

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**INFLUENCIA DE LAS BRISAS EN LAS CORRIENTES SUPERFICIALES
A LO LARGO DE LA ZONA COSTERA OCEÁNICA ENTRE ROSARITO,
B.C., MÉXICO Y PUNTA LOMA, CALIFORNIA, E.U.A.**

TESIS

que para obtener el título de:

OCEANÓLOGO

Presenta:

Eduardo Sierra Carrascal

Dx1048322

Ensenada, B.C., México

Agosto del 2003.

RESUMEN

Se usaron mediciones de corrientes superficiales y vientos en la zona costera oceánica entre Rosarito, BC. y Punta Loma, CA realizadas durante enero y febrero del 2003, para evaluar la influencia que presentan las brisas sobre las corrientes superficiales. Para la medición de corrientes se utilizó un sistema de radar de alta frecuencia y un perfilador acústico mientras que el viento fue medido en dos sitios sobre la costa. La comparación de los datos de corrientes por ambos instrumentos mostró una correlación de 0.89 en la componente paralela a la costa. El análisis de vientos marcó una dirección predominante hacia el sur-este durante las horas de la brisa diurna, de las 11:00 a las 17:00 horas, con una rapidez promedio de 3 m s^{-1} . Durante las horas de la brisa nocturna, de las 22:00 a las 06:00 horas, la dirección predominante fue al sur-oeste con un rapidez media de 1.3 m s^{-1} . Los datos de corrientes superficiales se filtraron con el fin de obtener únicamente las corrientes influenciadas por las brisas. Las corrientes superficiales mostraron una alta correlación con las brisas (0.86). Se encontró que en promedio, un 5 % de la rapidez de las corrientes superficiales es influenciado por las brisas.

ADQUIRIDO por	DONACION
REG	Fecha de Ingreso 00 SEP 2006
CLASIFIC	GC287
NOTACION	S54
No EJEMS.	2003
EJEMPLAR	4
CAMPUS ENSENADA UABC	

“INFLUENCIA DE LAS BRISAS EN LAS CORRIENTES SUPERFICIALES A LO
LARGO DE LA ZONA COSTERA OCEÁNICA ENTRE ROSARITO, B.C., MÉXICO
Y PUNTA LOMA, CALIFORNIA, E.U.A.”

TESIS
QUE PRESENTA:
EDUARDO SIERRA CARRASCAL

Aprobada por:



Presidente del Jurado
Dr. Reginaldo Durazo Arvizu



Sinodal Propietario
Dr. Francisco Javier Ocampo Torres



Sinodal Propietario
Dr. Rafael Hernández Walls

Dedico esta tesis:

A mis padres Euro y Ramón por brindarme siempre con amor el apoyo necesario para construir mi felicidad y libertad.

A mi hermana Madeleine por darme la oportunidad de crecer y aprender con ella.

A mis abuelos Ángel y Beatriz por darme el ejemplo de luchar con valor y sin miedo para alcanzar lo que quiero.

A la tía Inés por mostrarme su sentido humano y ver la vida siempre con una sonrisa.

A Nicol por estar conmigo en las buenas y en las malas, por enseñarme su sencillez y a valorar lo que tengo a mí alrededor.

A los Oceanólogos comprometidos con su profesión.

Agradecimientos académicos:

A la Universidad Autónoma de Baja California, que por medio del proyecto de investigación "Circulación y Dinámica en la franja costera oceánica entre Rosarito y Tijuana, B.C., fue posible la realización de la presente Tesis.

Al proyecto de investigación "Fase I de Oceanografía por satélite" (CONACyT - DAI J002/750/00) que dio inicio a la utilización de radares de alta frecuencia para medición de corrientes en México.

Al Departamento de Oceanografía Física del CICESE y los Estudios Fox-Rosarito por darme accesibilidad a los datos que fueron utilizados en este trabajo.

A la Dirección General de Oceanografía de Rosarito de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicanos (PEMEX), Refinación-Rosarito, que brindaron el apoyo necesario en la instalación de los instrumentos y colección de la información.

A mi director, Dr. Reginaldo Durazo Arvizu, y sinodales Dr. Francisco J. Ocampo Torres y Dr. Rafael Hernández Walls, por su dirección y asesoría durante el desarrollo de este trabajo de Tesis.

A Sergio Ramos, Julio C. Figueroa, Edgar Escalante por el apoyo brindado en las actividades asociadas a la recuperación de instrumentos y la colección de datos.

A Julio Candela, Modesto Ortiz, Adán Mejía y Michelle Cordey, por darme accesibilidad, sin compromiso alguno, a los datos y programas que ayudaron a realizar este trabajo de tesis.

Agradecimientos personales:

A la Facultad de Ciencias Marinas por mostrarme la inmensidad y belleza del océano.

A mis padres Ramón y Euro, por el ejemplo que me han brindado, por ser tan grandes y por enseñarme que todo en esta vida se logra con amor.

A mi hermana Madeleine, quien me ha demostrado lo alcanzables que son las metas de la vida, por su amor, sus palabras y por crecer conmigo.

A Nicolet Arano por compartir conmigo su sencillez, humildad y amor.

A Lourdes Sánchez, Julián Tonda y Sebastián Tonda por ser mi segunda familia, por su ejemplo, cariño, apoyo y amor.

A todos las personas que me han dejado algo invaluable en la vida, aun cuando se encuentran a distancia, *su amistad*. En especial a Jorge Noguez, Aleph Jiménez "mai", Enrique Quintero "doctor", Julio Sánchez-Aldana "juli", Hiula Rodríguez "rastita", Alec Torres "maestro", Adrián Torales "shiquiting", Luis Héctor Montoya "bolero", Josué Díaz "joshua", Alonso González "gonzo", Diego Vea "primo", Paulina Cetina, Sergio Crusher, Carlos y Sergio Mariscal, Luis Flores, Sofía López, Erick Bravo "ésele", Nemer Narchi "tocayo", Oscar Guzón, Alaide Montoya, Gabriela Caloca, Leonardo de la Rosa, Karel Castro "mi prima", Ana Marichal, Isaac y Omar Díaz, Pablo Hernández, Mario Loo, Nuria Gómez, Samantha Rodríguez, Pablo Duarte, Laura Rodríguez, Angélica Félix, Mari Carmen Ruiz, Hiram Rivera, Israel Popoca, Enrique Collard, Alfonso Fajer, Eduardo Ortega, Nuria Gómez, Maria Eugenia Allende, Ángel Carrillo, Karina Vázquez, Vanessa Torres, Alin Aguilar, Jimena Malagamba.

A todos los profesores que me dieron clase, por su tiempo e invaluable profesión.

A Reginaldo Durazo por darme el ejemplo de hacer las cosas bien, con entrega y profesionalismo. También por su tiempo, paciencia y dedicación.

A Francisco Ocampo, Rubén Castro, Adán Mejía, Sergio Larios, Julio C. Figueroa, Edgar Escalante y Ana Ramírez por sus consejos y recomendaciones durante la realización de este trabajo de Tesis.

A Manuel Moreno, Toño Martínez y Rafael Hernández por dejarme en claro que la complejidad se puede volver sencilla. Y porque además de impartir excelentes clases también imparten sencillez y respeto.

A Judith Uribe y Arturo Arano por su confianza y apoyo.

A la LV generación de Oceanólogos, “hot spots”, por compartir tantas vivencias a lo largo de la carrera.

Al equipo de fútbol de la FCM simplemente por el gusto de jugar por la camiseta.

A Eliseo Almanza, Rigoberto Guardado, Roberto Millán, Karina, Mari, Rosario, Lorena, Angélica, Neli y Jazmín por su gran ayuda y accesibilidad para resolver los trámites y problemas que se presentaron durante los años de mi carrera.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. La zona oceánica costera Tijuana-San Diego	1
1.2. Justificación	2
1.3. Circulación por brisa marina	4
2. ANTECEDENTES	8
2.1. Radares HF y zona costera	8
2.2. Zona costera fronteriza México y Estados Unidos	10
3. OBJETIVOS	13
4. METODOLOGA Y ANÁLISIS DE DATOS	13
4.1. Área de estudio	13
4.2. Obtención de datos	15
4.3. Principios de operación del radar HF y ADCP	16
4.3.1 Radar HF	16
4.3.2. Principio de operación del ADCP	20
4.4. Análisis de datos	21
4.4.1 Procesado de datos Radar HF. (Radiales → Totales)	21
4.4.2 Análisis espectral y filtrado	24
5. RESULTADOS	28
5.1. Calibración y validación	28
5.2. Brisas	35
5.3. Corrientes diurnas y nocturnas	43
6. DISCUSIÓN	56

	Pág.
7. CONCLUSIONES	61
8. RECOMENDACIONES	62
9. LITERATURA CITADA	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla I. Características del período de medición.	16
Tabla II. Parámetros de las elipses de corriente. La dirección está expresada en referencia al norte geográfico. M y m representan las magnitudes del eje mayor y del eje menor de la elipse, respectivamente. Um y Vm son las componentes este-oeste y norte-sur de la corriente promedio mostrado como una línea gruesa en la figura anterior.	33
Tabla III. Promedio de la rapidez y dirección diurna y nocturna del viento en las estaciones Río Tijuana y Fox Rosarito. La dirección es de donde viene el viento.	36
Tabla IV. Estadística básica de los datos de corrientes y viento. Previo al análisis, los datos fueron filtrados con un filtro pasa-bajo para eliminar las fluctuaciones provocadas por el ruido.	42
Tabla V. Valor de las correlaciones entre radar, ADCP y Viento con datos filtrados (filtro pasa-bajo).	42
Tabla VI. Representación numérica de los promedios de las corrientes filtradas con pasa-banda y filtradas las frecuencias típicas de marea e inercial en la zona delimitada por la cobertura de las antenas HF.	52

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.	Diagrama de brisas A) Diurnas, B) Nocturnas. Las letras H (High-Pressure) y L (Low-Pressure), por sus siglas en inglés, indican presión atmosférica alta y baja, respectivamente.	5
Figura 2.	Área de estudio con la localización de los aparatos de medición, radares HF (en rojo), estaciones meteorológicas (en azul) y ADCP (en amarillo). Los contornos indican profundidad en metros (barra de colores).	14
Figura 3.	Espectro típico de la energía electromagnética reflejada por la superficie del mar. Los dos picos corresponden a señales reflejadas por el oleaje y Δf es el corrimiento Doppler asociado con la corriente superficial en dirección hacia la antena (tomado de Paduan y Graber, 1997).	19
Figura 4.	Diagrama que muestra los vectores radiales de dos sitios diferentes. (Tomado de Paduan y Graber, 1997)	22
Figura 5.	Geometría de los vectores radiales y cálculo para generar totales (tomado de Haus <i>et al.</i> , 1995). θ_s es el ángulo azimutal con respecto a la componente radial R_s de la estación 1, θ_m es el ángulo azimutal con respecto a la componente radial R_m de la estación 2. V_n y V_p son los vectores componentes para generar a partir de ellos el vector total.	22
Figura 6.	Representación de las series de tiempo de las componentes E-O y N-S a partir de la malla de datos (n=2449).	23
Figura 7.	Espectros de energía de las series de tiempo de las corrientes totales (ADCP, RADAR, y de la velocidad del viento (VIENTO) en función del período.	26
Figura 8.	Diagrama de flujo que muestra parte de la metodología utilizada.	27

	Pág.
Figura 9. Series de tiempo de radar, A) rapidez, B) dirección, C) componente Este-Oeste, D) componente Norte-Sur, y ADCP: E) rapidez, F) dirección, G) componente Este-Oeste, y H) componente Norte-Sur. La línea gruesa representa los datos filtrados (pasa-bajo) de cada serie.	29
Figura 10. Correlación entre ADCP y radar para las componentes Este-Oeste (izquierda) y Norte-Sur (derecha). La línea roja se encuentra a 45°. La línea azul representa la recta ajustada a los datos por mínimos cuadrados.	31
Figura 11. Elipses de corriente que muestran la dirección preferencial de la variabilidad. Izq. radar HF, der. ADCP.	33
Figura 12. Correlación entre los datos de corriente medidos por el ADCP y radar para la componente transversal a la costa (izquierda) y paralela a la costa (derecha). La línea roja se encuentra a 45°. La línea azul representa la recta ajustada a los datos por mínimos cuadrados.	34
Figura 13. Día típico de la dirección (izq.) y magnitud del viento (der.) durante Enero y febrero de 2002 en la estación Fox-Rosarito.	37
Figura 14. Distribución de frecuencias de la dirección del viento durante enero y febrero de 2002 en la estación Fox-Rosarito. Se grafica la frecuencia del viento de donde viene. Izquierda: Rosa de vientos. Derecha: Histograma de direcciones del viento.	38
Figura 15. Día típico de la dirección (izq.) y magnitud del viento (der.) durante Enero y febrero de 2003 en la estación Río Tijuana.	39
Figura 16. Enero y febrero de 2003. Estación Río-Tijuana. Izq. Rosa de vientos. Der. Histograma de direcciones del viento.	40
Figura 17. Diagrama de astillas de la dirección y magnitud de los vectores de a) viento, y de corrientes medidas con b) radar y c) ADCP.	41

	Pág.
Figura 18. Espectros de energía de las componentes (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur de la corriente medida con ADCP, radar y el viento en la estación de Río-Tijuana.	45
Figura 19. Espectros de energía de las componentes (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur de la corriente medida con ADCP, radar y viento en la estación Río-Tijuana.	46
Figura 20. Series de tiempo de las componentes transversal y paralelas a la costa determinadas con los datos de Radar y ADCP.	47
Figura 21. Espectros de energía de las series filtradas para la componente a lo largo de la costa.	48
Figura 22. Mapas de promedios horarios de corrientes y viento (estación Río-Tijuana) a las 0, 4, 8, 12, 16 y 20 hrs durante el período de enero a febrero de 2003. Las contribuciones de bajas ($f < 0.045$) y altas ($f > 0.038$) frecuencias, así como frecuencias de marea K1 y O1 e inerciales, han sido removidas.	50
Figura 23. Promedio de las corrientes generadas por (a) brisa diurna y (b) brisa nocturna.	51
Figura 24. (a) Correlación vectorial de las corrientes medidas con radar y el Viento. (b) Tiempo (en horas) de respuesta de las corrientes por el forzamiento del viento.	55
Figura 25. Campo de corrientes superficiales de las 04:00 horas del día 13 febrero 2003.	59

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La zona oceánica costera Tijuana-San Diego

Las corrientes superficiales del océano son altamente variables en escalas de tiempo y espacio debido a que se encuentran influenciadas por distintos procesos, como el forzamiento geostrófico, las mareas, el campo de oleaje y el viento local superficial (Durazo, 2003). Dichas corrientes son capaces de transportar materiales en suspensión como contaminantes tóxicos tanto para el hombre como para organismos marinos. Igualmente, dicho transporte puede repercutir en el éxito o fracaso en el asentamiento y/o reclutamiento de larvas de organismos.

La zona costera oceánica a lo largo de México y Estados Unidos en el Océano Pacífico, presenta en particular problemas ambientales asociados con el libre transporte de materiales y dispersión de contaminantes debido a posibles fuentes provenientes de las descargas urbanas que llegan al océano desde efluentes en "South Bay" y "Point Loma" en California, y aportes de la ciudad de Tijuana a través de su planta de tratamiento en San Antonio de los Buenos, así como por el Río Tijuana (Segovia-Zavala, et al., 1995, Sañudo-Wilhelmy, et al., 1984). La contaminación térmica y derrames de combustibles son también una fuente potencial de contaminación en las Playas de Rosarito. Con el fin de establecer medidas de prevención de contaminación, determinar las fuentes puntuales de desechos y el destino final de estos, es necesario monitorear la circulación y dispersión en la franja costera oceánica que comprende desde Rosarito hasta San Diego. La Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y el Centro de

Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) en México, y la institución oceanográfica Scripps en Estados Unidos han iniciado el monitoreo de parámetros ambientales con la finalidad de comprender la dinámica de la zona costera y proporcionar la información de línea base para lograr un adecuado manejo de esa zona costera. Se espera que estos estudios ayuden a comprender los movimientos de larvas, la dispersión e intercambios de flujo entre cuerpos costeros, como bahías, esteros y estuarios, con el océano, establecer medidas de conservación marina, y controlar de una forma adecuada los recursos pesqueros.

El núcleo de las observaciones que estas instituciones realizan está basado en la medición de corrientes superficiales utilizando técnicas novedosas (radar HF). Este trabajo presenta un análisis detallado de un subconjunto de datos (enero a febrero 2003) y estudia el efecto que tienen los vientos locales (brisas) sobre la circulación superficial en dicha región costera.

