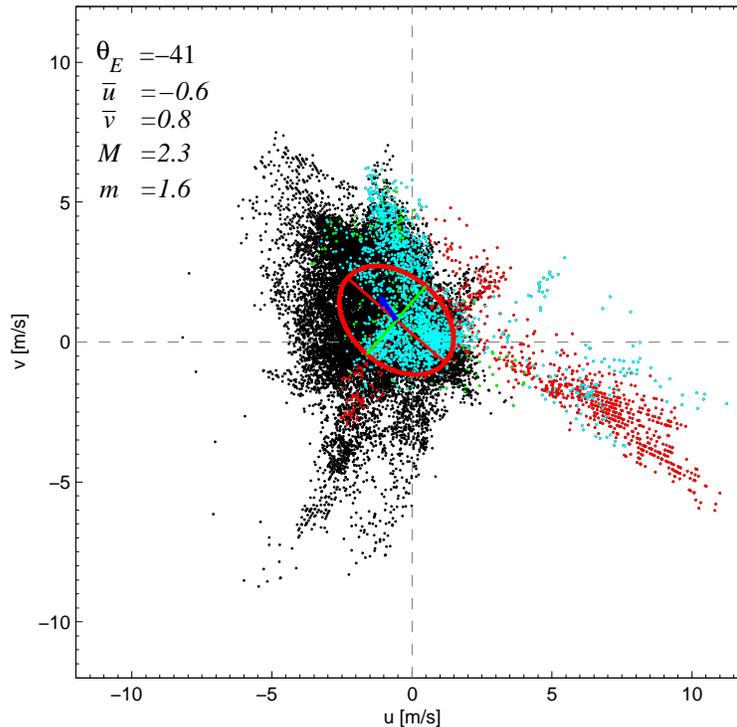


Figura 4: Elipse componente para los datos de viento de la estación Rosarito. Período del 7 de marzo al 25 de mayo y del 17 al 31 de octubre de 2003. Los datos correspondientes a condición Santa Ana se muestran en color: rojo (28 al 31 de marzo), verde (abril 8) y azul (21 al 28 de octubre). El vector medio es (\bar{u}, \bar{v}) , los semi-ejes son M y m , y θ_E el ángulo de inclinación de la elipse respecto al cero matemático. El sentido de los vectores de viento es referido a la convención meteorológica.

Tabla IV: Estadística de parámetros atmosféricos medidos.

\bar{x} es la media, σ la desviación estándar y Max el máximo.

	Ráfagas					
	\bar{x}	σ	Max	\bar{x}	σ	Max
Rosarito						
Rapidez del viento [m/s]	1.0	2.8	13.4	1.2	4.7	20.9
Dirección del viento [°N]	324	46	119	23.34	41.5	179
Presión atmosférica [mb]	1013	2	1022	–	–	–
Temperatura del aire [°C]	15.2	3.2	31.0	15.3	3.2	31.1
HR [%]	75	18	98	76	18	98

5, lo que permite establecer que el viento en la zona se caracteriza por la influencia de sistemas de diferentes escalas temporales: sinóptico (~ 4 a 7 días), un sistema diurno (24 hr) y uno semidiurno (12 hr). El viento, durante el período de muestreo fue más

intenso (25 %) en la estación de Rosarito que en la estación de San Diego.

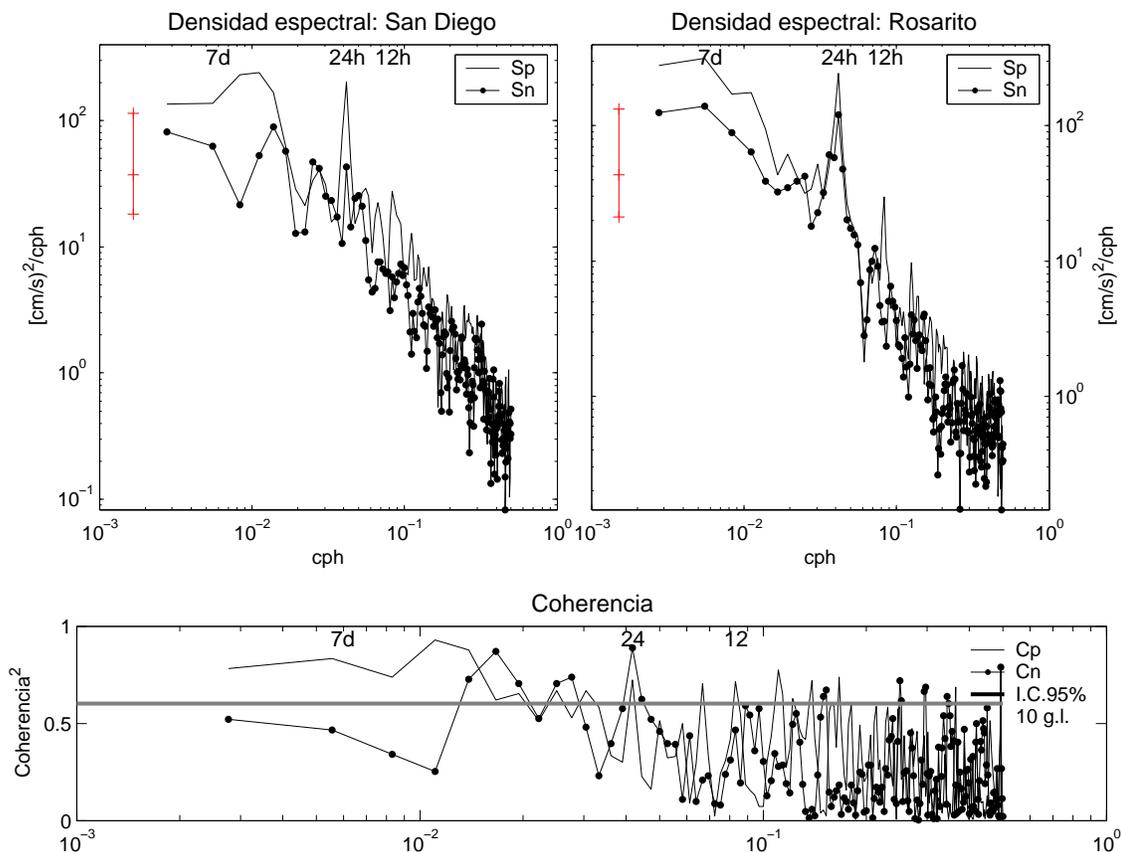


Figura 5: Espectros rotacionales de las series de viento, marzo–mayo de 2003. Las bandas de mayor concentración de energía son la sinóptica, diurna y semidiurna. Se utilizó una ventana Hanning de 15 días para suavizar el espectro. Sp significa rotación ciclónica (+) y Sn se refiere a rotación anticiclónica (-). Cp y Cn representan la coherencia cuadrada para los Sp y Sn respectivamente.

La influencia de vientos del norte es caracterizada por movimientos ciclónicos, (Sp, ver Fig. 5), en tanto que la porción negativa (Sn) muestra la influencia de vientos provenientes del sur, como es el caso de paso de tormentas, lo que origina que el viento presente vorticidad negativa o anticiclónica.

La condición Santa Ana, puesto que es un evento aislado, no se observa en los espectros (se analiza en la sección IV.8).

Debido a que en el transcurso del año es de esperarse que la intensidad de los

vientos cambie, se incluye la figura 6 con el objeto de establecer la variabilidad de los vientos locales a escalas diurnas, es decir, establecer el viento típico de cada mes. Los datos (Fig. 6) fueron suavizados y llevados a datos horarios a partir de mediciones cada 5 minutos dentro del un período de muestreo que comprende de junio de 1998 a abril de 2001. Se aprecia un mínimo en la magnitud del viento a lo largo de las horas nocturnas, con dirección que varía entre el este (E) y noreste (NE), en tanto que en el día se dan los máximos con direcciones de oeste (W) al noroeste (NW), estos dos sistemas constituyen la brisa nocturna y diurna respectivamente. Además se muestran variaciones en la magnitud de la brisa diurna a lo largo de los días típicos de cada mes. El período de marzo a junio es el que presenta la intensificación de los vientos asociados con la brisa.

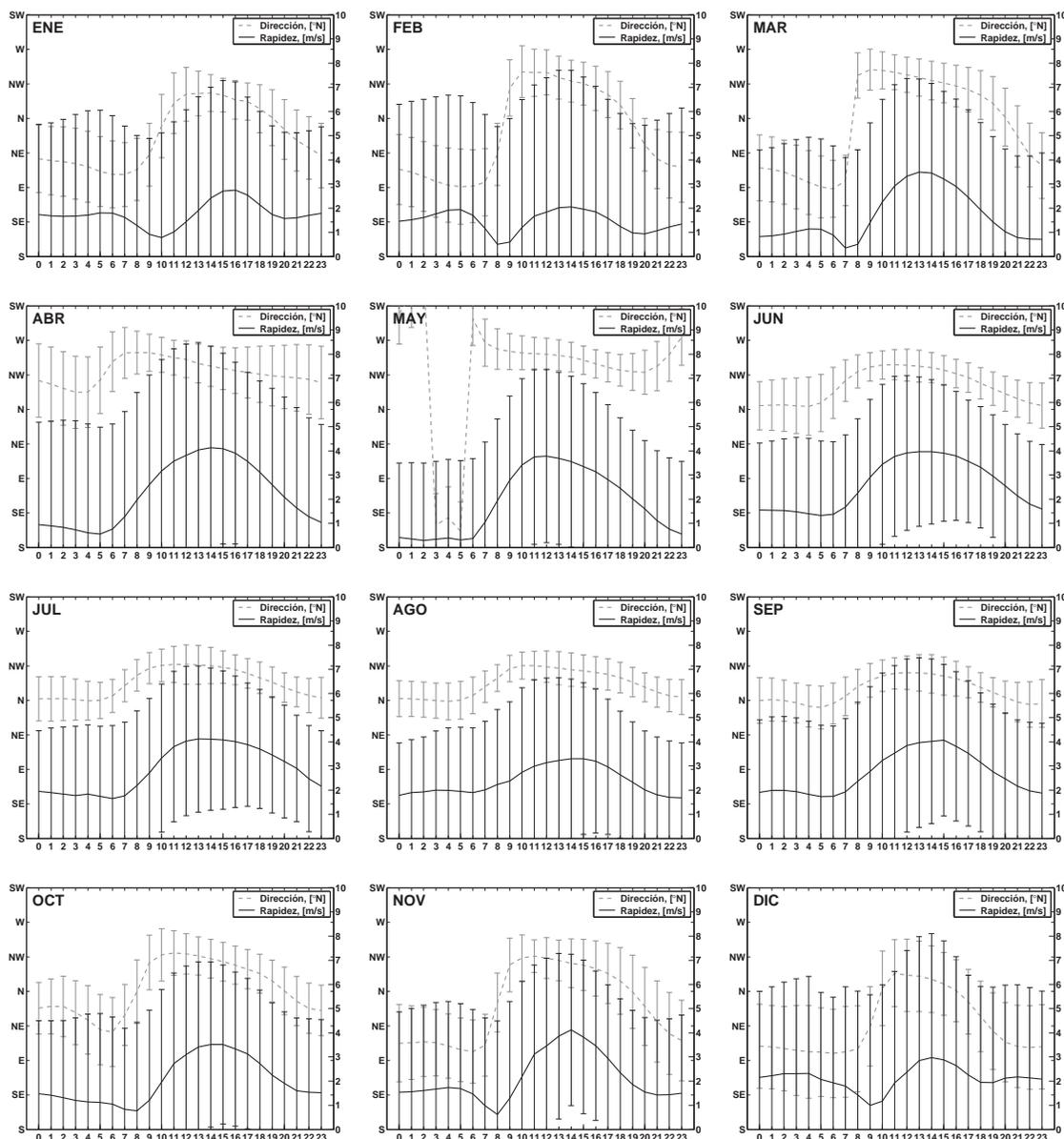
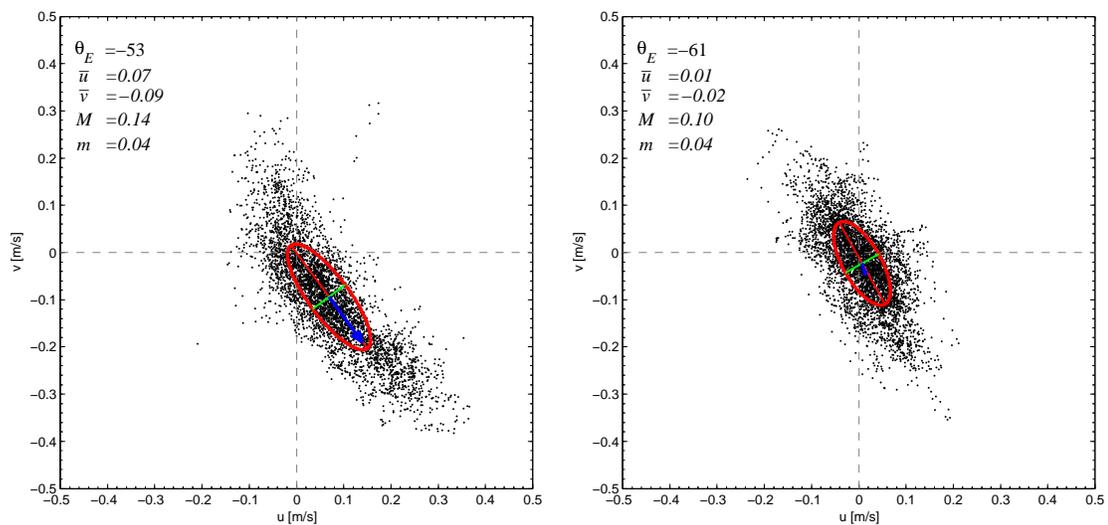


Figura 6: Variación diurna del viento típica de cada mes. Las mediciones (cada 5 minutos) fueron suavizadas con un filtro horario y estandarizadas a series horarias. El período de mediciones comprende los años de 1998 a 2001, los periodos donde no se tiene información fueron reemplazados por la media temporal. El eje horizontal representa las horas a lo largo del día y el eje vertical de la izquierda (derecha) establece la dirección (rapidez). Se aprecia la influencia estacional en la rapidez del viento.

IV.2. Corrientes medidas con perfiladores acústicos

Se calcularon las elipses de variabilidad de los datos de los PA (Fig. 7). El período de mediciones fue del 28 de diciembre de 2002 al 29 de marzo (02 de abril) para el PA 687 (PA 691). La celda que se mantuvo más superficial fue referida a 4 m por debajo de la superficie (Fig. 7). Finalmente se muestran los resultados del análisis armónico (AA) realizado a los datos de corrientes de los PA.



(a) PA 687. Variabilidad de los datos a ~ -4 m (b) PA 691. Variabilidad de los datos a ~ -4 m

Figura 7: Elipse de variabilidad de las velocidades superficiales de los dos perfiladores acústicos instalados. La profundidad mencionada es la profundidad promedio a la cual se mantuvieron las celdas durante el período de mediciones. La celda más superficial se mantuvo a 4 m por debajo de la superficie.

La contribución de la marea en la circulación superficial se puede entender a través del AA, el cual explica entre el 17% (superficie) y 28% (fondo) de la varianza total. La figura (8) muestran la estructura vertical de las componentes más energéticas (M_2 , S_2 , K_1 y O_1) de la marea barotrópica y que son resueltas por la longitud de las series (tabla II).

Se muestra en la figura 8 la estructura vertical de las componentes de marea (M_2 , S_2 , K_1 y O_1). La componente semidiurna M_2 es afectada por la presencia de la isla (Pa

687) respecto a la señal cercana a Rosarito (PA 691), esto se aprecia ya que el semi eje menor muestra un cambio en la dirección de rotación, pasa de ser rotación ciclónica (PA 691) a rotación anticiclónica (PA687). La componente S_2 es estable en los dos sitios. La componente K_1 presenta rotación anticiclónica (PA 691), mientras que en la Isla es ciclónica en superficie y anticiclónico de media agua hacia el fondo. Para S_2 y O_1 , los valores en ambos semi ejes son cercanos a cero. El error en la estimación de los semi ejes en general es menor a 1 cm/s y cae dentro del rango de error del instrumento.

Tabla V: Parámetros de las componentes de marea diurnas y semidiurnas obtenidos mediante datos de nivel del mar. Localidad Ensenada, B. C. Se compara con las mediciones de los PA.

Componente	Frecuencia	Amplitud	Fase	Fase	Fase
	[cph]	[cm]	CICESE	PA 691	PA 687
O_1	0.03873065	20.74	190.57	83±22	64±44
K_1	0.04178075	32.23	206.02	155±17	102±46
M_2	0.08051140	48.72	136.93	135±10	166±10
S_2	0.08333333	20.75	132.77	172±21	180±17

Fuente: Predicción de mareas en México, CICESE, J. González.

Respecto a la fase de las componentes de marea se observó que la componente M_2 concuerda con las estimaciones de la marea utilizando datos de nivel del mar (Tabla V). Sin embargo, el resto de las componentes no concuerda, por ejemplo K_1 (Fig. 8(c)) presenta diferencias en la fase de alrededor de 5 horas (superficie) a 11 horas (fondo) para el PA 691 en tanto que para el PA 687 las diferencias son mayores: 12 horas (superficie) a 14 horas (fondo).

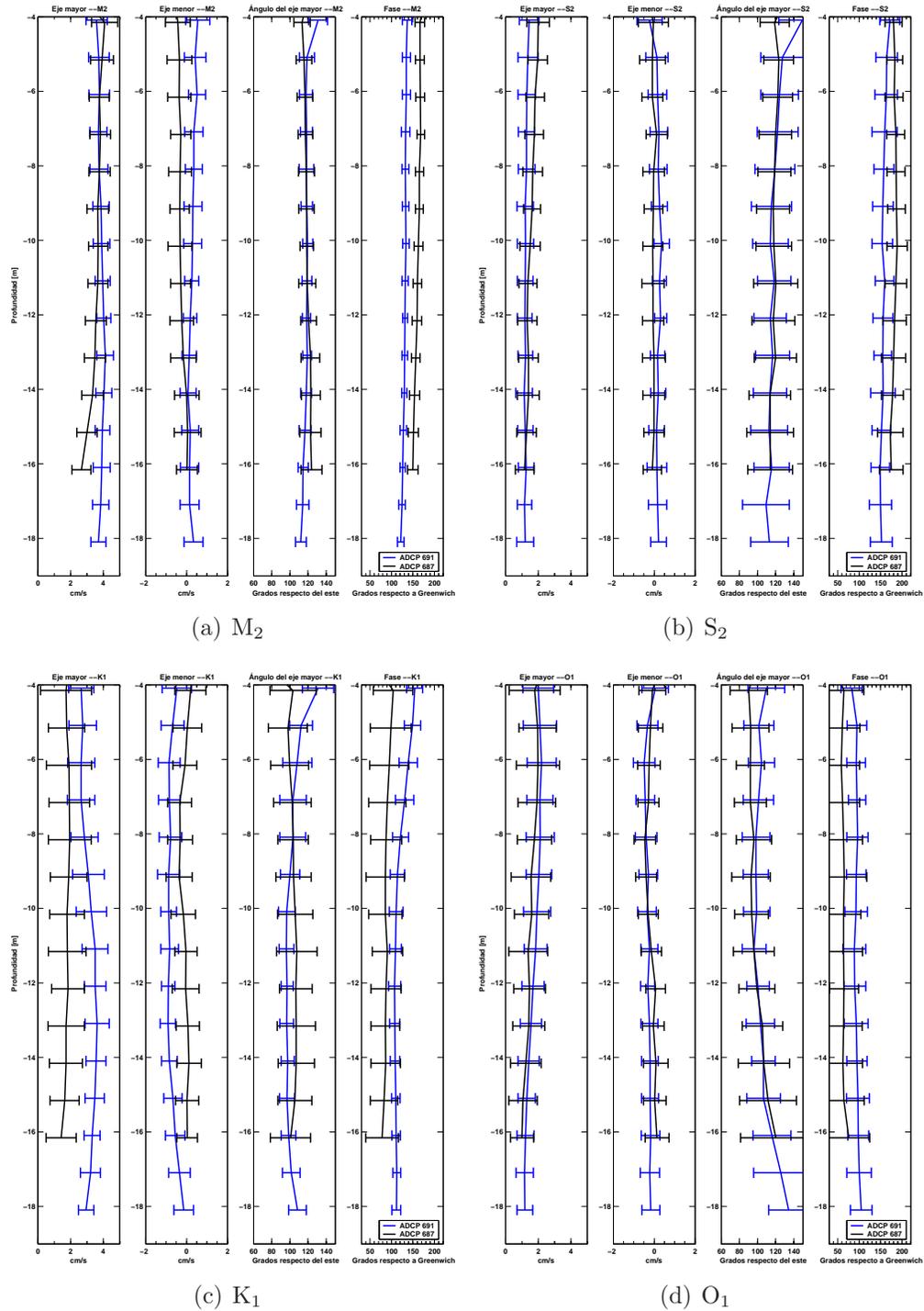


Figura 8: Componentes de marea diurna y semidiurna para los datos de corrientes de los PA 687 y 691. El PA 687 se instaló en la zona de las islas, en tanto que el PA 691 se instaló frente a Rosarito. Se observa una estructura barotrópica en los semi-ejes mayores.

La estructura vertical de los semi ejes mayores es homogénea (Fig. 8), magnitudes del orden de 4 cm/s para M_2 y K_1 , en tanto para S_2 y O_1 solamente fue del orden de 2 cm/s. La estructura baroclínica el semi eje mayor es menor a 1 cm/s y cae dentro del error del aparato (± 1.5 cm).

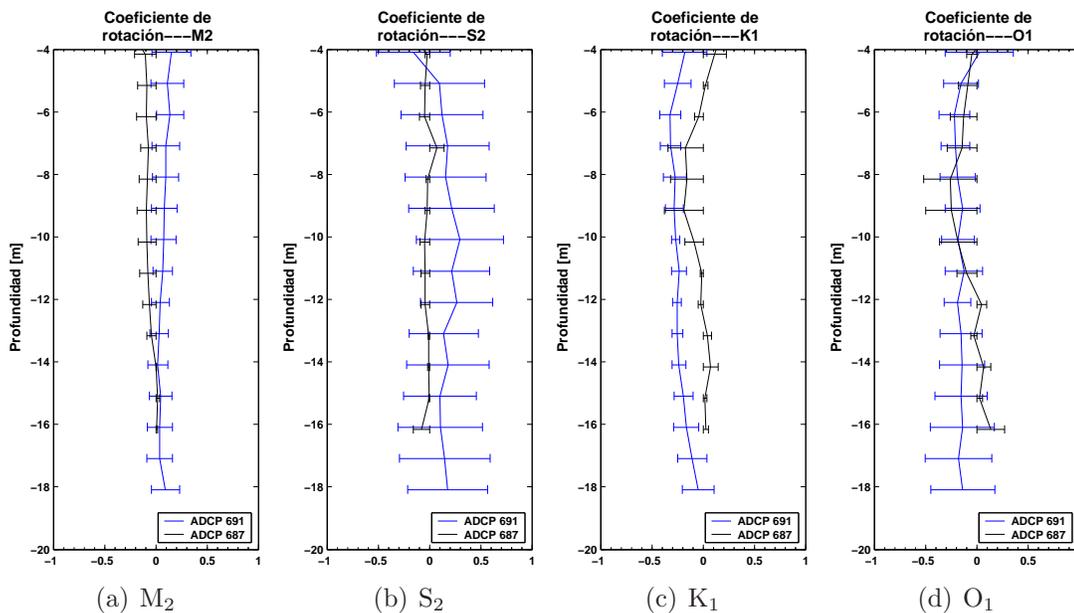


Figura 9: Coeficientes de rotación $\frac{m}{M}$ de las elipses de las componentes diurnas (K_1 y O_1) y semidiurnas (M_2 y S_2).

