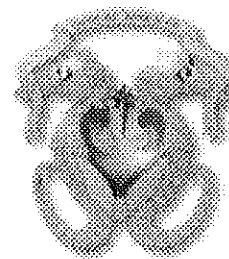


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACIÓN Y DISPERSIÓN DE
CONTAMINANTES FRENTE AL ARROYO EL GALLO,
EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C. , MÉXICO.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:
NANCY PÉREZ MORGA

Ensenada, Baja California, abril del 2004.

CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACIÓN Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES FRENTE AL ARROYO EL GALLO, EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., MÉXICO.

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio de las características de la circulación frente al arroyo 'El Gallo' así como de su calidad de agua. Este lugar tiene especial interés por cuestiones ambientales ya que se encuentra cercano al puerto de Ensenada y se tienen las descargas pluviales y de las plantas de tratamiento de 'El Gallo' y 'El Naranja'.

Para caracterizar las corrientes en esta zona, se realizaron mediciones con un perfilador acústico ADP (1,000 Khz.), en un punto fijo, durante dos periodos, así como transectos para diferentes condiciones de viento y marea. Las observaciones en el punto fijo indicaron una frecuencia diurna correspondiente al viento y a la marea. La corriente de marea explicó el 40% de la variabilidad de la serie. Los vectores progresivos indicaron un transporte predominante hacia el SW en la capa subsuperficial, y hacia el NE en la capa de fondo. La corriente subsuperficial se asoció a la presencia de una zona de convergencia inducida por viento en la Bahía y a la forma de la línea de costa, con vientos del NW de $3-4 \text{ m s}^{-1}$. Otro comportamiento importante fueron corrientes hacia el NE cuando se intensificó el viento ($>6 \text{ m s}^{-1}$), esto puede ser debido al movimiento de esta zona de convergencia, lo que produjo este cambio en las corrientes, aunado al efecto de la marea.

Para identificar la zona de impacto de la descarga, se realizaron mediciones con un CTD (Idronaut, 316) de: temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto y clorofila *a*, así como se tomaron muestras de agua para medir concentraciones de amonio, fosfatos y bacterias conformes fecales (CF) en el laboratorio. La concentración de CF estuvo por debajo del máximo permitido para aguas de uso recreativo. El amonio y fosfato fueron los mejores trazadores, con altas concentraciones debido a la descarga, a pesar de esto, la zona presentó valores altos de oxígeno por las características dinámicas de la circulación. Se observó una termoclina a una profundidad de 7 m para el mes de abril del 2003. De acuerdo con los transectos en este mismo mes se sugiere un sistema de dos capas, la superficial estuvo influenciada directamente por el viento, produciendo corrientes hacia el E, cerca del espigón, y una salida consecuente hacia el SW a través de la línea de costa, en cambio la de fondo estuvo influenciada por la circulación de la bahía, observándose una corriente hacia el NW.

Los trazadores de la descarga como CF, amonio y fosfato, fueron transportados siguiendo el patrón de la circulación, principalmente hacia el SW en la superficie.

Palabras clave: Bahía de Todos Santos, corrientes costeras, dispersión de contaminantes.

**“CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACIÓN Y DISPERSIÓN
DE CONTAMINANTES FRENTE AL ARROYO EL GALLO,
EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., MÉXICO.”**


**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA COSTERA
PRESENTA:**

Nancy Pérez Morgia

APROBADA POR :


PRESIDENTE DEL JURADO
Dr. Adán Mejía Trejo


SINODAL PROPIETARIO
Dr. Leopoldo G. Mendoza Espinosa


SINODAL PROPIETARIO
M.C. Rafael Blanco Betancourt

DEDICATORIA

A mis padres por todo su apoyo y cariño.

A mis queridos hermanos Ros, David, Silvia, Linda, Lore,
Gil, Vic y Rody. A toda mi familia, sobrinos, tíos.

A Juan.

A Juan David, mi gran motor y mi luz.

Al inmenso e impasible mar, por su inspiración y entrañable misterio ...

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Adán Mejía, por la dirección de este trabajo.

A los miembros del comité de tesis: Dr. Leopoldo Mendoza y M.C. Rafael Blanco, por la revisión de esta tesis, sus sugerencias y comentarios.

A M. C. Rafael Blanco, por su valioso apoyo en campo.

A los investigadores: Dr. Modesto Ortiz, M.C. Raúl Canino, Dr Francisco Delgadillo, M. C. Luis Soto, M. C. Oscar Delgado, Dr. Reginaldo Durazo, por sus comentarios y contribuciones a este trabajo y su colaboración incondicional.

Al M. C. Atilano y Ocean. Vanessa por su disposición y análisis de las muestras de nutrientes. A Rogelio, Iulú y Mónica por el análisis de las muestras de bacterias.

A mis profesores por su paciencia y por la forma sencilla de enseñar: Manuel Moreno, Michel Dreyfus, Rafael Walls, Antonio Martínez.

A la Secretaría de Marina: Tte. Nydia Angulo, Ocean. Guillermo Guillén, por todas las facilidades y apoyo durante el trabajo.

A CONACYT.

Al proyecto de investigación 4407, financiado por la 7ma. Convocatoria Interna de Apoyo a Proyectos de Investigación UABC.

Al programa permanente de seguimiento de la calidad sanitaria de las aguas residuales tratadas en la ciudad de Ensenada, B.C., llevado a cabo por CESPE.

A los directivos de la FCM por su apoyo: Dr. Roberto Millán, Dr Ramón Cajal, Dr. Rigoberto Guardado, Dr Eduardo Santamaría.

A Mary, Angélica, Rosario y Lorena.

A Alejandro por su ayuda en la programación y su apoyo en el campo.

A E. Gil por su apoyo en campo.

A mis compañeros: Verito, Alexandrina, Caro, Andrea, Edna, Ushiro y Guillermo...

A Alejandro, Lupita, Karel, Leslie, Alberto, Lalo, Jaime, Larios,.... a todos mis amigos.

A Norma y Yunuén por su amistad y cariño.

A Anita, por todos los momentos compartidos.

A Pablo y Bety.

A la Sra. Teresa Galaviz Granados y a sus hijas, por su apoyo incondicional.

.... A todas las personas que en algún momento cruzaron mi camino y me regalaron una sonrisa.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. OBJETIVOS.....	6
I.1.1. Objetivo general	6
I.1.2. Objetivos particulares.....	6
I.2 HIPÓTESIS	6
I.3. ANTECEDENTES.....	7
II. METODOLOGÍA.....	11
II.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	11
II.1.1. Vientos en la Bahía de Todos Santos.....	15
II.1.2. Variabilidad de temperatura en la Bahía de Todos Santos	18
II.1.3. Corrientes en la Bahía de Todos Santos.....	19
II.1.4. Oleaje	22
II.2. MÉTODOS.....	23
II.2.1 Observaciones	25
II.2.1.1. Corrientes.	25
II.2.1.2. Viento.	29
II.2.1.3. Nivel del mar.....	25
II.2.1.4. Batimetría.....	25
II.2.1.5. Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, y clorofila a.....	29
II.2.1.6. Bacterias coliformes fecales.....	30
II.2.1.7.Fosfato y amonio.....	31
II.2.2. ANÁLISIS DE DATOS.....	32
II.2.2.1. Serie de tiempo de corrientes para mayo del 2002 y recorridos	32
II.2.2.1.1.Calidad de datos y cálculo de la velocidad.....	32
II.2.2.1.2. Análisis armónico.	33
II.2.2.1.3. Análisis de Fourier.	33
II.2.2.1.4. Corriente residual.....	34
II.2.2.1.5. Correlación vectorial compleja.	34
II.2.2.1.6.. Funciones Empíricas Ortogonales.	35