1.2. Justificación

La medición de las corrientes superficiales es útil para conocer y predecir el movimiento de flujos, modelación biológica de transporte de material, estudios de deriva superficial, interacción de corriente y oleaje, derrames de petróleo y otros contaminantes. Los mapas de corrientes pueden mostrar el lugar donde se encuentran giros, áreas de convergencia y divergencia. En tiempo real, la medición de corrientes puede ser usada para efectos de navegación, rescate, manejo de contingencias

ambientales, entre otros. Por otra parte, la escala espacial de corrientes permite hacer comparaciones de dichas mediciones con modelos de simulación numérica (Prandle, 1991).

El obtener una imagen precisa de la estructura de las corrientes superficiales del océano es por lo regular un proceso muy costoso. A través del uso de mediciones de corrientes por métodos Lagrangeanos y Eulerianos, se puede obtener la corriente superficial de un punto específico, o su trayectoria se puede trazar a lo largo de un período de observación. Esto significa que no existe un método práctico, usando estas técnicas, para obtener series de tiempo en dos dimensiones a lo largo de áreas extensas.

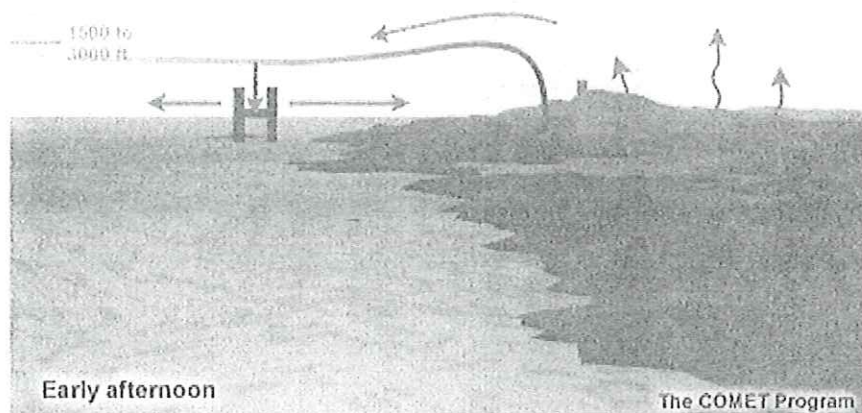
Las observaciones con radar de alta frecuencia (HF por sus siglas en inglés; Prandle, 1991; Teague et al., 1997) de las corrientes superficiales han abierto nuevas dimensiones en el estudio de la dinámica de las zonas costeras. Este tipo de instrumentación permite conocer las corrientes superficiales en una extensa superficie de la capa superficial del océano (~1 m) desde un punto fijo de observación sobre la costa (Foster, 1993). Las mediciones consisten de vectores de corriente independientes en espacio de dos dimensiones, hasta 200 km x 200 km, de una manera simultánea. Los radares HF son una herramienta útil para obtener mapas de corrientes superficiales en escalas de tiempo horarias. En la actualidad, dicha medición no puede ser obtenida de forma tan práctica por ningún otro sistema (Paduan y Graber, 1997).

1.3. Circulación por brisa marina

El sistema de radar HF es una herramienta útil para caracterizar eventos episódicos y estacionales debidos a forzamientos locales. Un forzamiento importante lo presenta el viento sobre las corrientes superficiales. Dicho forzante se presenta en la zona costera en forma de brisa, y se caracteriza por generar dos diferentes tipos de circulación durante el día: la brisa diurna y la nocturna. El siguiente capítulo describe las características más relevantes de las brisas y su relación con las corrientes superficiales.

La brisa marina responde a las diferencias de temperatura y presión entre la tierra y el mar. Estas diferencias de temperatura entre mar y tierra son debidas a que las áreas en tierra se calientan con mayor rapidez que en el océano, pues el calor específico de la tierra es menor que el del océano. El calentamiento de la tierra produce que la densidad decrezca y se establezca un área de menor presión, y con ello, el aire se dirija hacia arriba. El aire sobre la superficie del océano es de mayor densidad y por consiguiente de mayor presión. Este gradiente de presión producido por las diferencias de temperatura entre tierra y agua, genera un viento dirigido hacia la costa, conocido como brisa marina (Figura 1). Durante la noche el gradiente de presión se invierte debido a que la tierra tiende a enfriarse con mayor rapidez que el océano, y el viento sopla hacia el mar (Foster, 1993).

a



b



Fig. 1: Diagrama de brisas a) Diurnas, b) Nocturnas. Las letras H (High-Pressure) y L (Low-Pressure), por sus siglas en inglés, indican presión atmosférica alta y baja, respectivamente.

Existen varios factores que afectan el inicio, fuerza y dirección de las brisas. Por ejemplo, las variaciones estacionales pueden producir cambios en las diferencias de calentamiento entre tierra y océano necesarios para la circulación de la brisa (Foster, 1993). Otro factor determinante es la topografía de un lugar determinado que puede, sin duda, influir en el cambio de dirección y rapidez de las brisas.

En la zona costera, la circulación atmosférica por brisa es responsable de vientos de periodicidad diurna que producen efectos importantes sobre la circulación oceánica superficial, así como en el transporte de materiales de origen antropogénico. Por lo tanto, el conocer acerca del proceso de circulación de las brisas y su efecto en las corrientes superficiales, es un tema de gran interés.

Los radares HF son particularmente útiles para medir corrientes forzadas por el viento debido a que estas corrientes tienden a ser más intensas en la superficie y a que resulta prácticamente imposible introducir instrumentos de medición a esta profundidad (Collar y Howarth, 1987). Durante fuertes vientos, y consecuentemente altos estados del mar, la dinámica del oleaje superficial se vuelve compleja debido a la existencia de factores no lineales que dificultan aún más la operatividad de instrumentos de medición cercanos a la superficie. Estos procesos superficiales, en combinación con el aumento de ruido en la señal, complican las mediciones e interpretación de las corrientes inducidas por el viento. Sin embargo, es posible utilizar diversas técnicas de análisis de datos (filtros) para disminuir el ruido de la señal y extraer información de interés específico.

En la zona fronteriza entre Rosarito y Punta Loma, el estudio de la respuesta de las corrientes ante la presencia de brisas puede contribuir a determinar los patrones de circulación y dispersión del agua costera oceánica. Es por ello la importancia del uso de los sistemas de radar a lo largo de zonas costeras impactadas por el hombre.

El presente trabajo consiste en una evaluación y análisis de las brisas diurnas y nocturnas como uno de los procesos involucrados en el forzamiento de las corrientes superficiales y circulación en la zona costera.

2. ANTECEDENTES

2.1. Radares HF y zona costera

Las corrientes superficiales presentan modos de variabilidad que pueden ser separables en términos de procesos de escala temporal. Se han realizado diversos estudios que comprueban la influencia y relación que tienen diversos forzamientos, como los son el viento, las mareas y el efecto de rotación de la tierra sobre las corrientes superficiales en las zonas costeras. Esta sección presenta un resumen de los estudios que han estado encaminados al análisis de datos de corrientes medidos con radar HF y la influencia relativa de los forzantes.

Muchos de los estudios pioneros acerca de la variabilidad de corrientes medidas con radar HF han sido realizados en la Bahía de Monterrey, California. Paduan y Rosenfeld (1996) compararon series de tiempo de corrientes superficiales obtenidas con un radar HF con series de tiempo de vientos sobre la costa y de corrientes tomadas en un punto a 10 m de profundidad. Su estudio reveló una correlación significativa entre el viento y las corrientes, caracterizadas por un flujo predominante a lo largo de la costa. Se determinó que las inversiones de las corrientes estaban relacionadas con cambios temporales, con el viento, y con el movimiento de un giro observado cerca de la bahía. Paduan y Cook (1997) describieron la evolución de las surgencias costeras a partir de cambios en la dirección del viento a lo largo de la costa. Encontraron que, a frecuencias altas, los datos de corrientes medidas con radar HF distinguen claramente los efectos de los forzamientos por viento y marea para períodos diurnos y semidiurnos. Por otra parte,

Foster (1993) y Petruncio (1993) destacaron que las fluctuaciones de las corrientes se encontraban dominadas por el forzamiento de la marea semidiurna y el efecto producido por el forzamiento de la brisa marina (diurna). Neal (1992) demostró que los patrones generales de flujo se encuentran asociados con el efecto diario de la brisa marina.

Por otra parte, Kosro y Strub (1997) realizaron comparaciones de corrientes superficiales medidas con radar y el viento costero durante el mes de mayo de 1995, cerca de Oregon, Estados Unidos. Los resultados mostraron una alta correlación entre los datos de corrientes medidas con radar y los datos de viento, al igual que con las velocidades de la corriente obtenidas con un ADCP a 7 m de profundidad. Neal (1992) realizó una comparación de mediciones obtenidas con estos dos sistemas en el período de marzo a mayo de 1992 y encontró una alta correlación para las corrientes de bajas frecuencias (períodos mayores a 10 días) y para fluctuaciones en las bandas de marea diurna y semidiurna.

Con el fin de distinguir las frecuencias de marea y viento, Prandle (1997) estudió la relación entre dichos forzamientos con las corrientes superficiales en el Estrecho Dover, entre Inglaterra y Francia. Menciona que resulta difícil distinguir las corrientes forzadas por el viento cuando las corrientes de marea son intensas pues dichos forzamientos se encuentran en una frecuencia similar. Esto comúnmente ocurre en aguas poco profundas (<20 m) (Prandle y Wolf, 1978). Experimentos realizados en zonas donde las corrientes de marea son débiles (aguas más profundas), es factible identificar

las corrientes forzadas por el viento. Los resultados obtenidos demuestran que para estas zonas ocurre el comportamiento clásico de deriva de Ekman (Prandle, 1991).

Debido a que el viento y las corrientes asociadas a éste exhiben una alta variabilidad tanto en escalas temporales como en espaciales, es generalmente difícil relacionar las corrientes superficiales con el viento (Prandle, 1993). En aguas poco profundas, como es el caso de la zona costera en estudio, el forzamiento por el viento puede ser parcialmente balanceado por desniveles superficiales, lo cual es probable que ocurra debido a la influencia de intensos vientos en la región costera entre Rosarito y San Diego.

2.2. Zona costera fronteriza México y Estados Unidos

Entre las características oceanográficas distintivas frente a Tijuana – San Diego se puede destacar la influencia de la Corriente de California (CC), caracterizada por su flujo hacia el sur, baja temperatura, baja salinidad y alto oxígeno disuelto. Esta corriente es somera (0-100 m) y tiene un flujo promedio superficial de 25 cm s^{-1} y fluye sobre una franja paralela a la costa de unos 200-400 km de ancho (Lynn y Simpson, 1987). La CC exhibe una marcada variabilidad estacional. Desde la primavera hasta el verano, y dentro de los primeros 200 km de la costa, la CC se intensifica hacia el ecuador resultado de los vientos del noroeste que favorecen las surgencias. Desde fines del otoño y durante el invierno, el flujo se intensifica hacia el norte (Lynn y Simpson, 1987). Esta corriente costera hacia el polo puede extenderse hasta 100 km fuera de la costa. La variabilidad

descrita se ha estudiado en base a datos hidrográficos; los conocimientos que se tienen de la circulación cercana a la costa son todavía incipientes ya que no ha sido posible describir las características de la variabilidad de los flujos costeros

Estudios de circulación de corta duración (Álvarez et al., 1990; Segovia-Zavala et al., 1995, Winant y Bratkovitch, 1981) han indicado que el transporte de las aguas procedentes de las descargas de agua residual ocurre en dirección sur, similar a la de la corriente medida en el sur de California (Winant y Bratkovitch, 1981). Según estos autores existen dos flujos persistentes, uno al sur durante la época de invierno, y el otro durante verano en sentido contrario. Experimentos realizados con boyas de deriva con elementos de arrastre a diferentes profundidades frente a Playas de Tijuana durante marzo 1985, mostraron que la rapidez promedio de las corrientes es de 22 cm s^{-1} , con dirección predominante hacia el sur (a lo largo de la costa), aproximadamente paralela a las isobatas.

El estudio del intercambio y transporte de agua a través de la zona oceánica costera entre México y Estados Unidos es un tema de interés para ambos países debido a la problemática de la contaminación existente a lo largo de la zona costera. En ambos lados de la frontera, grandes cantidades de materiales residuales (de uso industrial, urbano y en agricultura) son vertidas directamente al mar, en algunas ocasiones sin ningún tratamiento previo. Dichas fuentes de contaminación han sido asociadas a las descargas de agua residual tratada y sin tratar (Noble *et al.*, 2003). Las fuentes posibles

de contaminación bacterial son la descarga de la planta de tratamiento de "South Bay", la descarga del Río Tijuana, las aguas residuales pre-tratadas de la ciudad de Tijuana que son descargadas directamente hacia la playa a razón de $1.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ desde la planta de tratamiento de San Antonio de los Buenos, y alrededor de 100 descargas residuales sin control en algunos puntos habitacionales y comerciales ubicados a lo largo de la costa entre Tijuana y Rosarito. Datos de 1988 indicaban que el emisor de Punta Loma, al norte de San Diego, descargaba $8.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Durazo, 2003). Otros estudios (Zeng y Vista, 1997) han mostrado la existencia de grandes concentraciones de metales pesados, sólidos en suspensión y compuestos de DDT en puntos cercanos a las descargas.

Aunque en la actualidad existen diversos estudios sobre contaminación y circulación en la región fronteriza oceánica, la variabilidad espacial y temporal de los procesos costeros y los intercambios a través de la frontera no se encuentran bien entendidos (Durazo, 2003). Por lo tanto, se requieren estudios que logren determinar cuales son los principales procesos que influyen sobre la circulación para poder tomar medidas de acción y, con ello tener un mejor entendimiento de la dinámica y circulación costera en dicha región. En el presente trabajo se plantea una metodología para comprender la relación entre las corrientes superficiales y el esfuerzo del viento, representado como brisa diurna y nocturna, con el fin de estudiar la variabilidad temporal (a esas escalas) de las corrientes superficiales a través de la zona costera entre México y Estados Unidos.

3. OBJETIVO

Determinar el efecto de la brisas en las corrientes superficiales a lo largo de la franja costera oceánica entre Rosarito, BC, y Punta Loma, SD, durante el período de los meses de enero y febrero del 2003.

4. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Área de estudio

La zona costera oceánica en estudio está comprendida por la región delimitada entre, $117^{\circ} 36' 36''$ W, $116^{\circ} 47' 49.2''$ W y entre, $31^{\circ} 58' 12''$ N, 33° N, (Fig. 2). En la zona de estudio se encuentran las Islas Coronado a unos 10 km al oeste de la ciudad de Tijuana. Las isobatas varían desde los 10 hasta los 1000 metros de profundidad en poco menos de 20 km. Destaca la presencia de las ciudades de Tijuana, San Diego y Rosarito, con alrededor de 4,000,000 de habitantes. El riesgo potencial que existe debido a las residencias y zonas comerciales e industriales que bordean la zona costera a lo largo del corredor turístico de Tijuana hasta Ensenada, hacen que esta zona represente un gran interés para evaluar el impacto que tienen las diversas fuentes de contaminación sobre el agua de mar.