La figura 9 muestran los coeficientes de rotación ($\frac{m}{M}$) de las componentes analizadas. La componente K_1 fue la más estable, con rotación anticiclónica en las dos estaciones de mediciones.

IV.3. Comparación de las corrientes medidas (PA–RAF)

Se realiza una comparación de las mediciones de corrientes superficiales obtenidas con los RAF y las obtenidas con los PA. Se muestra la elipse de variabilidad (Fig. 10) de las mediciones de los RAF, destaca un a corriente con dirección sur de 10 cm/s.

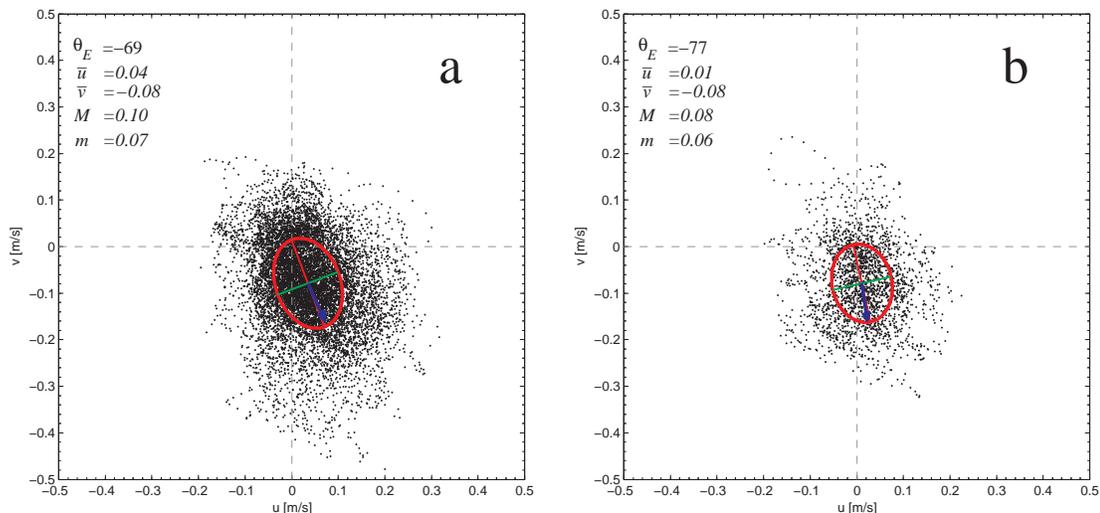


Figura 10: Dispersion de las mediciones del RAF. a) Mediciones del RAF próximas al PA 691, período de muestreo del RAF: septiembre del 2002 a noviembre de 2003; b) similar a (a) pero para el período del PA (28 de diciembre de 2002 al 02 de abril de 2003). La corriente promedio presenta dirección sur.

La figura 11 muestra la posible relación lineal existente entre las mediciones del PA 691 y el radar durante el período de 28 de diciembre de 2002 al 02 de abril de 2004. La correlación es menor en la componente zonal (0.3) de la corriente que en la componente meridional (0.61), posiblemente la poca correlación se deba a que la incertidumbre en las mediciones de los radares no sólo se relacionan al número de muestras promediadas para generar una observación, sino que también existe una contribución geométrica al error (figs. 50 y 51). Esto ocasiona que el error no tenga la misma estructura en la componente zonal que en la componente meridional.

La figura 12 muestra que la máxima correlación entre los datos del RAF y los datos del PA fue de 0.46 con cero horas de desfase temporal y con un ángulo medio entre

los vectores de -13° . Se consideró un desfase de 24 horas para realizar la correlación vectorial de las dos series de mediciones.

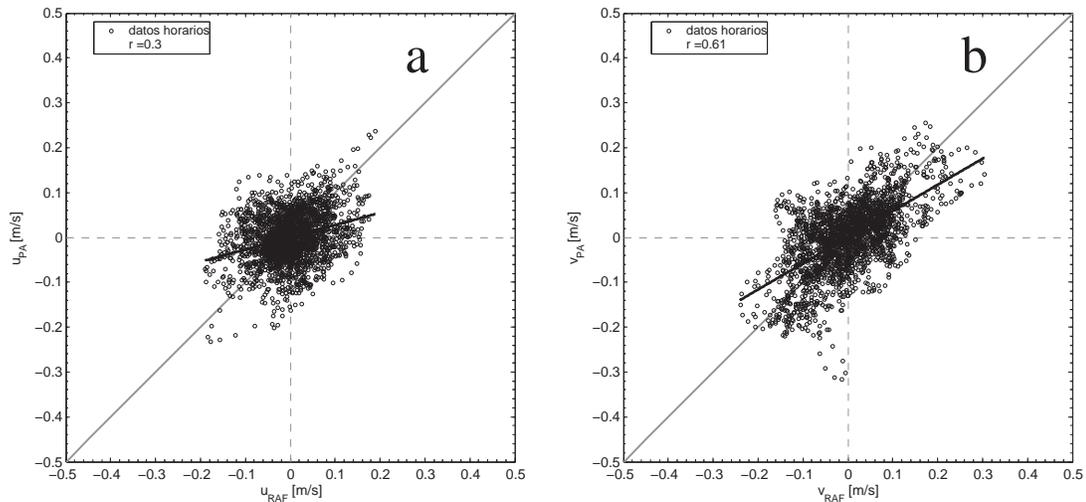


Figura 11: Comparación de datos de corrientes obtenidos con el RAF y el PA 691 dentro del período del 28 de diciembre de 2002 al 02 de abril de 2003. a) Componente zonal de la corriente. b) Componente meridional. Los datos son mediciones horarias, todas las frecuencias mayores a 1/3 cph fueron removidas, para efecto de suavizado.

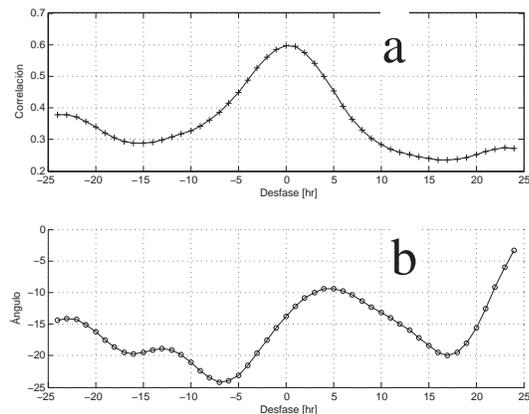


Figura 12: Coeficiente de correlación vectorial. a) correlación con un desfase de ± 24 horas. b) Ángulo medio entre las series del radar y del PA de -13° . Desfase positivo significa que la primer serie (RAF) antecede a la segunda (PA).

IV.4. Campo medio de corrientes superficiales

El campo medio de corrientes (Fig. 13) representa la estructura media del flujo superficial entre septiembre de 2002 y noviembre de 2003. La principal característica es un flujo con dirección al sureste, paralelo a la línea de costa, con rapidez de 12 cm/s y homogéneo. A diferencia de mapas horarios (sección de Santa Ana), no se aprecian giros o estructuras evidentes (convergencias, divergencias).

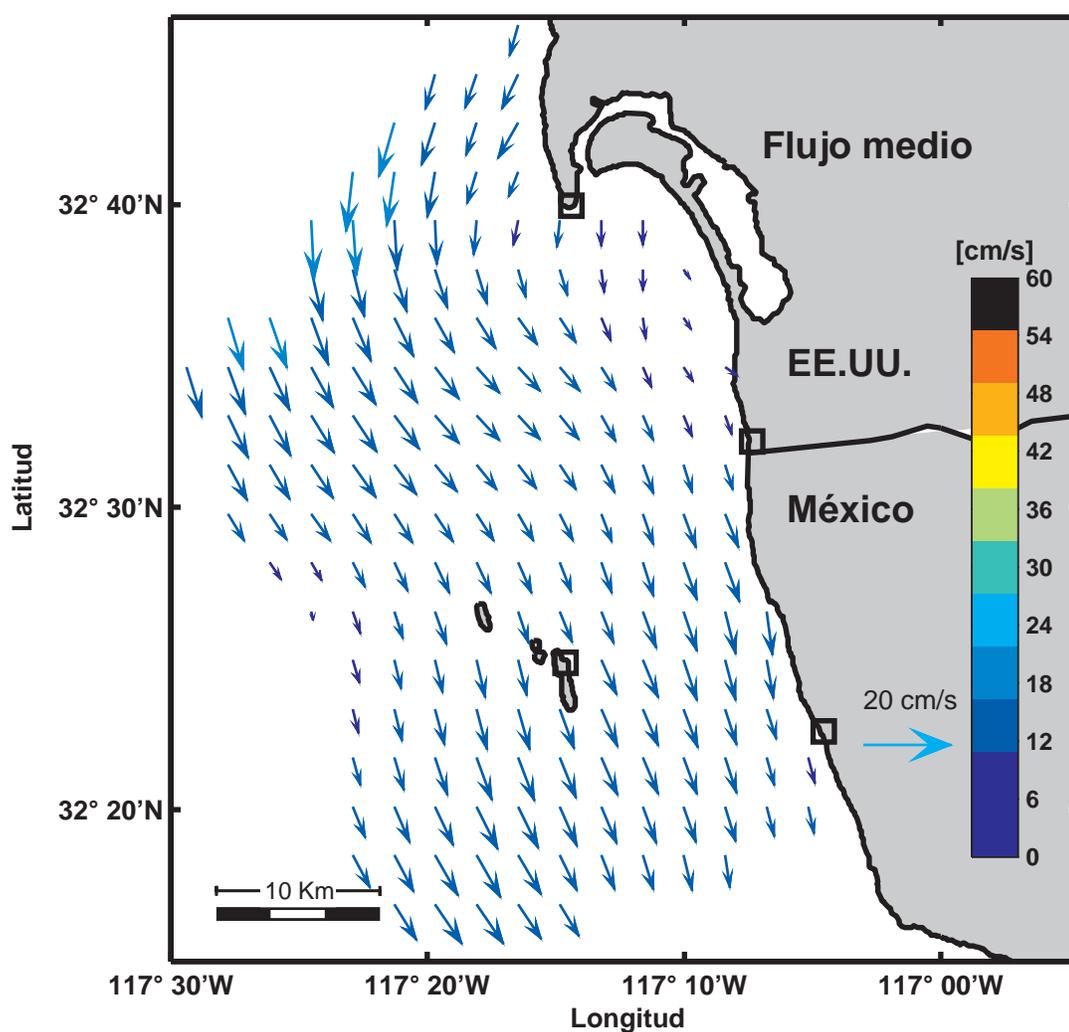


Figura 13: Campo medio de corrientes superficiales. Estructura con dirección sureste y magnitud del orden de 12 cm/s. El campo medio fue calculado en el período de septiembre de 2002 a noviembre de 2003 a partir de datos horarios.

La estructura media de las corrientes superficiales concuerda bastante bien tanto en dirección como en magnitud con los valores de corrientes reportadas para el sistema de corriente de frontera este (Corriente de California, Lynn y Simpson (1987)).

La figura 14 presenta dos tipos de incertezas. La figura 14(a) muestra el promedio de las incertidumbres asociadas a las mediciones de de cada radar. Se observa que la estimación de las corrientes en la zona norte presentan una incertidumbre de hasta 3 cm/s. En tanto que la parte central, el error es menor debido a una mejor cobertura de los radares.

Por otro lado, la figura 14(b) muestra que en promedio el error por geometría es menor en el centro, y es de esperarse ya que se tiene una mayor densidad de datos para estimar una corriente, comparado con los extremos. Las unidades son radianes y representa la desviación estándar de la dirección de los vectores radiales.

En general la estructura geométrica es consistente con las elipses del GDOP, tanto para el caso de dos estaciones de radar sobre la costa (Fig. 50), como para el caso de tres estaciones de radar, dos sobre la costa y una en Islas Coronado (Fig. 51, ver apéndice A, página 74).

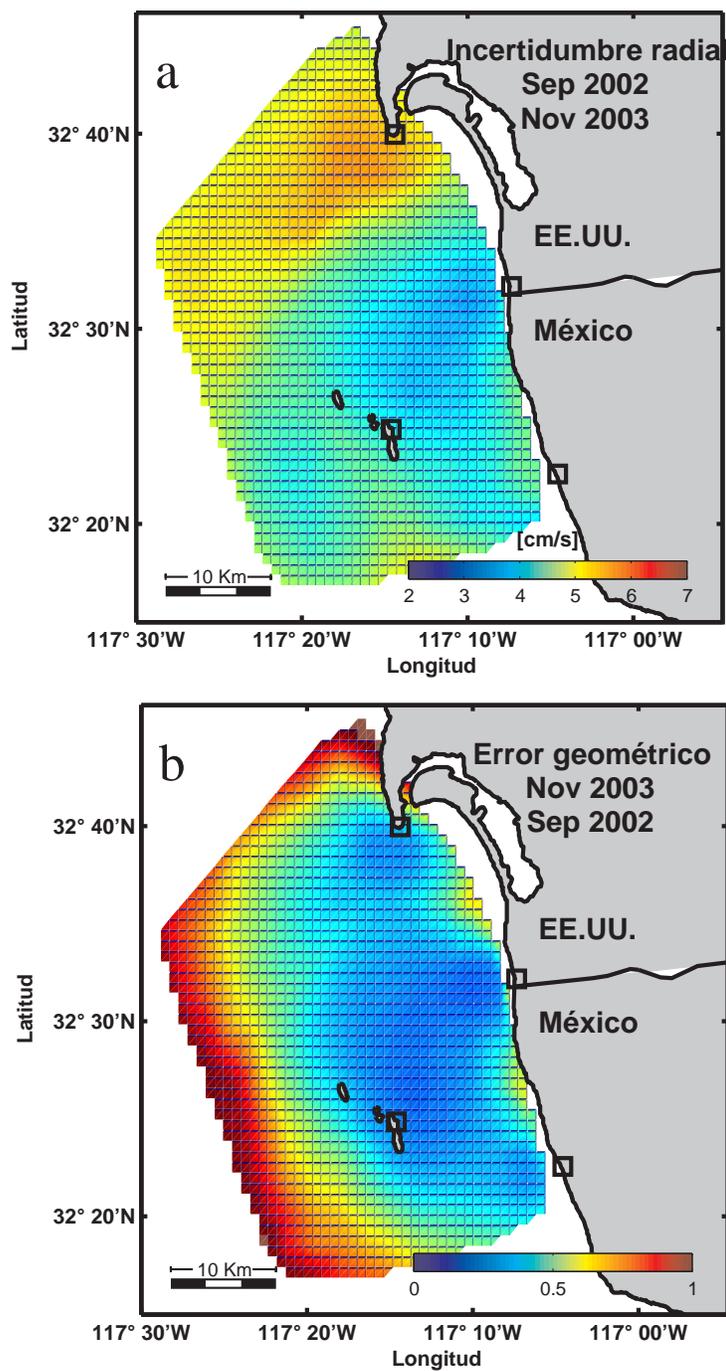


Figura 14: Errores promedio asociados a mediciones de los RAF. a) Incertidumbre en la estimación de los datos radiales, b) Error medio de la geometría de los datos radiales utilizados. El periodo comprende de septiembre de 2002 a noviembre de 2003.

IV.5. Flujo medio mensual de la corrientes superficiales

Se muestra a continuación el promedio mensual de las corrientes superficiales, a partir de septiembre de 2002 hasta noviembre de 2003. Cabe mencionar que en las imágenes se utiliza la máxima resolución que permiten los datos, con una malla de 1 km x 1 km. Lo anterior tiene como objeto de que el lector se familiarice con el movimiento superficial en promedio mes a mes. En general se observó un flujo variable con dirección sur, excepto en noviembre de 2002, cuando la cobertura de los radares fue limitada y originó poca información y por ende el análisis de los datos es deficiente.

Una estructura sobresaliente en los mapas mensuales es un giro que permaneció en las corrientes superficiales durante febrero de 2003, al norte de las Islas Coronado. Se observó durante los meses (marzo, abril y octubre de 2003) de eventos Santa Ana un debilitamiento del flujo medio cercano a la costa (marzo de 2003), aunque en abril no se observó una diferencia notable respecto al promedio superficial. Sin embargo, para el mes de octubre de 2003 se encontró que las corrientes promedio son menores a 15 cm/s, debilitamiento ocasionado tanto por efectos de los vientos Santa Ana como de los eventos de corrientes con dirección norte.

En agosto y septiembre de 2003 se observó una estructura en la corriente con dirección suroeste del orden de 25 cm/s, entre los sitios de Imperial Beach y Rosarito, época en la que se presentaron lluvias intensas. Por otro lado se observó una intensificación de las corrientes superficiales en los meses de marzo, abril y mayo de 2003, justo cuando se intensifica el viento (Fig 6).

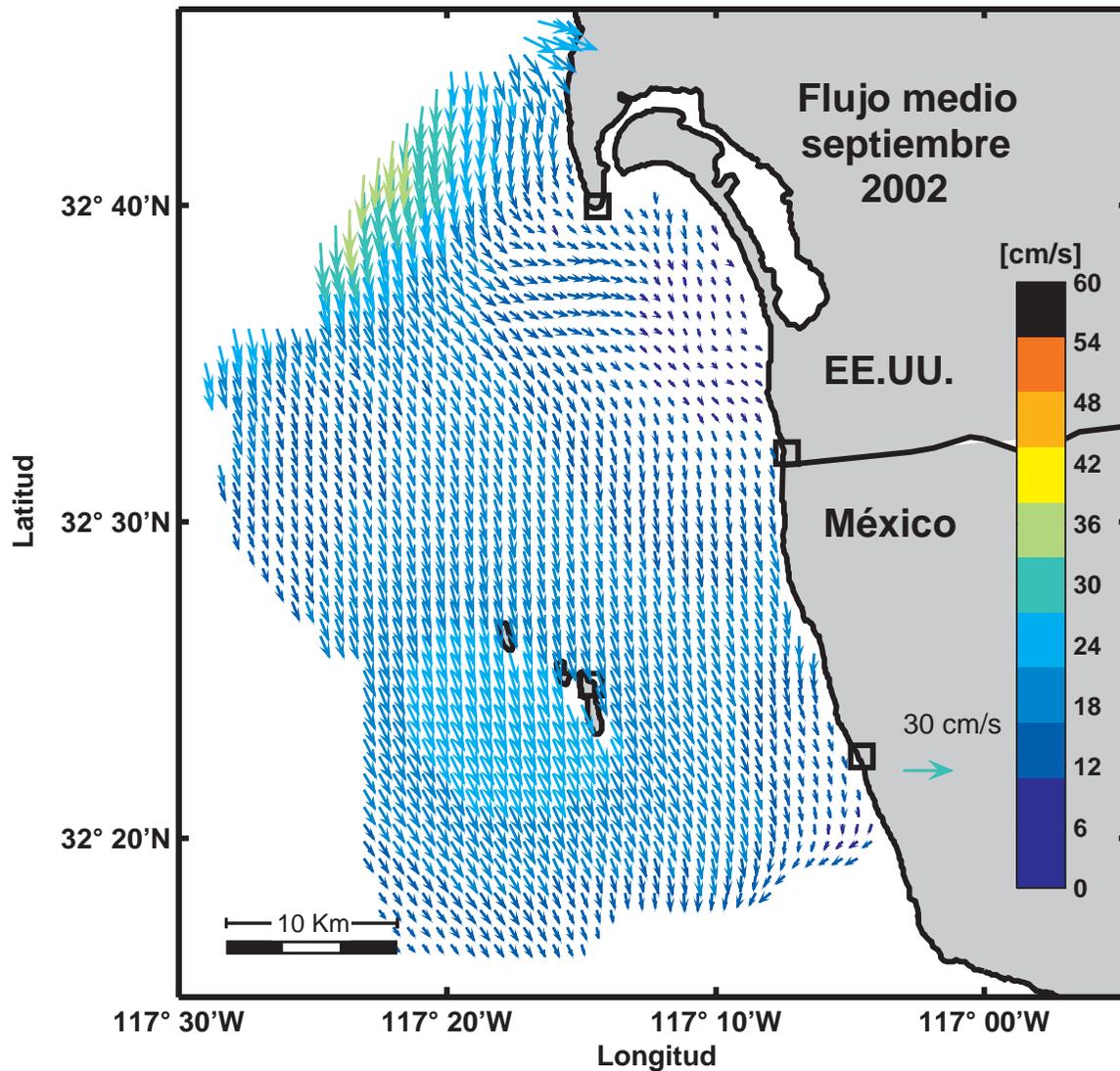


Figura 15: Campo medio de la corriente superficial para el mes de septiembre de 2002. El flujo presenta dirección sur y tiende a cruzar entre las islas y la costa. Se observa intensificación del flujo al sur oeste de las Islas Coronado.