II.2.2.2. Batimetría.....	35
II.2.2.3. Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, y clorofila <i>a</i>	35
II.2.3. Análisis de muestras.	36
II.2.3.1. Concentración de bacterias coliformes fecales.....	36
II.2.3.2. Concentración de fosfato y amonio.	36
III. RESULTADOS.	37
III.1. Hidrodinámica.	37
III.1.1 Serie de tiempo de corrientes (Campaña realizada en mayo del 2002)..	37
III.1.1.1.Condiciones de viento.....	39
III.1.1.2. Descripción para periodos de marea viva y muerta, bajo diferentes condiciones de viento.....	42
III.1.1.3. Estimación de la amplitud y fase de la correlación entre el viento y diferentes capas de corrientes así como entre ellas mismas.	54
III.1.1.4. Corrientes de marea.....	57
III.1.1.5. Frecuencias principales observadas.....	60
III.1.1.6. Diagrama de vectores progresivos.....	63
III.1.1.7. Corrientes residuales asociadas al periodo de 24 horas.	65
III.1.1.8.Variabilidad temporal para los modos principales observados.....	66
III.1.2. Serie de tiempo de corrientes (campaña realizada en diciembre del 2002).	71
III.1.3. Patrón de corrientes para los recorridos perpendiculares a la línea de costa.	74
III.1.3.1. Condiciones de marea muerta durante el refluo con viento del SW de 3 m s ⁻¹ (Fecha 27 /11/02).....	74
III.1.3.2. Condiciones de marea viva en el refluo con viento predominante del SE y SW de 1 m s ⁻¹ (Fecha 5 /12/02 inicio 8:52 hrs).....	76
III.1.3.3. Condiciones de marea viva en el refluo con viento predominante del NW de 2 m s ⁻¹ (Fecha5/12/02, inicio 13:11 hrs).	78
III.1.3.4.Condiciones de refluo durante marea viva con viento del NW de aproximadamente 6 ms ⁻¹ (17/02/03).	80

III.1.3.5. Marea viva con viento del SW de 4 m s^{-1} (Fecha 17 /04/03.....	82
III.1.3.6. Evento Santana en la boca de la rada portuaria.....	84
III.2. Trazador de la descarga.	85
III.2.1. Bacterias coliformes fecales.....	85
III.2.2. Concentraciones de amonio y fosfato (febrero y abril del 2003).	89
III.3. Condiciones hidrológicas.	96
III.3.1. Salinidad y temperatura (marzo y abril del 2003.	96
III.3.1. Salinidad y temperatura abril del 2003.....	96
III.3.2. Clorofila y pH.....	99
III.3.3. Oxígeno disuelto.	100
 IV. DISCUSIONES.	 102
IV.1 Comportamiento de la corriente bajo diferentes condiciones de marea y viento en la isobata de 12 m, frente al arroyo El Gallo.....	102
IV.10. Incertidumbre de las mediciones por ADP.	114
IV.11. Difusión.	115
IV.2. Comportamiento de la corriente por el efecto de la línea de costa, batimetría y presencia de espigón y rompeolas.....	106
IV.3. Comparación entre eventos Santana con vientos del NE y condiciones con viento del SW, durante el refluo de la marea.	107
IV.3. Influencia de la marea y del viento en la corriente.	109
IV.3.1. Corrientes residuales asociadas al periodo de 24 horas.....	111
IV.4. Periodos de primavera (05/02) e invierno (12/02).....	107
IV.5. Surgencia local.	108
IV.8. Respuesta de la descarga ante diferentes condiciones de marea y viento.	111
IV.9. Calidad de agua.....	112
 V. CONCLUSIONES.....	 116
VII. REFERENCIAS.	119

Lista de Figuras

1	Algunos mecanismos que contribuyen al proceso de mezcla bajo la superficie del mar. Fuente: Thoper (1985).....	3
2	Ubicación de las plantas de tratamiento de la ciudad de Ensenada, B. C.....	5
3	Área de estudio ubicada al sur del puerto dentro de la Bahía de Todos Santos. Los círculos rojos muestran las plantas de tratamiento de aguas residuales y los azules, los lugares de muestreo.....	13
4	Batimetría de la zona de estudio. Las isóbatas están en metros.....	14
5	Diagrama de rosas e histograma para la estación de punta Morro durante el 2002.....	17
6	Brisa marina día típico, para diferentes estaciones del año.....	18
7	Ubicación de los lugares de muestreo (*) para CTD.....	31
8	Viento (superior), nivel del mar (medio) y corrientes (inferior) durante el mes de mayo del 2002.....	38
9	Histograma y diagrama de rosas que muestra la magnitud y dirección del viento para la estación de Punta Morro, para el mes de mayo del 2002.....	39
10	Histograma de la magnitud de velocidad del viento, para el mes de mayo y diciembre del 2002.....	40
11	Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 2 m.....	41
12	Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 3 m.....	41
13	Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 7 m.....	42
14	Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 11 m.....	42
15	Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 11 al 13 de mayo del 2002.....	44
16	Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 12 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.....	45
17	Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 12 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.....	45
18	Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 25 al 27 de mayo del 2002.....	47
19	Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 26 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.....	48
20	Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 26 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.....	48
21	Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 3 al 5 de mayo del 2002.....	50
22	Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 3 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.....	51
24	Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 19 al 23 de mayo del 2002.....	52
25	Condiciones de viento, marea, componente u y v, así como los vectores resultantes para el día 19 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.....	53
26	Condiciones de viento, marea y componente u y v, así como los vectores resultantes para el día 19 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.....	54
27	Correlación entre el viento y la corriente en la vertical (línea negra). Correlación entre capas y la superficie (línea roja), con la capa media (línea azul) y con el fondo (línea verde). En el eje horizontal se observa la profundidad de las capas y el eje vertical muestra la amplitud de correlación.....	55