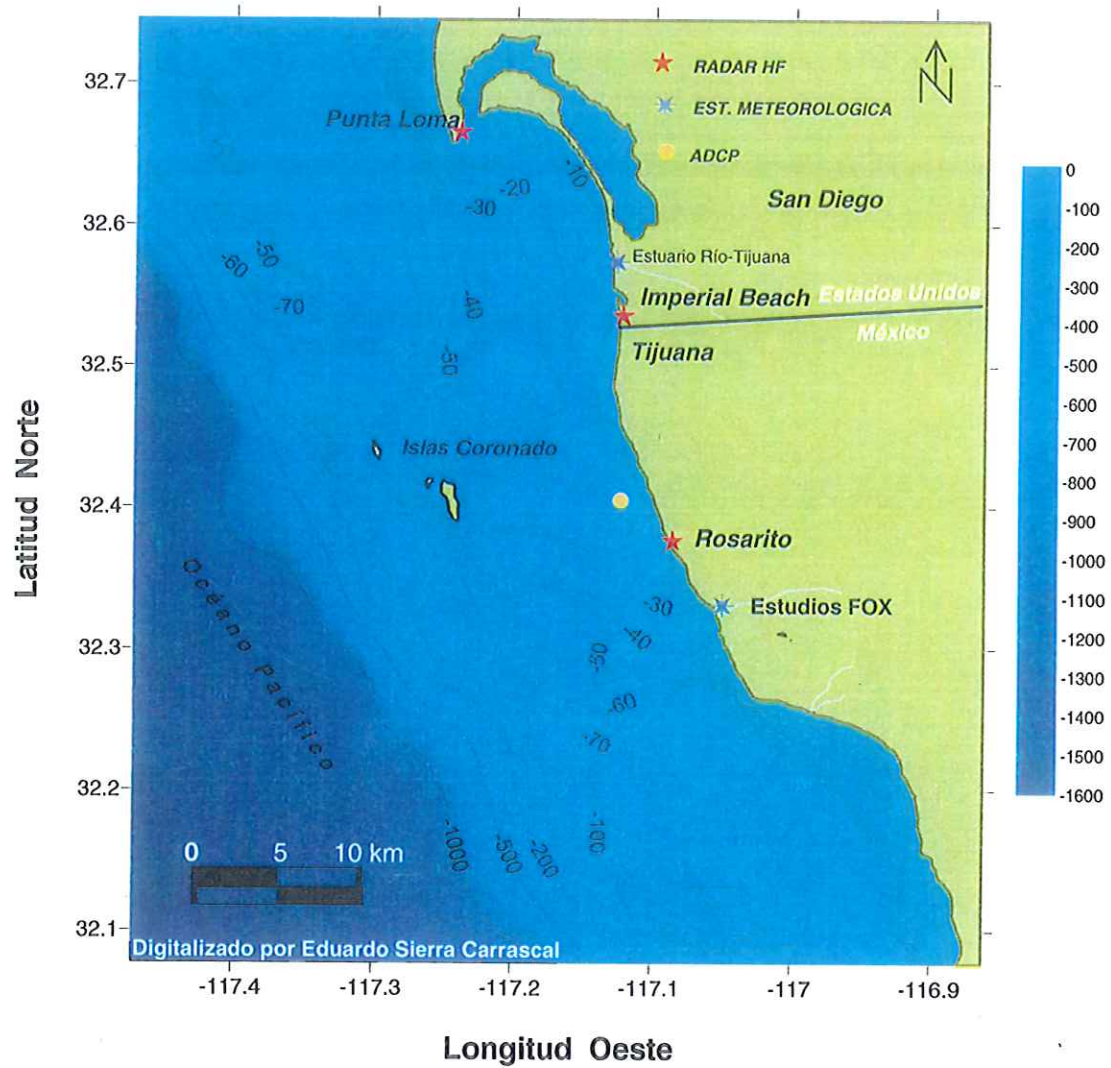


Fig. 2. Área de estudio con la localización de los aparatos de medición, radares HF (en rojo), estaciones meteorológicas (en azul) y ADCP (en amarillo). Los contornos indican profundidad en metros (barra de colores).

4.2. Obtención de datos

Los datos utilizados en el presente estudio corresponden a mediciones de corrientes superficiales con el uso de radares HF ubicados en Rosarito (32.376 N, 117.076 W), Imperial Beach (32.536 N, 117.122 W) y Punta Loma (32.666 N, 117.239 W). Los datos de las antenas de radar HF consisten en promedios horarios de componentes norte-sur y este-oeste de la corriente, con una resolución espacial de 1 x 1 km, desde el 1 de enero al 28 de febrero del año 2003 (tabla I), en un área aproximada de 40 x 40 km.

Para el mismo período se cuenta con mediciones de corrientes a ~4 m por debajo de la superficie realizadas con un perfilador acústico Doppler (ADCP) marca Nortek instalado sobre el fondo (32.405 N, 117.123 W). Los datos de ADCP fueron registrados como promedios cada 30 minutos. Para obtener los datos horarios se promediaron dos datos por hora.

Se obtuvieron registros de viento a partir de dos estaciones meteorológicas; una de ellas ubicada en los estudios Fox de Rosarito (32.331 N, 117.107 W) y la otra cerca de la desembocadura del Río Tijuana (32.574 N, 117.127 W) unos 5 km al norte de la frontera entre México y los Estados Unidos. Al igual que con los datos de ADCP, los datos de viento fueron promediados para obtener datos horarios (4 datos por hora).

Tabla I. Características del período de medición

Equipo	Período de medición	Intervalo de muestreo	Tipo de medición
ADCP	1 enero 00:00 hrs al 28 febrero 23:30 hrs (59 días)	30 min	Perfil vertical de la corriente en función del tiempo
RADAR	1 enero 00:00 hrs al 28 febrero 23: hrs (59 días)	1 hr	Mapa de corrientes en función del tiempo
ANEMÓMETRO	1 enero 00:00 hrs al 28 febrero 23:45 hrs. (59 días)	15 min	Rapidez y dirección del viento en función del tiempo

4.3. Principios de operación del radar HF y ADCP

4.3.1 Principio de operación del radar HF

El concepto del uso de pulsos de radio de alta frecuencia (HF) para estudiar la superficie del océano mediante percepción remota ha sido usado durante décadas. Crombie (1955) descubrió que existen señales de radar que son dispersadas por las ondas superficiales del océano, un medio eléctricamente conductivo. El océano es una superficie rugosa con ondas que poseen muchos períodos. Cuando la señal del radar con longitud de onda λ , llega a las olas que están entre 3 y 50 metros de largo, se refleja en distintas direcciones. Aquellas señales que se dirigen hacia, o en contra de la estación transmisora, son detectadas. Las señales reflejadas por el oleaje que son del orden de $\frac{1}{2}$ de la longitud de onda generan resonancia con las ondas electromagnéticas emitidas por el radar. A este principio se le conoce como Mecanismo Bragg. Un pico de alta energía es detectado en el espectro Doppler de la señal. El corrimiento Doppler en el pico de la

señal reflejada se utiliza para obtener una medida de la intensidad de la corriente en la dirección del radar.

La ventaja del uso del radar HF para mapear corrientes superficiales es que las olas del océano asociadas con las longitudes de onda de alta frecuencia emitidas por el radar, siempre están presentes. Para este estudio se utilizaron antenas que transmiten ondas electromagnéticas a 25 MHz, a una longitud de onda, $\lambda=12$ m. Por tanto, las olas en el océano que reflejan preferentemente dicha energía son aquellas con una longitud de onda de 6 m.

El análisis espectral de la señal reflejada muestra dos picos dominantes en el espectro de frecuencia (fig. 3). Estos picos, cuya posición es predecible, están asociados con las velocidades de fase de las olas del océano que son responsables del reflejo de la señal. Estas ondas de gravedad superficial viajan en aguas profundas a una velocidad de fase constante, C , determinada por su longitud de onda, como:

$$C = \sqrt{\frac{g L}{2\pi}} \quad (1)$$

donde g es la constante gravitacional y L es la longitud de onda. Si $L = \lambda/2$, el valor de C se conoce de antemano y la posición de los picos es predecible, de tal forma que la frecuencia Doppler, f_d , registrado por el radar está dado por (Neal, 1992):

$$\pm fd = \frac{2C}{\lambda} = \frac{2\sqrt{(gL/2\pi)}}{\lambda} = \sqrt{\frac{g}{\lambda\pi}} \quad (2)$$

En condiciones normales, sin embargo, se detectan ligeros cambios en la posición de los picos espectrales que son atribuidos a las corrientes superficiales que afectan el campo de oleaje (Crombie, 1972). El cambio de la frecuencia Doppler incluye la velocidad teórica de la velocidad de la onda más la influencia de la corriente subyacente del océano en la velocidad de la onda en una trayectoria radial (alejándose o acercándose hacia del radar). Estos pequeños desplazamientos son usados para medir la velocidad radial de la corriente superficial. El corrimiento de la frecuencia Doppler Δf ocasionado por la corriente está dado por:

$$\Delta f = 2V_{cr} / \lambda \quad (3)$$

donde V_{cr} es la velocidad en la dirección radial de la corriente (Neal, 1992). Sin embargo, el cambio observado de la frecuencia Doppler no es exactamente equivalente con la velocidad teórica de la onda.

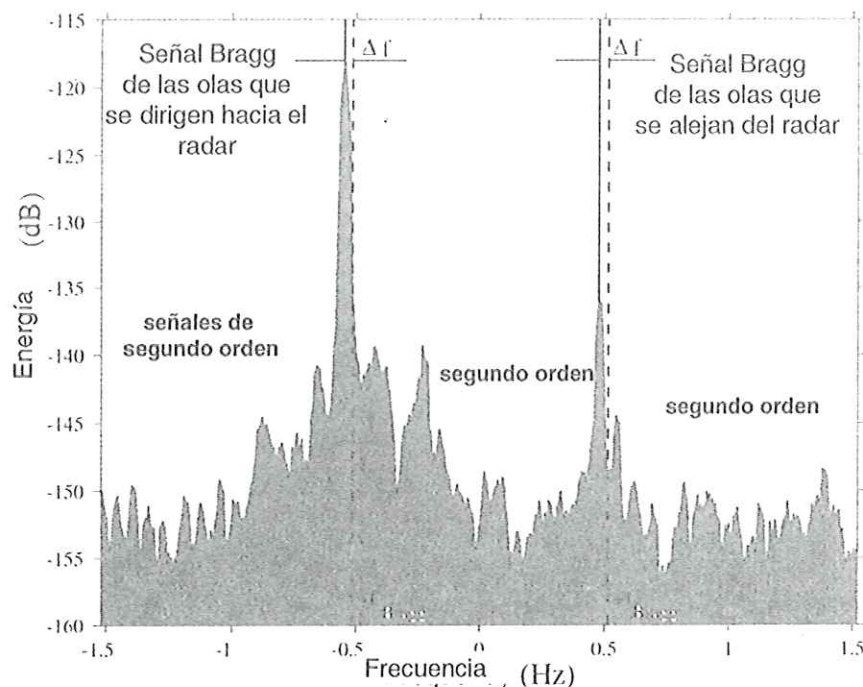


Fig. 3. Espectro típico de la energía electromagnética reflejada por la superficie del mar. Los dos picos corresponden a señales reflejadas por el oleaje y Δf es el corrimiento Doppler asociado con la corriente superficial en dirección hacia la antena (tomado de Paduan y Graber, 1997).

Es importante considerar los siguientes puntos acerca de las corrientes derivadas del radar HF: 1) Una sola estación de radar es capaz de detectar sólo la componente del flujo que viaja hacia o en contra del sitio (componente radial); 2) La profundidad efectiva de la medición depende de la profundidad de influencia de las ondas Bragg y es del orden de 1 m; 3) Para tener buenas estimaciones de las corrientes se requiere el reflejo de cientos de olas, y con ello promediar los espectros de retorno; 4) La precisión está limitada por la frecuencia de resolución del espectro Doppler y es comúnmente 2-5 cm/s; y, 5) La exactitud está controlada por numerosos factores, tales como ruidos de la señal, errores puntuales, y geometría de las componentes radiales (Chapman y Graber,

1997). El error típico en los datos de corrientes es de unos 5 a 7 cm/s. La presencia de barcos, oleaje rompiendo (turbulencia), tormentas, etc., ocasiona que la señal se encuentre contaminada. Este tipo de fenómenos incrementa el error en los datos.

4.3.2. Principio de operación del ADCP

El ADCP utiliza el mismo principio de corrimiento Doppler de una señal acústica, el cual establece que la frecuencia de vibración medida es afectada por el movimiento relativo entre la fuente de vibración y el punto de observación. Este instrumento utiliza el sonido para medir la velocidad de la corriente mediante ondas transmitidas en la columna del agua y el reflejo de señales que son dispersadas por partículas. Debido a que las partículas se encuentran en movimiento, generan un corrimiento en la frecuencia respecto a la señal emitida, corrimiento que está relacionado proporcionalmente con la velocidad de la partícula. Este corrimiento puede ser interpretado como la velocidad de la corriente de acuerdo con

$$f_0 = \frac{V f_s}{V - v_s} \quad (4)$$

donde f_0 es la frecuencia de la señal emitida por el ADCP, V es la velocidad del sonido, f_s es la frecuencia de la partícula en movimiento, y v_s es la velocidad de la fuente. En este trabajo se utilizó un ADCP que emite señales acústicas a una frecuencia de 300 kHz. Los errores que presentan las mediciones de ADCP son aleatorios e inherentes al instrumento. En la superficie, dichos errores son generalmente asociados a que la señal

de sonido se puede ver afectada por la cercanía de la atmósfera y los procesos de interacción océano-atmósfera como turbulencia causada por el rompimiento de las olas. Los errores aleatorios del ADCP, del orden de $0.5 - 1.0 \text{ cm s}^{-1}$, son función de la frecuencia de operación, la resolución vertical y el número de pulsos por ensemble. Los errores inherentes al instrumento (*sesgo*), del orden de $0.5 - 1.0 \text{ cm s}^{-1}$, dependen de diversos factores como la temperatura, rapidez promedio de la corriente, la geometría de los rayos.

4.4. Análisis de datos

4.4.1. Procesado de datos radar HF. (Radiales $\rightarrow$ Totales)

Los datos de corrientes se procesaron mediante los programas desarrollados por Mike Cook de la escuela Naval de Posgraduados de Monterey, California (<http://www.oc.nps.navy.mil/~icon>). Los datos de corriente recién obtenidos por cada una de las antenas se encuentran en forma radial, es decir, corrientes que se acercan o se alejan del sitio de transmisión. Al combinar, a lo largo de bandas de 1 km de distancia, datos de dos o más antenas, se pueden obtener las corrientes totales en una malla de celdas cuya resolución espacial se especifica a priori, tal como se muestra en la figura 4. La resolución espacial que se especificó para el cálculo de vectores totales fue de 1 km x 1 km, por lo que el número de celdas resultante fue de 2449. Los vectores cuya magnitud fuera mayor a 150 cm s^{-1} son considerados como error y fueron eliminados de las series.

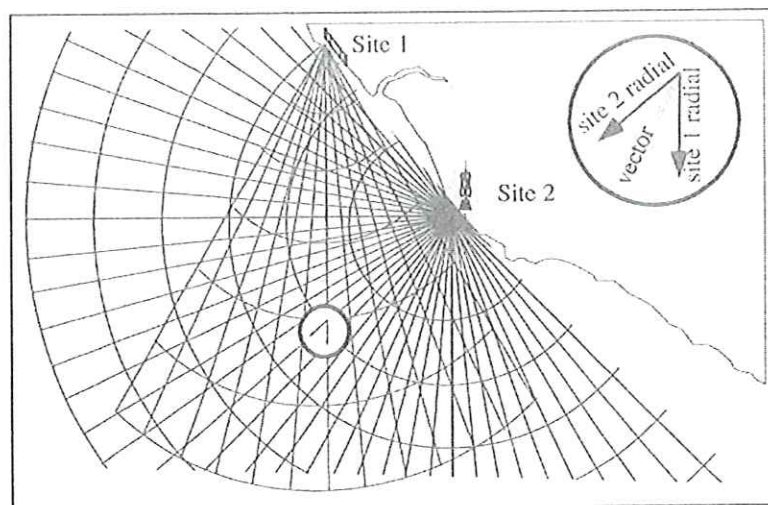


Fig. 4. Diagrama que muestra los vectores radiales de dos sitios diferentes. (Tomado de Paduan y Graber, 1997).

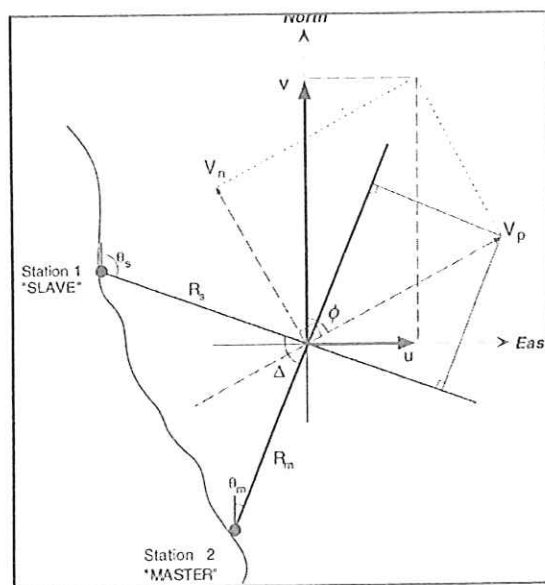


Fig. 5. Geometría de los vectores radiales y cálculo para generar totales (tomado de Haus *et al.*, 1995). θ_s es el ángulo azimutal con respecto a la componente radial R_s de la estación 1, θ_m es el ángulo azimutal con respecto a la componente radial R_m de la estación 2. V_n y V_p son los vectores componentes para generar a partir de ellos el vector total.