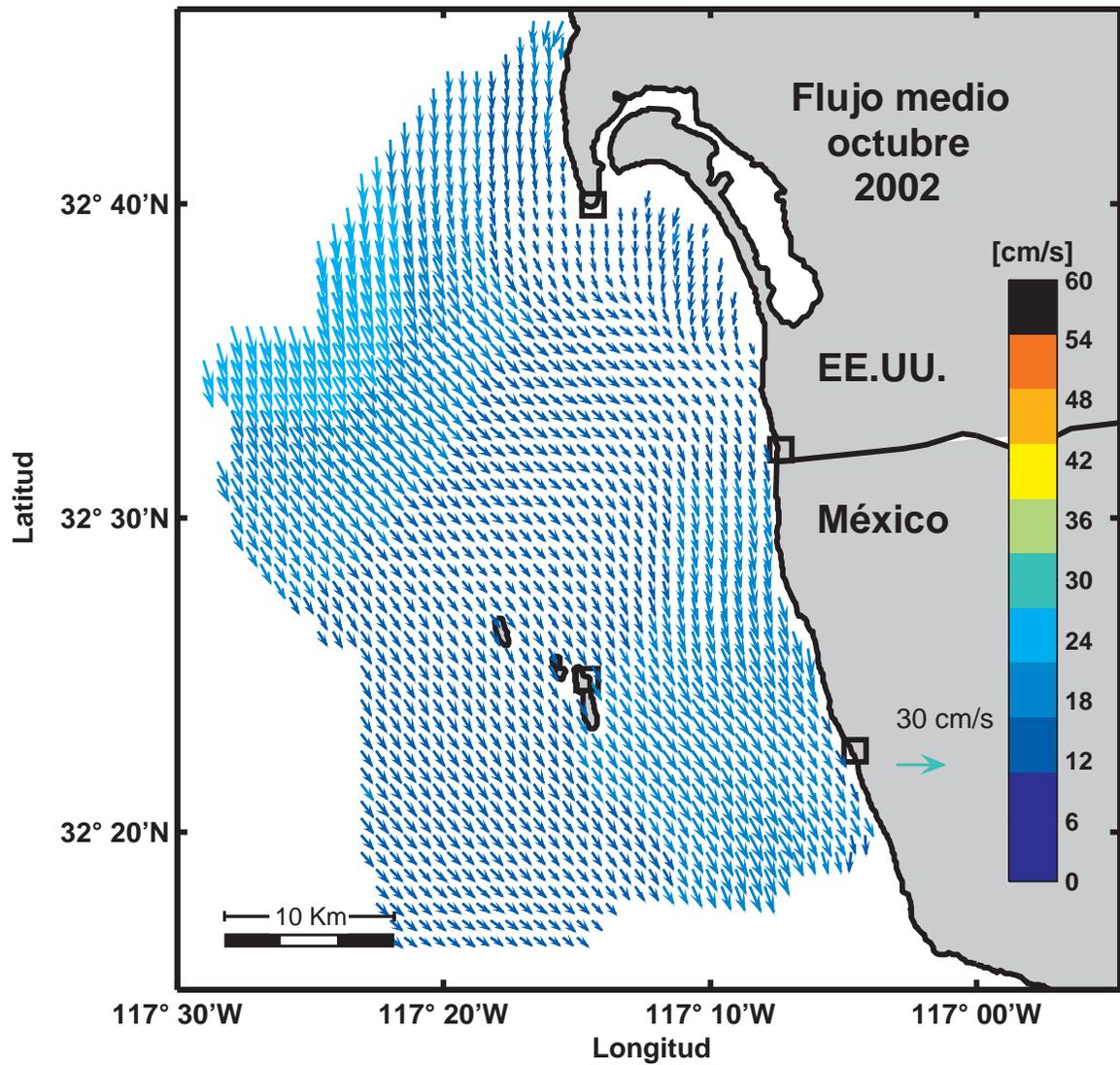


Figura 16: Similar a la fig. 15, pero para el mes de octubre de 2002.

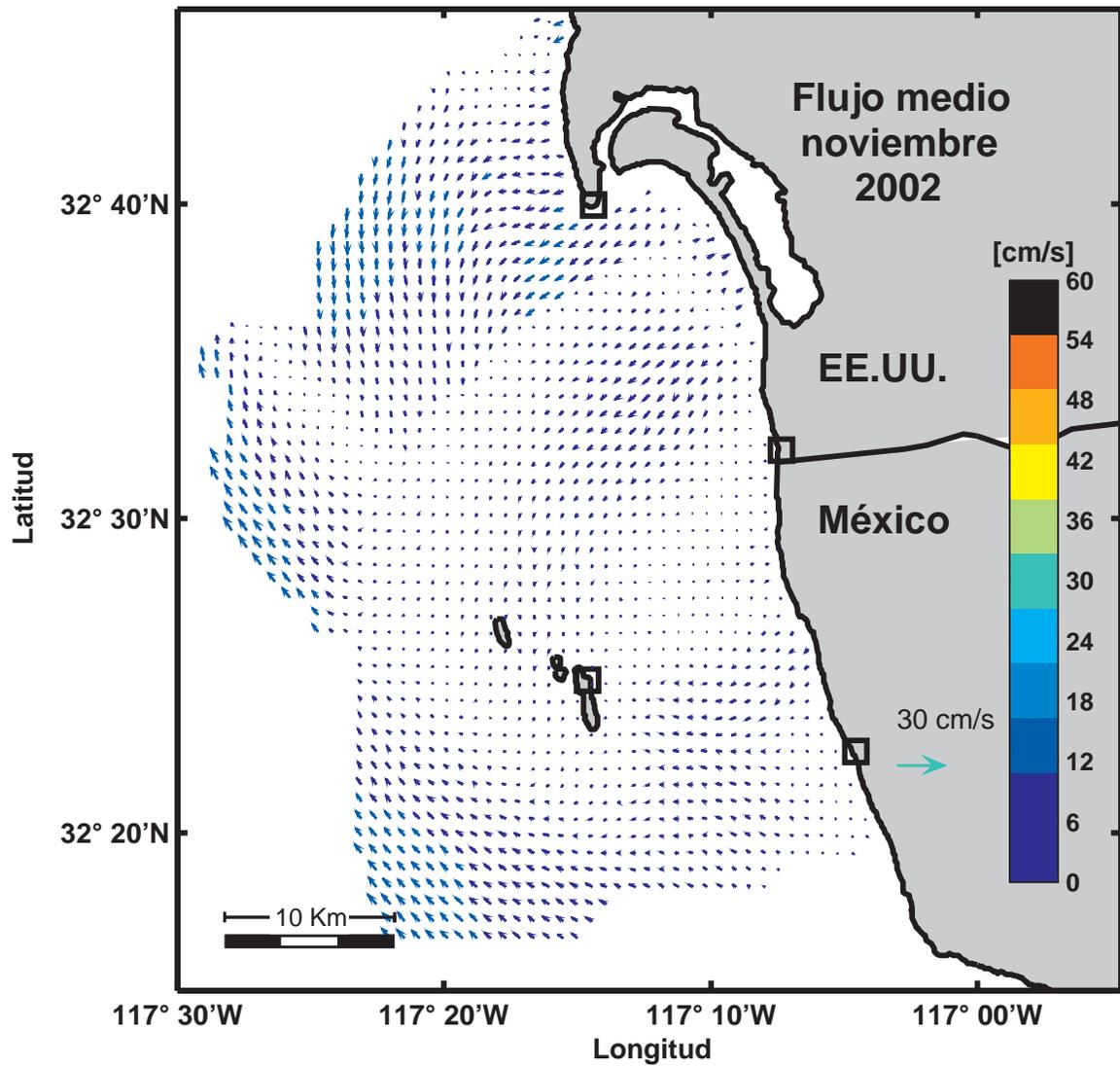


Figura 17: Similar a la fig. 15, pero para el mes de noviembre de 2002. Se refleja la poca cantidad de datos para realizar el promedio.

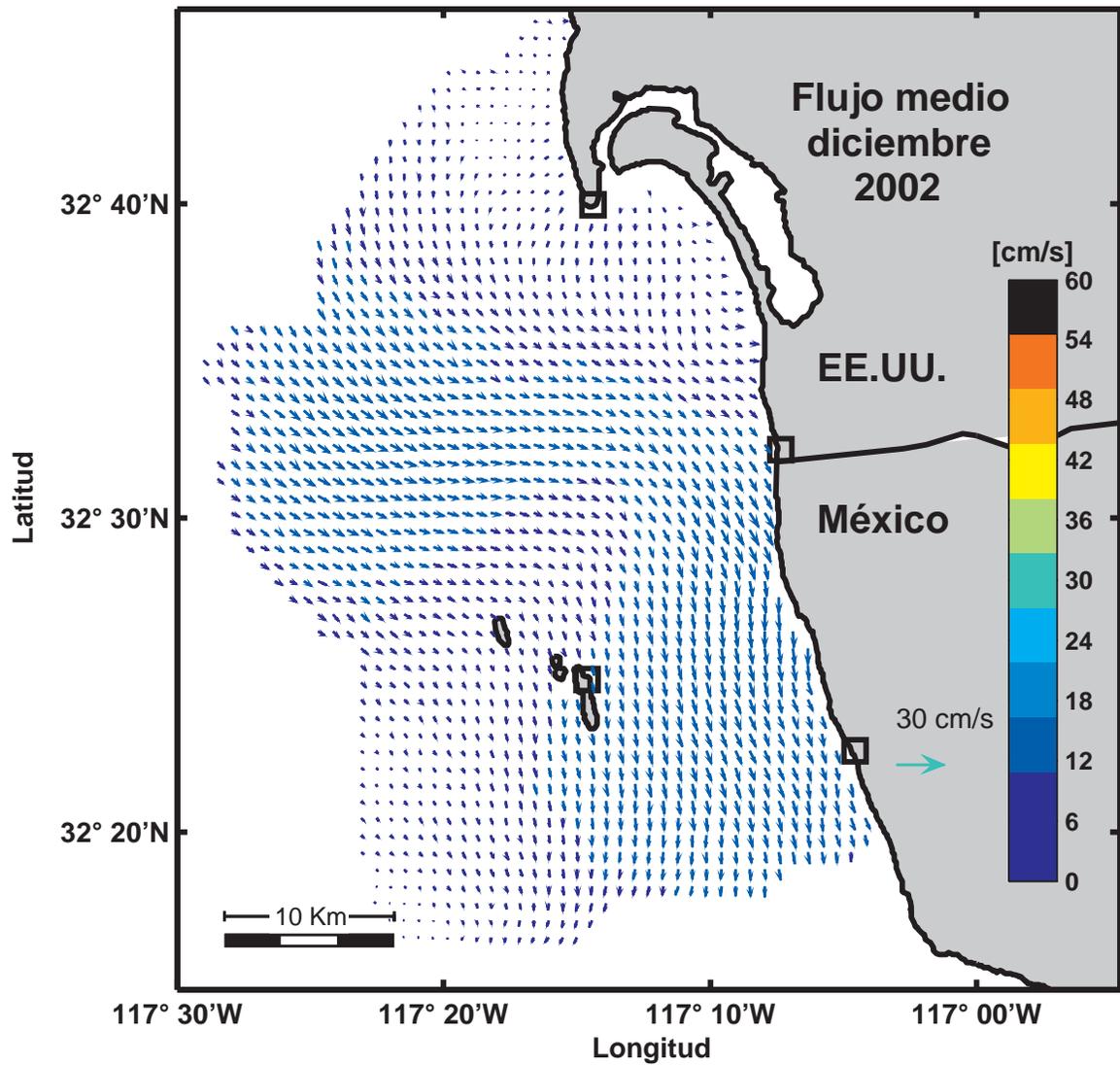


Figura 18: Similar a la fig. 15, pero para el mes de diciembre de 2002. Se caracteriza por un meandro que llega perpendicular a la costa y al alinearse a la línea de costa fluye al sur.

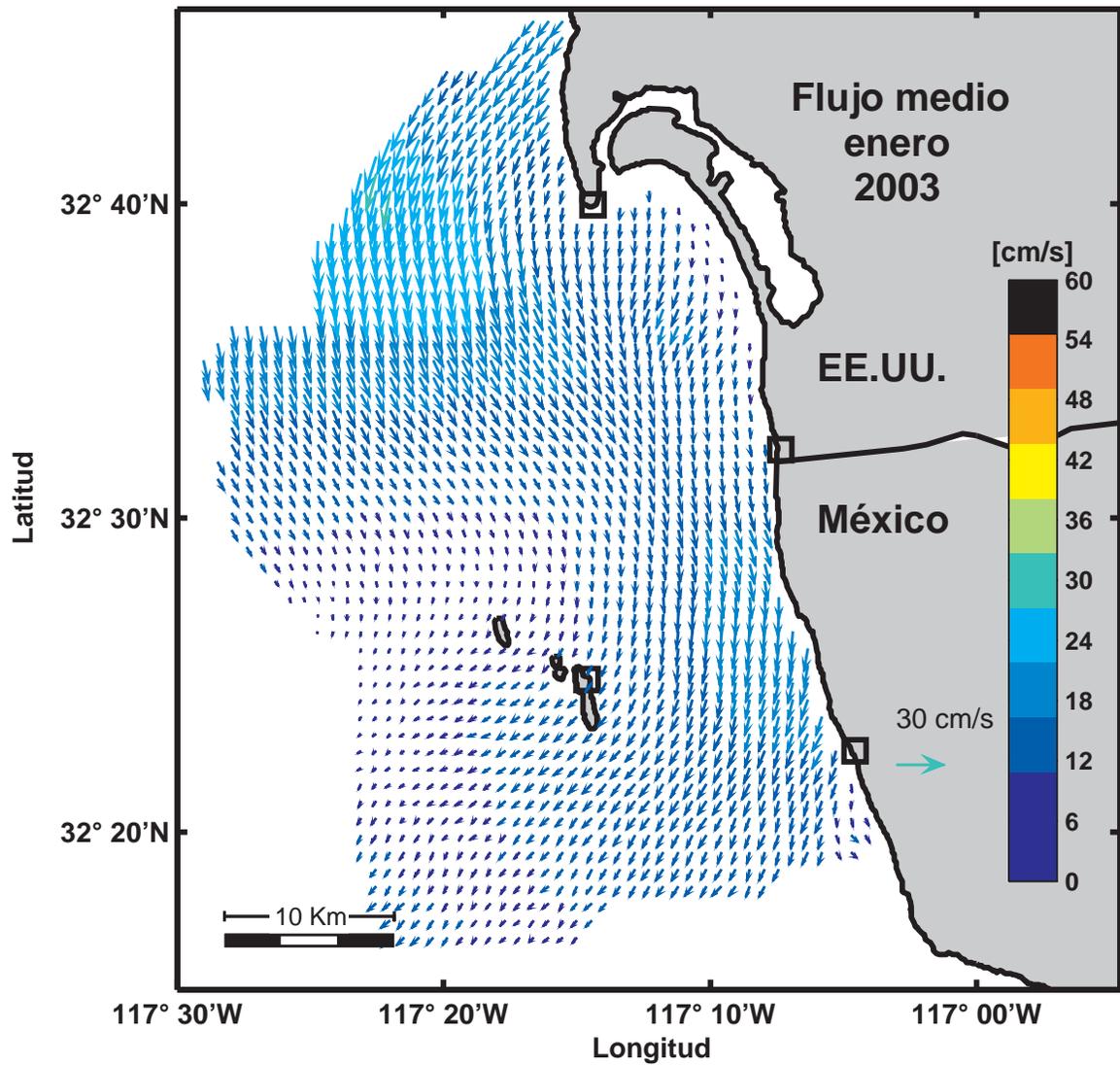


Figura 19: Similar a la fig. 15, pero para el mes de enero de 2003.

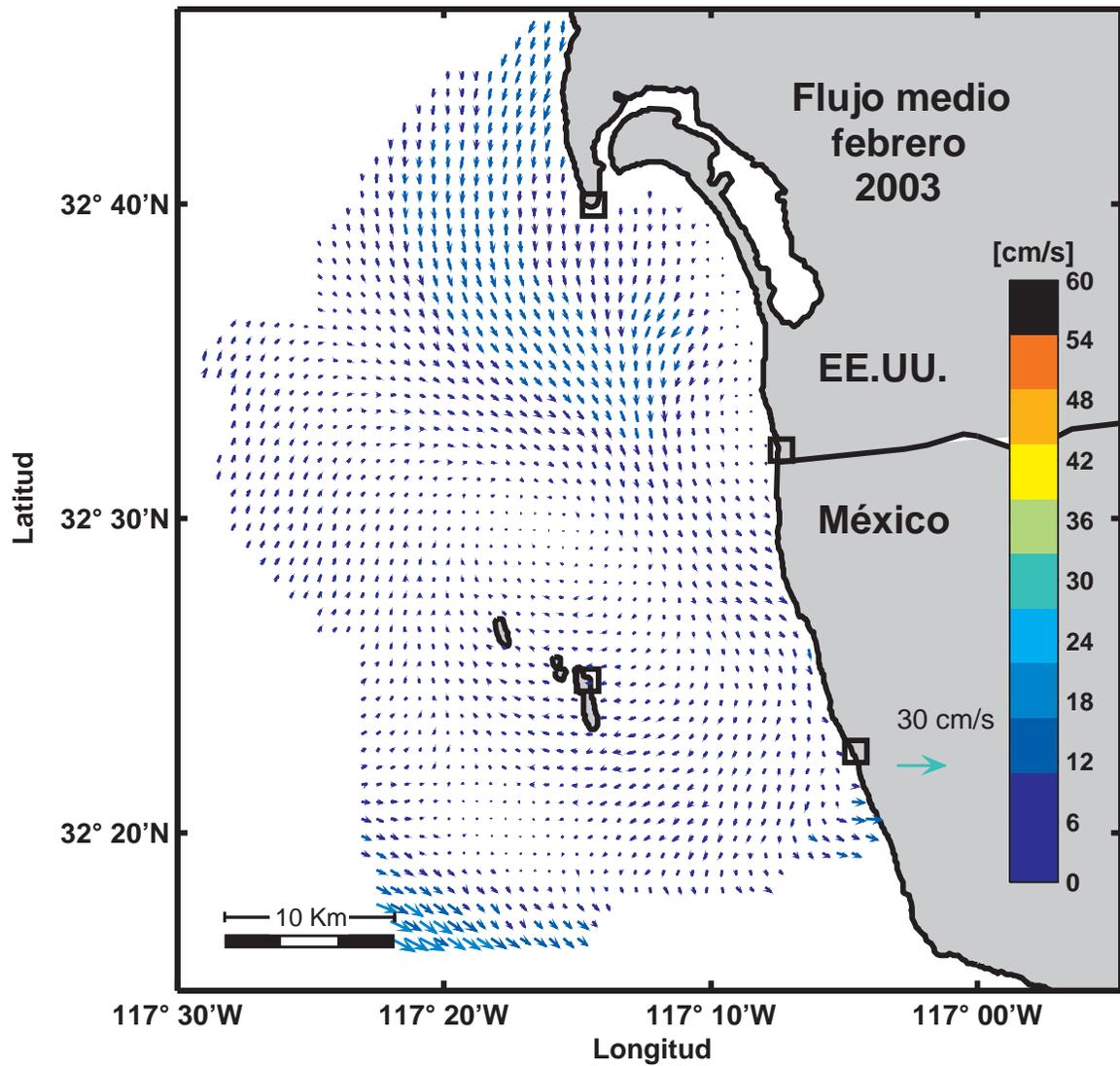


Figura 20: Similar a la fig. 15, pero para el mes de febrero de 2003.

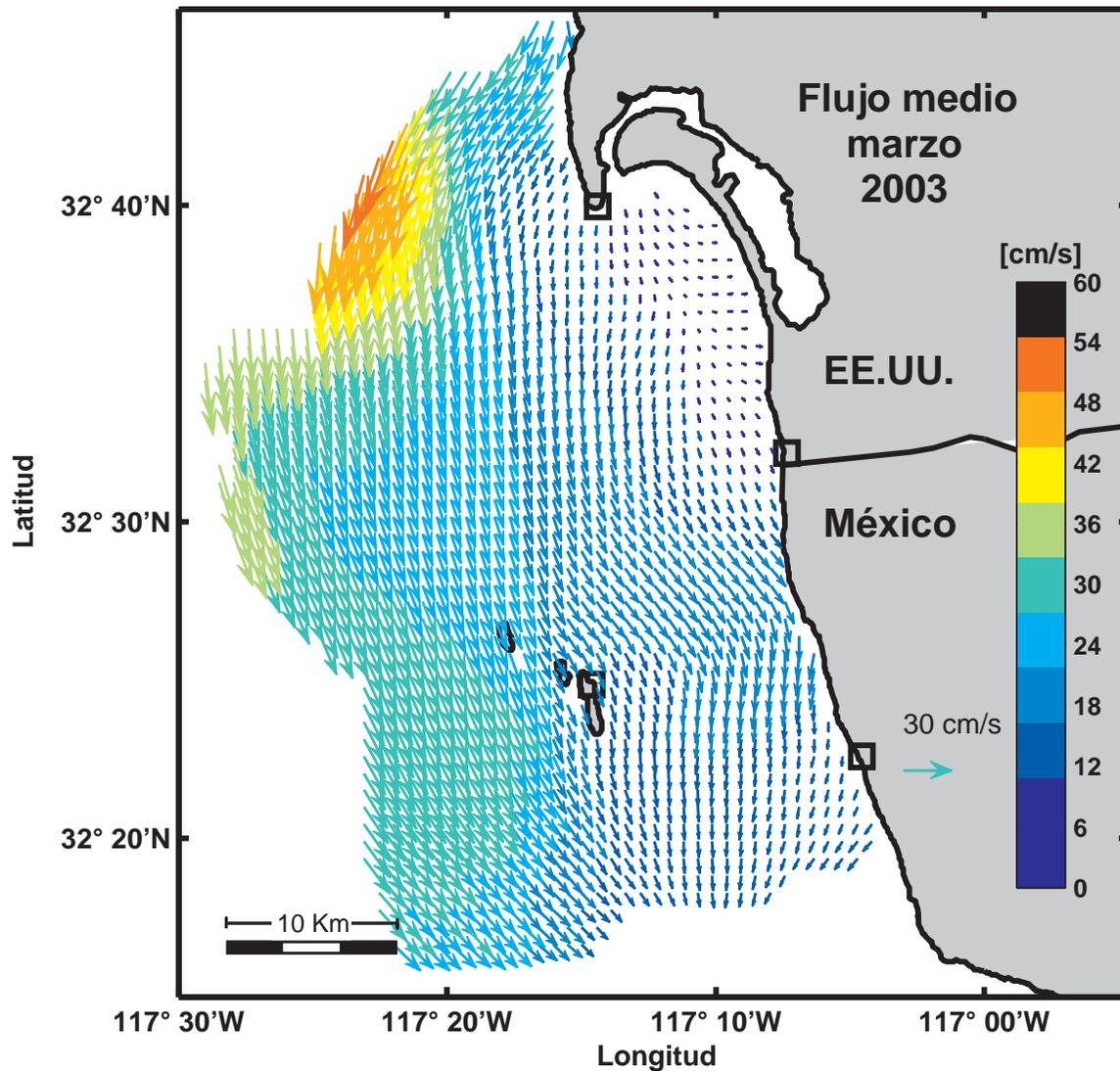


Figura 21: Similar a la fig. 15, pero para el mes de marzo de 2003. La corriente promedio se intensifica, sobre todo en la porción oeste del area de estudio. El debilitamiento del flujo cercano a la costa se debió a los vientos Santa Ana.