28	Fase entre el viento y la corriente a diferentes profundidades (línea negra). Fase entre capas y superficie (línea roja), con la capa media (línea azul) y con el fondo (línea verde). En el eje horizontal se observa la profundidad y el eje vertical muestra la fase.....	57
29	Velocidad medida por el ADP (línea negra) y la corriente de marea predicha (línea roja), para la componente u a diferentes profundidades.....	58
30	Velocidad medida por el ADP (línea negra) y la corriente de marea predicha (línea roja), para la componente v a diferentes profundidades.....	59
31	Espectro de potencia para la serie original de la corriente (línea azul) y para la serie removiendo la marea predicha por el análisis armónico (línea roja), para la componente u a los 3 m.....	61
32	Espectro de potencia para la serie original de la corriente (línea azul) y para la serie removiendo la marea predicha por el análisis armónico (línea roja), para la componente v a los 3 m.....	61
33	Constituyentes significativos de la marea (líneas azules) para la componente u a los 3 m de profundidad.....	62
34	Constituyentes significativos de la marea (líneas azules) para la componente v a los 3 m de profundidad.....	63
35	Diagrama de vectores progresivos, se muestra la posición del ADP (●). La línea roja indica la trayectoria de la superficie (3m), la línea verde, la capa intermedia (7 m) y la línea azul, la de fondo (11 m).....	64
36	Viento, nivel del mar y corrientes residuales para un periodo de 24 hrs.....	65
37	Modo 1 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente u.....	67
38	Modo 2 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente u.....	68
39	Modo 1 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente v.....	69
40	Modo 2 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente v.....	70
41	Diagrama de astillas para el periodo del 12 al 14 de diciembre del 2002, en la columna de agua.....	72
42	Diagrama de rosas e histograma y que indican la dirección W y NE predominante para la estación de punta Morro, para el mes de diciembre.....	73
43	Corrientes durante marea muerta con viento del SW a 2 m de profundidad.....	75
44	Corrientes durante marea muerta con viento del SW a 6 m de profundida.....	75
45	Corrientes en condiciones de reflujó durante marea viva y viento del SW a 2m de profundidad.....	76
46	Corrientes en condiciones de reflujó durante marea viva y viento del SW a 6m de profundidad.....	77
47	Corrientes en condiciones de reflujó durante marea viva y viento del SW a 9m de profundidad.....	77
48	Condiciones de marea viva durante el reflujó de marea con viento del NW a 2 m de profundidad.....	78
49	Condiciones de marea viva durante el reflujó de marea con viento del NW a 6 m de profundidad.....	79
50	Condiciones de marea viva durante el reflujó de marea con viento del NW a 9 m de profundidad.....	79
51	Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 2.25 m de profundidad.....	80
52	Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 6.25 m de profundidad.....	81
53	Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 8.25 m de profundidad.....	81

54	Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 11.25 m de profundidad.....	82
55	Corrientes bajo condiciones de marea viva durante el reflujó y con viento del SW a 2.7 m de profundidad.....	83
56	Corrientes bajo condiciones de marea viva durante el reflujó y con viento del SW a 6.7 m de profundidad.....	83
57	Campo de velocidad (cm s^{-1}) en un transecto transversal a la boca del puerto durante reflujó de marea viva y con viento del NE.	84
58	Campo de velocidad (cm s^{-1}) en un transecto transversal a la boca del puerto durante reflujó de marea y con viento del SW.....	85
59	Concentración de bacterias coliformes fecales durante marea muerta.....	86
60	Concentración de coliformes fecales durante marea muerta y viento del SW.....	87
61	Concentración de bacterias coliformes fecales en condiciones de marea viva durante el reflujó y viento del SW.....	87
62	Concentración de CF durante el reflujó en marea viva con viento de NW.....	89
63	Concentración de amonio durante marea viva y viento del NW.....	90
64	Concentración de amonio en condiciones de marea viva (reflujó) con viento del SW.....	91
65	Concentración de fosfato en condiciones del reflujó de marea viva, con viento del NW.....	92
66	Concentración de fosfato durante marea viva en el reflujó y con viento del SW...	93
67	Localización de las estaciones para muestras de fosfato y amonio a 5 y 10 m de profundidad.....	94
68	Distribución horizontal y vertical de temperatura para abril del 2003.....	97
69	Distribución horizontal y vertical de salinidad en abril del 2003.....	98
70	Perfil de temperatura, salinidad y densidad para el punto donde fue colocado el ADP.....	98
71	Distribución horizontal y vertical de clorofila a para abril del 2003.....	99
72	Distribución de pH para abril del 2003.....	100
73	Distribución de oxígeno disuelto (ppm) en abril del 2003.....	101

Lista de Tablas

I	Frecuencias de muestreo.....	24
II	Especificaciones del CTD Ocean Seven Idronaut.....	26
III	Variables medidas (columna izquierda) y fechas de muestreo (renglón superior). Lo sombreado indica la fecha en que fue realizada cada medición.....	30
IV	Promedio de la magnitud y desviación estándar de la velocidad de la corriente para la serie original (ADP) y para la corriente de marea. Porcentaje de varianza explicado por la componente u y v de la corriente de marea, para tres profundidades representativas: 3, 7 y 11 m.....	60
V	Concentraciones máximas y mínimas de CF con las diferentes condiciones de marea y viento en que fueron observadas.....	88
VI	Concentraciones máximas y mínimas de amonio y fosfato, con las diferentes condiciones de marea y viento en que fueron observadas.....	93
VII	Concentraciones de amonio y fosfato para las muestras a 5 y 10 m de profundidad.....	95

I. INTRODUCCIÓN.

Una de las actividades que se ha incrementado debido al crecimiento urbano e industrial en áreas aledañas a la zona costera, ha sido el uso del medio marino como un receptor de todo tipo de desechos. Es así, como este se ha convertido en una zona receptora de descargas de aguas residuales tratadas, no tratadas o de descargas accidentales como derrames petroleros que ocasionan un impacto directo en el medio marino.

La función de amortiguamiento llevada a cabo por el océano junto con las características propias del contaminante, pueden producir que este sea diluido o únicamente dispersado o transportado. Esta capacidad del mar para diluir estas sustancias a niveles permisibles es limitada, por lo que es importante evaluar los mecanismos de transporte y dispersión de contaminantes, debido al impacto causado sobre el medio marino.

El impacto de las descargas sobre el medio marino se intenta atenuar con el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, estas pueden alterar las condiciones naturales del medio marino y dar lugar a procesos de eutroficación. En caso de descargas no tratadas, con un alto contenido de materia orgánica, pueden presentarse condiciones de anoxia, así como la presencia de microorganismos patógenos, los cuales representan un peligro potencial para la salud humana.

Los mecanismos principales del transporte de contaminantes son la difusión y dispersión de los mismos, los cuales están determinados por procesos advectivos y difusivos. Los procesos advectivos son producidos por el transporte de las corrientes presentes en la zona estudiada. Los procesos difusivos pueden llevarse a cabo por difusión molecular o difusión turbulenta. Ambos procesos son análogos, con la diferencia de que los coeficientes de difusión turbulenta son más grandes, por lo que el proceso de difusión es referido en general, como difusión turbulenta.

Estos procesos llevan a cabo la dispersión de contaminantes en el mar, la cual depende de diferentes eventos como la marea, el viento y el oleaje principalmente, y también de otras condiciones ambientales particulares del área

de estudio como: batimetría, línea de costa, condiciones de temperatura y salinidad.

La influencia de la marea sobre la difusión y dispersión de contaminantes, ha sido descrita por varios autores como Pritchard (1960), Bowden (1965) y Csanady (1970), los cuales se refieren a la marea como un forzamiento de la corriente en periodos regulares, el cual contribuye a la mezcla horizontal. Annika *et al.* (2001), por ejemplo, menciona que el atrapamiento más efectivo de partículas ocurre sobre mareas muertas de bajo flujo y el máximo de advección durante mareas muertas con aguas altamente estratificadas. Dichos autores, mencionan también la importancia de considerar la estratificación termal y la salinidad, particularmente en el caso de la difusión vertical.

El efecto que el viento y oleaje pueden causar sobre la superficie del agua es explicado por varios autores, entre ellos Johnson (1960), el cual menciona que estos eventos pueden causar mezcla y dispersión por diferentes procesos: corrientes superficiales por esfuerzos tangenciales, acción turbulenta de la onda cuando la velocidad del viento medido rebasa los 7 m s^{-1} , así como transporte de masa por oleaje local. Otro proceso provocado por el viento son las burbujas generadas por el rompimiento del oleaje, las cuales se difunden hacia abajo por turbulencia causando difusión vertical (Thorpe, 1984 a, b). Este autor menciona otro mecanismo que afecta la turbulencia en la capa superficial del océano, la circulación Langmuir (Thorpe, 1985), definida como una estructura organizada cercana a la superficie del mar formada por vórtices alternados, alineados en dirección del viento. El efecto de otros mecanismos sobre la difusión en la superficie del mar es la interacción de la corriente con el fondo, cuyo proceso puede generar remolinos y ondas internas (Thorpe, 1985). La Figura 1, muestra los principales procesos encargados de la dispersión de contaminantes.