El cálculo de las componentes Este-Oeste y Norte-Sur de la velocidad se deduce a partir de la figura 5:

$$u = \frac{R_m \cos \theta_s - R_s \cos \theta_m}{\sin \Delta}$$

$$v = \frac{R_s \sin \theta_m - R_m \sin \theta_s}{\sin \Delta}$$

donde R es la componente radial de la velocidad, θ es el ángulo azimutal de la componente radial, Δ es la diferencia angular entre las dos componentes radiales. Para cada una de las celdas ($n=2449$) se obtuvo una medición de velocidad (u,v) cada hora, un ejemplo de las cuales se muestra en la figura 6.

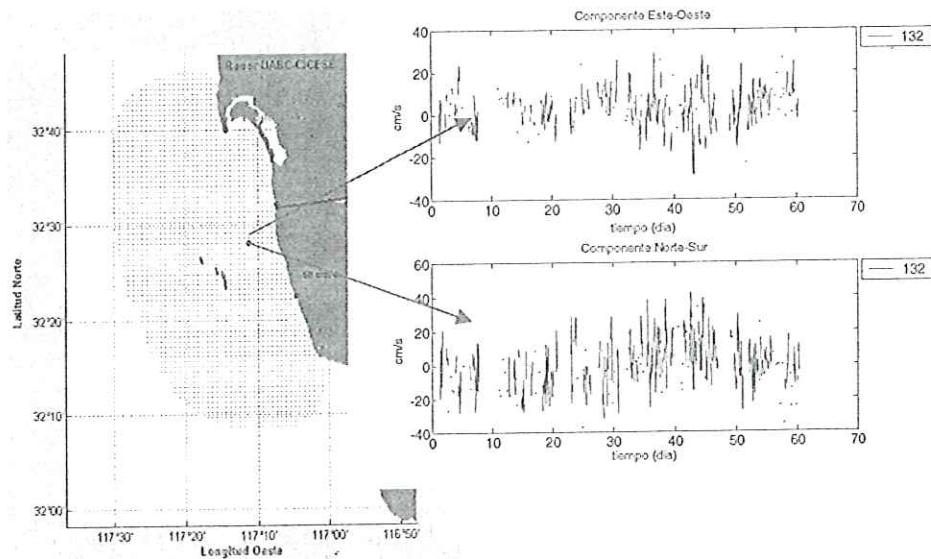


Fig. 6. Representación de las series de tiempo de las componentes E-O y N-S a partir de la malla de datos ($n=2449$).

4.4.2. Análisis espectral y filtrado

Se aplicó un análisis espectral a las componentes de velocidad este-oeste y nort-sur (u,v) de las series de tiempo de corrientes totales y de viento para determinar la contribución de las diferentes frecuencias involucradas.

Para cada serie de tiempo se aplicó un filtro pasa banda (filtro Lanczos) para extraer únicamente las frecuencias que pertenecen a los períodos diurnos. El filtro está dado por la función (Emery y Thompson, 1998):

$$H_b(\omega) = 2 \frac{\omega}{\omega_N} + 4 \sum_{k=1}^M C_k \sigma_k \cos(\pi k \omega / \omega_N) \cos(\pi k \omega / \omega_N) \quad (5)$$

donde $C_k = \frac{\sin(\pi k \omega / \omega_N)}{\pi k \omega / \omega_N}$ son los coeficientes de Fourier, con $k = \{1, 2, 3, \dots, M\}$, el

número de coeficientes de Fourier, ω_N es la frecuencia de Nyquist, ω es la frecuencia

central y $\sigma_k = \frac{\sin[2\pi k / (2M + 1)]}{2\pi k / (2M + 1)}$, son los factores de Lanczos.

Las series de tiempo resultantes contienen aún variabilidad en las frecuencias diurnas ocasionadas por corrientes de marea y corrientes inerciales. Para determinar la contribución de las componentes de marea diurnas, K1 y O1, y la de oscilaciones inerciales con período $T = 2\pi/f$, donde f es el parámetro de Coriolis, se realizó un análisis armónico en las series de tiempo de corrientes. La predicción generada con

estas componentes se restó de la serie filtrada, con lo que se eliminaron dichas contribuciones. Las series de tiempo resultantes contienen, por tanto, sólo la variabilidad producida por forzamiento del viento a la frecuencia diurna (Fig. 7). En resumen se aplicó la metodología descrita en la figura 8 para procesar los datos de corrientes y viento con el fin de obtener las corrientes influenciadas por la frecuencia diurna, en especial, las brisas marinas y terrestres.

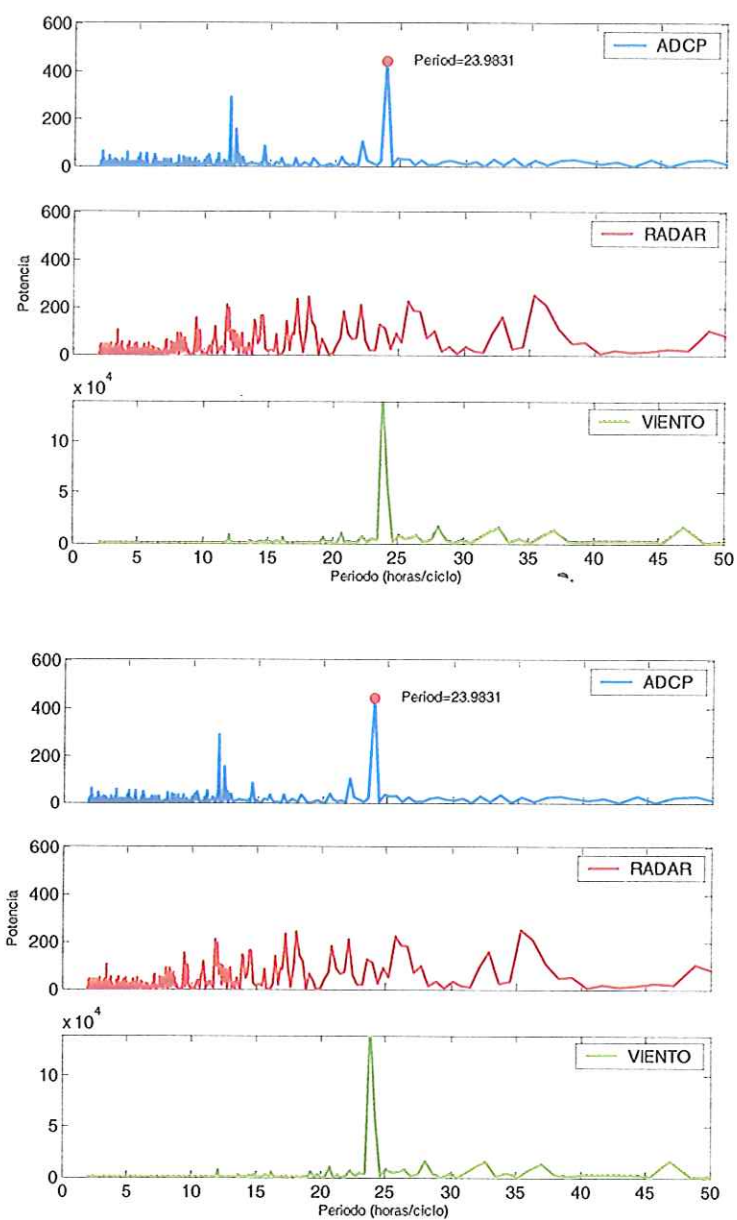


Fig. 7. Espectros de energía de las series de tiempo de las corrientes totales (ADCP, RADAR, y de la velocidad del viento (VIENTO) en función del período.

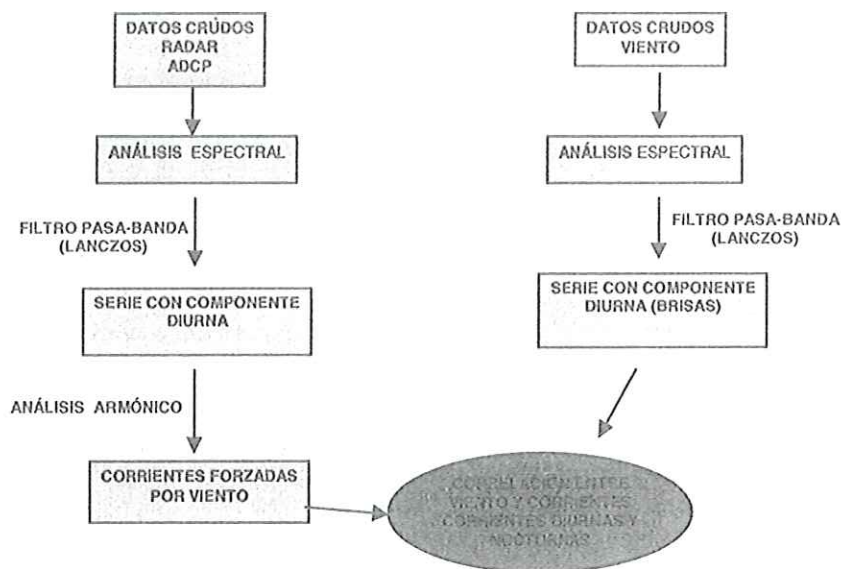


Fig. 8. Diagrama de flujo que muestra parte de la metodología utilizada.

5. RESULTADOS

5.1. Calibración y Validación

Con el fin de validar la calidad de los datos de radar HF se realizaron análisis comparativos de las mediciones de corrientes obtenidas del radar con mediciones de corrientes tomadas con un ADCP. Las mediciones de corrientes con radar y con ADCP se realizan en diferentes escalas espaciales y temporales. El radar mide en el primer metro de la superficie y la medición con ADCP más cercana a la superficie está a 4 m de profundidad. Debido a las diferencias dinámicas y a las fuentes de ruido que afectan las mediciones de corrientes a cada sistema, no se espera que sean exactamente iguales. La presencia de ruido y el método de medición del sistema de radar (razón ruido/señal), originan datos de mala calidad y por consiguiente, huecos en la serie de tiempo. Esto puede mejorarse promediando mayor cantidad de puntos en una región más extensa, es decir, disminuyendo la resolución.

Las series de tiempo de las variables de rapidez, dirección y componentes de velocidad este-oeste y norte-sur, de las series correspondientes al ADCP, así como al promedio de 9 celdas medidas con radar y cercanos a la posición del ADCP, se muestra en la figura 9. Se observa que ambos instrumentos miden la misma variabilidad de la corriente principalmente en la componente norte - sur, aunque la intensidad de las corrientes medidas con radar es mayor que aquella registrada con ADCP a 4 m debajo de la superficie. Hacia la mitad del período de observaciones, se observan diferencias

grandes en la corriente medida en la dirección este – oeste. Las corrientes medidas con radar son más intensas y tienen dirección preferencial hacia la costa (positivas).

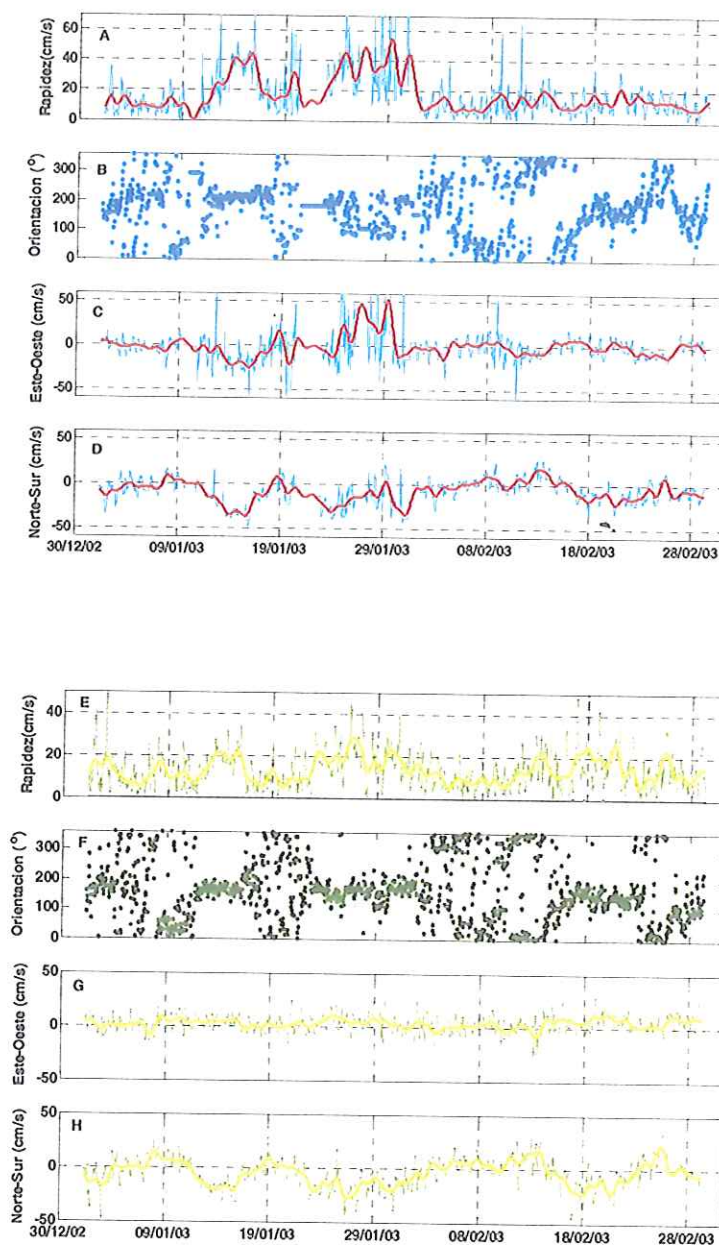


Fig. 9. Series de tiempo de radar, A) rapidez, B) dirección, C) componente Este-Oeste, D) componente Norte-Sur, y ADCP: E) rapidez, F) dirección, G) componente Este-Oeste, y H) componente Norte-Sur. La línea gruesa representa los datos filtrados (pasa-bajo) de cada serie.

La figura 10 muestra las componentes de velocidad medida con ambos instrumentos, así como la recta ideal de 45° y el ajuste por mínimos cuadrados. Como es de esperarse de acuerdo con la figura 9, la dispersión de los datos alrededor de la línea de 45° es mayor para la componente este – oeste. De igual forma, la correlación entre las componentes de la corriente medida con ADCP y radar es menor para la componente este-oeste ($r=0.20$) que para la componente norte-sur ($r=0.68$). El valor de la diferencia cuadrática media (RMS, por sus siglas en inglés) fue 14.09 cm/s para la componente este – oeste y 12.6 cm/s para la componente norte – sur.

Las diferencias entre las observaciones realizadas entre las corrientes determinadas por el radar y el ADCP se pueden deber al efecto de la estructura vertical de las corrientes, y a que las corrientes medidas por el ADCP representan la corriente a los 3.8 metros de profundidad, comparado con que el radar mide en el primer metro de la superficie del océano. Otra causa de la variabilidad observada puede ser debida a que el ADCP mide las corrientes en un solo punto mientras que la corriente del radar considerada para la comparación representa el promedio de 9 celdas alrededor de la posición del ADCP.

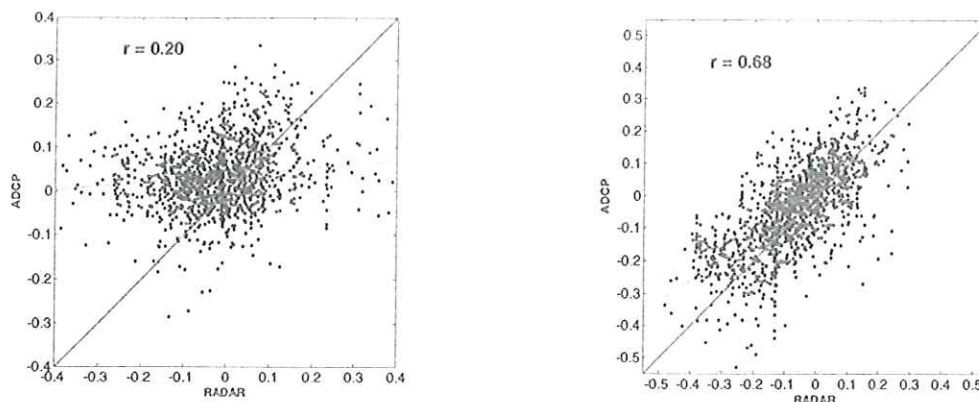


Fig. 10. Correlación entre ADCP y radar para las componentes Este-Oeste (izquierda) y Norte-Sur (derecha). La línea roja se encuentra a 45°. La línea azul representa la recta ajustada a los datos por mínimos cuadrados.