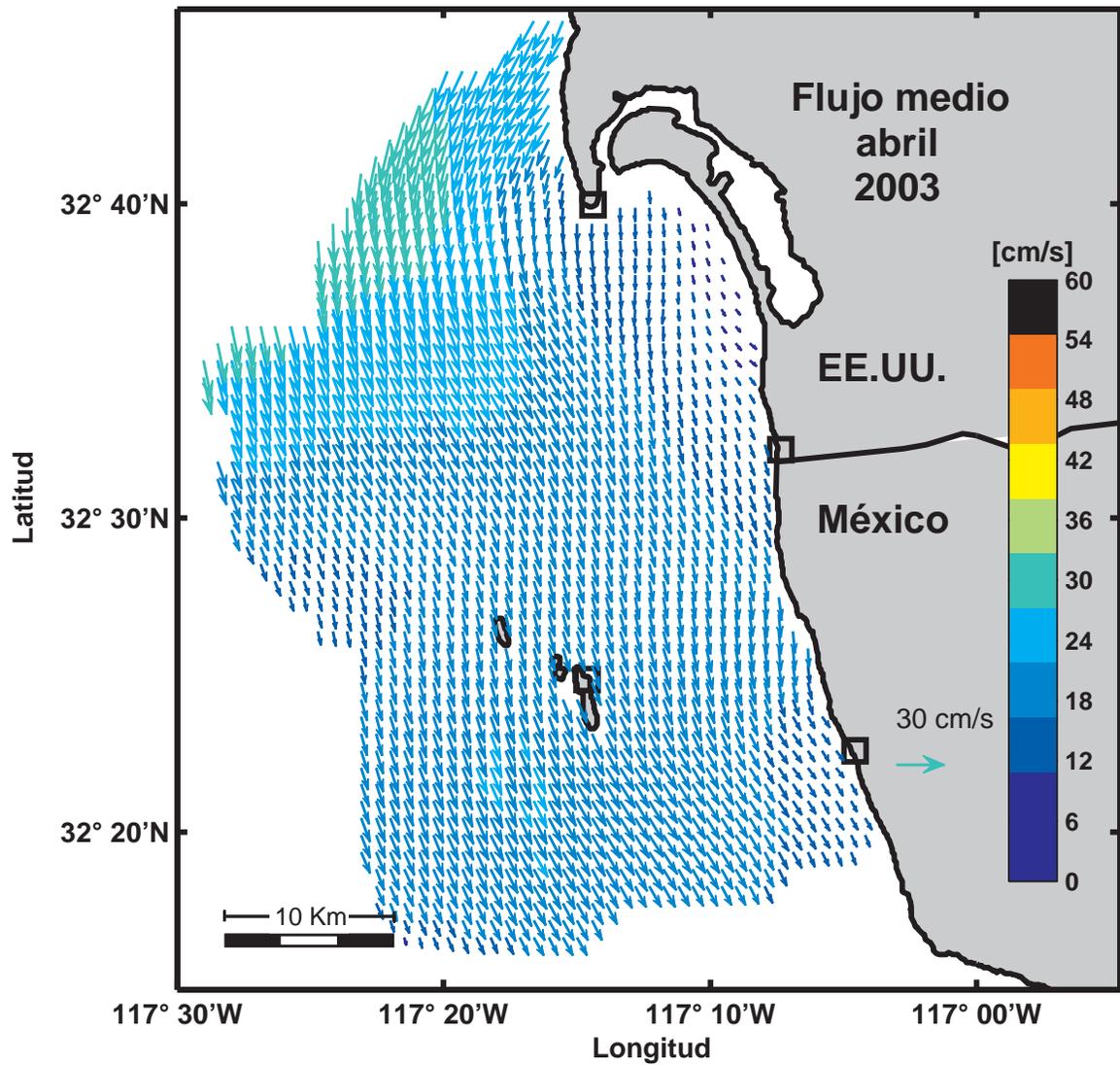


Figura 22: Similar a la fig. 15, pero para el mes de abril de 2003.

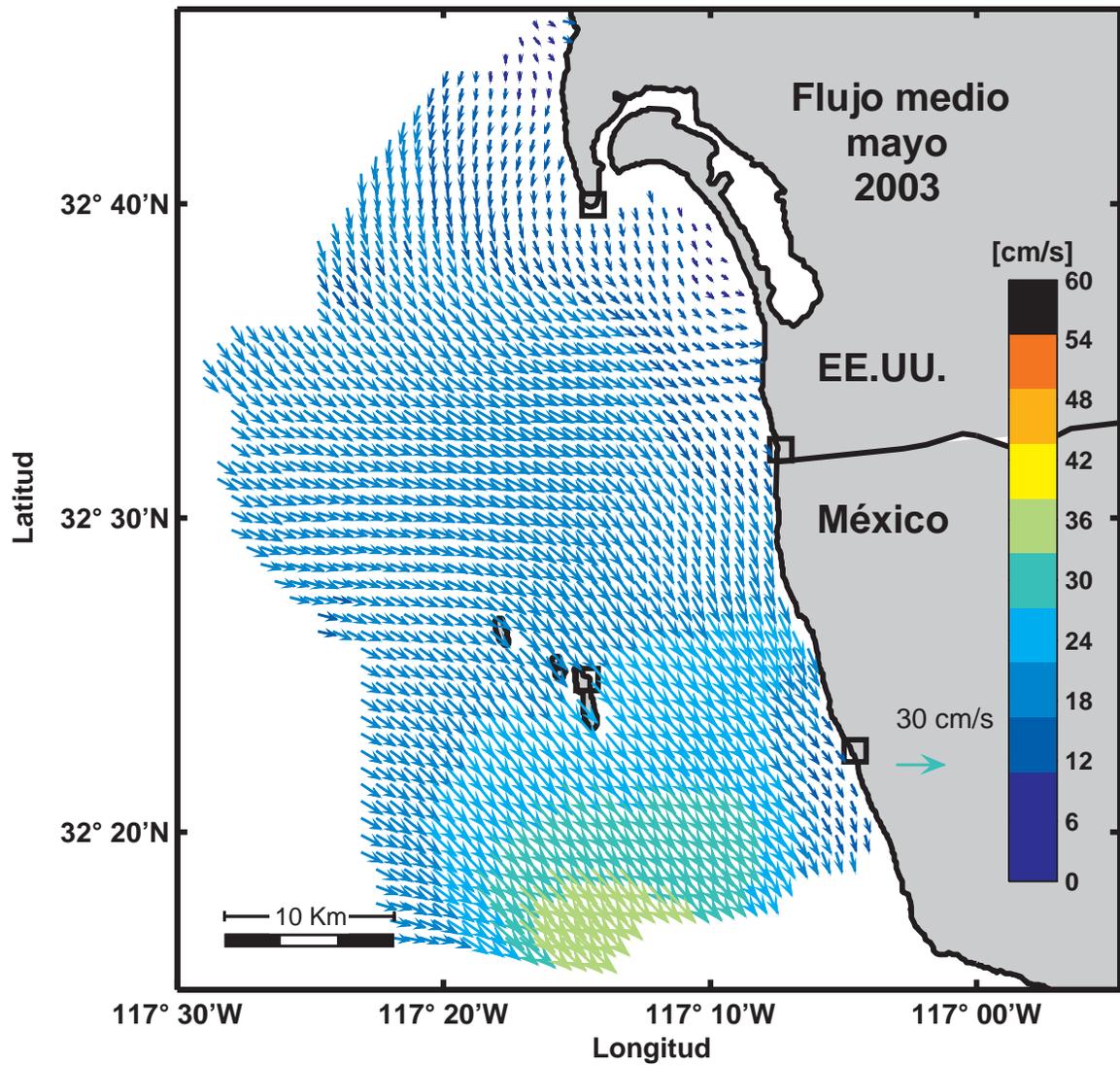


Figura 23: Similar a la fig. 15, pero para el mes de mayo de 2003.

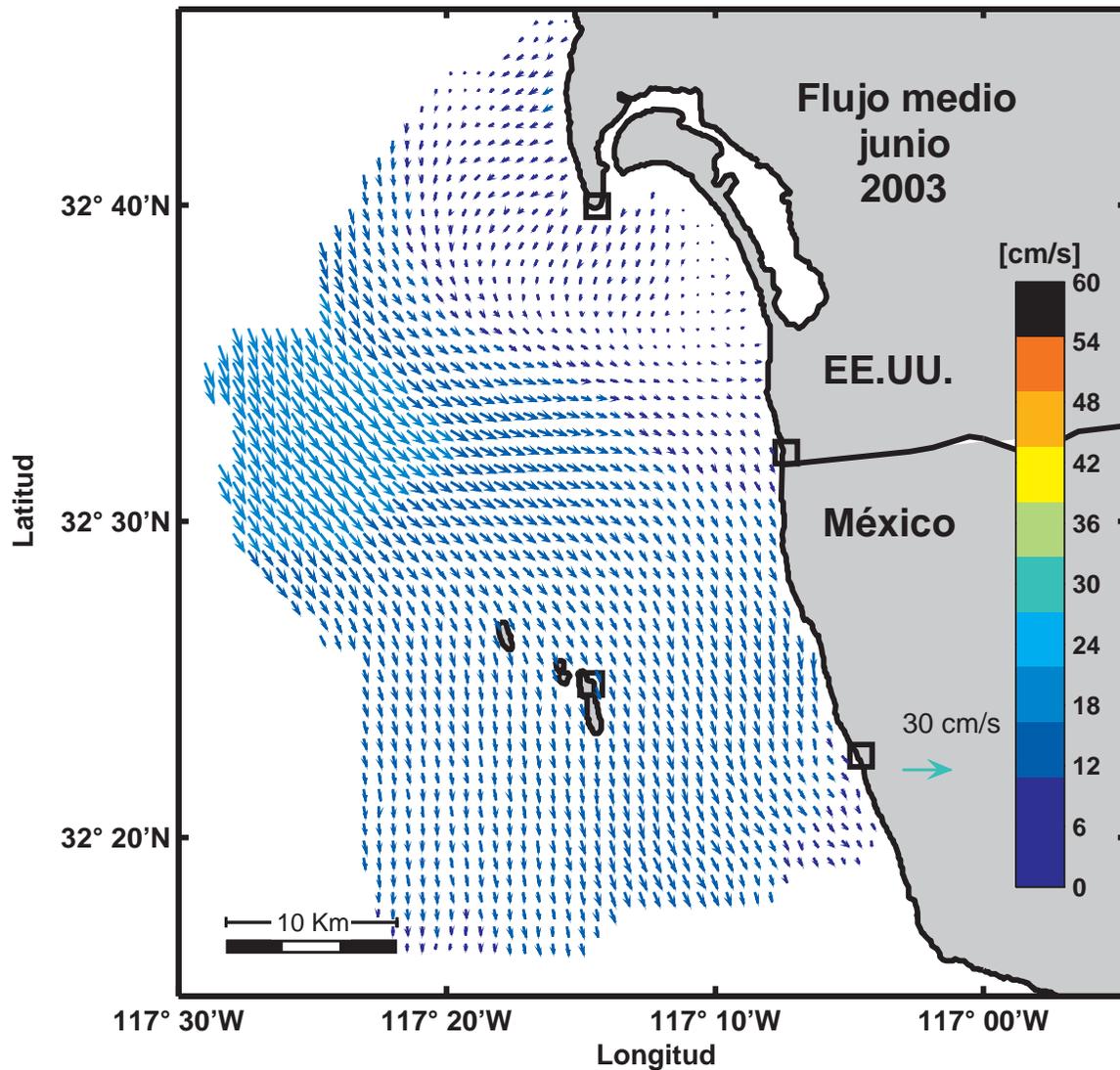


Figura 24: Similar a la fig. 15, pero para el mes de junio de 2003.

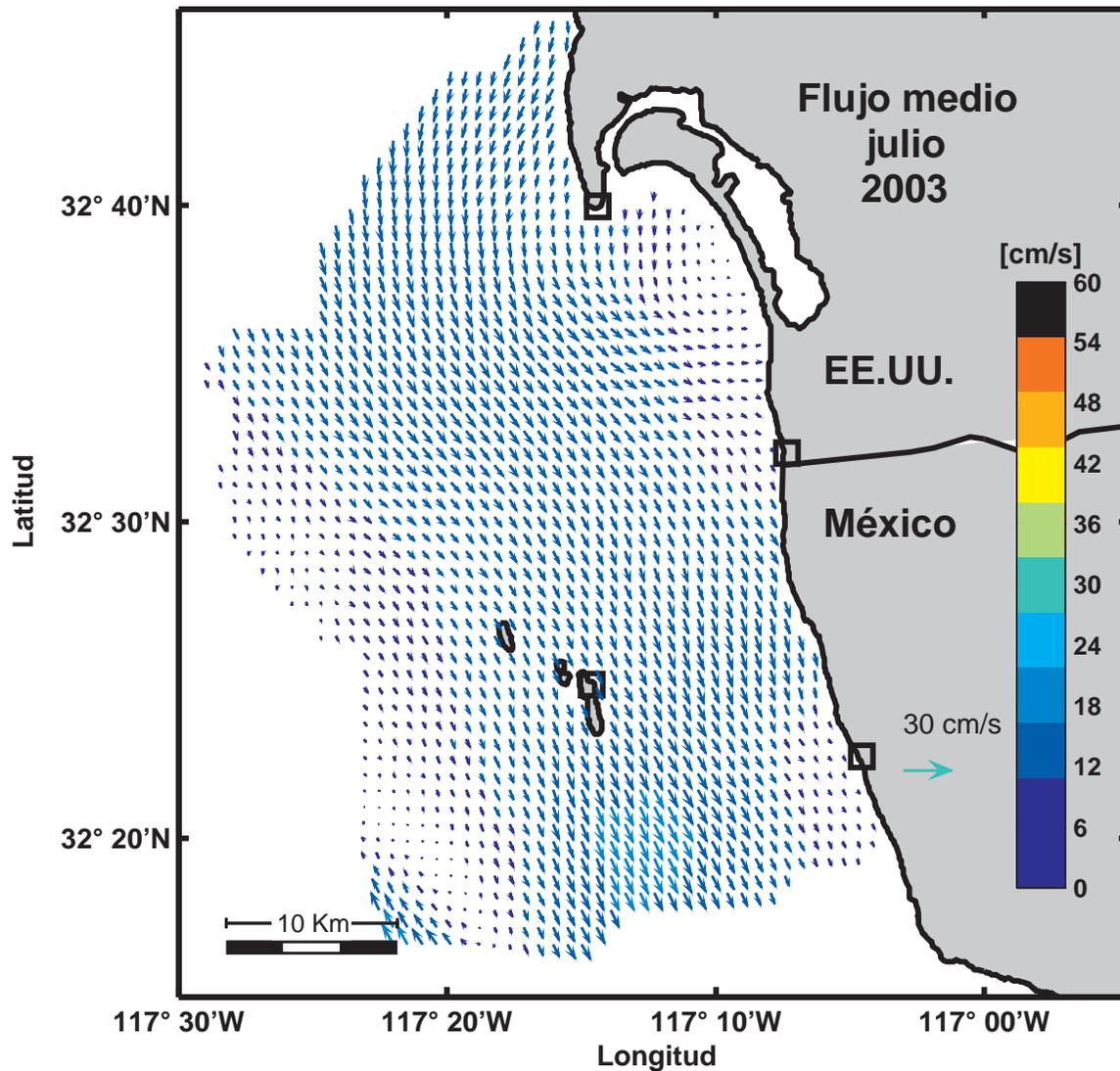


Figura 25: Similar a la fig. 15, pero para el mes de julio de 2003. Flujo homogéneo.

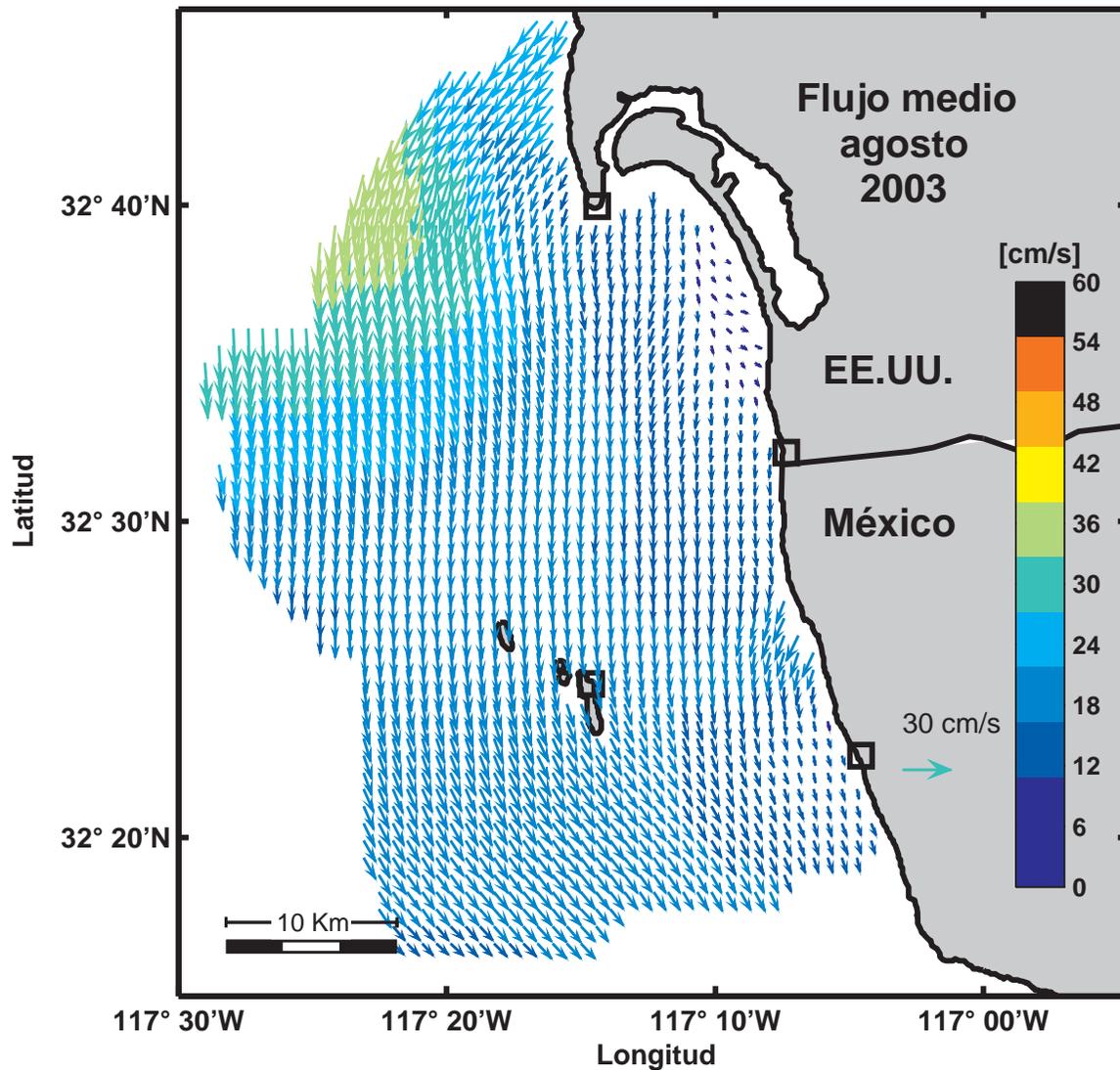


Figura 26: Similar a la fig. 15, pero para el mes de agosto de 2003. Se presenta una intensificación de las corrientes en las inmediaciones del vertedero de la Cd. de Tijuana.

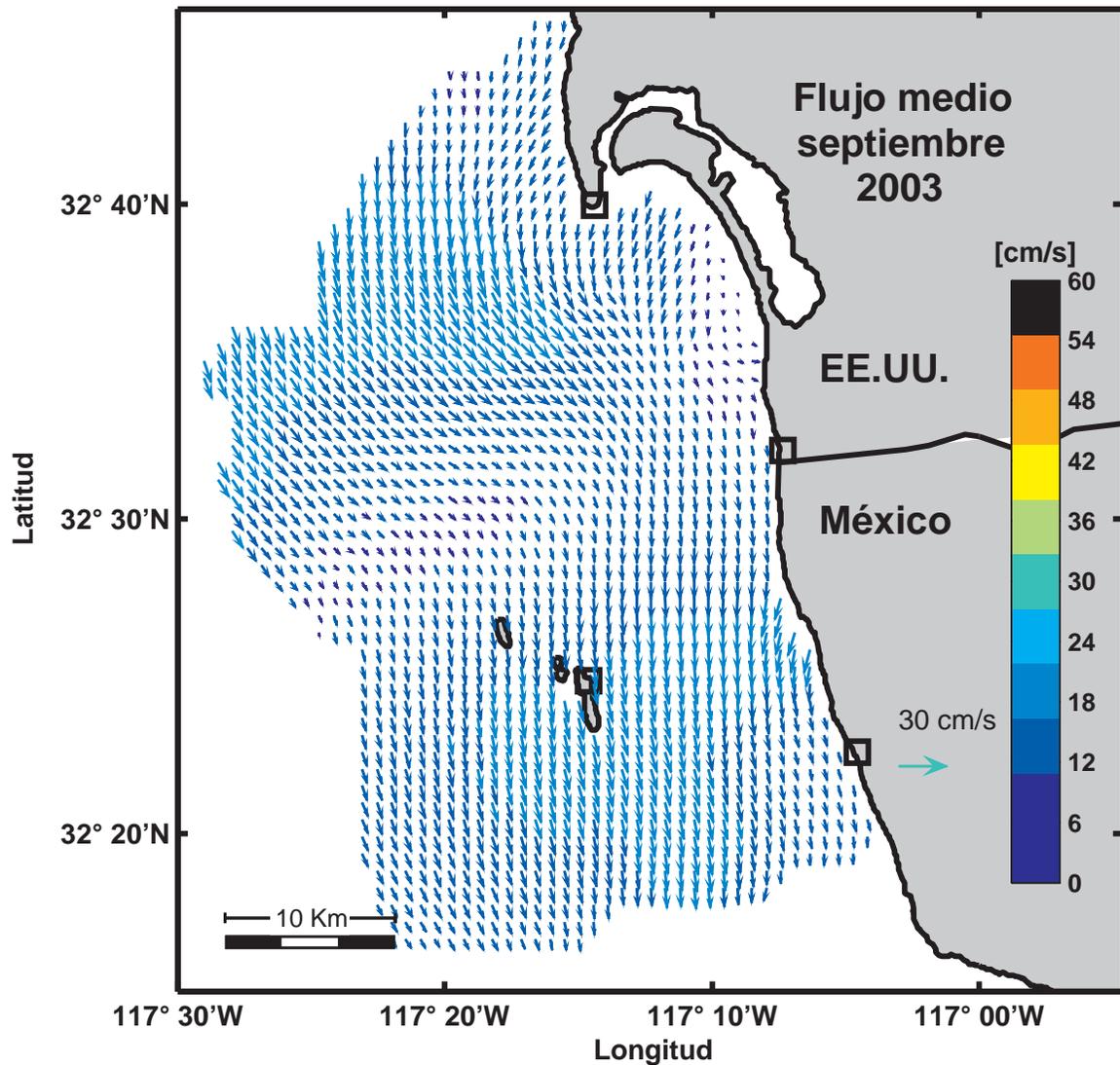


Figura 27: Similar a la fig. 15, pero para el mes de septiembre de 2003. Se presenta una intensificación de las corrientes en las inmediaciones del vertedero de la Cd. de Tijuana.