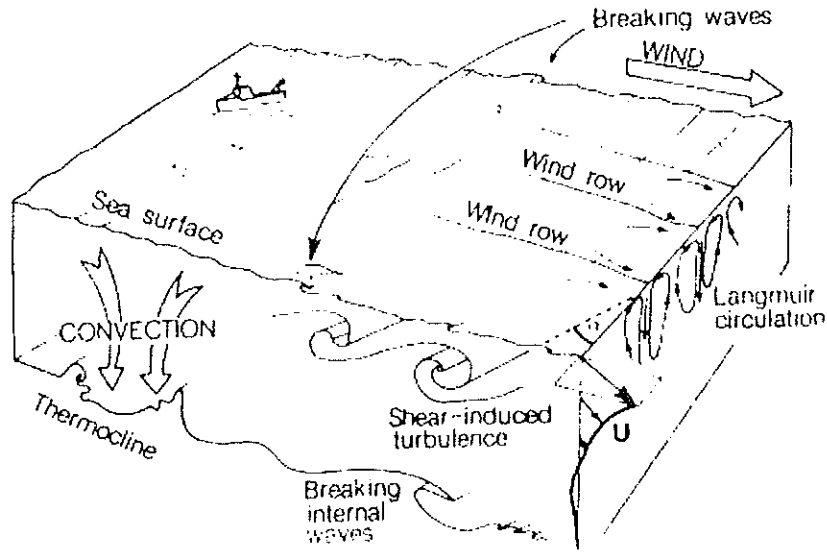


Figura 1. Algunos mecanismos que contribuyen al proceso de mezcla bajo la superficie del mar. Fuente: Thorpe (1985).

Comúnmente se utiliza la ecuación de advección-difusión para parametrizar la dispersión de contaminantes, expresada como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - k_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - k_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = Q.$$

donde Q es el término de fuente o sumidero, para una propiedad no conservativa, tal como el contenido de oxígeno, nitratos o bacterias. Esta ecuación es la base de todos los métodos de cálculo de dispersión en el mar usando una aproximación euleriana, donde en muchos casos, algunos de los términos advectivos de la difusión son despreciables y el problema es reducido a una o dos dimensiones (Bowden, 1983).

En el presente trabajo, se estudiaron diferentes forzamientos como la marea y el viento, la temperatura y salinidad, así como el efecto de la batimetría y configuración costera sobre la corriente, y como estos diferentes procesos inducen la difusión y advección de contaminantes provenientes de las aguas residuales vertidas al sistema costero.

El arroyo El Gallo (Figura 2), recibe los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales de El Naranjo y El Gallo y desemboca en la Bahía de Todos Santos. Recientemente, con la nueva planta de tratamiento El Naranjo, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) ha mejorado notablemente la calidad de agua tratada. Sin embargo, como en muchas zonas costeras, los nuevos asentamientos humanos pueden llegar a producir un incremento en los volúmenes de descarga. El Naranjo descarga aproximadamente 316 l s^{-1} y El Gallo 93 l s^{-1} , Mendoza-Espinosa (comunicación personal), sin embargo, el arroyo El Gallo incrementa su descarga en época de lluvias donde acarreo pluviales provenientes de otras fuentes que no son las descargas tratadas aumentan el volumen de agua al efluente y junto con ello, el contenido de contaminantes microbianos hacia la zona costera, indicadores de contaminación sobretodo para la salud humana.

Actualmente la CESPE cuenta con un programa de monitoreo en playa de bacterias y variables fisicoquímicas, sin embargo, se desconoce lo que sucede en el mar, cómo estos contaminantes son dispersados debido a la hidrodinámica y condiciones particulares de la zona y cuáles son las áreas más afectadas de la costa.

Para responder estas preguntas, se llevaron a cabo mediciones de corrientes durante periodos de mareas vivas y muertas bajo diferentes condiciones de viento (viento predominante del NW y viento Santana). Estas se realizaron en mayo, noviembre y diciembre del 2002 y en febrero, marzo y abril del 2003 (Tabla I). Se analizaron mediciones de viento de la estación meteorológica ubicada en Punta Morro. Se realizó una batimetría de la zona y como indicadores de la calidad de agua, se utilizaron mediciones "*in situ*" de las características físico-químicas de la misma, tales como, temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, amonio, fosfato y clorofilas, así como mediciones de bacterias coliformes fecales.



Figura 2. Ubicación de las plantas de tratamiento de la ciudad de Ensenada, B.C. Fuente: www.cespe.mx.

I.1 OBJETIVOS.

I.1.1. Objetivo general.

Estudiar las características de la circulación costera frente al arroyo El Gallo, Ensenada, B.C y sus efectos en la dispersión de las descargas de aguas residuales en esta zona.

I.1.2. Objetivos particulares.

Estudiar el comportamiento de las corrientes oceánicas durante periodos de mareas vivas, mareas muertas, así como bajo diferentes condiciones de viento (e.j. vientos del NW y eventos Santana), y durante diferentes épocas del año (primavera e invierno).

Estudiar la influencia de la marea y del viento en la velocidad de la corriente y como consecuencia, en la dispersión de contaminantes para esta zona.

Identificar la descarga de aguas residuales en el mar mediante mediciones "*in situ*" de la concentración de bacterias coliformes, de amonio, fosfato y condiciones hidrológicas como temperatura, salinidad y oxígeno disuelto.

Estudiar el comportamiento de la descarga ante diferentes condiciones de marea y viento.

I.2 HIPÓTESIS.

La circulación en la zona está influenciada por diferentes procesos como la configuración de la línea de costa, el forzamiento del viento y la marea, los cuales se van a encargar del transporte de la descarga de aguas residuales una vez que esta llega al mar aunado a los procesos de dilución o resuspensión.

I.3 ANTECEDENTES.

Existen pocos trabajos sobre la zona de estudio, los más recientes son el de Ramírez (1994), en la zona adyacente al espigón, y el estudio de Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) que, aunque no es en la zona, estudió la difusividad en la zona sur de la Bahía de Todos Santos.

Ramírez (1994), utilizó boyas de deriva para obtener las trayectorias lagrangianas, las cuales describieron una dirección predominante hacia el este, paralelas al espigón, con una ligera tendencia a seguir a lo largo de la línea de costa, hacia el este-sureste, bajo condiciones de viento predominante del NW, sus magnitudes oscilaron en un intervalo de 3 a 7 m s⁻¹. Sólo notó un cambio el 30 de septiembre donde el movimiento fue significativo hacia el NE, sin embargo no menciona la razón de este cambio. Cuando la corriente fue hacia la costa observó, al igual que Durazo (1986), cierta tendencia de los flotadores a agruparse y formar un cuadro más pequeño, por lo que ubica esta zona como una zona de convergencia, lo que se manifestó también en los valores de divergencia negativa observada. Este autor obtuvo valores de difusividad negativa en el 85% de los casos. Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) también obtuvieron valores de difusividad negativa en una zona 100 km al norte del estudio de Ramírez (1994) y lo asociaron a que las corrientes con componentes hacia la costa causaron efectos convergentes en el campo de flujo. Ramírez (1994), explicó que el origen de estas zonas de convergencia era atribuido a diferentes factores: cuando la corriente superficial a una gran distancia de la costa tiene alguna componente hacia ésta, antes de alcanzar la frontera, el flujo debe detenerse y hundirse o cambiar de dirección, Csanady (1963) mencionó que este hundimiento es una masa de agua moviéndose a gran velocidad paralela a la costa y puede permanecer mientras la corriente sea estable, la cual se difunde longitudinalmente. Otra posibilidad de convergencia paralela al viento, son las llamadas líneas de viento que aparecen con vientos moderadamente fuertes (Csanady, 1963). Ramírez (1994) señaló que sus resultados tuvieron una gran incertidumbre, debido al número reducido de

flotadores utilizados para su estudio. Sin embargo, fue el único antecedente que se tuvo dentro de la zona de estudio.

Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) obtuvieron índices de persistencia y difusividad. En la mayoría de las trayectorias se observó que la dirección del flujo estuvo influenciado por la morfología costera. Los altos valores de persistencia y rapidez y bajos valores de difusividad, coincidieron con vientos relativamente fuertes, por lo que concluyeron que este fue un factor dominante en los procesos de dispersión del agua superficial de la Bahía. La tendencia general de difusión frente al estero de Punta Banda indicó un incremento de la varianza con el tiempo, con valores máximos de divergencia y vorticidad en esta zona, lo que sugirió una mezcla activa inducida por los gradientes horizontales de velocidad. Las varianzas tuvieron valores y cambios temporales distintos dentro de un sólo experimento, lo que indicó condiciones anisotrópicas en la difusividad horizontal, la cual se hizo más marcada al aumentar el tiempo de difusión.

Estudios bacteriológicos previos al funcionamiento de la planta de tratamiento El Naranja (septiembre de 1999), han sido realizados por Orozco-Borbón y Gutiérrez-Galindo (1983), Orozco-Borbón y Delgadillo-Hinojosa (1989), entre otros. Orozco-Borbón y Gutiérrez-Galindo (1983) realizaron mediciones en aguas costeras del puerto de Ensenada, obteniendo un valor promedio para la estación frente al arroyo El Gallo, de 2.15×10^6 coliformes fecales. Esta concentración sobrepasó en cuatro órdenes de magnitud el límite para aguas de uso recreativo con contacto primario según la legislación de California, California Assembly Bill 411 (www.dns.cahwnet.gov), <400 coliformes fecales 100 ml^{-1} para muestras simples. En general observaron que el número de bacterias disminuyó al incrementarse la distancia (0.5 km) hacia la costa. Otro estudio de contaminación fecal realizado para la bahía, pero en sedimentos superficiales (Orozco-Borbón y Delgadillo-Hinojosa, 1989), mostró una dispersión de la fuente de contaminación hacia el centro y sur de la Bahía.

Estudios más recientes, posterior al funcionamiento de la planta de tratamiento mencionada, son los de Seañez-Reyes (2001) y González-Moreno

(2003). Seañez-Reyes (2001), mostró una disminución en los niveles de contaminantes microbiológicos en la Bahía de Todos Santos, pero con un aporte significativo por parte de las plantas de tratamiento, aunque esto, de acuerdo a González-Moreno (2003) fue debido a que la planta se encontraba en el inicio de su operación. González-Moreno (2003) realizó un estudio en las plantas de tratamiento El Gallo y El Naranja, así como en el punto de mezcla donde confluyen el mar y el arroyo, encontrando que en las plantas de tratamiento en general las concentraciones estuvieron por debajo de la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente. Observó una notable disminución en coliformes fecales aunque hubieron casos en que se observaron altas concentraciones de 240,000 NMP 100 ml⁻¹ debido a fallas en la operación de la planta. Sin embargo, en el mar en el punto de mezcla y al norte y sur de este, se obtuvieron algunos valores que sobrepasaron el límite establecido por la legislación de California para aguas de usos recreativo, mencionando que la presencia de mayores concentraciones en el agua de mar pudo deberse a las descargas clandestinas, acarreo por lluvia, acumulación en sedimento y resuspensión por acción del oleaje en la rompiente. En el punto de mezcla, la concentración promedio fue de 281 coliformes fecales (CF) 100 ml⁻¹ mientras que 10 m al norte, fue de 406 CF 100 ml⁻¹, alcanzando valores máximos de 1600 CF 100 ml⁻¹. González-Moreno (2003) también mencionó que los niveles de otros indicadores como bacteriófagos excedieron el límite propuesto para aguas de usos recreativo en la mayoría de muestras analizadas en agua de mar, ya que éstos presentaron una mayor resistencia a la desinfección, además de que el transporte de la descarga a la zona de rompiente no fue suficiente para su dilución y reducción.

Otros estudios fueron llevados a cabo por la Secretaría de Marina, la cual realiza monitoreos sobre calidad de agua en diferentes puntos de la bahía. En sus informes trimestrales para el año 2002, reportaron concentraciones promedio de

coliformes fecales <2 CF 100 ml⁻¹ en la estación ubicada frente al arroyo El Gallo para muestras superficiales.

Por otro lado, existen otras técnicas que han sido utilizadas para el monitoreo de contaminantes en el mar. Por ejemplo, es posible llevar a cabo la identificación de la descarga a través de inyección de tinta alrededor del punto de la descarga, con el fin de realizar un mapeo de su dispersión mediante el monitoreo de la fluorescencia y posición de la tinta. Con base en estos estudios, se obtiene la dilución y dispersión de aguas residuales en aguas costeras. Otros estudios realizan mediciones de variables indicadoras de la calidad de agua. Así pues, Dasic y Branislav (1999) consideraron necesarios siete parámetros para evaluarla: materia suspendida, pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno después de cinco días, demanda química de oxígeno, materia disuelta y niveles de *Escherichia coli*. La Agencia para Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos EPA (U.S. Environmental Protection Agency) utiliza entre algunos de sus criterios para evaluar la calidad de agua, los siguientes constituyentes: color, oxígeno disuelto, materia flotante, grasas y aceites, pH y coliformes fecales. Sherwin (1993) también menciona la utilización de la concentración de oxígeno disuelto y de bacterias coliformes fecales como indicadores de contaminación.

II. METODOLOGÍA.

II.1. ÁREA DE ESTUDIO.

La Bahía de Todos Santos se ubica en la costa noroeste de Baja California entre 31°40' y 31°55' N y entre 116°36' y 116°50' W; está comunicada con el Océano Pacífico por medio de dos entradas una al noreste limitada por punta San Miguel y la parte norte de la isla de Todos Santos, y otra al sureste limitada por Punta Banda y el extremo sur de la isla. Entre la parte sur de la isla y Punta Banda, se encuentra la zona más profunda, con un cañón submarino de 400 m. En general en la bahía, las profundidades varían entre 50 m hasta 10 m conforme nos acercamos a la costa.

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la Bahía de Todos Santos, al sur del recinto portuario de la ciudad de Ensenada (Figura 3). Se localiza entre los 31°49' 34" y 31° 50'45" de latitud norte y entre los 116°36'29" y 116°38' 3" de longitud W. Está delimitada al norte por el rompeolas y el espigón del puerto, como frontera este, se encuentra la línea de costa, extendiéndose 1 km hacia el oeste hasta la isóbata de 12 metros, cruzando el canal de navegación y entrada al puerto, y 1 km hacia el sur frente a El Conalep (Figura 3). Las isóbatas varían de 2 a 12 metros de profundidad a partir de la costa, alineándose paralelas a la línea de costa y ensanchándose hacia el mar (Figura 4).