Debido a que la corriente costera tiende a orientarse a lo largo de la costa (Álvarez *et al.*, 1990) se espera que el flujo promedio de las corrientes ocurra paralelo a la línea de costa u orientado con respecto a los contornos batimétricos locales. El análisis de la elipse de corriente se utiliza para encontrar la orientación principal sobre la cual ocurre la mayor variabilidad de un flujo, y el eje principal se utiliza a menudo para definir la dirección a lo largo de la costa, mientras que el eje de menor variabilidad define la dirección del flujo perpendicularmente al eje principal (Emery y Thompson, 1998). Una técnica común para analizar las series de tiempo de algún vector es la de rotar cada series de datos a lo largo de su propios ejes principales, esto es, un nuevo sistema de coordenadas en el que la mayor parte de la varianza se encuentra asociada al eje mayor (paralelo a la costa), mientras que la varianza restante es relacionada al eje menor (transversal a la costa).

Los datos de corriente medidos con radar y ADCP fueron rotados en función del eje de máxima variabilidad definido como el eje mayor de las elipses de corriente y su representación se muestra en la figura 11. Se ha incluido la representación de la elipse de corriente en los diagramas. La tabla II resume los parámetros de dichas elipses. Se observa que para ambos casos, la magnitud de las corrientes a lo largo del eje principal (M) es muy similar. Sin embargo, la elipticidad (razón entre los ejes menor y mayor, m/M) fue mayor para los datos de corrientes medidos con radar (0.75) que para los de ADCP (0.67), lo cual sugiere una mayor variabilidad de las corrientes superficiales respecto a las medidas a 4 m de profundidad, o bien simplemente, una mayor cantidad de ruido en la señal de radar. La inclinación de los ejes es similar en ambos casos y coincide con la inclinación que presenta la costa, aproximadamente 110° con respecto al este con una corriente promedio orientada hacia el sur-este. La tabla II muestra que la velocidad media de la componente este-oeste fue mayor que la componente norte-sur.

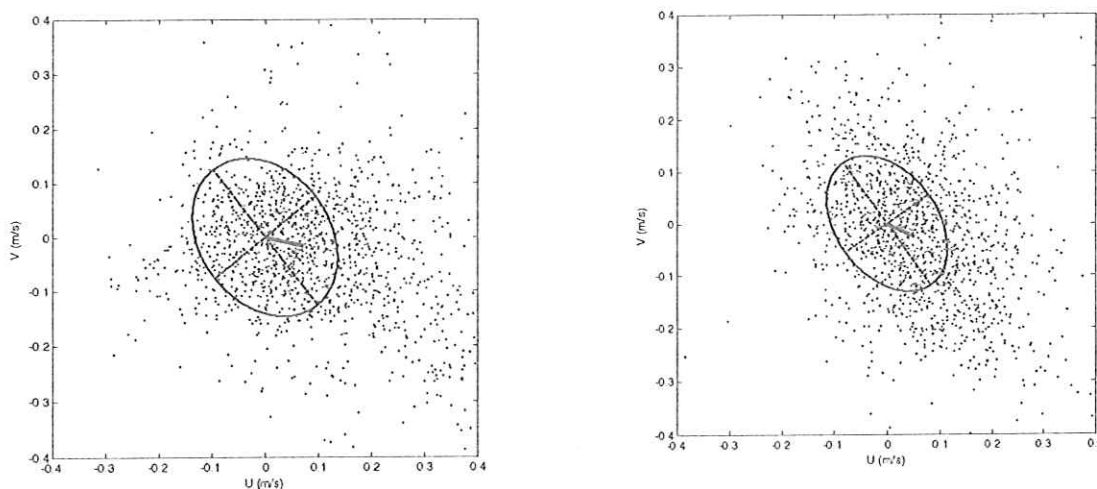


Fig. 11. Elipses de corriente que muestran la dirección preferencial de la variabilidad. Izq. radar HF, der. ADCP.

Tabla II. Parámetros de las elipses de corriente. La dirección está expresada en referencia al norte geográfico. M y m representan las magnitudes del eje mayor y del eje menor de la elipse, respectivamente. Um y Vm son las componentes este-oeste y norte-sur de la corriente promedio mostrado como una línea gruesa en la figura anterior.

	Dir	M (cm/s)	m (cm/s)	Um (cm/s)	Vm (cm/s)
RADAR HF	325	16.0	12.1	7.2	-7.6
ADCP	322	14.4	9.7	4.1	-5.5

Los datos rotados respecto a este nuevo sistema de coordenadas son mostrados en la figura 12, donde se puede observar que la correlación aumenta respecto a los datos sin rotar, en la componente norte-sur, $r = 0.89$. La diferencia cuadrática media es de 6.7 cm/s. La diferencia en inclinación entre la recta de ajuste por mínimos cuadrados y la recta ideal es de 10° . En la dirección transversal a la costa la correlación resulta similar al caso sin rotación, esto es, $r = 0.24$ con una diferencia cuadrática media de 11.1 cm/s.

Kosro y Strub (1997) muestran correlaciones entre los datos de radar y ADCP con valores de 0.84 y 0.78 en las costas de Oregon, valores menores a los reportados en este trabajo. Por tanto, a partir del análisis de validación realizado, es de esperar, dentro del rango de las diferencias encontradas, una buena confiabilidad de los datos de corrientes medidas con radar HF. Por este motivo se continuó realizando la metodología descrita anteriormente con los datos de radar HF.

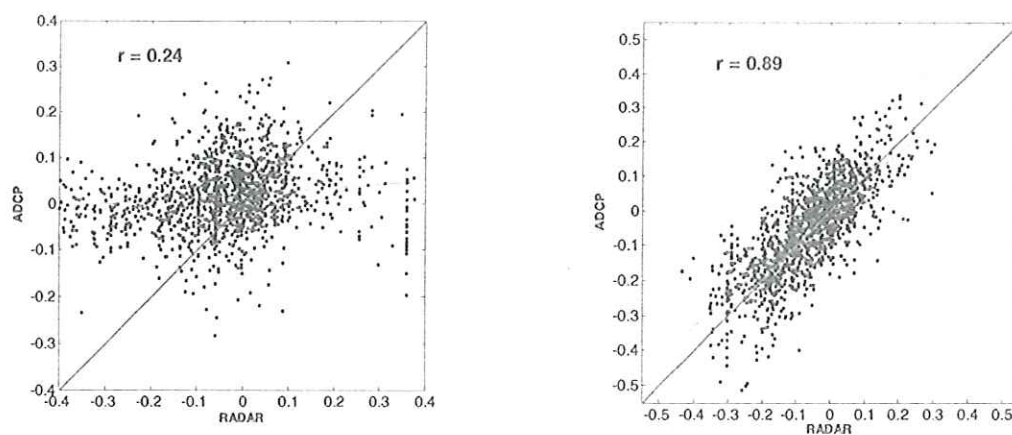


Fig. 12. Correlación entre los datos de corriente medidos por el ADCP y radar para la componente transversal a la costa (izquierda) y paralela a la costa (derecha). La línea roja se encuentra a 45°. La línea azul representa la recta ajustada a los datos por mínimos cuadrados.

5.3. Brisas

Utilizando los datos de viento en las estaciones costeras, se calculó la magnitud y dirección del viento para un día típico de los meses de enero y febrero. La determinación del período de tiempo durante el cual ocurren las brisas diurnas y nocturnas se determinó al analizar el promedio horario de la rapidez y dirección en ese día típico (Figs.13 a 16). Debido a que, tanto la intensidad como el cambio de dirección es muy evidente entre el día y la noche, se adjudicó de las 11:00 a las 17:00 horas como el período de brisas diurnas, y de las 22:00 a las 06:00 horas del día siguiente, las brisas nocturnas.

Durante los meses de enero y febrero de 2002, la rapidez promedio de las brisas diurnas fue mayor que para las brisas nocturnas (Tabla III) en ambas estaciones de muestreo. La dirección promedio en la estación Fox-Rosarito fue hacia el sureste y suroeste durante el día y la noche, respectivamente (ver figuras 13 y 14). En la estación Río-Tijuana, se encontró que la dirección promedio fue hacia el sureste durante el día y hacia el suroeste durante la noche (Figs. 15 y 16). La diferencia en rapidez y dirección en esa distancia (~15 km) a lo largo de la costa, puede ser debida a que el viento varía en diferentes localidades de acuerdo a la topografía del lugar, altura y colocación del sensor de rapidez del viento. Sin embargo, un resultado interesante es que aunque la intensidad es diferente, las horas en las que ocurre la brisa diurna y nocturna son similares en las dos estaciones.

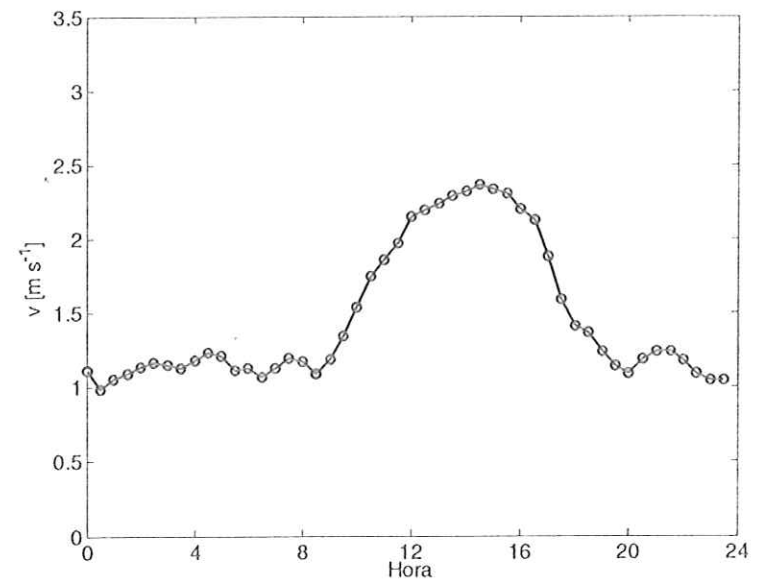
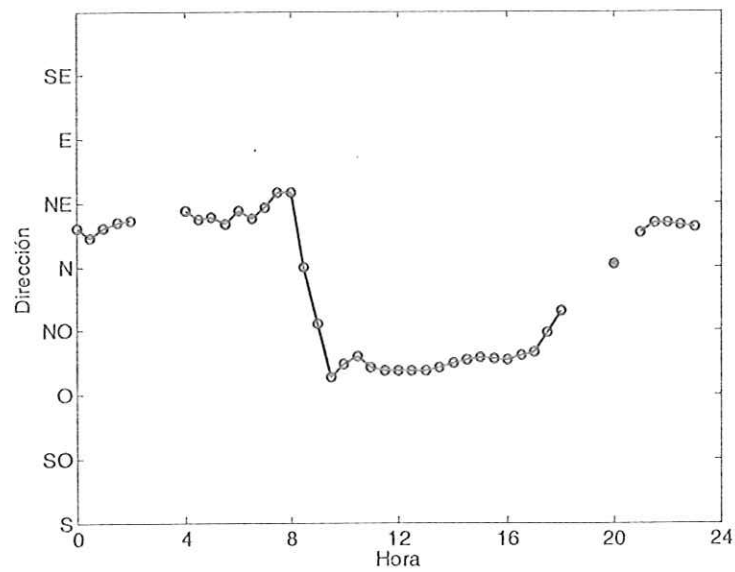
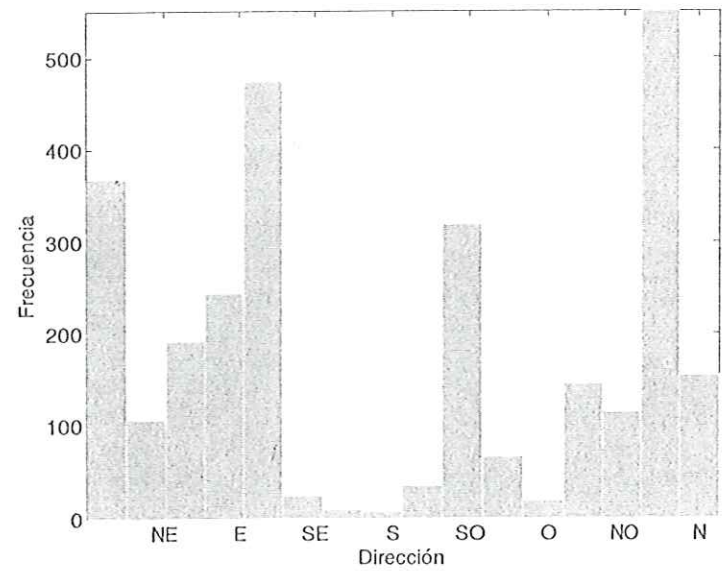


Fig. 13. Día típico de la dirección (izq.) y magnitud del viento (der.) durante Enero y febrero de 2002 en la estación Fox-Rosarito.



38

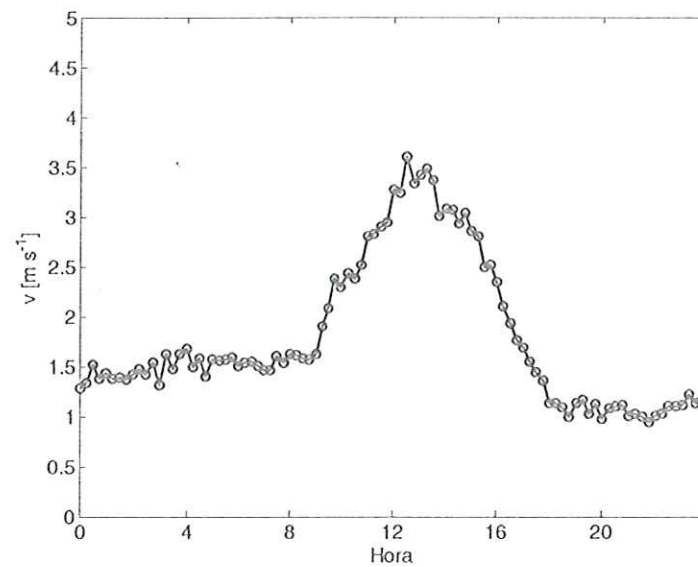
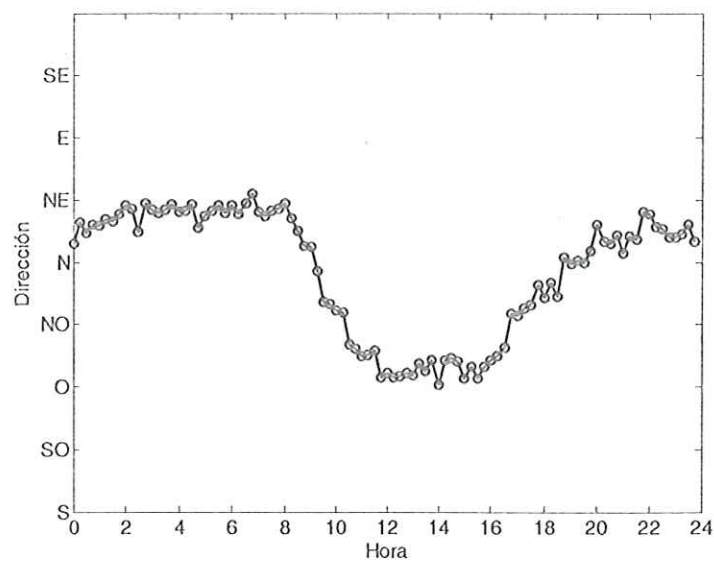


Fig. 15. Día típico de la dirección (izq.) y magnitud del viento (der.) durante Enero y febrero de 2003 en la estación Río Tijuana.