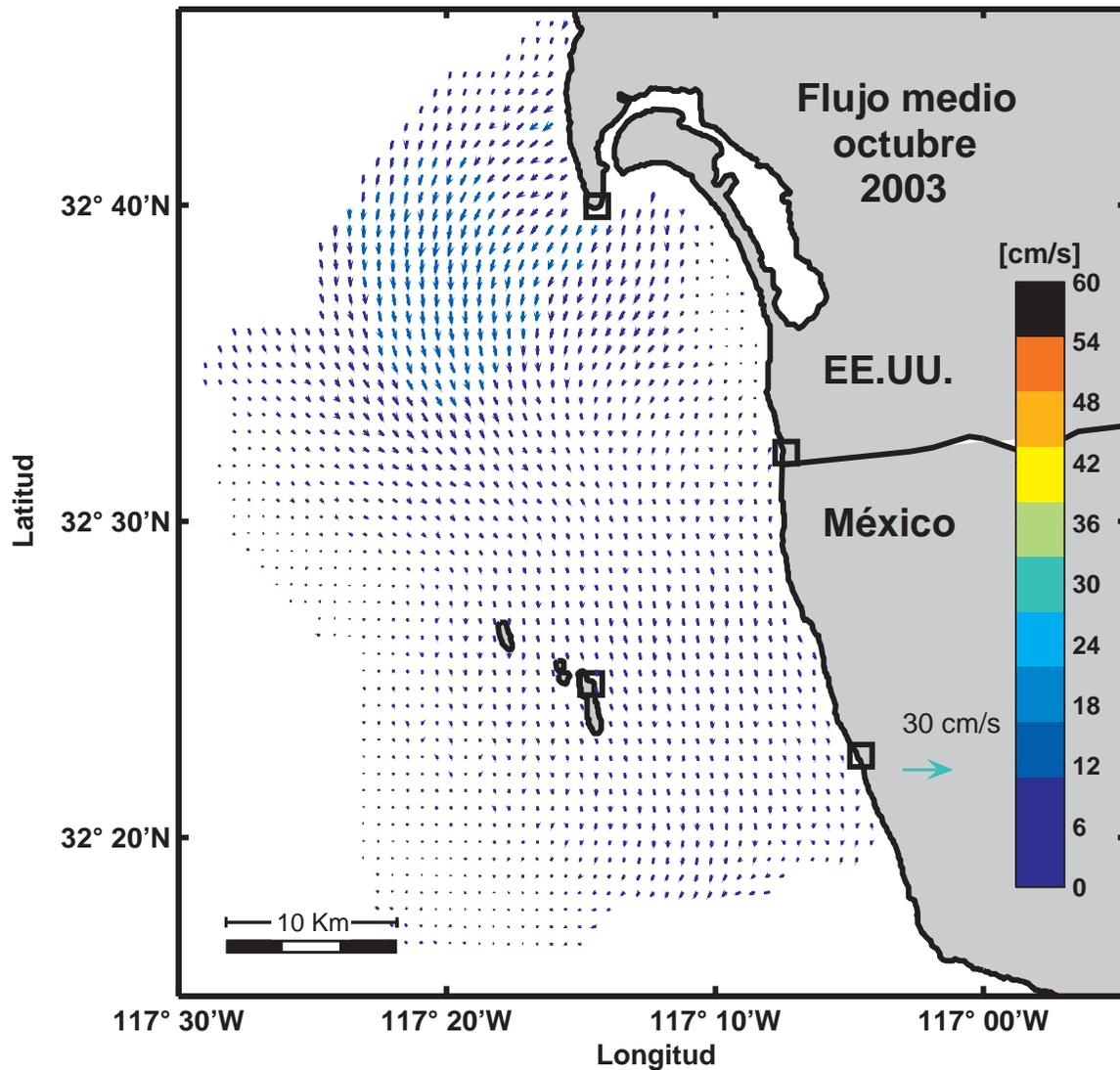


Figura 28: Similar a la fig. 15, pero para el mes de octubre de 2003. El flujo es bastante débil, respecto al año anterior. Posiblemente ocasionado por los vientos Santa ana.

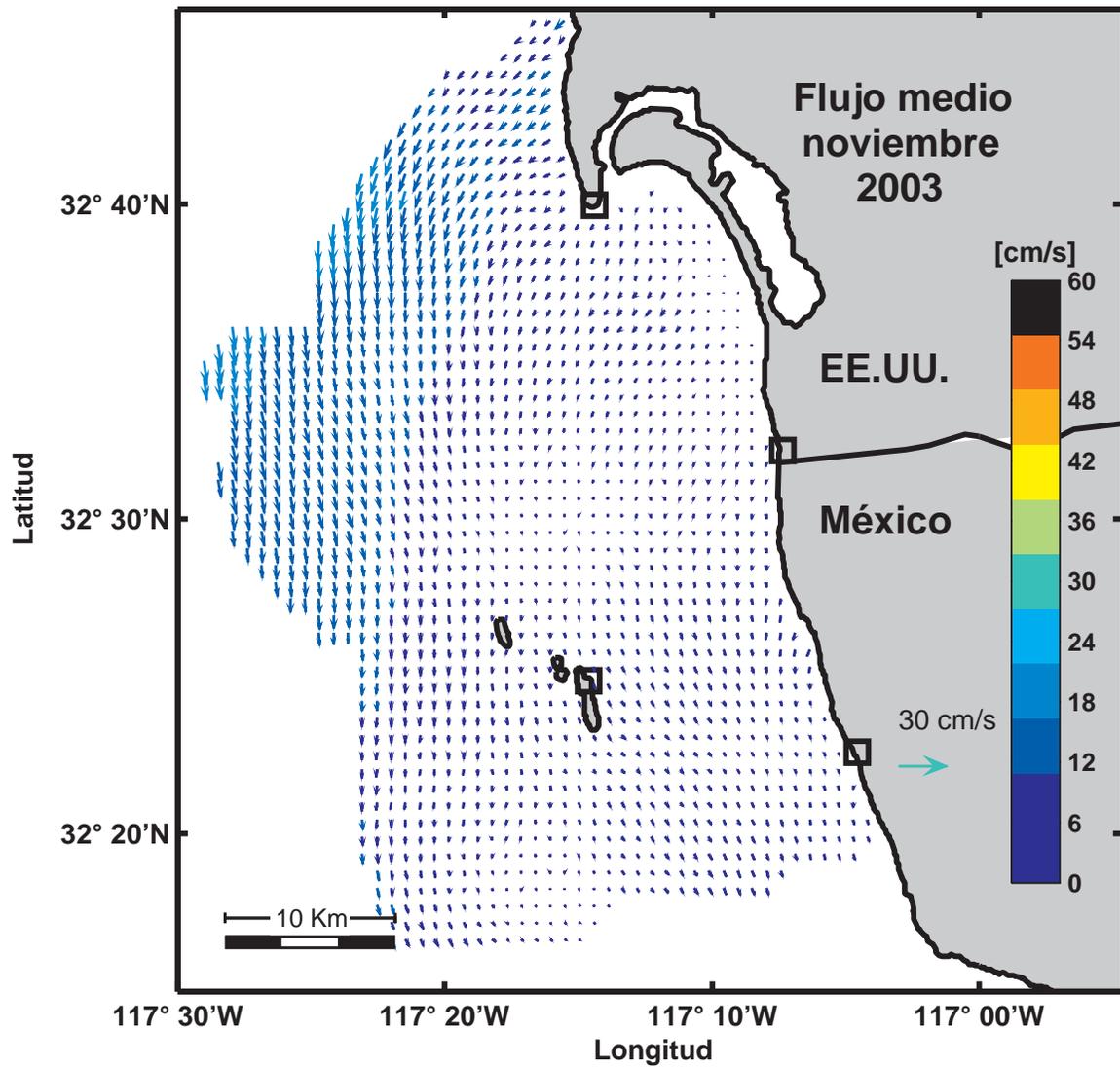


Figura 29: Similar a la fig. 15, pero para el mes de noviembre de 2003.

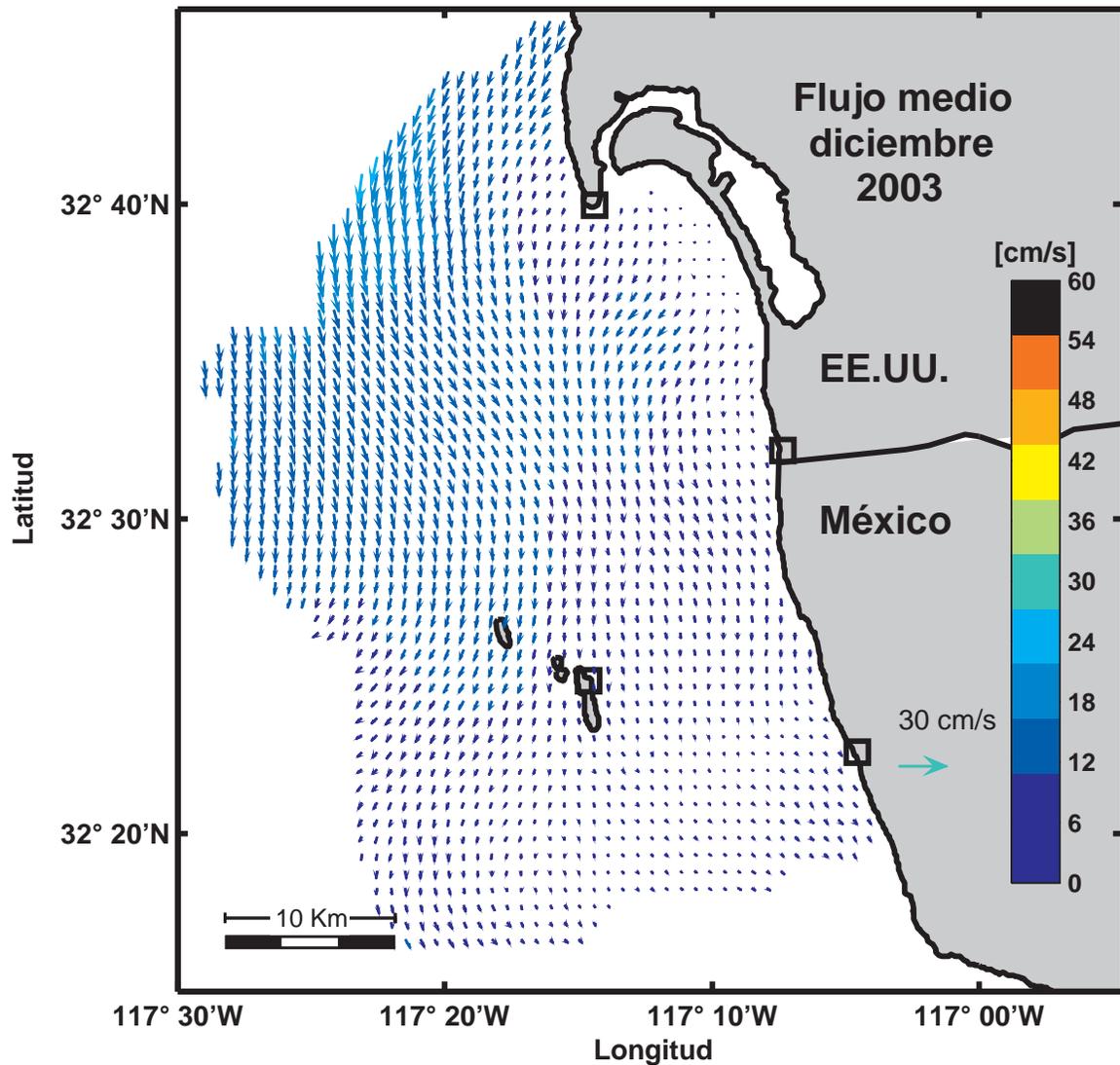


Figura 30: Similar a la fig. 15, pero para el mes de diciembre de 2003.

IV.6. Análisis armónico de las corrientes superficiales

Se muestran a continuación los resultados del análisis armónico (Pawlowicz *et al.*, 2002) de los datos de corrientes del PA y del RAF con el objeto de extraer los componentes de la marea presentes en las corrientes. El porcentaje de varianza explicada por el análisis armónico a las corrientes superficiales se muestra en la figura 31.

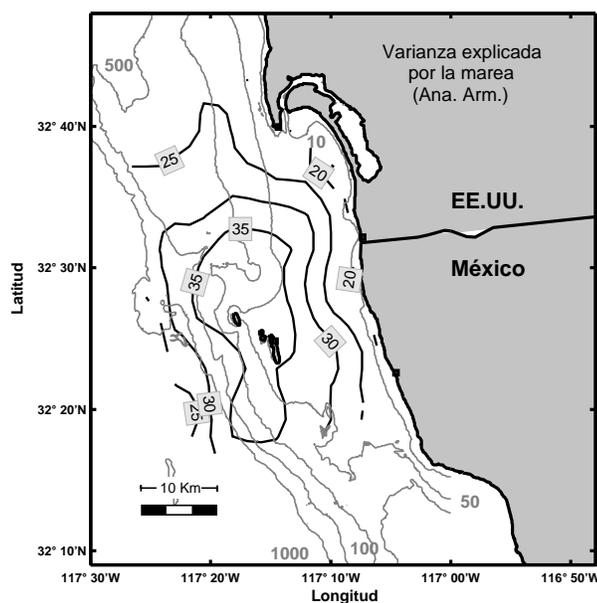


Figura 31: Porcentaje de la varianza total explicada por el análisis armónico de la marea.

Se presentan las elipses de marea (Figs. 32 a 35) correspondientes a las componentes (K_1 , O_1 , M_2 y S_2). El color de la elipse indica la rotación de la misma, para el caso de los radares el negro (rojo) hace mención a una rotación ciclónica (anticiclónica); para el caso de los perfiladores acústicos el color azul (verde) establece una rotación ciclónica (anticiclónica). En general, el error en la estimación del semieje mayor, fue menor a 1 cm/s para el caso de los RAF y de 1.5 cm/s para los PA.

La componente de marea que más contribuye al movimiento de las corrientes superficiales es la lunar semi-diurna o M_2 (Fig. 34).

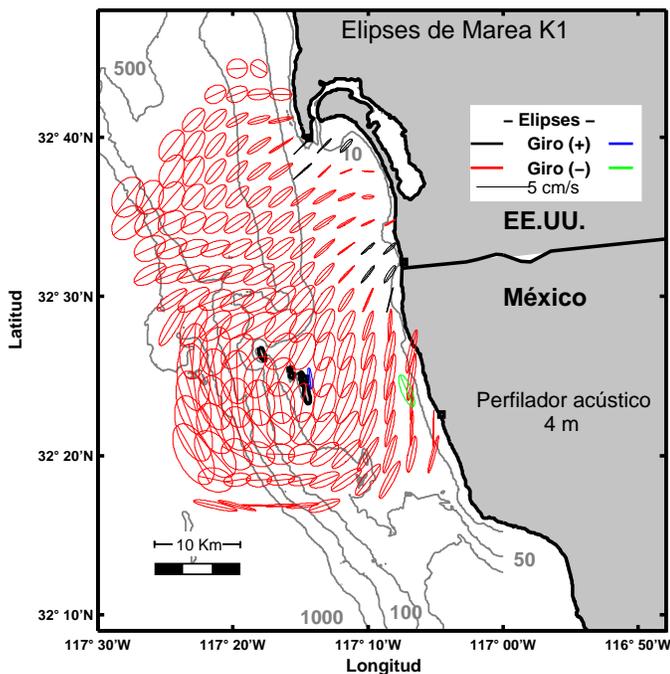


Figura 32: Estructura espacial de las elipses de la componente de marea Lunar-solar diurna, K_1 . El sentido de rotación de las elipses de los RAF y PA es el mismo.

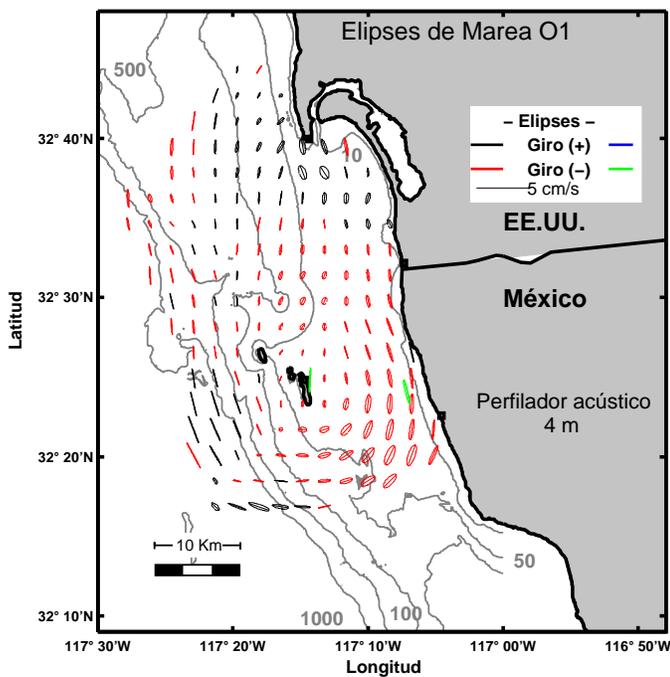


Figura 33: Estructura espacial de las elipses de la componente lunar diurna de la marea, O_1 . El sentido de rotación de las elipses de los RAF y PA es el mismo.

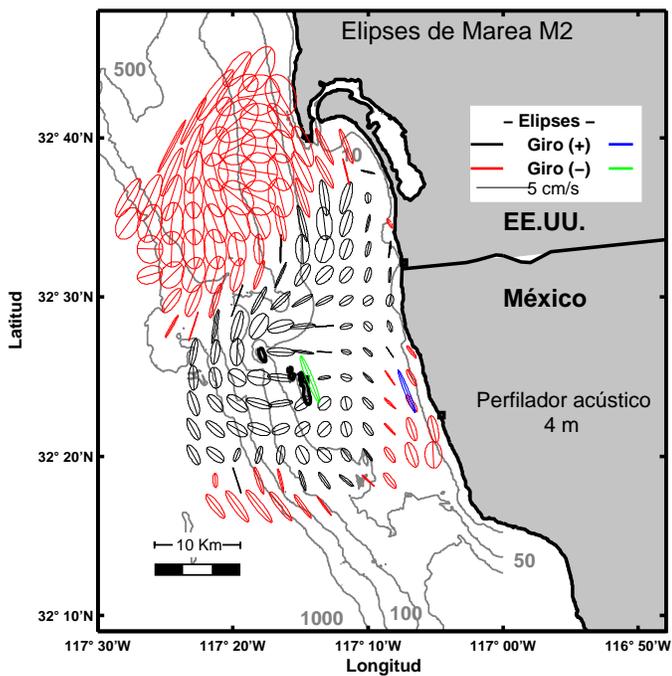


Figura 34: Estructura espacial de las elipses de la componente de marea lunar semi-diurna, M_2

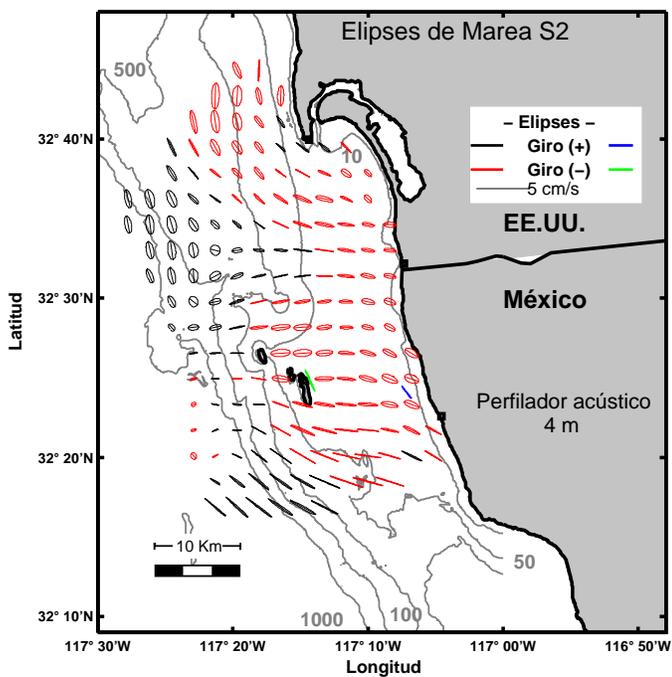


Figura 35: Estructura espacial de las elipses de la componente de marea solar semi-diurna, S_2

IV.7. Análisis de las corrientes superficiales residuales por funciones empíricas ortogonales

Las funciones empíricas ortogonales o FEOs son una herramienta matemática que permite descomponer una serie de datos en modos de oscilación, estacionarios, y ortogonales entre sí. El primer modo es el más energético y está compuesto, al igual que los demás modos, de una estructura espacial y una estructura temporal. Se presenta a continuación el análisis por FEOS realizado a las series de tiempo de las corrientes residuales del análisis armónico de la marea (Figs. 38–40). Cabe mencionar que las series horarias fueron promediadas a series diarias, para reducir la matriz a resolver, además de reducir la cantidad de datos NaN.

La figura 36 presenta un espectro de potencias de las componentes principales de las FEOs, con la cual se muestra los picos energéticos para los primeros modos. En tanto que en la figura 37 se muestra que el pido energetico del modo 1 (18 dias) esta desfasado con el rotacional de la velocidad del viento (22 dias) por 4 dias. Así mismo, existe un periodos de 9 dias común en ambos espectros y con un pico energético significativo.

La varianza explicada por los primeros tres modos constituye el 65 % de la varianza total del residual. El primer modo (Fig. 38) explica el 43 % de los residuales y muestra una estructura espacial que representa un flujo paralelo a la costa, con variaciones norte–sur.

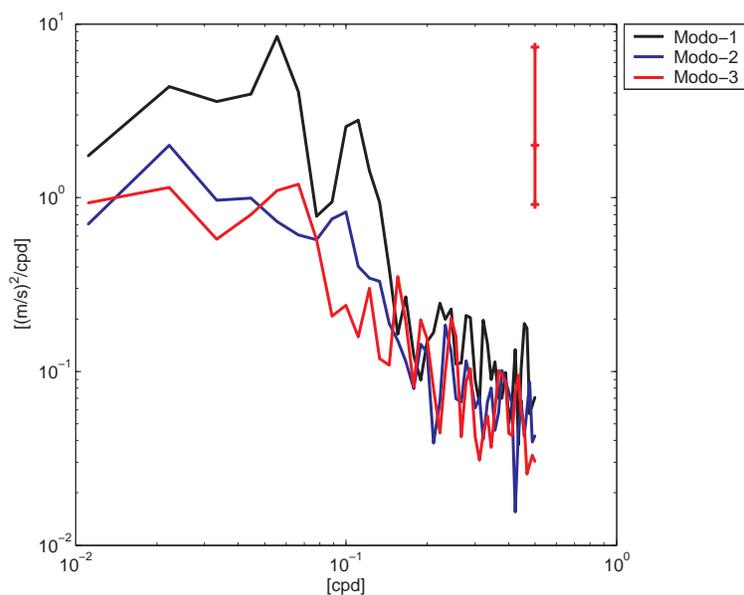


Figura 36: Espectro de potencias de las componentes principales multiplicadas por sus respectivos autovalores. Se realizaron particiones espectrales cada 3 meses, sin traslape espectral. La línea vertical indica el nivel de confianza al 95 %.