La Figura 1 muestra la ubicación del arroyo El Gallo, el cual es receptor de las dos descargas residuales principales de la ciudad de Ensenada, las cuales son tratadas por dos plantas de tratamiento: El Naranja y El Gallo, con un flujo promedio de $0.316 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $0.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente, Mendoza-Espinosa (comunicación personal). Estas descargas desembocan de forma conjunta en el arroyo, siguen su cauce, hasta llegar a la playa. En la Figura 1 se muestra también el lugar de la descarga al mar aunque hay que mencionar que el cauce del arroyo cambia de dirección y algunas ocasiones se bifurca en dos salidas de 50 m de distancia de separación, lo cual depende de las condiciones climáticas, como por ejemplo, precipitación o del cambio en el flujo de la descarga residual. En este

arroyo no sólo desembocan a aguas residuales tratadas, sino también, aunque en menor cantidad, aguas residuales no tratadas provenientes de otras fuentes como viviendas aledañas a la zona o las que se presentan durante eventos pluviales.

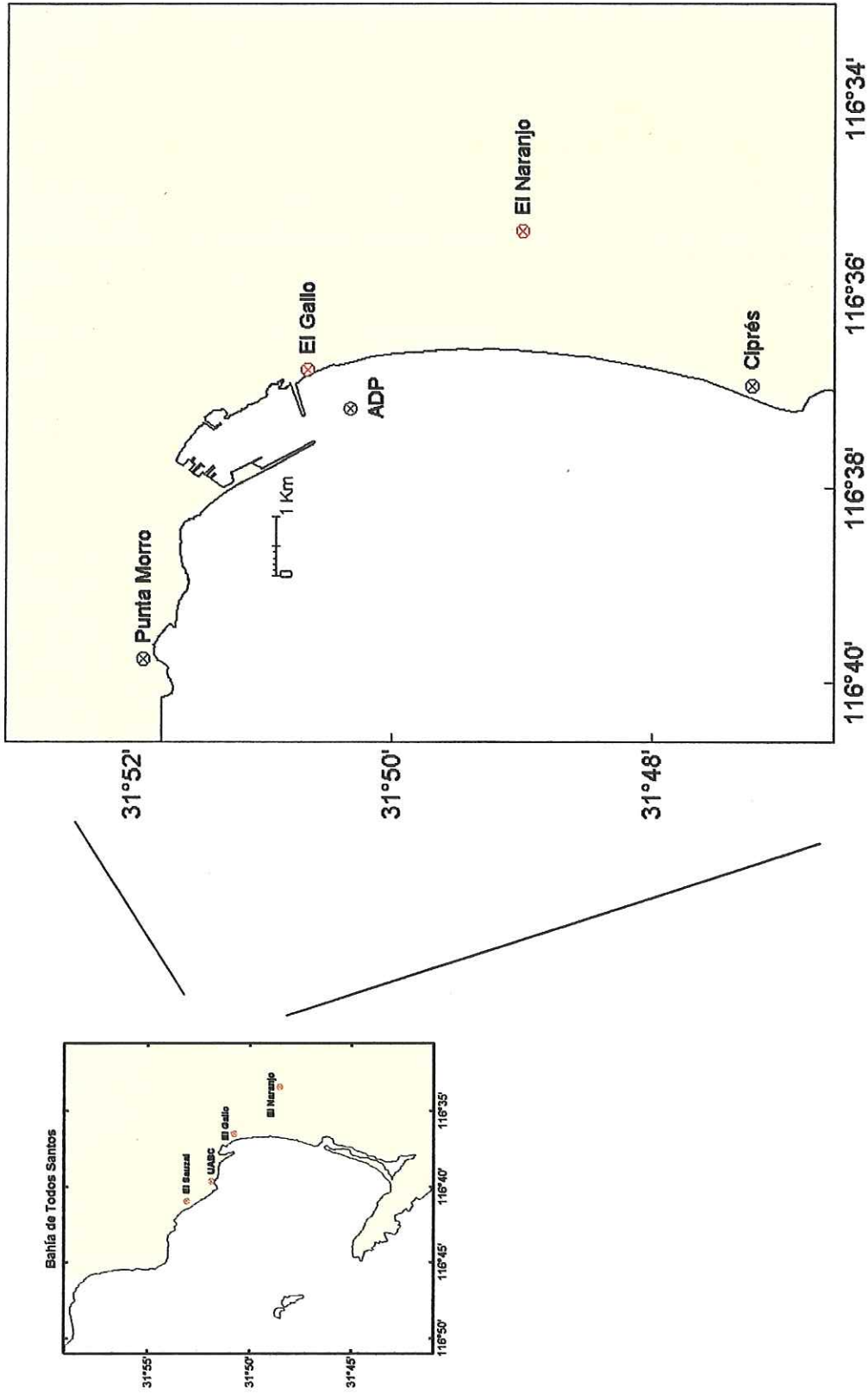


Figura 3. Área de estudio ubicada al sur del puerto dentro de la Bahía de Todos Santos. Los círculos rojos muestran las plantas de tratamiento de aguas residuales y los azules, los lugares de muestreo.

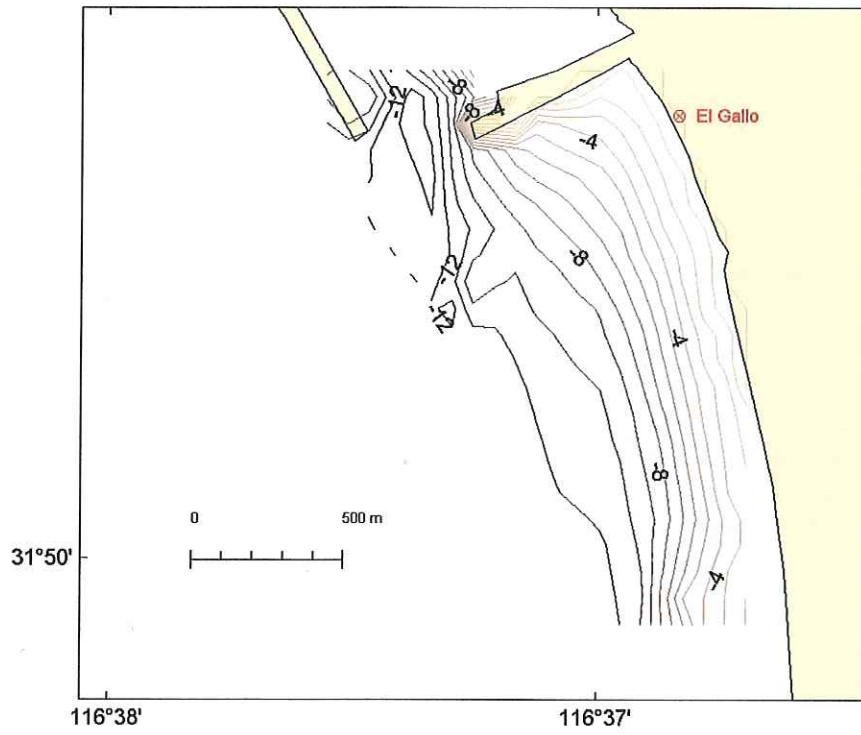


Figura 4. Batimetría de la zona de estudio. Las isóbatas están en metros.

II.1.1. Vientos en la Bahía de Todos Santos.