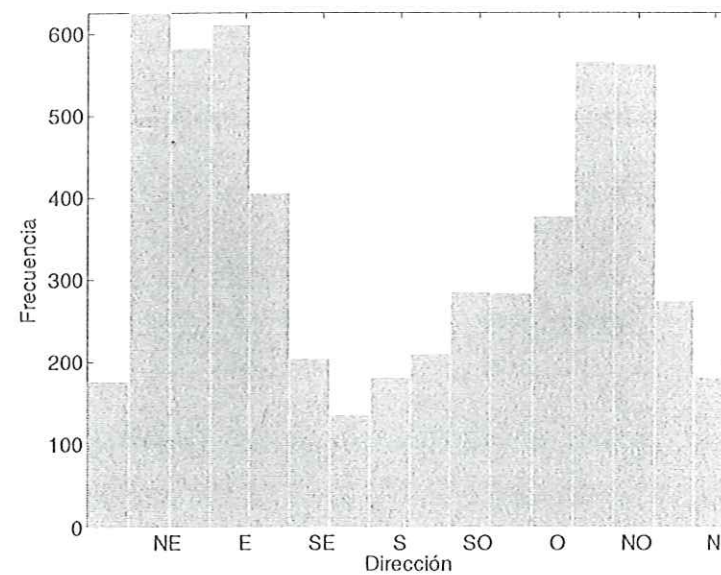
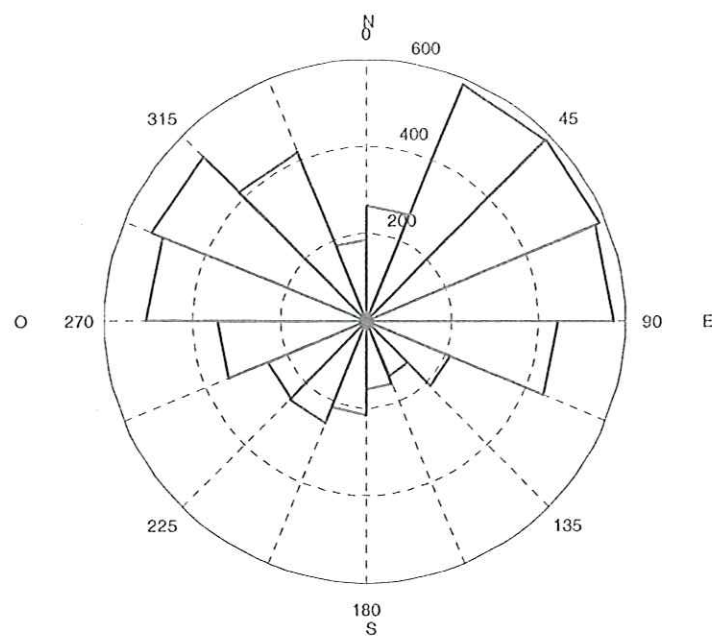


Fig. 16. Distribución de frecuencias de la dirección del viento durante enero y febrero de 2003 en la Estación Río Tijuana. Se grafica la frecuencia del viento de donde viene. Izquierda: Rosa de vientos. Derecha: Histograma de direcciones del viento.

Conocer el efecto que tiene el viento sobre las corrientes es uno de los principales objetivos del presente trabajo. Un análisis preliminar en forma de diagrama de astillas se muestra en la figura 17 para la dirección y magnitud de los vectores del viento, y de corrientes medidas con radar y ADCP. Se observa un patrón similar tanto de intensidad como en dirección entre la corriente medidas con radar y ADCP. Debido a la variabilidad del viento es difícil observar un comportamiento similar de la serie de viento con respecto a las series obtenidas con radar y ADCP. En la sección siguiente se discutirá acerca del efecto que tiene el viento, representado en forma de brisas, sobre las corrientes superficiales.

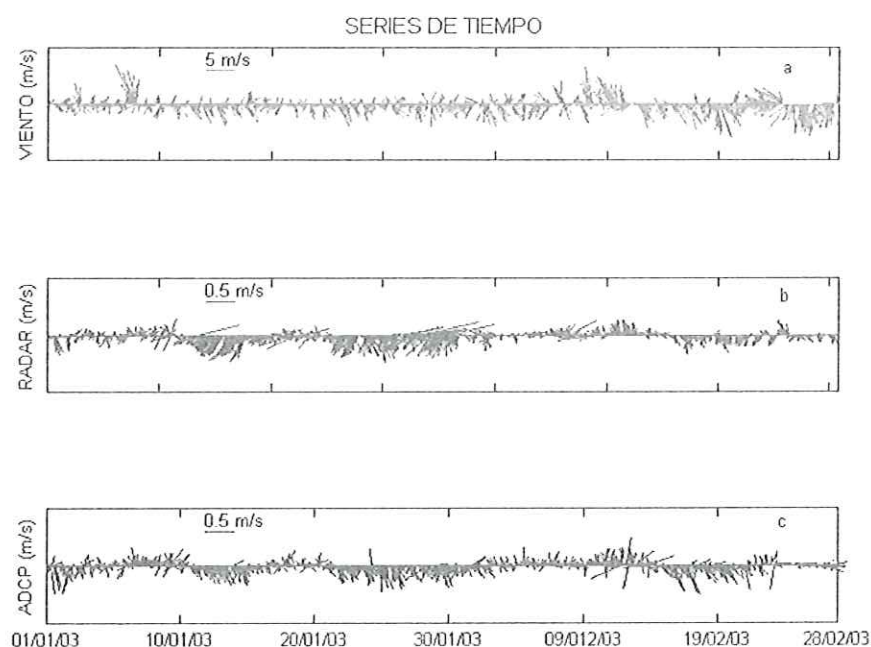


Fig. 17. Diagrama de astillas de la dirección y magnitud de los vectores de a) viento, y de corrientes medidas con b) radar y c) ADCP.

Durante el período de medición la rapidez promedio de viento fue aproximadamente 12 veces mayor que la del radar y el ADCP (ver Tabla IV). La rapidez de las corrientes medida por el radar fue relativamente mayor que la del ADCP, sin embargo la dirección promedio fue similar con una desviación de las corrientes medidas con el ADCP de aproximadamente hacia la derecha con respecto a las corrientes medidas con el radar, tal y como se muestra en la Tabla IV.

Tabla IV. Estadística básica de los datos de corrientes y viento. Previo al análisis, los datos fueron filtrados con un filtro pasa-bajo para eliminar las fluctuaciones provocadas por el ruido.

Estadística	VIENTO (m/s)	RADAR HF (cm/s)	ADCP (cm/s)
Promedio u	-0.13	-1.57	4.38
Desviación Estándar u	0.87	7.71	4.39
Promedio v	-0.81	-7.29	-3.61
Desviación Estándar v	1.11	11.29	10.81
Promedio Rapidez	0.82	7.46	5.68
Dirección promedio	260.88	257.84	320.50

Tabla V. Valor de las correlaciones entre radar, ADCP y Viento con datos filtrados (filtro pasa-bajo).

Correlación	Componente (Transversal a la costa)	Componente (Paralela a la costa)	Rapidez
RADAR HF/VIENTO	0.58	0.31	0.03
RADAR HF/ADCP	0.24	0.89	0.73
VIENTO/ADCP	0.52	0.24	0.20

5.4. Corrientes diurnas y nocturnas

Para identificar las frecuencias de las oscilaciones que introducen mayor variabilidad en las series de tiempo observadas, se obtuvieron los espectros de energía de las series de tiempo originales de las componentes este-oeste y norte-sur (Fig. 18). Los espectros resaltan picos de energía tanto en bajas frecuencias como en las componentes diurna y semidiurna. Las series de tiempo de corrientes medidas con ADCP presentan mayor energía en las frecuencias diurna y semidiurna, que las corrientes medidas con radar. La energía de la frecuencia diurna del viento se destaca principalmente en la componente norte-sur, pues a lo largo de dicha componente se encuentra la mayor variabilidad (ver Figs. 18 y 19). Existen picos energéticos grandes que resaltan alrededor de las bajas frecuencias y que pueden estar asociados a eventos de tormenta o presencia de giros periódicos.

Para lograr aislar de los registros de radar aquellas corrientes que son inducidas principalmente por las brisas diurnas y nocturnas, se aplicó un filtro pasa-banda Lanczos (ec.5). El espectro de energía resultante de la señal filtrada se muestra en la figura 19. Nótese el cambio en la escala vertical del gráfico. La serie resultante contiene aún contribuciones que corresponden a otro tipo de forzamientos tales como corrientes de marea y corrientes inerciales. Con la finalidad de eliminar estas oscilaciones de la serie, se efectuó un ajuste armónico usando las frecuencias típicas de marea diurna K1 ($f_{K1}=0.04178$ cph) y O1 ($f_{O1}=0.0387$ cph), además de la frecuencia inercial ($f_i=0.04476$ cph). Solamente se seleccionaron estas dos componentes de marea dado que son las más

energéticas en el registro. La predicción obtenida utilizando estas frecuencias fue restada de la serie. La figura 20 presenta las series de tiempo de radar y ADCP filtradas para cada componente, únicamente con la frecuencia diurna del forzamiento causado por el viento. Por lo tanto, si se obtiene un espectro de dichas series se espera que la energía se concentre en los picos diurnos de las brisas.

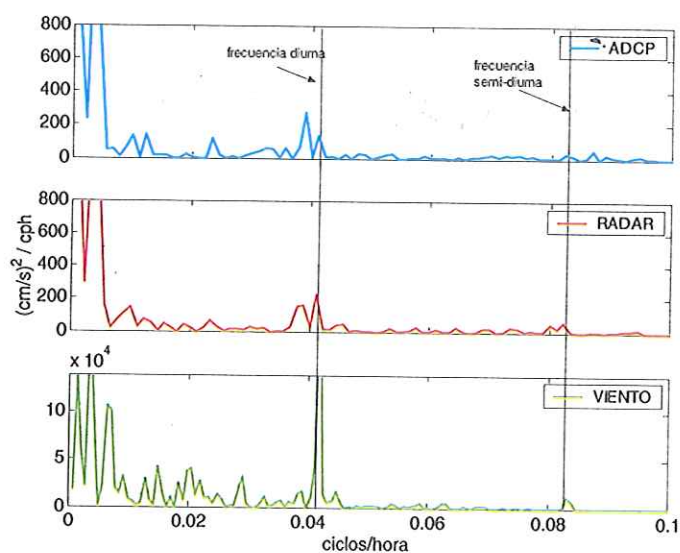
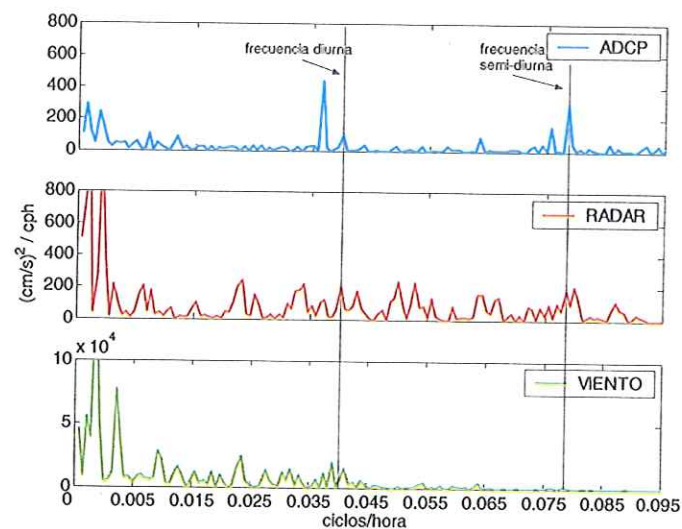


Fig. 18. Espectros de energía de las componentes (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur de la corriente medida con ADCP, radar y el viento en la estación de Río-Tijuana.

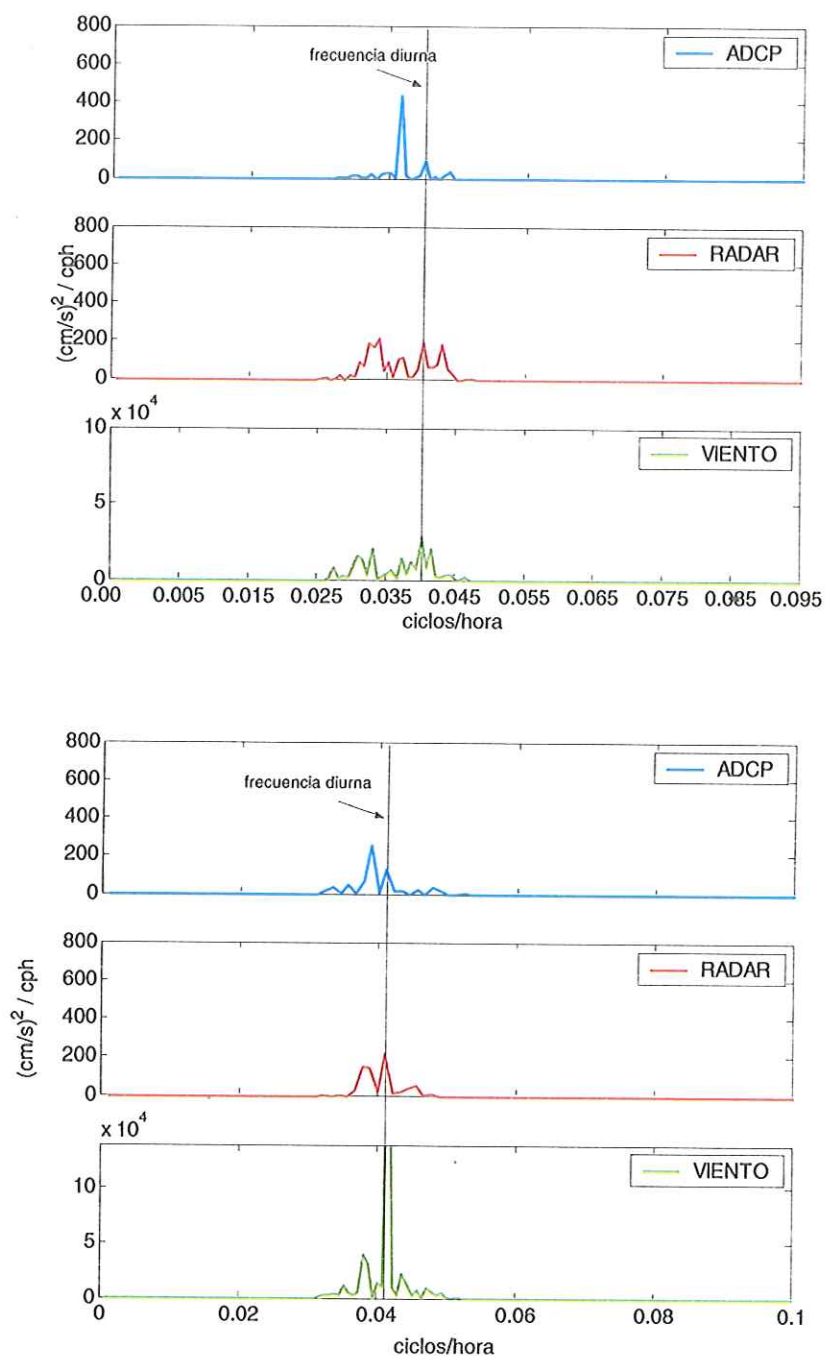


Fig. 19. Espectros de energía de las componentes (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur de la corriente medida con ADCP, radar y viento en la estación Río-Tijuana.