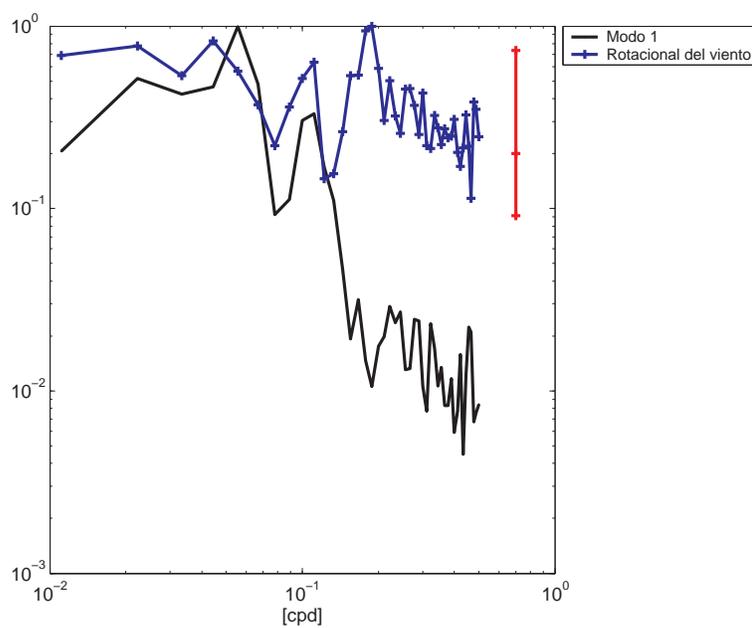


Figura 37: Espectro de potencias normalizado del rotacional de la velocidad del viento. El campo de velocidades se obtuvo de imágenes diarias de QuikSCAT para todo el año de 2003. La línea vertical indica el nivel de confianza al 95 %. Se compara con el modo 1 (multiplicado por sus unidades y normalizado). La energía entre el modo 1 y el rotacional del vector velocidad del viento es consistente a los 9 días.

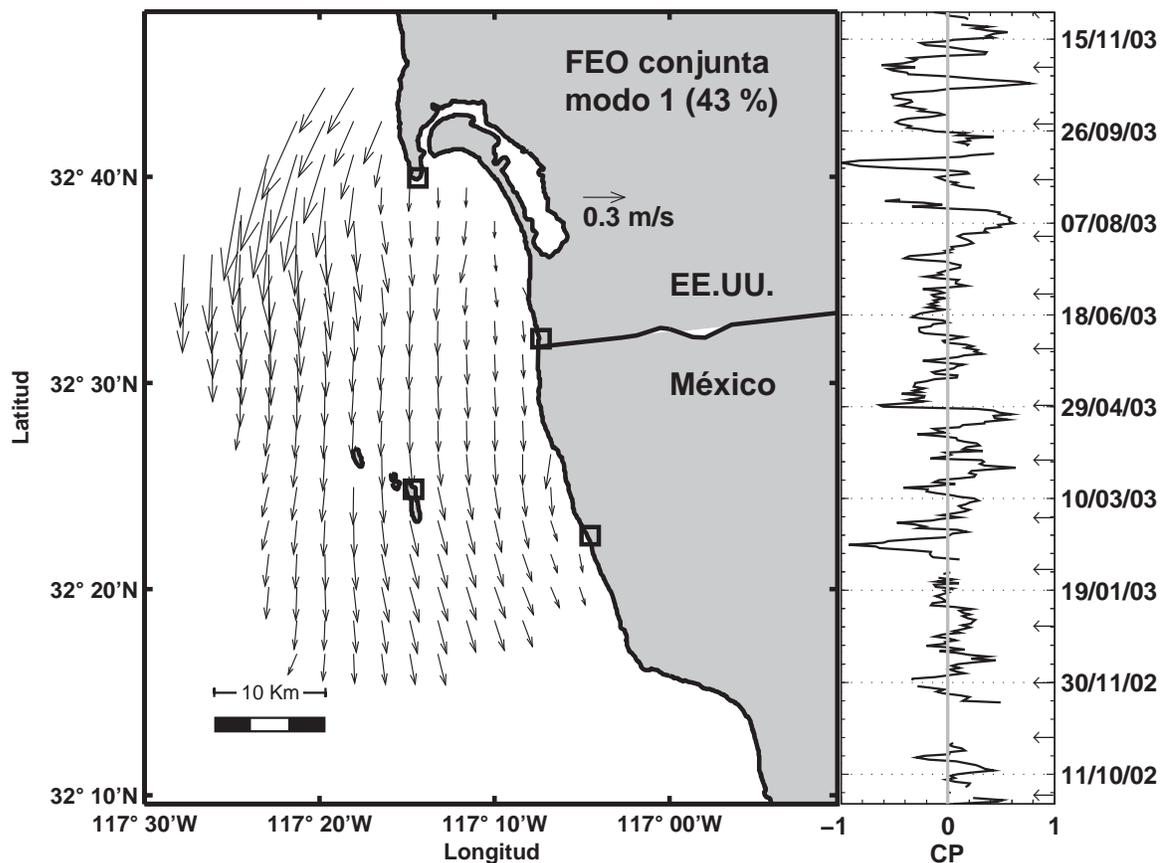


Figura 38: Primer modo de oscilación de las corrientes superficiales de los RAF. Los vectores representan la variación espacial del modo, en tanto que la línea obscura de la derecha representa la variación temporal (componentes principales, CP) del campo espacial. Las flechas del eje de tiempo indican el primer día de cada mes. La estructura espacial muestra variaciones con dirección norte-sur. El primer modo explica el 43% de la varianza del residual.

La línea del panel derecho de la figura 38 representa la serie temporal del modo 1, la cual presentó picos energéticos significantes en la banda de 18 y 9 días. La variación temporal es predominantemente sinóptica. Con el fin de entender las variaciones alrededor del primer modo se calculó el espectro de potencias a una serie anual de datos del rotacional de la velocidad del viento, la cual fue inferida de imágenes de QuikSCAT (Fig.37). El espectro realizado a los datos de viento capturo energía significativa al rededor de la banda de frecuencia de 22, 9 y 5 días.

El segundo modo (Fig. 39) explica el 12% de la varianza del residual y presenta una estructura espacial donde destaca una estructura con forma de meandro, presentando menor amplitud al norte de las Islas Coronado. El espectro de potencias realizado a la variación temporal (Fig 36) de las componentes principales muestra bandas de energía poco significantes.

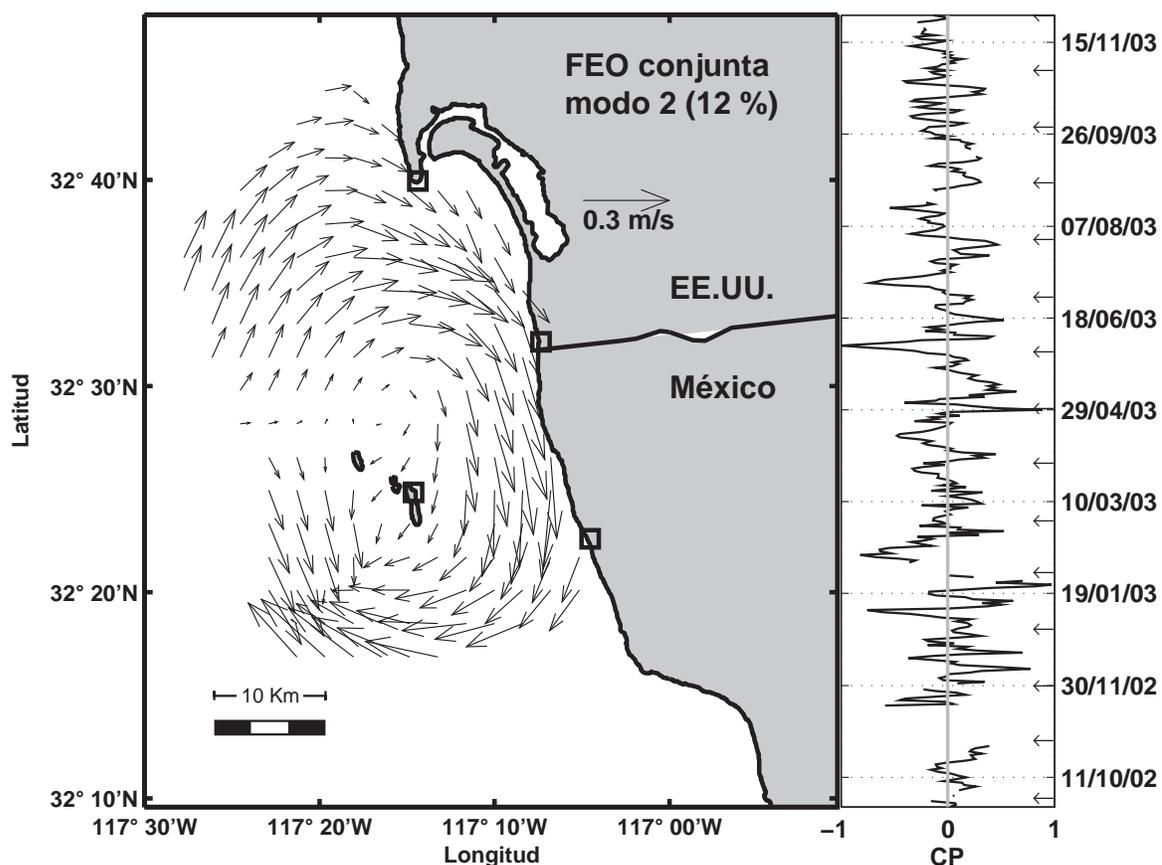


Figura 39: Similar a la figura 38, pero para el segundo modo. La estructura espacial muestra variaciones perpendiculares a la línea de costa, en tanto que la estructura temporal presenta periodos del orden de 3 meses y 15 días (Fig. 36). Se explica el 12% de la varianza del residual.

El tercer modo (Fig. 40) explica el 10% de la varianza del residual. Presenta variaciones de las corrientes perpendiculares a la línea de costa. La variación temporal presenta periodos del orden de 15 días. (Fig 36). Cabe mencionar que la brisa no esta

presente en este modo, ya que se utilizaron promedios diarios de las mediciones de corrientes en el análisis por FEOs.

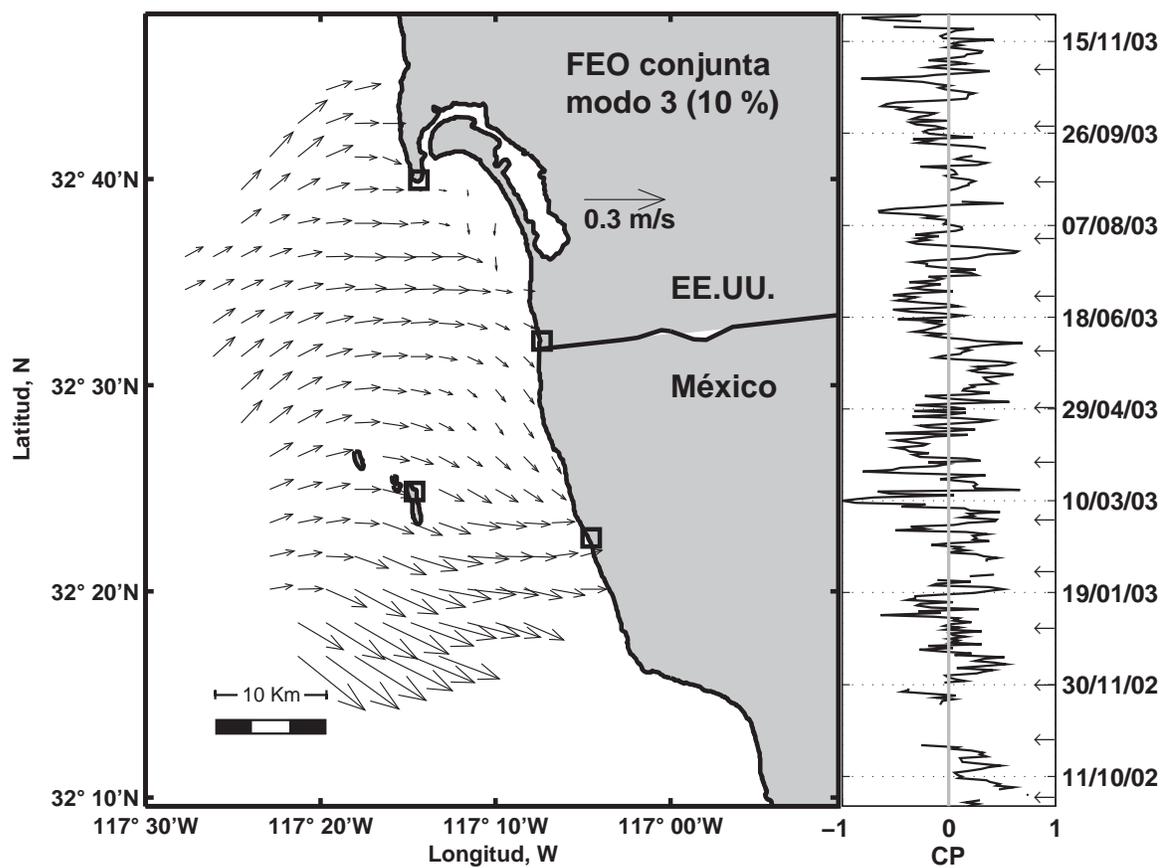


Figura 40: Similar a la figura 38 pero para el tercer modo. La estructura espacial muestra un giro con centro al norte de Islas Coronado. Se explica el 10 % de la variabilidad del residual.

IV.8. Condición Santa Ana

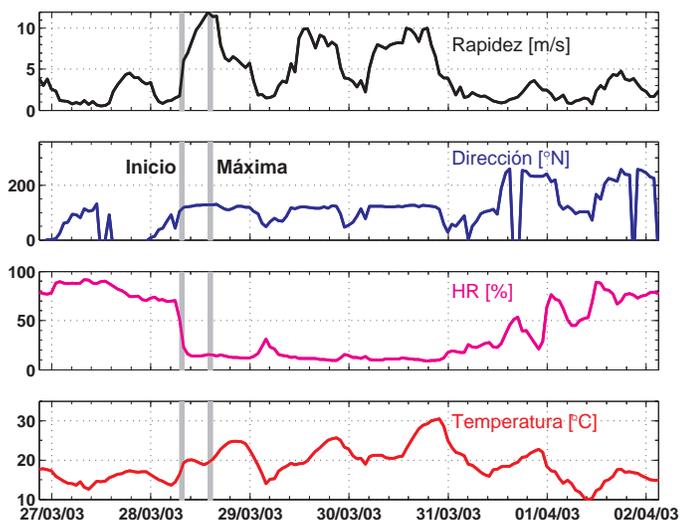
Los vientos provenientes de tierra y escasos en humedad (tabla VI), producen condiciones atmosféricas como las que se muestran en la figura 41(a). Se sabe que la magnitud de una corriente de deriva producida por ráfagas de viento es del orden de 3% de la rapidez del viento referida a 10m sobre la superficie y en la dirección del esfuerzo aplicado (Wu, 1983), tal como se observa en las figuras 41(b) y 41(c). Sin embargo, el campo de viento fue homogéneo (Fig 42), al menos en marzo de 2003 donde las corrientes superficiales no mostraron responder al forzamiento por viento (Fig 44).

La tabla VI contiene algunas variables estadísticas de los datos de viento (promedios y ráfagas) obtenidos bajo la influencia de los eventos Santa Ana presentes.

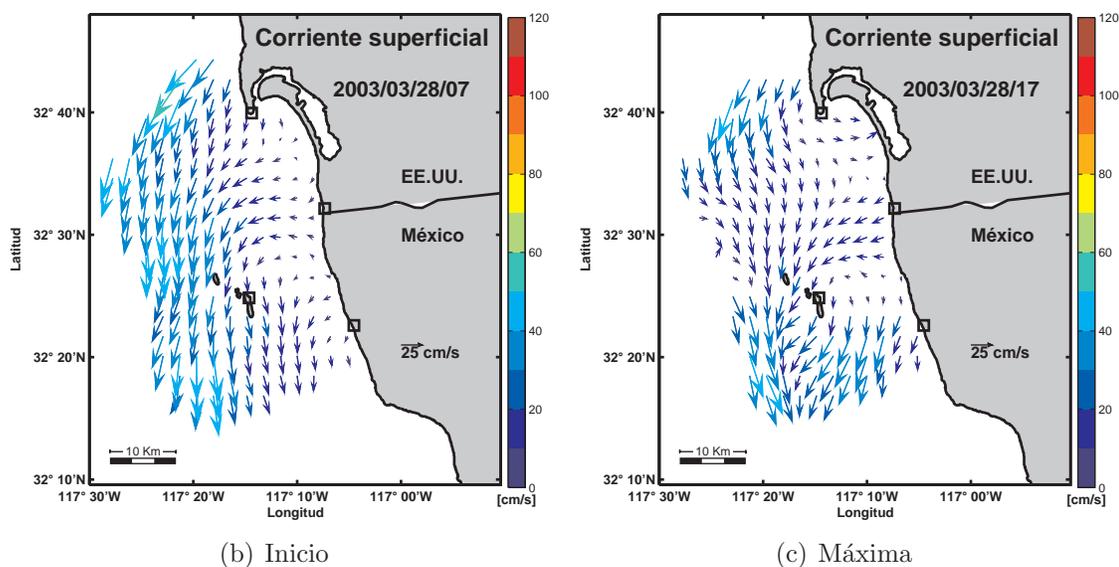
Tabla VI: Estadística de la atmósfera de Rosarito bajo condición Santa Ana. \bar{x} es la media, σ la desviación estándar y Max es el máximo.

	\bar{x}	σ	Max	Ráfagas		
				\bar{x}	σ	Max
Marzo 28 al 31 de 2003						
Rapidez [m/s]	4.38	4.04	12.37	7.76	7.02	20.87
Dirección [°N]	105	60.35	119	157.7	33.28	179
Presión [mb]	1016	3.44	1021.6	–	–	–
Temperatura [°C]	21.35	3.56	30.70	21.47	3.56	30.77
HR [%]	17.61	10.14	65.87	18.30	10.67	65.97
Abril 8 de 2003						
Rapidez [m/s]	1.79	2.56	5.87	2.96	4.9	9.78
Dirección [°N]	353	36.4	350	56	43.8	87
Presión [mb]	1014	1.08	1015.6	–	–	–
Temperatura [°C]	20.1	3.25	28.4	20.32	3.26	28.6
HR [%]	36	14	70.8	37.8	14.2	70.89
Octubre 21 al 28 de 2003						
Rapidez [m/s]	1.21	2.6	11.5	2.26	4.7	20
Dirección [°N]	14.6	45.8	101	84	36.5	143
Presión [mb]	1012.4	2.45	1017	–	–	–
Temperatura [°C]	19.3	4	31	19.4	4.1	31.1
HR [%]	66.6	33	98	67.2	32.7	98.1

Se muestra a continuación la condición Santa Ana para marzo de 2003, la cual



(a) Registro meteorológico



(b) Inicio

(c) Máxima

Figura 41: Corrientes superficiales durante una condición Santa Ana de marzo 2003. a) El registro meteorológico del Santa Ana se caracterizó por tres eventos (máximos en la rapidez del viento), las líneas verticales en gris muestran el inicio y máximo de un evento. b) Corrientes superficiales al inicio del evento. c) Corrientes superficiales cuando el Santa Ana fue máximo.

se caracterizó por tres eventos (máximos en la rapidez del viento, Fig. 41(a)) con descensos en la humedad relativa hasta valores de 10 %. Se ilustra mediante dos mapas de corrientes superficiales el inicio (Fig. 41(b)) y máximo (Fig. 41(c)) de la condición

Santa Ana, esta última muestra divergencia en la zona frente a Rosarito y la posibilidad de surgencia.

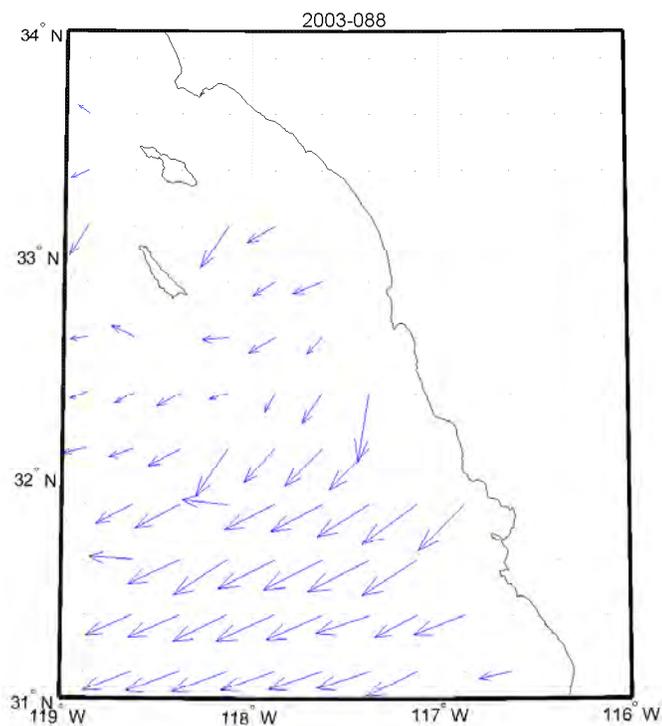
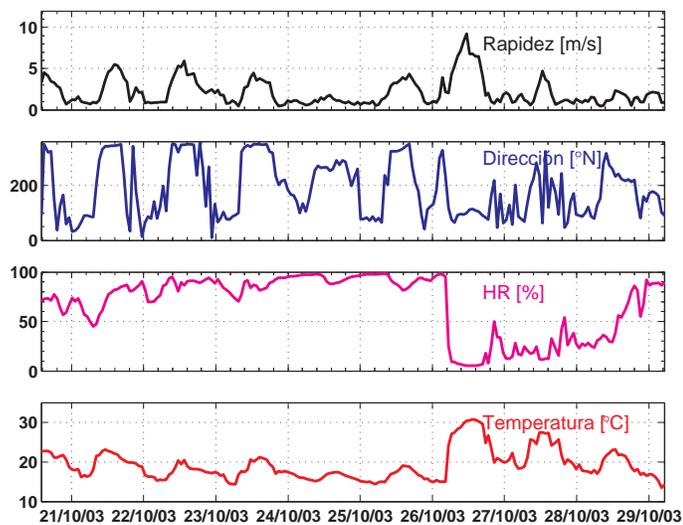
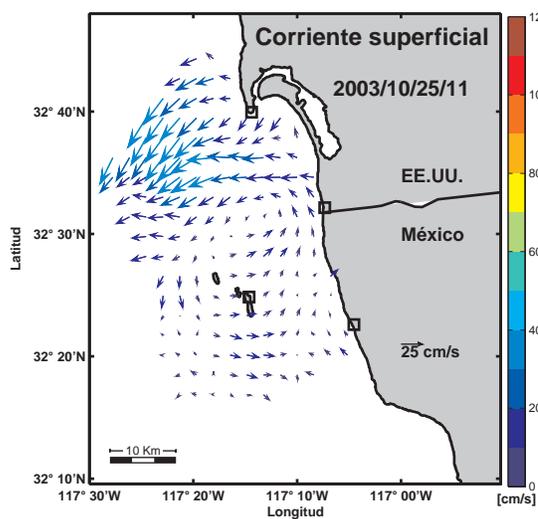


Figura 42: Ejemplo de un campo de viento obtenido por el satélite QikSCAT para el 28 de marzo de 2003. Se destaca un campo de viento uniforme para dicho periodo.