La Bahía de Todos Santos está influenciada por un régimen local de brisas marina y terrestre, el cual ha sido estudiado por varios autores como Pavía (1978), Parés (1981) y Pavía y Reyes (1983), entre otros.

Pavía (1978) realizó un estudio en primavera y verano, encontrando un régimen de brisa marina bien marcado, que tiende a aumentar en verano y que se caracteriza por un viento de mar a tierra durante el día, de dirección persistente y rapidez alta y variable.

Parés (1981) encontró en las cuatro estaciones que analizó, una brisa marina-terrestre también bien definida con magnitudes de viento máximo para la brisa marina, a las 14:00 hrs. Este autor mencionó también una dependencia de la orientación de la línea de costa sobre la dirección del viento. En general, encontró una diferencia entre la dirección del viento de la isla de Todos Santos con respecto a las estaciones costera; para las estaciones del Faro (Punta Banda) y la isla, la dirección de la brisa marina-terrestre fue E-W mientras que para las estaciones de Punta Morro y CICESE su dirección fue predominantemente SW-NE.

Pavía y Reyes (1983) notaron un efecto friccional y de orientación de la línea de costa respecto a la dirección del viento, observando además de brisa marina-terrestre, la presencia de viento sinóptico en la isla de Todos Santos, cuya presencia pudo deberse a que es la estación menos afectada por las condiciones locales, como orografía, línea de costa y calentamiento terrestre. El sistema de brisa marina y terrestre para primavera y otoño estuvo medianamente desarrollado, mientras que para invierno, debido a un periodo poco lluvioso, anómalamente bien desarrollado y para verano débilmente desarrollado debido a un evento Santana. La influencia sinóptica para las estaciones costeras sólo se produjo en condiciones extremas como lluvias, condiciones Santana y nieblas profundas. Los autovectores para las estaciones costeras fueron, en general, aproximadamente perpendiculares a la línea de costa, mostrando una variación diurna evidente en la dirección, así como una variación semidiurna en la rapidez, debidas a las intensificaciones de la

brisa marina y terrestre durante el día y la noche y a los procesos de convección libre.

Cruz-Colín (1997), mediante espectros rotacionales de viento, encontró máximos a las frecuencias bajas (los vientos sinópticos). Sus análisis demostraron además, que durante otoño-invierno la brisa terrestre se definió mejor que la marina, con el efecto contrario en verano, donde la brisa terrestre se presentó de menor duración y rapidez.

Cruz-Colín (1997) calculó las principales frecuencias para los vientos, en isla de Todos Santos y en Punta Morro, encontrando picos en tres principales frecuencias: 0.008 cph, 0.04 cph y 0.08 cph correspondientes a periodicidades de viento sinóptico, sistema de brisas y variación semidiurna de la presión superficial, respectivamente. El viento sinóptico se intensificó durante otoño e invierno. Con respecto a las brisas, para isla de Todos Santos, se observó que durante la primavera la frecuencia fue opacada por un efecto sinóptico, sin embargo, esto no sucedió en Punta Morro, cuya brisa se encontró bien definida. Además Cruz-Colín (1997) mencionó que durante otoño-invierno, la brisa terrestre se definió mejor que la marina, y que ocurrió lo contrario durante el verano, donde la brisa terrestre se presentó de menor duración y rapidez. La frecuencia semidiurna se intensificó durante otoño e invierno para ambas estaciones, aunque pudo observarse la importancia relativa de la frecuencia diurna sobre la semidiurna.

Mejía-Trejo y Gil-Silva (2004), en un reporte técnico en preparación, muestran la distribución de la magnitud y dirección de la velocidad del viento en la estación de Punta Morro, para un año de datos (2002). En este análisis se observó una mayor densidad de velocidades entre 0-3 m s⁻¹, en particular, en dirección W-NW. Esta dirección se pudo observar en el diagrama de rosas e histograma referenciado con el norte magnético, donde predominan vientos del oeste y noroeste (Figura 5). Se observó también la presencia de un régimen de brisas diurnas intensificándose en verano, con un máximo a las 15:00 y valores mínimos entre las 0:00 y 6:00 hrs (Figura 6).

Mejía-Trejo y Gil-Silva (comunicación personal), en un análisis reciente realizaron una comparación entre el viento del Ciprés y Punta Morro. Observaron diferencias en magnitud y dirección, siendo la estación Ciprés 20-40% mayor que Punta Morro, además de un cambio de orientación de -20 grados hacia el W del Ciprés con respecto a Punta Morro. De este modo, mientras para Punta Morro los vientos vienen del NW en Ciprés vienen del WNW.

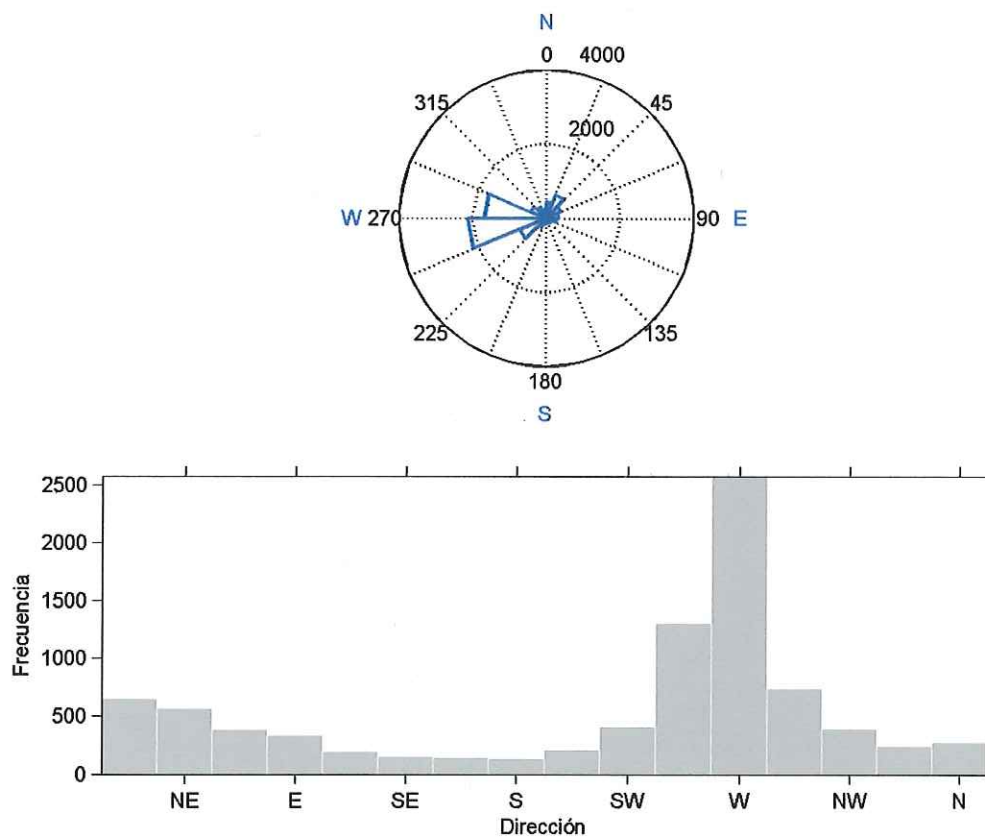


Figura 5. Diagrama de rosas e histograma para la estación de punta Morro durante el 2002.