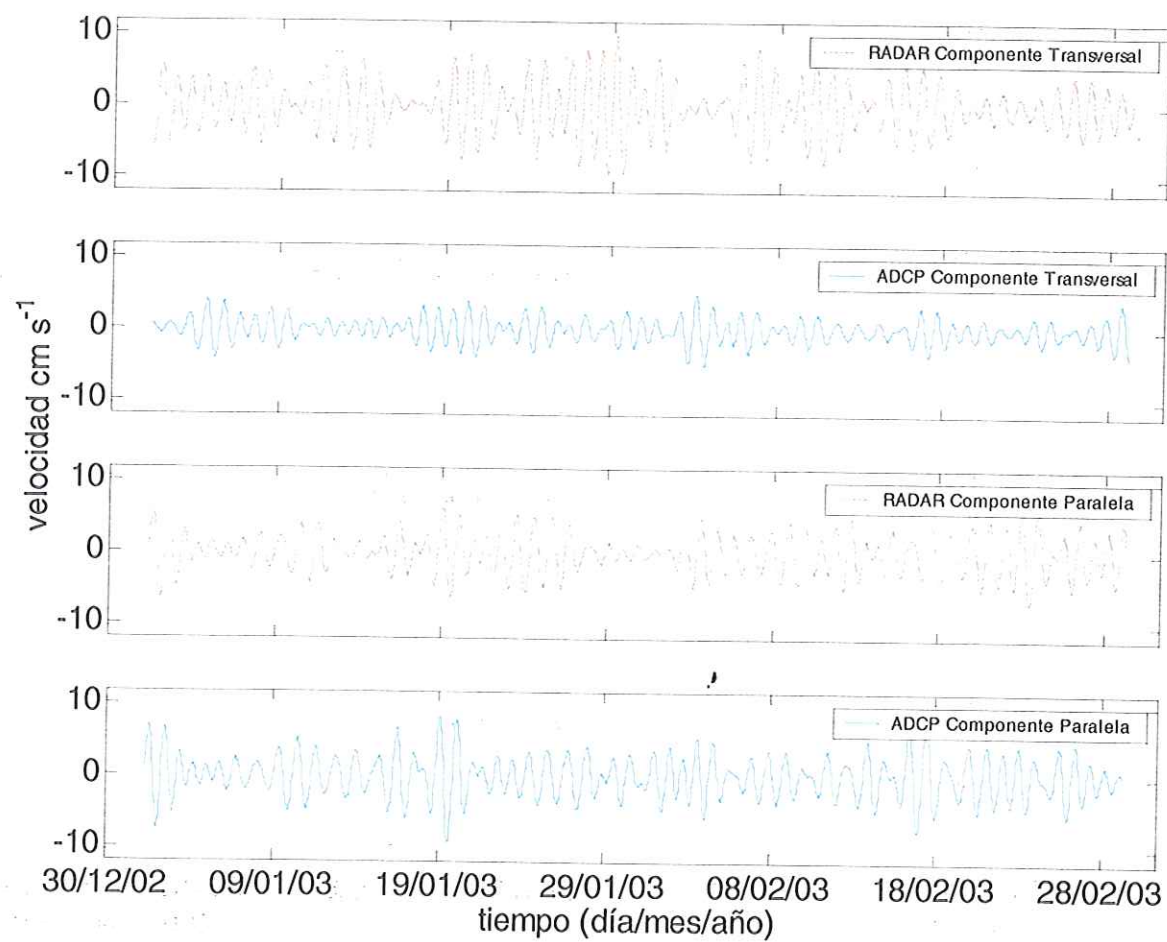


Fig. 20. Series de tiempo de las componentes transversal y paralelas a la costa determinadas con los datos de Radar y ADCP.

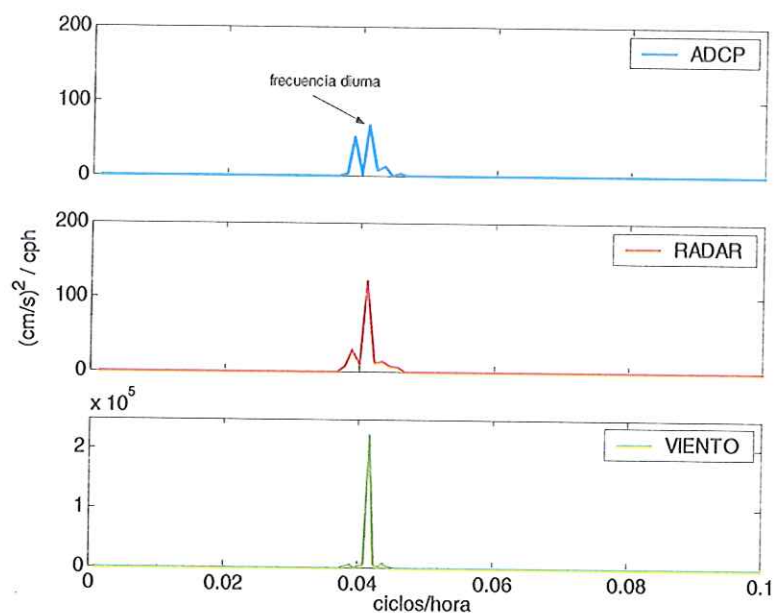


Fig. 21. Espectros de energía de las series filtradas para la componente a lo largo de la costa.

Utilizando las series de tiempo mostradas en la figura 20 se obtuvo un día típico de corrientes a cada hora de todos los días de medición. Los resultados se muestran en la figura 22 a intervalos de 4 hrs. Los promedios horarios muestran que el flujo predominante durante enero-febrero 2003 es hacia el sur, esto es, en la misma dirección predominante del viento. Alrededor de las 04:00 horas se puede observar indicios de una circulación de tipo anticiclónica entre Punta Loma y las Islas Coronado, circulación que se identifica como un giro anticiclónico hacia las 08:00 horas al norte de las Islas Coronado. Posteriormente el giro desaparece alrededor de las 12:00 horas y la corriente promedio se intensifica y orienta siguiendo el contorno de la línea de costa. A partir de las 16:00 horas los vectores de velocidad de la corriente tienden a orientarse hacia el

sureste, indicando el inicio de la brisa nocturna con una pequeña disminución de la rapidez de la corriente, al igual que la rapidez del viento. Es notable destacar que la rapidez de la corriente es persistentemente mayor unos 10 km al oeste de Punta Loma, disminuyendo en intensidad conforme viaja hacia el sur.

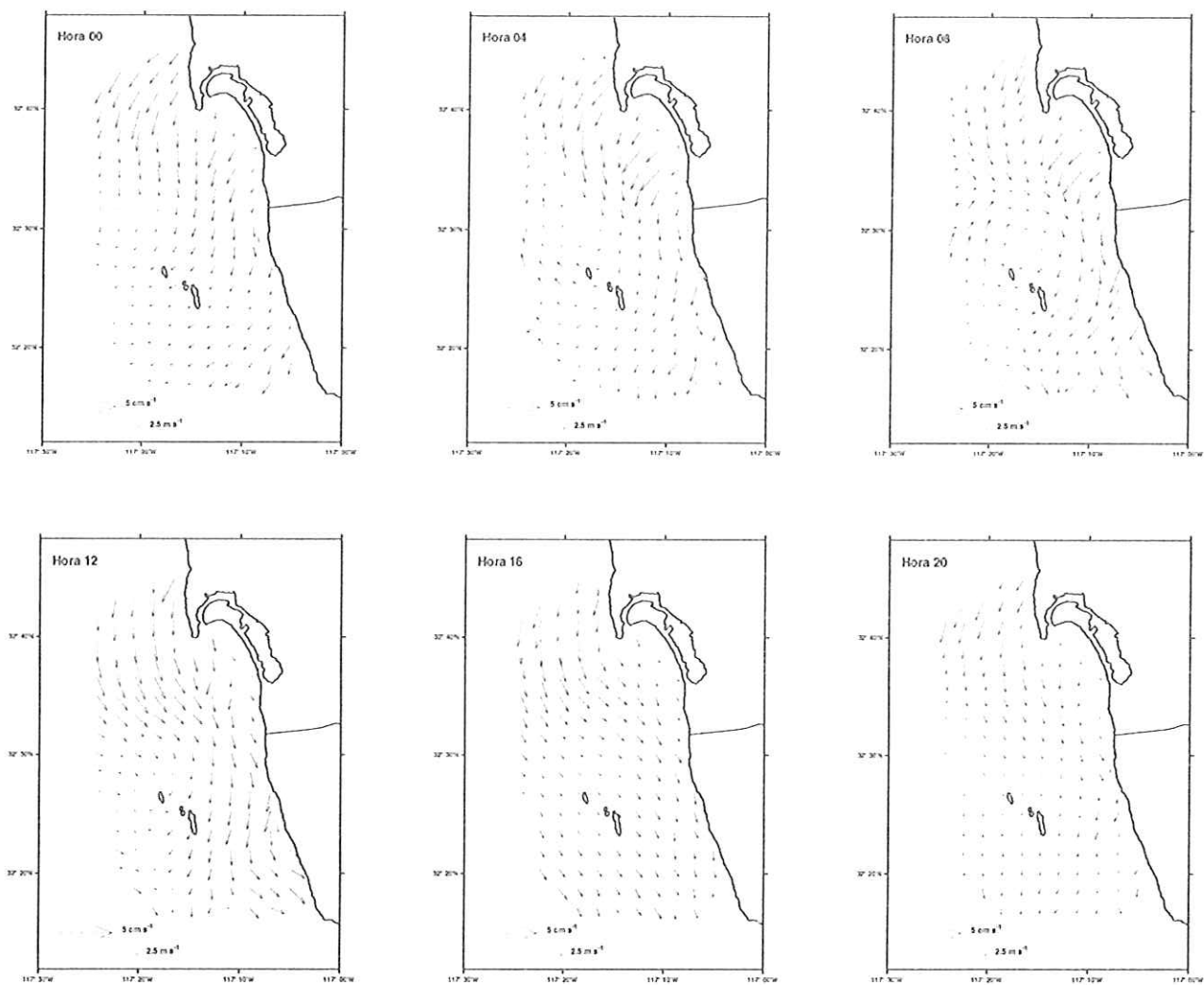


Fig. 22. Mapas de promedios horarios de corrientes y viento (estación Río-Tijuana) a las 0, 4, 8, 12, 16 y 20 hrs durante el período de enero a febrero de 2003. Las contribuciones de bajas ($f < 0.045$) y altas ($f > 0.038$) frecuencias, así como frecuencias de marea K1 y O1 e inerciales, han sido removidas.

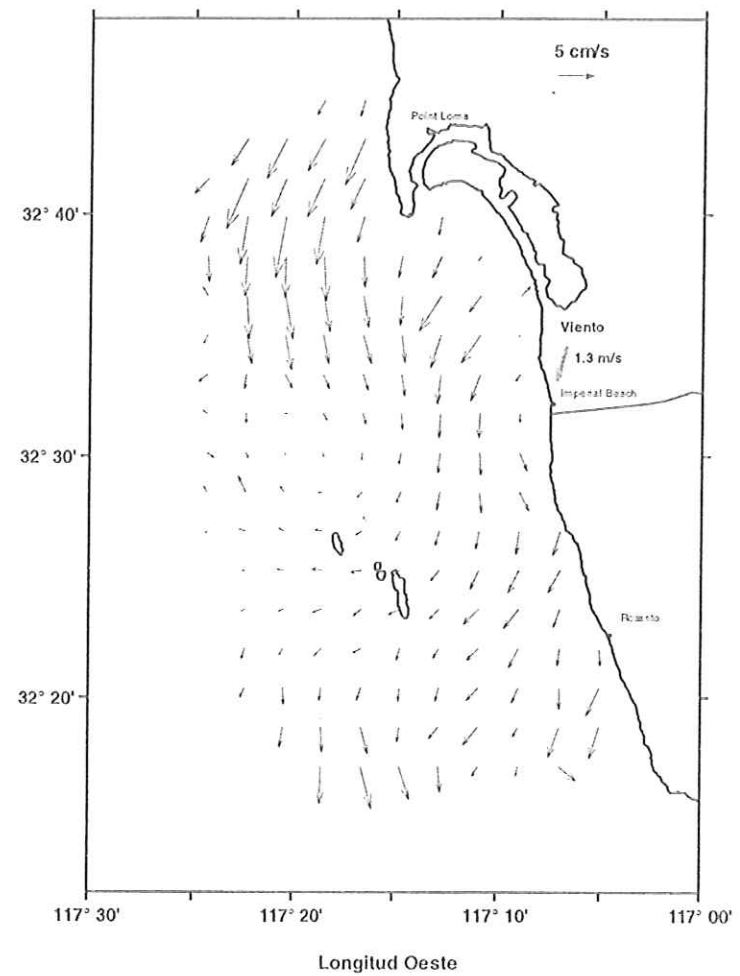
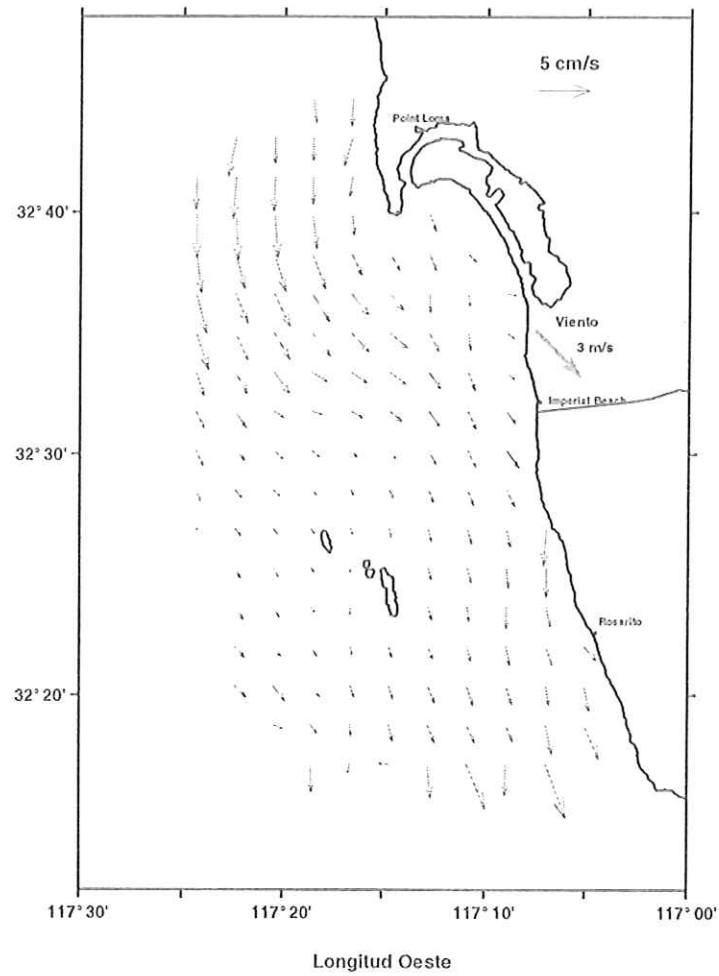


Fig. 23. Promedio de las corrientes generadas por (a) brisa diurna y (b) brisa nocturna.

En base a la caracterización de los períodos diurnos (11-17 hrs) y nocturnos (22-06 hrs) de las brisas se promediaron los datos de corriente mostrados en la figura 23. Los rasgos de circulación durante el día muestran una orientación de los vectores de corriente predominantemente en dirección paralela a la costa (Fig. 23a), mientras que durante la noche, los vectores de corriente tienden a orientarse hacia fuera de la costa, lo cual es más notorio en los vectores que se encuentran cerca de la línea de costa (Fig. 23b). En la misma figura se observa que el flujo promedio es más intenso al oeste de Punta Loma y de menor intensidad en las zonas cercanas a las Islas Coronado. La tabla VIII muestra la estadística básica de la rapidez y dirección promedio de las corrientes diurnas y nocturnas distribuidas a lo largo de la región estudiada.

Tabla VI. Representación numérica de los promedios de las corrientes filtradas con pasa-banda y filtradas las frecuencias típicas de marea e inercial en la zona delimitada por la cobertura de las antenas HF.