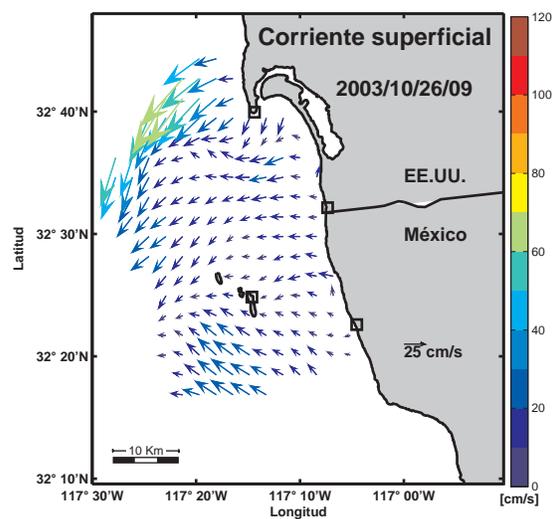
El evento Santa Ana de octubre de 2003 (Fig. 43) se caracterizó por la ocurrencia de varios incendios forestales. Respecto de sus efectos sobre las corrientes superficiales se observó que fueron más intensos en la porción norte de la zona de estudio, lo cual produjo un pequeño giro al norte de Islas Coronado (Fig. 43(b)).



(a) Registro meteorológico



(b) Corrientes superficiales, ejemplo 1



(c) Corrientes superficiales, ejemplo 2

Figura 43: Corrientes superficiales durante una condición Santa Ana de octubre de 2003. a) Registro meteorológico, el Santa Ana se detecta en Rosarito a partir del 25 de octubre. (b) y (c) son mapas de corrientes superficiales que muestran que el Santa Ana fue más intenso en la porción norte del área de estudio.

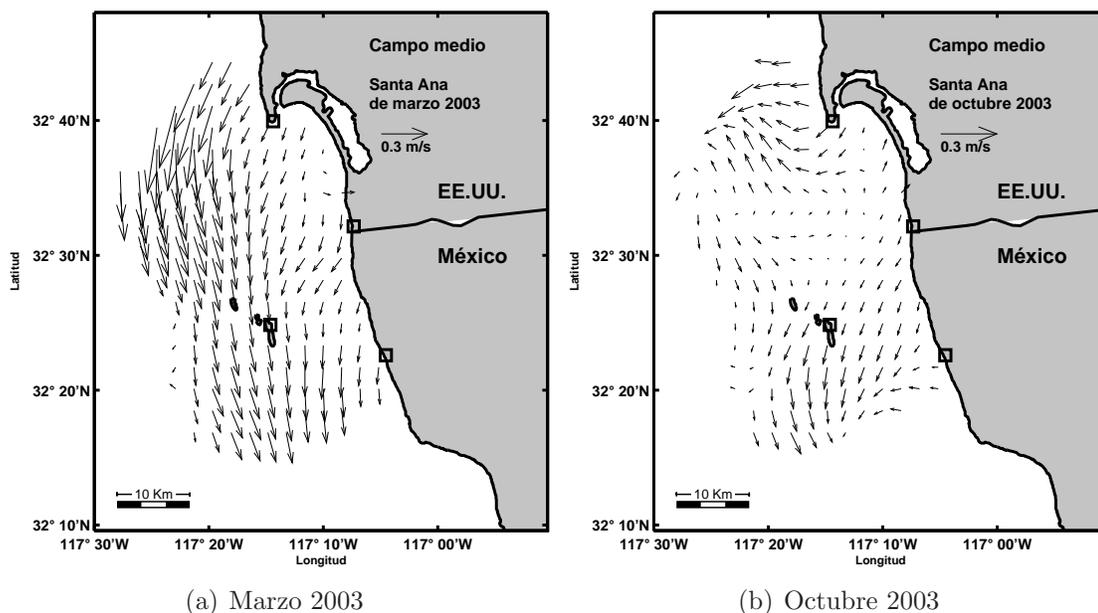
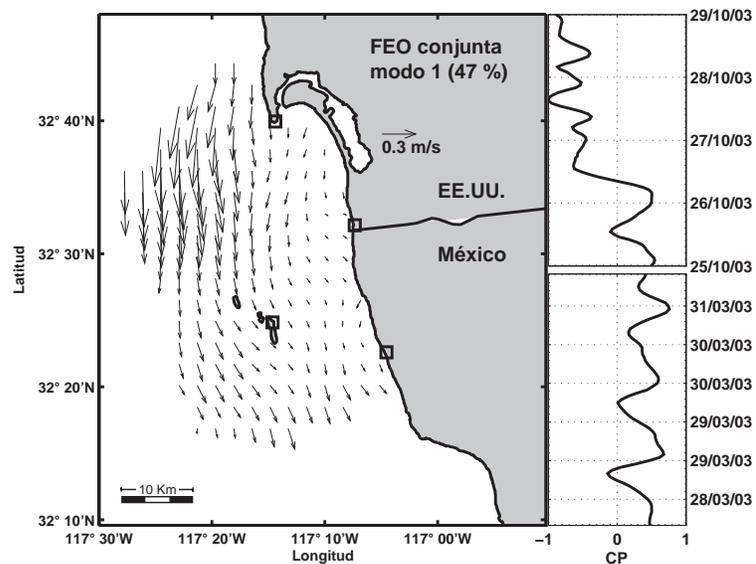


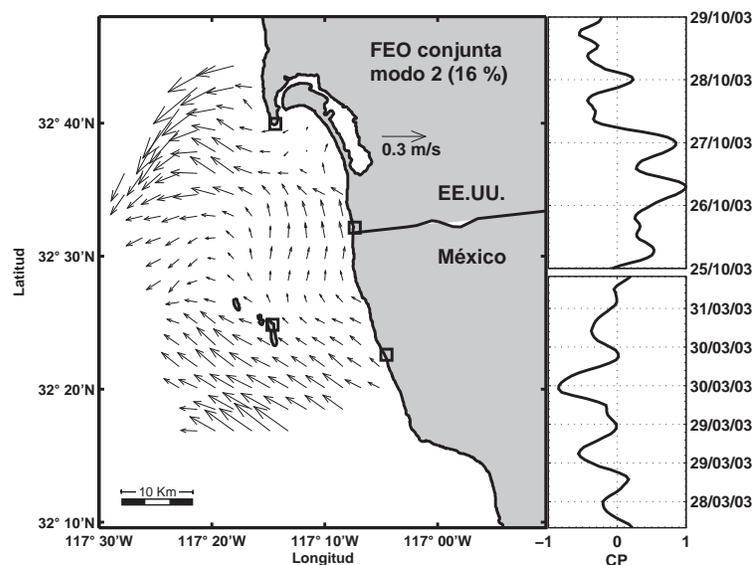
Figura 44: Condiciones promedio de la corriente superficial durante la condición Santa Ana de marzo y octubre de 2003. La influencia del evento Santa Ana de octubre es más evidente en la corriente superficial en comparación del evento de marzo.

Se utilizó la técnica de FEOs conjuntas para analizar datos de corrientes superficiales en dos períodos de condición Santa Ana (marzo y octubre). Los dos primeros modos se muestran en la figura 45. El primer modo conserva la estructura espacial del primer modo bajo condiciones generales (Fig. 38). Posterior al segundo modo se encontraron estructuras espaciales perpendiculares a la línea de costa, por ejemplo, la estructura espacial del modo 2 es similar a la corrientes superficiales para una hora específica durante condición Santa Ana (Fig. 41 y 43) o al flujo medio durante esta condición (Fig. 44).

Los espectros de potencias de las componentes principales mostraron en general que la mayor energía se concentró en la banda diurna para los modos 2 y 3.



(a) modo 1



(b) modo 2

Figura 45: FEOs de las corrientes superficiales en periodos de Santa Ana. Se muestran los 3 primeros modos. La estructura espacial es la misma para ambos eventos, sólo que la variación temporal (CP) cambia entre los eventos, panel inferior (superior) para marzo (octubre).

V. Discusión

Las observaciones de corrientes superficiales de este trabajo representan uno de los esfuerzos de mayor intensidad realizados en la zona fronteriza de México–E.U.A., y quizás único por su contexto costero. Se discute a continuación sobre los forzantes de las corrientes superficiales en la zona y se establece su contribución en la circulación mediante el uso del análisis armónico y de funciones empíricas ortogonales. Finalmente se discute el efecto de los vientos Santa Ana en las corrientes superficiales.

Series de viento

El espectro cruzado (Fig. 5) de las series de viento (San Diego y Rosarito) del periodo marzo–mayo de 2003, muestra tres escalas de variación del viento: sinóptica, diurna y semidiurna. La banda de mayor concentración de energía (dentro del periodo), es la del viento sinóptico.

Los espectros con polaridad ciclónica muestran que la influencia del viento geostrofico, y de las brisas es más energética (25%) en la región de Rosarito que en la región norte de la zona de estudio (muelle de Scripps). Dicha influencia del viento sobre las corrientes se observó en el espectro de potencias de los primeros dos modos de las FEOs.

En lo que respecta al vector de viento con polaridad anticiclónica, se observó el mismo esquema de intensificación del viento sinóptico y de la brisa para la estación de Rosarito. El viento sinóptico en este caso sería el que proviene del sur (paso de tormentas).

Corrientes superficiales: RAF y PA

Respecto a las mediciones de corrientes superficiales con radares de alta frecuen-

cia y perfiladores acústicos se debe mencionar que ambos instrumentos miden procesos similares pero a diferentes razones de muestreo y con diferentes principios de operación (Gordon, 1996; Graber *et al.*, 1997). El apéndice A muestra el principio de operación de los radares de alta frecuencia.

Una medida de la confiabilidad de las observaciones realizadas con los RAF y los PA se establece a través del análisis armónico (Figs. 32 a 35) y del cálculo de elipses de variabilidad (Figs. 7 y 10), así como de la regresión lineal (Fig. 11) entre mediciones de ambos instrumentos y del cálculo del coeficiente de correlación vectorial (Fig. 12).

Se esperaba que existieran diferencias entre las mediciones de los instrumentos. Primero por que el PA estima corrientes estrictamente en un volumen que se considera representativo con base en mediciones a lo largo de 60 seg cada media hora, por otro lado el RAF estima corrientes superficiales en un área de 1 km x 1km con base en los espectros cruzados de la información estimada por tres radares (2 radares perpendiculares entre sí y un monopolo), dichos espectros son calculados cada 5 min para toda la zona de cobertura.

Segundo, el PA es incapaz de medir corrientes en la superficie debido a que existe contaminación de la señal por presencia de la superficie (refracción de la señal por el cambio de densidad entre el mar y la atmósfera). Por el contrario los radares de alta frecuencia miden una corriente en la superficie, la cual representa el flujo integrado en cierta profundidad, dicha profundidad depende de la frecuencia de operación del radar, en este estudio se utilizan radares que trabajan a 25 MHz (f_o) y las corrientes estimadas representan los primeros 0.70 m de la superficie.

Tercera, afortunadamente el PA es un instrumento confiable para perfilar la columna, mientras que los RAF no pueden perfilar la columna, solamente se puede estimar el corte vertical de la velocidad en la superficie siempre y cuando se utilice un radar que opere con al menos dos frecuencias (f_o) distintas.

Campo medio de las corrientes superficiales

Las corrientes superficiales en promedio fluyen hacia el sur (Fig. 13). El uso de las funciones empíricas ortogonales (FEOs) permitió establecer la variabilidad presente alrededor del campo medio de las corrientes superficiales (Fig. 38), con contribuciones significativas en periodos de 9 y 18 días, lo que explica el 43% de la varianza del residual del análisis armónico de la marea.

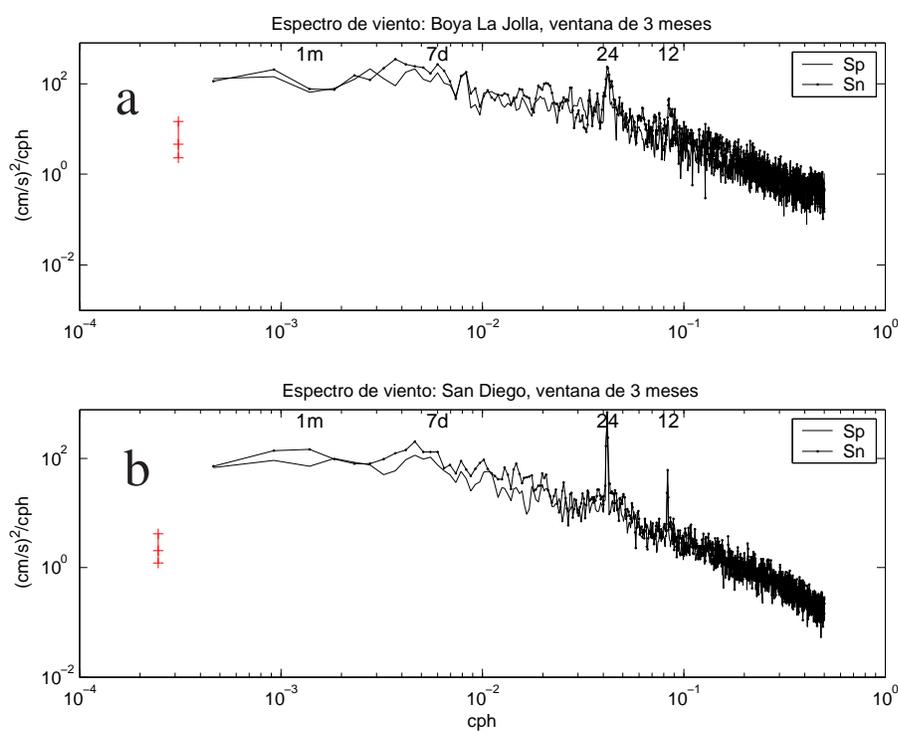


Figura 46: Espectro rotacional del viento. Se utilizó una ventana espectral de 3 meses con 8 grados de libertad. a) Boya ubicada 7.5 Km mar afuera frente al muelle de Scripps. b) Estación meteorológica en el muelle de Scripps. Destaca una banda muy energética en las 24 hrs.

Las variaciones alrededor del flujo medio muestran que el flujo al sur se intensifica en periodos de 9 y 18 días en los meses de diciembre de 2002, marzo, abril, agosto y noviembre de 2003. Además existe un debilitamiento del flujo con dirección sur en los meses de noviembre de 2002, febrero, junio y octubre de 2003, lo que permite pensar

que el flujo es menos intenso hacia el sur, lo que ocasiona una tendencia a que existan corrientes con dirección norte. La figura 46 muestra que el viento es el forzante en periodos de 7 a 9 días, que corresponde al sistema del viento sinóptico.

Análisis armónico de las corrientes superficiales

El análisis armónico de los datos de corrientes reveló que la variabilidad de las corrientes superficiales puede ser explicada hasta en un 35 % por la presencia de la marea (Fig. 31), primordialmente barotrópica (Fig. 8). En general el error en la estimación de las elipses de marea es menor a 2 cm/s..

A pesar de que los valores de los semi ejes menores de las elipses son cercanos a los errores de los diferentes instrumentos, lo interesante está en las estructuras espaciales que se forman y que tienden a ajustarse a la batimetría, sobre todo cerca de las islas y del cañón submarino, zonas donde la varianza explicada por la marea es del orden del 35 % (Fig. 31). Respecto al ajuste de las elipses con la batimetría (orientación del semieje mayor) se debe mencionar que los datos de los radares son muy ruidosos (elipses de marea están cercanas al error del instrumento), por lo cual es muy difícil tener una buena estimación de la corriente de marea, sobre todo en los extremos del área de estudio donde se espera una menor resolución.

Corrientes residuales del análisis armónico

Las FEOs (Figs. 38 a 40) permitieron descomponer las corrientes residuales del AA en modos estacionarios. El primer modo muestra que existe cierta componente en las corrientes con variaciones a lo largo de un eje norte-sur. Dichas variaciones se intensifican en periodos del orden de 18 y 9 días. Solamente las variaciones de 9 días se asocian muy bien a las variaciones de baja frecuencia del viento (Fig. 46) producto de la intensificación del campo de viento en el Sistema de la Corriente de California.

Sin embargo, al realizar espectros de potencia para los modos más energéticos (Fig. 36), se encontró que los modos 2 y 3 presentaron significativamente poca energía, es decir son similares; dicha similitud también se observa en la varianza total de cada modo (12 % y 10 % respectivamente), lo que significa que a la técnica de FEOs le resulto muy difícil obtenerlos, ya que presentan energía en bandas de frecuencia contiguas.

Independientemente de la similitud de los modos 2 y 3. Las variaciones alrededor del campo medio para estos modos muestran estructuras que asemejan a meandros en la zona (modo 2, Fig. 39) y a movimientos perpendiculares a la línea de costa (modo 3, Fig. 40).

Condición Santa Ana

Los vientos provenientes de tierra y escasos en humedad (Tabla VI) generaron características en circulación superficial perpendiculares a la línea de costa dentro de la primer mitad del área de estudio. El primer modo de los FEOs (Fig. 38) que muestra variaciones a lo largo de un eje norte-sur fue persistente en la condición Santa Ana (Fig. 45(a)), razón por la cual se observó flujo al sur durante la condición Santa Ana de marzo (Fig. 41).

Respecto al campo medio durante los eventos Santa Ana de marzo y octubre de 2003 (Fig. 44), se observó que la estructura de las corrientes superficiales es perpendicular a la costa y con mayor intensidad durante el evento de octubre.

Esto sugiere que el Santa Ana de octubre fue más intenso que el de marzo. Sin embargo, los registros meteorológicos indican justo lo contrario, el evento Santa Ana de marzo fue más intenso que el de octubre (Tabla VI). Simplemente que en marzo el primer modo era más intenso y fuertemente positivo, respecto a octubre, donde la estructura espacial cambia totalmente de signo. En tanto que en octubre se presentaron eventos de flujo con dirección norte (Fig. 38), por lo cual el campo de

corrientes superficiales fue susceptible a ser modificado por forzamiento provenientes de la costa (Santa Ana). Además en octubre se registraron corrientes superficiales con dirección norte durante varias horas. Lo anterior plantea la idea de que cada Santa Ana es diferente y que no se puede generalizar midiendo sólo unos eventos, depende de la ubicación de los centros de alta presión sobre el océano Pacífico y el de baja presión sobre el continente.

VI. Conclusiones

Existe evidencia de que la circulación superficial en la region costera–oceánica entre Rosarito y San Diego es forzada principalmente por la marea (35 % de la varianza total) y secundariamente por el viento en escalas sinóptica y diurna.

Los promedios mensuales de corrientes no mostraron flujo con dirección norte, así como tampoco mostraron giros. Sin embargo, si existe evidencia de intensificación de las corrientes medias mensuales por efecto de intensificación de los vientos, siendo marzo el mes con flujo más intenso hacía el sur.

Existe evidencia con base en las funciones empíricas ortogonales de que las corrientes superficiales de baja frecuencia presentan variaciones importantes en 9 y 18 días. Las variaciones alrededor de los 9 dias son producto de la influencia del campo de viento en la zona. Sin embargo, para la variación de 18 dias no se encontró un forzante atmosférico.

La condición Santa Ana fue más intensa en marzo de 2003 en comparación a octubre del mismo año, sin embargo, en octubre su influencia en las corrientes superficiales fue más marcada debido a que existen inversión en el flujo, el cual normalmente es con dirección sur.

La influencia de los eventos Santa Ana registrados, sobre las corrientes medidas con radares se caracterizó con base en el segundo modo de las FEOS bajo esta condición. Sin embargo, esto fue posible, gracias a que se contaba con datos meteorológicos para corroborar las estructuras y fechas de ocurrencia de los eventos.

A. Radar de alta frecuencia: estimación de corrientes superficiales.

Las tecnologías basada en el corrimiento Doppler son una excelente opción cuando se requiere tener mediciones confiables de corrientes superficiales; tal es el caso de los perfiladores ADCP (de sus siglas en inglés: Acoustic Doppler Current Profiler) y de los radares de alta frecuencia (RAF). La presente sección describe el método para estimar corrientes superficiales a partir de mediciones con RAF; sin embargo, una descripción más completa de la teoría se puede encontrar en Crombie (1955), Lipa y Barrick (1983), Gurgel (1994), Graber *et al.* (1997) y Paduan y Graber (1997).

La estimación de corrientes superficiales a partir de mediciones con radares de alta frecuencia se basa en el principio de reflexión difusa de las ondas de Bragg (Ec. 20), es decir, un radar de alta frecuencia emite un pulso electromagnético de cierta longitud de onda λ_E , el cual es reflejado por olas que tienen justo la mitad de la longitud de onda de la onda emitida (figura 47). Estas ondas reflectoras son llamadas ondas de Bragg y tienen una longitud de onda dada por

$$\lambda_{Bragg} = \frac{\lambda_E}{2} \text{sen}(\theta_i) \quad (20)$$

donde: θ_i es el ángulo de incidencia, en el caso de un radar instalado en tierra $\theta_i = 90^\circ$.

El espectro de potencia de la señal recibida es similar al de la figura 48. La posición de los picos espectrales es simétrica en ausencia de corrientes superficiales, la frecuencia del corrimiento (f_B) respecto de la frecuencia de emitida (f_o) es dado por

$$f_B = \pm \frac{2C_0}{\lambda_E} \quad (21)$$

donde: $C_0 = \sqrt{g\lambda_{Bragg}/2\pi}$ representa la velocidad de fase de los reflectores.

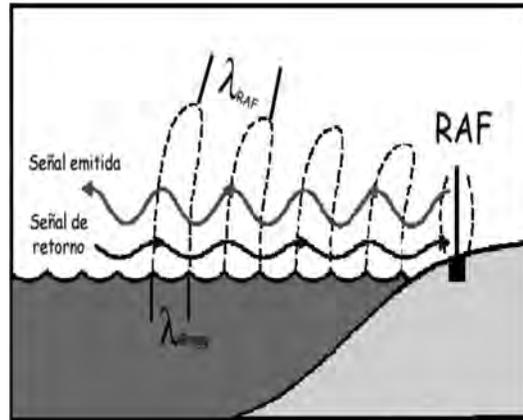


Figura 47: Esquematzación de las ondas de Bragg.

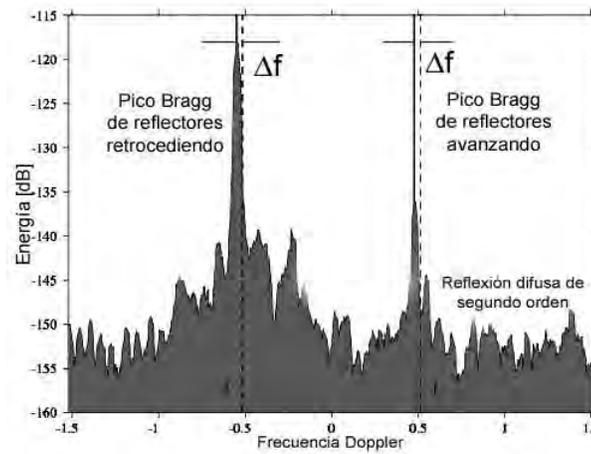


Figura 48: Espectro Doppler de una señal recibida. Modificado de Paduan y Graber (1997).