Promedios	Rapidez Diurna (cm/s)	Rapidez Nocturna (cm/s)	Dirección Diurna (°)	Dirección nocturna (°)
Corriente total (datos crudos)	18.5	16.02	279.61	264.83
Corriente al pasar el filtro Lanczos	2.43	2.20	325.02	305.01
Corriente al filtrar marea (O1 y K1) y frec. Inercial (f_i)	0.91	0.83	296.84	242.74

Con la finalidad de conocer la similitud de las corrientes y el viento se realizó un análisis de correlación vectorial entre dichas variables. Una correlación vectorial toma

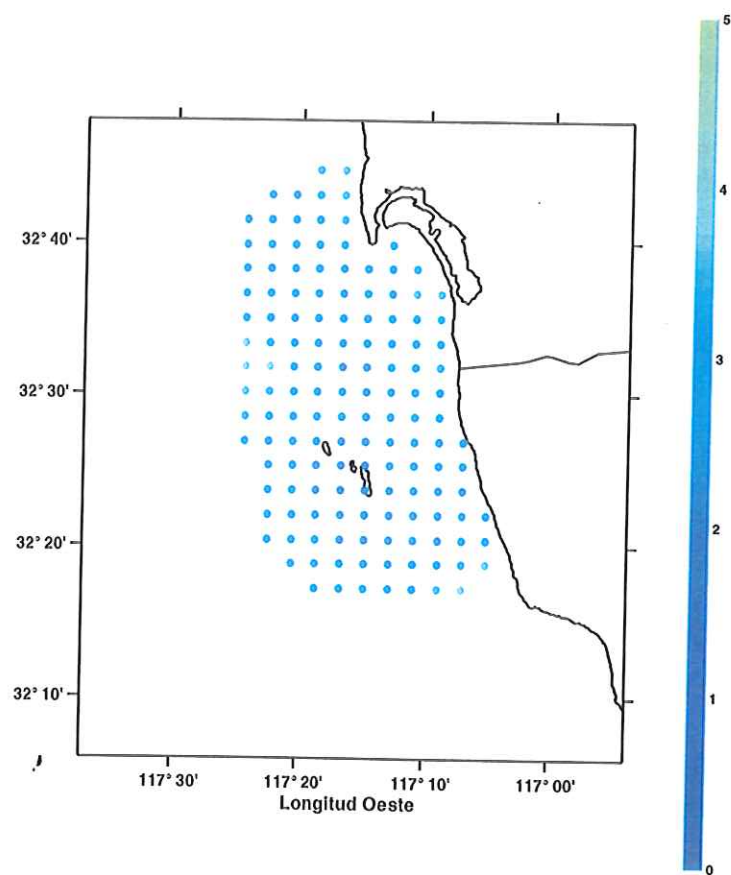
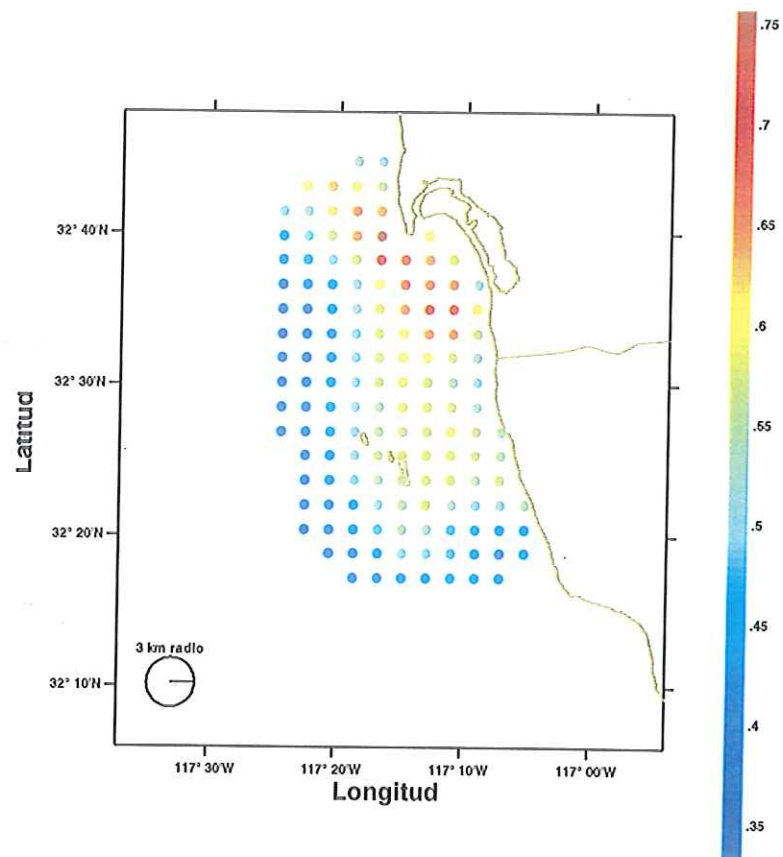
en cuenta tanto la rapidez como la dirección y fue determinada mediante el procedimiento mostrado en el apéndice II.

El resultado del análisis figura 24a, muestra la correlación vectorial máxima para cada celda, entre las series de corrientes y el viento medido en la estación Río-Tijuana. Se observa que la correlación máxima, cercana a 0.55 es mayor en regiones cercanas a la línea de costa, cerca de la estación de medición de viento y disminuye hacia el sur y al alejarse de las estaciones de muestreo probablemente porque el viento se comporta diferente en estas zonas.

La figura 24b indica el desfase o tiempo de respuesta en horas que presentan las series de corrientes con respecto a la serie de viento, entre 1 y 4 horas, aproximadamente. El desfase con el que ocurre la máxima correlación ocurre alrededor de 1 a 3 horas, siendo mayor en los puntos que se encuentran más alejados de la estación meteorológica y menor en los puntos donde ocurre la máxima correlación vectorial, lo cual indica que el tiempo de respuesta de las corrientes debido al efecto del viento es cercano a 1 hora.

Existen factores que pueden ser determinantes en el análisis de correlación entre corrientes y viento, como lo son la batimetría, para el flujo superficial del océano y el efecto topográfico, para el flujo de los vientos. El efecto que pueden provocar estos rasgos fisiográficos, así como otros factores oceanográficos como el flujo medio de la

Corriente de California, la presencia de giros y filamentos costeros, afectan sustancialmente en el análisis de la correlación vectorial., ya que son factores que modifican la circulación superficial de las corrientes y no fueron considerados durante el análisis.



a

b

Fig. 24. (a) Correlación vectorial de las corrientes medidas con radar y el Viento. (b) Tiempo (en horas) de respuesta de las corrientes por el forzamiento del viento.

6. DISCUSIÓN

La mayoría de los trabajos previos sobre corrientes costeras en la región fronteriza (Álvarez *et al.*, 1990, Hernández-Walls, 1986 y Segovia-Zavala, 1995) han reportado la rapidez y dirección de los flujos destacando la importancia de dichos estudios para determinar la dispersión de contaminantes en la zona costera. En el presente estudio se detectaron parte de los forzamientos que afectan la circulación superficial del agua costera oceánica, en especial, el causado por las brisas, lo cual representa un avance en el entendimiento del transporte e intercambio de materiales en la zona fronteriza México – Estados Unidos.

En general, las corrientes medidas con radar HF parecen responder al efecto del viento generado por las brisas. La dirección de la corriente tiende a orientarse con un patrón similar al del flujo de las brisas y a la batimetría del lugar. El flujo promedio de las corrientes superficiales medidas con el sistema de radar tuvo una orientación predominante hacia el sur, revelando una alineación de las corrientes con la línea de costa, tal y como lo reportan Álvarez *et al.* (1990) y Hernández-Walls (1986). Aunque de menor intensidad, este flujo promedio también fue detectado con las mediciones puntuales de las corrientes subsuperficiales hechas con el ADCP. El flujo superficial presentó una rapidez diurna mayor que la nocturna, 18 y 16 cm/s, respectivamente. La orientación promedio fue hacia el sur-sureste durante el día, mientras que por la noche la dirección fue sur-suroeste (Tabla VIII). La señal de la corriente filtrada mostró una

diferencia en relación con la dirección y magnitud de la corriente total (Tabla VIII). Dichas diferencias sugieren que aproximadamente un 5 % de la magnitud de la corriente media total se encuentra influido por el efecto de las brisas diurnas y nocturnas, además de frecuencias cercanas no identificadas.

Los datos reportados en este trabajo sugieren una variación notable de rapidez y dirección promedio con respecto a la ocurrencia de las brisas diurnas y nocturnas. La magnitud promedio del viento durante el día fue mucho mayor que durante la noche. Esta diferencia no es tan evidente en el promedio de la rapidez diurna y nocturna de las corrientes. Sin embargo, la orientación media de las corrientes y el viento tiene la misma tendencia. Durante el día el viento promedio sopla hacia tierra (340°) y las corrientes se orientan en la dirección de la línea de costa (296°), mientras que por la noche la brisa cambia de dirección hacia el suroeste (241°) y la corriente promedio se orienta aproximadamente con la misma dirección (242°). Esta relación direccional entre las brisas y las corrientes indica que el flujo de agua sigue el mismo patrón que el viento en cuanto a orientación. Lo relevante de este resultado radica en que la dispersión de contaminantes, el transporte de larvas y flujo de agua superficial, en general, tiende a estar relacionada con el flujo de las brisas. Esta relación puede ser aplicada para determinar las condiciones de circulación oceánica superficial conociendo el estado del viento.

La respuesta de las corrientes al forzamiento por brisas es aplicable al período de mediciones, enero y febrero 2003. Datos recientes (marzo a julio 2003) han mostrado que existe variabilidad muy importante como respuesta a otra escala de los forzamientos tales como los vientos fuertes del este conocidos como eventos Santa Ana (Castro, et al., 2003). Existen períodos de tiempo donde las corrientes fluyen hacia el norte, tales como los reportados por Álvarez *et al.* (1990) durante julio y septiembre de 1985 con una rapidez promedio de 18 cm s^{-1} . A lo largo del período de medición se detectó un flujo promedio hacia el norte durante el día 13 de febrero de 2003 a las 04:00 horas (ver fig. 25). Esta inversión de la corriente puede deberse a variaciones temporales de dos días o hasta más de una semana (Álvarez *et al.*, 1990). El flujo hacia el norte representa que el transporte de materiales y dispersión de contaminantes se dirige desde la frontera mexicana hacia las aguas estadounidenses. Esto implica que existen procesos forzadores de las corrientes que deben ser estudiados para un mejor entendimiento de la circulación costera.

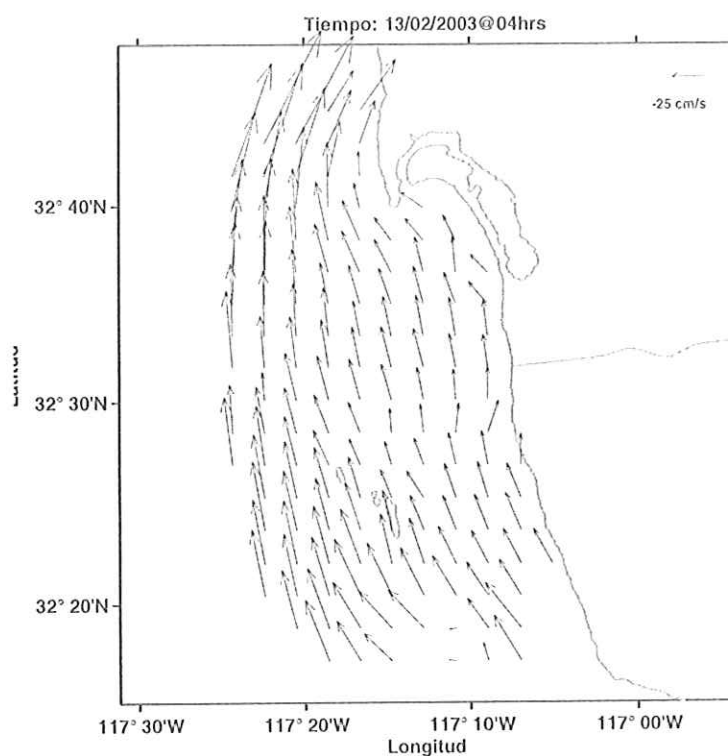


Fig. 25. Campo de corrientes superficiales de las 04:00 horas del día 13 febrero 2003.

El procesamiento de los datos de corrientes medidos con el sistema de radar HF realizado en este trabajo, logró identificar fenómenos asociados a mareas, brisas y frecuencias inerciales y otras bajas frecuencias asociadas seguramente a la presencia de giros y eventos de tormentas. Aún cuando el estudio se enfocó en conocer el efecto de las brisas sobre la circulación, existen todavía muchos otros aspectos de la variabilidad

7. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los datos de corrientes tomadas con el sistema de radar HF, se identificaron diferentes frecuencias diurnas como la causada por las brisas marinas y terrestres.

El flujo promedio de las corrientes superficiales medidas con el sistema de radar tuvo una orientación predominante hacia el sur, revelando una alineación de las corrientes con la dirección predominante de las brisas y con la línea de costa.

El 5 % de las corrientes totales superficiales a lo largo de la región estudiada se encuentra influenciado por el efecto que las brisas generan sobre el océano.

El presente trabajo propone una metodología para comprender la relación entre las corrientes superficiales y el esfuerzo del viento, representado como brisa diurna y nocturna.

Los resultados que aquí se presentan marcan sólo el inicio del uso de los sistemas de radar HF en México en conjunto con aparatos oceanográficos ya existentes en la zona.

8. RECOMENDACIONES

Es necesario el análisis de datos con series de tiempo más largas para poder detectar variaciones temporales de mayor escala, como es el caso de la inversión de corrientes hacia el Norte.

Es conveniente realizar un estudio a lo largo de toda la columna de agua y en diferentes estaciones para observar si en dicha región se puede distinguir la deriva de Ekman.

Es menester lograr consolidar un laboratorio oceanográfico de observaciones costeras que ayude a entender y detectar los procesos físicos que afectan directa o indirectamente el interés social y ambiental entre los dos países.

9. LITERATURA CITADA

- Álvarez, L.G., V.M. Godínez y M.F. Lavín (1990). Dispersión en la franja costera de Tijuana, Baja California. *Ciencias Marinas*, **16**, 87-109.
- Castro, R., A. Parés-Sierra y S.G. Marinone (2003). Evolución y extensión de los vientos de Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la Península de Baja California. *Ciencias Marinas*, **29**, 275-281.
- Chapman, R. y H. Graber (1997). Validation of HF radar measurements. *Oceanography*, **10**, 76-79.
- Collar, P.G. y M.J. Howarth (1987). A comparison of three methods of measuring surface currents in the sea: Radar, current meters and surface drifters. Department of Energy, Offshore Technology Report OHT 87 272, 46 pp.
- Crombie, D.D. (1955). Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc.s^{-1} , *Nature*, **175**, 681-682.
- Crombie, D.D. (1972). Resonant backscatter from sea and its application to physical oceanography. IEEE International Conference Proceedings on Engineering in the Ocean Environment, New York, 174-179.
- Durazo, R. (2003). Protocolo de Propuesta SEMANAT, O2MAC. Sometida a concurso del fondo Sectorial SEMARNAT-CONACyT, Junio 2001.
- Emery, W.J. y R.E. Thomson (1998). Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier Science, 638 pp.

- Foster, M. (1993). Evolution of diurnal surface winds and surface currents for Monterey Bay. Tesis de Maestría, Naval Postgraduate School. Monterey, California, 99 pp.
- Haus, B.K., H.C. Graber, L.K. Shay y J. Martinez (1995). Ocean surface current observations with HF Doppler radar during the DUCK94 experiment. Reporte Técnico, Universidad de Miami, Florida. 38 pp.
- Hernández-Walls, R. (1985). Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de Licenciatura, UABC, Escuela Superior de Ciencias Marinas, 69 pp.
- Kosro, P. y T. Strub (1997). The coastal jet: Observations of surface currents over the Oregon continental shelf from HF radar. *Oceanography*, **10**, 53-56.
- Lynn, R.J. y J.J. Simpson (1987). The California Current System: the seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 12947-12966.
- Neal, T. C. (1992). Analysis of Monterey Bay CODAR-derived surface currents. Tesis de Maestría, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 96 pp.
- Noble, R.T., D.F. Moore, M.K. Leccaster, C.D. McGee y S.B. Weisberg. (2003). Comparison of total coliform, fecal coliform, and enterococcus bacterial indicator response for ocean recreational water quality testing. *Water Research*, **37**, 1637-1643.
- Paduan, J. y H. Graber (1997). Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography*, **10**, 36-39.

- Paduan, J. y M. Cook (1997). Mapping surface currents in Monterey Bay with CODAR – Type HF Radar. *Oceanography*, **10**, 49-52.
- Paduan J. y L.K. Rosenfeld (1996). Remotely sensed surface currents in Monterey Bay from shore-based HF radar (CODAR). *Journal of Geophysical Research*, **101**, 20669-20686.
- Petruncio, E.T. (1993). Characterization of tidal currents in Monterey Bay from remote an in-situ measurements. Tesis de Maestría, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 100 pp.
- Prandle, D. (1991). A new view of near-shore dynamics based on observations from HF radar. *Progress in Oceanography*, **27**, 403-438.
- Prandle, D. (1993). Year long measurements of flow through the Dover Strait by H.F. radar and Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). *Oceanologica Acta*, **16**, No. 5-6, 457-468.
- Prandle, D. (1997). Tidal and wind-driven currents from OSCAR. *Oceanography*, **10**, 57-59.
- Prandle, D. y J. Wolf (1978). The interaction of surge and tide in the North Sea and River Thames. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **55**, 203-216.
- Sañudo-Wilhelmy, S.A. y C.E. Suárez (1984). Variación temporal de la carga orgánica en las aguas residuales de la ciudad de Tijuana, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, **10**, 107-118.

- Segovia-Zavala, J.A., F. Delgadillo-Hinojosa, M.V. Orozco-Borbón, A. Muñoz-Barbosa, y S.R. Canino-Herrera (1995). Distribución de DBO y bacterias en la costa fronteriza México-EUA. *Ciencias Marinas*, **21**, 415-426.
- Teague, C.C., J.F. Vesecky y D.M. Fernández (1997). HF radar instruments, past to present. *Oceanography*, **10**, 40-44.
- Winant, C. y A. Bratkovich (1981). Temperature and currents on the Southern California shelf: a description of the variability. *Journal of Physical Oceanography*, **11**, 71-86.
- Zeng, E.Y. y C.L. Vista (1997). Organic pollutants in the coastal environment off San Diego, California. I. Source identification and assessment by compositional indices of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Toxicology and Chemistry* **16**, 179-188.