Crombie (1955) demostró que el corrimiento Doppler Δf del pico espectral, es una medida de la corriente que transporta la onda de Bragg. El pico espectral teórico es desplazado en una cantidad

$$\Delta f = 2V_r/\lambda_E \quad (22)$$

donde: V_r es la magnitud de la componente radial de la corriente estimada.

El vector de la corriente (Fig. 49(d)) se estima a partir de la combinación de por lo menos dos vectores radiales (Fig. 49(b), 49(c)) de distintos radares, con esto se resuelve la ambigüedad en la dirección de la corriente estimada. Los vectores radiales

para el caso de dos sitios de radar, como el de la figura 49 son:

$$R_m = u \sen \theta_m + v \cos \theta_m \quad (23)$$

$$R_s = u \sen \theta_s + v \cos \theta_s \quad (24)$$

donde: θ_m y θ_s son los ángulos entre las antenas y cierto punto de observación en el océano, esto con respecto al norte.

Las componentes de velocidad para el caso anterior se expresan en términos de las componentes de velocidad radial

$$V_p = \frac{R_m + R_s}{2 \cos(\Delta/2)} \quad (25)$$

$$V_n = \frac{R_m - R_s}{2 \sen(\Delta/2)} \quad (26)$$

$$\Delta = \theta_m - \theta_s \quad (27)$$

Las componentes de velocidad zonal y meridional (u, v) se obtienen a partir de

$$u = V_p \sen \phi + V_n \cos \phi \quad (28)$$

$$v = V_p \cos \phi - V_n \sen \phi \quad (29)$$

$$\phi = \frac{\theta_s + \theta_m}{2} \quad (30)$$

donde: ϕ es el ángulo del bisector formado por las componentes de velocidad radial, medido a partir del norte en el sentido de las manecillas del reloj.

Dada la sustitución de (25) y (26) en (28) y (29) se obtiene la expresión del vector velocidad (u, v) en términos de velocidad radial

$$u = \frac{R_m \cos \theta_s - R_s \cos \theta_m}{\sen \Delta} \quad (31)$$

$$v = \frac{R_s \sen \theta_m - R_m \sen \theta_s}{\sen \Delta} \quad (32)$$

Cabe mencionar que existen dos trabajos diferentes (Lipa, 2003; Trujillo, 2004) que toman en cuenta los errores en las mediciones radiales para llegar a una solución óptima de las ecuaciones 23 y 24. Sus métodos, aunque un poco diferentes entre sí, se basan ambos en el criterio de cuadrados mínimos (Brandt, 1976) para la estimación de la corriente superficial. Tales trabajos reportan sólo mediciones de dos radares, pero los métodos que presentan son generales y pueden aplicarse a un número mayor (en principio ilimitado) de radares.

La solución general y óptima para estimar la corriente superficial cuando se tienen más de 2 radares observando un punto la plantea Gurgel (1994). Se parte de escribir en forma matricial el sistema de ecuaciones resultante, que se obtiene de manera similar a como se obtuvieron las ecuaciones (23 y 24):

$$\begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_1}{\sigma_1} & \frac{\text{sen } \theta_1}{\sigma_1} \\ \frac{\cos \theta_2}{\sigma_2} & \frac{\text{sen } \theta_2}{\sigma_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\cos \theta_N}{\sigma_N} & \frac{\text{sen } \theta_N}{\sigma_N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1/\sigma_1 \\ R_2/\sigma_2 \\ \vdots \\ R_N/\sigma_N \end{bmatrix} \quad (33)$$

La solución se encuentra por cuadrados mínimos y, debido a que la desviación estándar aparece explícitamente en las ecuaciones, el resultado que se obtiene da más peso a aquellas mediciones que presentan una varianza más pequeña.

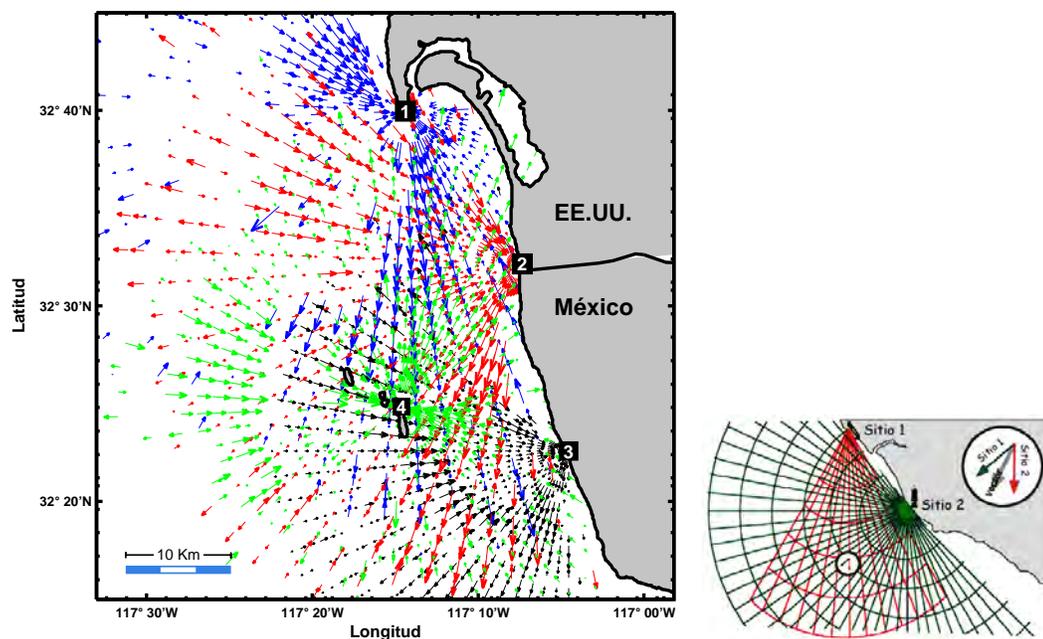
Existe otro método que, aunque no reduce los errores por cuadrados mínimos, es mucho más sencillo de llevar a la práctica. Si llamamos:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \text{sen } \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \text{sen } \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_N & \text{sen } \theta_N \end{bmatrix} = A; \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = U; y \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_N \end{bmatrix} = b \quad (34)$$

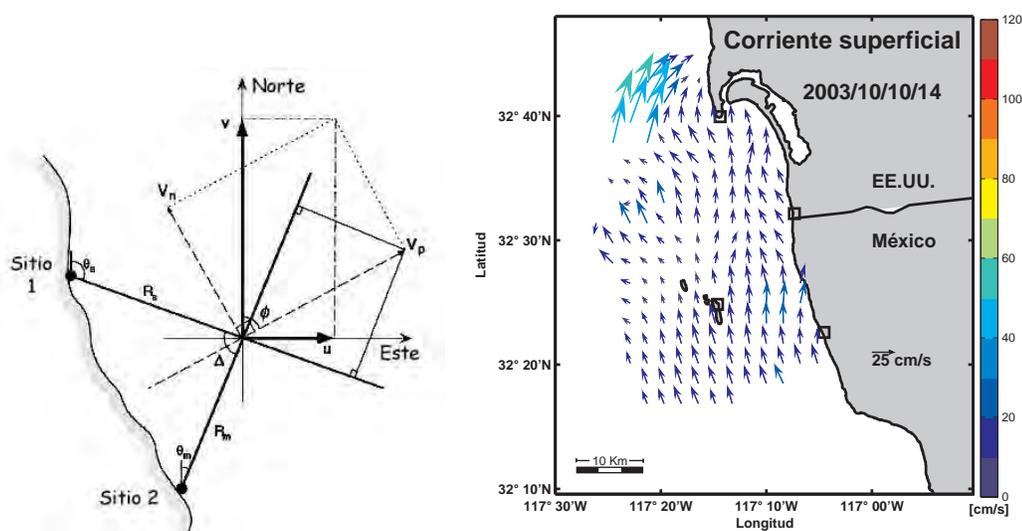
Entonces, este último método consiste en encontrar U mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{U} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (35)$$

En la presente tesis se usó este método.



(a) Componente radial de la corriente estimada por cada (b) Forma gráfica de obtener
antena vectores resultantes



(c) Estimación de corrientes resultantes
a partir de 2 sitios de observación

(d) Corrientes resultantes

Figura 49: Estimación de corrientes superficiales con radares de alta frecuencia.

Las elipses de las figuras (50 y 51) representan la dilución geométrica (espacial) de la precisión en la medición de corrientes o GDOP (Geometrical Dilution of Precision). Dichas figuras son cortesía de D. Barrick (CODAROS) y E. Terril (SCRIPPS). La interpretación es la siguiente. Los sitios de los radares HF costeros (Point Loma e Imperial Beach) se representan con círculos azules, en tanto que el sitio de Islas Coronado es el de color rojo. Lo interesante en las siguientes figuras no es el tamaño absoluto de las elipses, si no el tamaño relativo que hay entre ellas en el mismo panel, es decir la estructura espacial. Los dos primeros paneles de estas figuras muestran las dimensiones normalizadas de una elipse representando la resolución a lo largo de la costa (a lo largo del eje x) y hacia afuera de la costa (a lo largo del eje y). Dicha dirección es dibujada en forma arbitraria entre los sitios 1 y 2 (Fig. 50) ó 1, 2 y 3 (Fig. 51). Las elipses establecen que la resolución de los datos de los radares depende de la dirección, las elipses tienden a ser redondas justo cuando la resolución en ambas direcciones tiende a ser similar.

El panel inferior izquierdo de las figuras (50 y 51) es la resolución del vector resultante, es decir las corrientes superficiales estimadas al utilizar 2 ó 3 sitios de radar. Dicho panel es la raíz cuadrada de la suma cuadrática de los dos paneles superiores.

Los tres paneles mencionados hasta el momento constituyen la calidad de los datos. El panel inferior derecho de las figuras (50 y 51) representa el GDOP por si mismo.

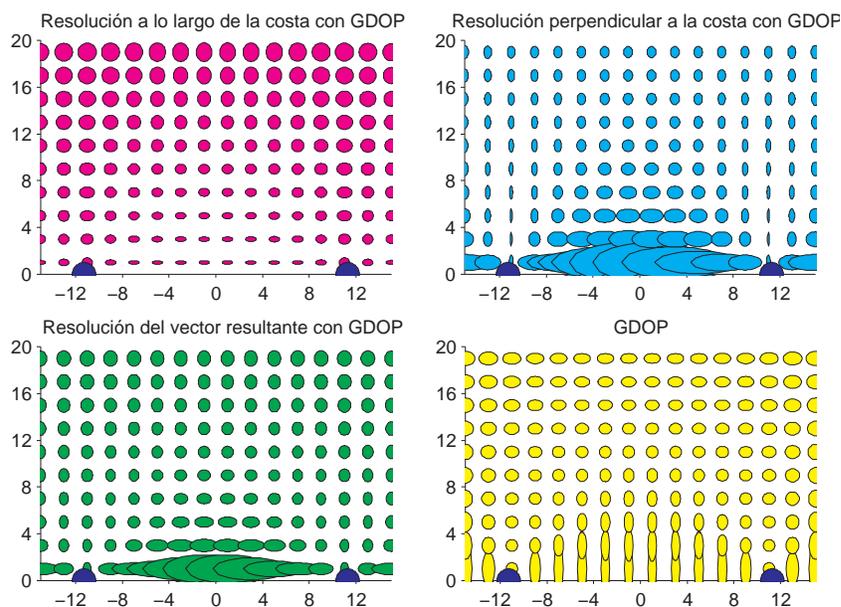


Figura 50: Factor GDOP para dos sitios costeros. Se consideran los sitios de Point Loma e Imperial Beach. Variación a lo largo de la costa de la resolución (Sup. Izq.) y perpendicular (Sup. Der.). Estructura espacial de la resolución de las corrientes superficiales (Inf. Izq.). GDOP (Inf. Der.). Cortesía D. Barrick y E. Terril.

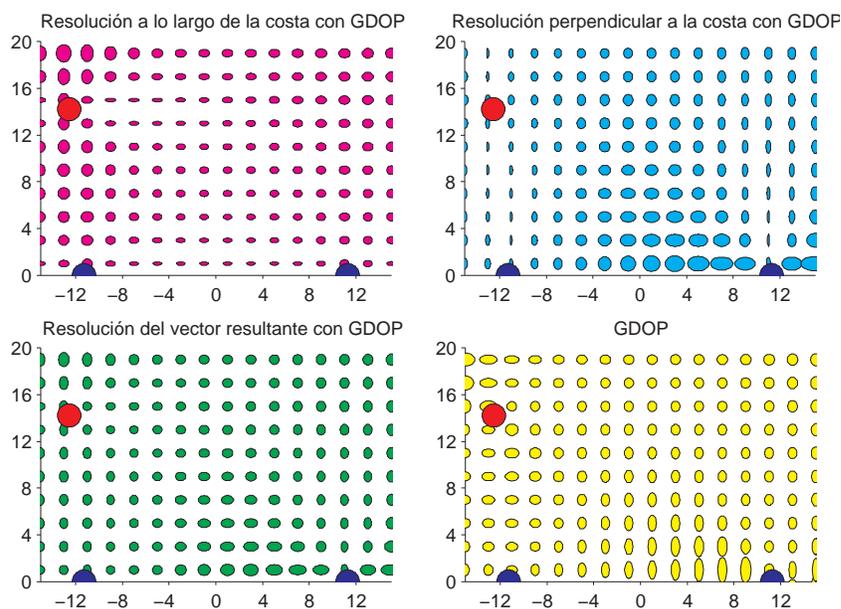


Figura 51: Factor GDOP para tres sitios de radares HF. Se consideran los sitios de Point Loma, Imperial Beach e Islas Coronado. Variación a lo largo de la costa de la resolución (Sup. Izq.) y perpendicular (Sup. Der.). Estructura espacial de la resolución de las corrientes superficiales (Inf. Izq.). GDOP (Inf. Der.). Cortesía D. Barrick y E. Terril.

Referencias

- Alvarez-Sánchez, L. G., Godínez-Sandoval, V. M., y Lavín-Peregrina, M. F. (1990). Dispersión en la franja costera de Tijuana, Baja California. *Ciencias Marinas*, **16**(4): 87–109.
- Banke, E. G. y Smith, S. D. (1971). Wind over ice and over water in the Beaufort sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **76**(30): 7369–7374.
- Bjorkstedt, E. y Roughgarden, J. (1997). Larval transport and coastal upwelling, an application of HF radar in ecological research. *Oceanography*, **10**(2): 64–67.
- Brandt, S. (1976). *Statistical and Computational Methods in Data Analysis*. North-Holland, 2da. edición. ISBN 0 7204 0334 0. 414 pp.
- Candela-Pérez, J. (1982). *Corrientes en el Estrecho de Johnstone, B. C., Canadá, durante la primavera y el verano de 1973*. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, Ensenada, B. C., México. 208 pp.
- Carrillo-Berumen, R. M. (1998). *Dinámica Sedimentaria en las Inmediaciones de la Obra de Toma de la Central Termoeléctrica Presidente Juárez en Rosarito*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Baja California. 134 pp.
- Castro-Valdez, R., Parés-Sierra, A., y Marinone-Moschetto, S. (2003). Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002, en el océano frente a California y Baja California. *Ciencias Marinas*, **29**(3): 275–281.
- Crombie, D. D. (1955). Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*, **175**: 681–682.

- Durazo-Arvizu, R. y Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progr. Oceanogr.*, **54**: 7–31.
- Elizarrarás, Vargas. S. R. (1986). *Determinación de la dirección del transporte litoral predominante*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Baja California. 71 pp.
- Emery, J. W. y Thomson, R. E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon. ISBN 9 780080 314341. 634 pp.
- Geernaert, G. L. (1999). *Theory of air–sea momentum, heat and gas fluxes*. En: Air–Sea Exchange: Physics, Chemistry and Dynamics. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Kluwer. 578 pp.
- Godin, G. (1988). *Tides*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, Ensenada, B. C., México. 290 pp.
- Gonella, J. (1972). A rotary–component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series. *Deep–Sea Research*, **19**: 833–846.
- Gordon, R. L. (1996). *Acoustic Doppler Current Profiler*. RD Instruments, San Diego, Ca. E. U. A. Segunda edición. 54 pp.
- Graber, H. C., Haus, B. K., Chapman, R. D., y Shay, L. K. (1997). HF radar comparisons with moored estimates of current speed and direction, expected differences and implicaciones. *J. Geophys. Res.*, **102**(C8): 18749–18766.
- Gurgel, C. W. (1994). Shipborne measurement of surface current fields by HF radar. *L'Onde Électrique.*, **74**(5): 54–59.

- Hartmann, D. L. (2001). *Objective methods of data analysis*. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington., Seattle, Washington, E. U. A. Class notes: ftp eos.atmos.washington.edu/pub/dennis. Octubre, 2004.
- Haus, B., Graber, H. C., y Shay, L. K. (1997). Synoptic measurement of dynamic oceanic features. *Oceanography*, **10**(2): 45–48.
- Hernández-Walls, R. (1986). *Circulación inducida por viento en la zona costera*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Baja California. 69pp.
- Hickey, B. M. (1979). The California Current System, hypotheses and facts. *Progress in Oceanography*: **8**, 191–279.
- Hu, H. y Liu, W. T. (2003). Oceanic thermal and biological response to Santa Ana winds. *Geos. Res. Letters*. **30**(11): 1596, doi:10.1029/2003GL017208.
- Kaihatu, J. M., Handler, R. A., Marmorino, G. O., y Shay, L. K. (1998). Empirical orthogonal function analysis of ocean surface currents using complex and real-vector methods. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*. **15**: 927–941.
- Lange, B., Larsen, S., Højstrup, J., y Barthelmie, R. (2004). The influence of thermal effects on the wind speed profile of the coastal marine boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*. **112**: 587–617.
- Leal, J. C. y Lavín-Peregrina, M. F. (2002). Comparacion del viento costero y marino de la región norte del golfo de california durante invierno de 1994. *GEOS*, **22**(1): 12–17.
- Lipa, B. (2003). Uncertainties in SeaSonde current velocities. *Proc. of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology*, páginas 1–6.

- Lipa, B. y Barrick, D. E. (1983). Least squares methods for extraction of surface currents from codar crossed loop data, application at arsloe. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **8**(4): 226–253.
- Lynn, R. J. y Simpson, J. J. (1987). The California Current System: the seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, **92**(C12): 12947–12966.
- Mascarenhas-Da Silveira, A., Castro-Valdez, R., Martínez-Díaz de León, A., y Gil-Silva, E. (2003). Observación de vientos Santa Ana en la Bahía de Todos Santos e Isla Guadalupe, Baja California en febrero de 2002. *Ciencias Marinas*, **29**(3): 275–281.
- Muñoz-Barbosa, A., Gutiérrez-Galindo, E. A., Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., y Sandoval-Salazar, G. (2004). Trace metal enrichment in surficial sediments of the Northwest coast of Baja California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, **48**: 587–603.
- Neal, T. C. (1992). *Analysis of Monterey Bay CODAR-derived Surface Currents*. Tesis de Maestría, Naval Postgraduate School, Monterey, California. 96 pp.
- Paduan, J. D. y Cook, M. S. (1997). Mapping surface currents in Monterey Bay with CODAR type HF radar. *Oceanography*, **10**(2): 49–52.
- Paduan, J. D. y Graber, H. C. (1997). Introducción to high-frequency radar, reality and myth. *Oceanography*, **10**(2): 36–39.
- Parés-Sierra, A., Mascarenhas-Da Silveira, A., Marinone-Moschetto, S. G., y Castro-Valdez, R. (2003). Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, **30**(6): doi 10.1029/2002GLO016176.

- Pavía-López, E. y Reye-Coca, S. (1983). Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la bahía de Todos Santos, B. C. Mex. *Ciencias Marinas*, **9**(1): 151–167.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using *t-tide*. *Computer and Geosciences*, **28**: 929–937.
- Prandle, D. (1997). *Tidal and wind driven currents from OSCR*. *Oceanography*, **10**(2): 57–59.
- Preisendorfer, R. W. y Mobley, C. D. (1988). Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography. *Número 17 en Developments in Atmospheric Science*. ELSEVIER, Seattle, Washington, E. U. A. 426 pp.
- Ramos-Rodríguez, S., Ocampo-Torres, F., Nava-Button, C., y Lizarraga-Arciniega, R. (2001). *Condiciones oceanográficas y meteorológicas extremas durante el niño 1997–1998, en Rosarito, B. C. En III Congreso Internacional de la AMIP. AMIP. Veracruz, México, 11-13 Octubre.*
- Reeves, R. W., Godshall, F. A., y Pytlowany, P. (1983). *Meteorology*. En: F. A. Godshall y R. G. Williams, editores, A climatology and oceanographic analysis of the California Pacific outer Continental shelf region, *página 1182*. NOAA and U.S. Department of the Interior.
- Reyes-Coca, S. y Parés-Sierra, A. (1983). *Análisis de las componentes principales de los vientos superficiales sobre la bahía de Todos Santos*. *Geof. Int.*, **22**(2): 179–203.
- Reyes-Coca, S., Vogel, G., Pavía, E., y Parés-Sierra, A. (1983). *Synoptic effects on*

- the local winds in Todos Santos Bay: a case study.* Monthly Weather Review, **111**: 1494–1500.
- Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., Orozco-Borbón, M. V., Muñoz-Barbosa, A., y Canino-Herrera, S. R. (1995). *Distribución de DBO y bacterias en la costa fronteriza México–EUA.* Ciencias Marinas, **21**(4): 415–426.
- Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., y Alvarez-Borrego, S. (1998). *Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California–Mexico border.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, **46**:475–481.
- Sierra-Carrascal, E. (2003). *Influencia de las brisas en las corrientes superficiales a lo largo de la zona costera oceánica entre Rosarito, B. C. y Punta Loma, California, E. U. A.. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Baja California. 66 pp.*
- Smith, S. D. (1980). *Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds.* J. Phys. Oceanogr., **10**:709–726.
- Sommers, W. T. (1978). *Lfm forecast variables related to Santa Ana wind occurrences.* Monthly Weather Review, **106**:1307–1316.
- Sverdrup, H. U. y Fleming, R. H. (1941). *The waters off the coast of Southern California, March to July.* Bull. Of the Scripps Ins. Of Oceanography, **4**:261–378.
- Thompson, R. O. (1979). *Coherence significance levels.* Journal of the Atmospheric Science, **36**:2020–2021.
- Trasviña-Castro, A., Ortiz-Figueroa, M., Herrera, H., y Cosío, M. A. *En proceso. Santa ana' winds and upwelling filaments off the northern Baja California coast.* Dynamics of Atmospheres and Oceans.

Trujillo, D. (2004). Accuracy of surface current velocity measurements obtained from HF radar in Corpus Christi Bay, Texas. Tesis de maestría, Texas AM University, Corpus Christi. 17 pp.

Wu, J. (1980). Wind stress coefficients over sea surface near neutral conditions, a revisit. J. Phys. Oceanogr., 10:727-740.

Wu, J. (1983). Sea-surface drift currents induced by wind and waves. J. Phys. Oceanogr., 13(8): 1441-1451.