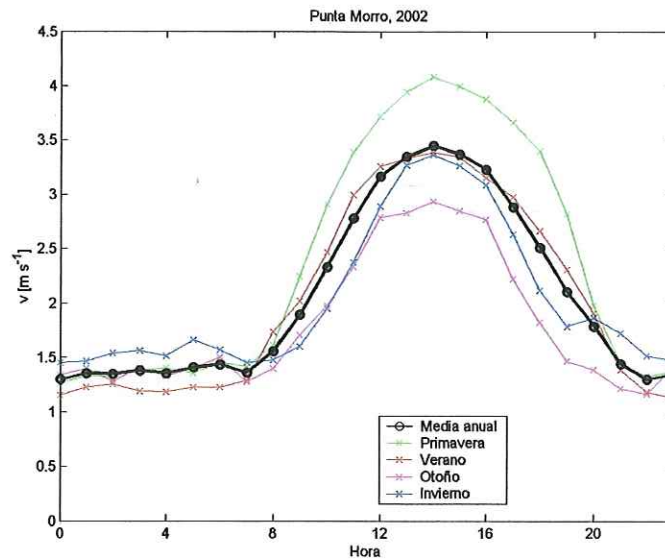


Figura 6. Brisa marina día típico, para diferentes estaciones del año.

II.1.2. Variabilidad de temperatura en la Bahía de Todos Santos.

Carrillo-Bibriezca (1993) realizó un estudio durante otoño e invierno de 1991 y 1992, en la Bahía de Todos Santos (BTS) encontrando diferencias diurnas de temperatura entre 4 y 5 °C en otoño a una profundidad de 10 m, disminuyendo durante los meses fríos hasta hacerse imperceptible en enero y febrero debido a homogeneidad en la columna de agua, con una mayor variabilidad en la isla. Observó también una participación de la marea y del viento sobre los cambios diurnos y semidiurnos de temperatura, para el periodo de otoño, no así durante el invierno.

Los datos analizados por Cruz-Colín (1997), cubren periodos de 1994 a 1995, donde encontró variaciones claramente diferenciadas entre verano e invierno, con una mayor variabilidad de hasta 8 grados en verano, con una termoclina a los 9 metros de profundidad, y para invierno, condiciones de mezcla. Las diferencias en grados de la variabilidad, con respecto a lo reportado por Carrillo-Bibriezca (1993) se debe, mencionó Cruz-Colín (1997), a la diferencia de los periodos de medición y al efecto de El Niño durante 1991-1992. Cruz-Colín (1997) reportó también que el gradiente de temperatura durante verano estuvo

definido por las mareas vivas y muertas que lo debilitan y refuerzan, dándose la ruptura del gradiente cuando la termoclina desaparece desde finales de otoño hasta principios de primavera. Los espectros cruzados le indicaron que las variaciones diurnas y semidiurnas de temperatura en el verano se encontraron mejor correlacionadas con la marea que con el viento para ambos niveles de profundidad. Observó además, que entre 6 y 10 m de profundidad la variación diurna y semidiurna de la temperatura se encontró relacionada con los mismos periodos de variación de marea, por la presencia de una onda de marea interna y que sus registros de temperatura revelaron la presencia de ondas internas del periodo de la marea en la Bahía durante el verano.

II.1.3. Corrientes en la Bahía de Todos Santos.

Álvarez-Sánchez (1971) realizó mediciones superficiales por medio de boyas de deriva, en la Bahía de Todos Santos. Encontró que cuando hubo viento dominante se observó un transporte de agua superficial hacia el interior de la Bahía en la dirección del viento, aunque en algunas ocasiones se observaron corrientes en sentido contrario. La corriente producida por el viento estuvo restringida a una capa superficial y no afectó notablemente la corriente a 2 metros de profundidad. Encontró también un cambio semidiurno notable con corriente residual cercana a 2 cm s^{-1} . Observó que con vientos entre $4 \text{ y } 6 \text{ m s}^{-1}$ provenientes del W y NW se producía una corriente de deriva hacia el interior de la bahía paralelo a la costa y directamente hacia la costa debido a la configuración de la Bahía de Todos Santos, el cual mencionó debe ser compensado por un transporte hacia el exterior de la bahía que queda por ser determinado. Durante las observaciones en los 2 metros superiores hubo casos en que la corriente se presentó en sentido opuesto al viento, invirtiéndose el sentido cuando el viento tuvo sus intensidades máximas de 5 m s^{-1} . Esto le indicó que el viento dominante tuvo efecto sólo sobre una capa superficial de espesor reducido donde se produjo una corriente de deriva apreciable que se redujo considerablemente al sumarse con la corriente en lo que resta del perfil. El diagrama progresivo de vectores bajo un viento dominante (4 m s^{-1}) no manifestó tendencia al flujo en la dirección del viento, lo mismo observó cuando se graficó sin

el efecto de la marea, donde el flujo resultante fue opuesto al viento. Con respecto a la marea, mencionó que la irregularidad de estas corrientes pudo deberse a la desigualdad diurna que no permite una entrada y salida regular de agua en la bahía debido a las condiciones geográficas y batimétricas por la presencia de la isla y el cañón. Mediante consideraciones teóricas calculó una corriente de marea de 6 cm s^{-1} a través de una isóbata de 22 m para una marea con rango de 2 m.

Argote *et al.* (1975), basándose en la interpretación de parámetros de salinidad y temperatura, realizó patrones de circulación de la Bahía observando dos giros, uno anticiclónico en la parte norte de la Bahía y otro ciclónico en la zona del cañón, los cuales siguieron la topografía de la zona, ambos afectados por la dirección de los vientos locales. Los autores concluyeron que cuando los vientos locales tuvieron una fuerte componente del norte, las aguas fluyeron hacia el interior de la bahía por la parte norte, siguiendo el perfil de la costa y girando hacia el exterior por la zona de las islas. Cuando los vientos presentaron una componente en dirección oeste o suroeste, el agua tendió a fluir de la zona de las islas hacia el interior formándose dos giros: uno hacia el norte, fluyendo hacia el exterior por la zona adyacente a Punta San Miguel y otro que gira fluyendo por el cañón hacia fuera de la costa. Cuando los vientos fueron de poca intensidad y de dirección variable la circulación presentó una estructura complicada y sin un patrón definido.

Durazo (1983) realizó mediciones con boyas de deriva, en la región sur de la Bahía para los meses de octubre y enero y las tendencias netas de circulación medidas fueron en dirección hacia la costa, con trayectorias de estructura irregular y corrientes de baja intensidad de $5\text{-}8 \text{ cm s}^{-1}$ en promedio, con una corriente a lo largo de la costa desde Punta Banda hasta la boca del estero, con velocidades de $10 \text{ a } 15 \text{ cm s}^{-1}$, que indicaron una relación de la formación de una trayectoria regular a lo largo de la costa en presencia de viento, no sucediendo así en su ausencia.

Pérez-Higuera y Chee-Barragán (1984) con base en las características de sedimentos costeros identificaron, al igual que Argote (1975), una circulación hacia el sur en las playas del norte de la Bahía y hacia el norte en las playas del sur.

Hernández-Walls (1986), mediante mediciones de radar al sur del puerto de Ensenada, observó un movimiento superficial neto hacia la costa, con una pequeña componente hacia el S, a excepción de un día donde se tuvo condiciones de viento del SSW, lo que se manifestó en una corriente hacia el N y trayectorias poco uniformes. Mostró un amplio rango de velocidades en general de poca intensidad (11 cm s^{-1}). Observó también un efecto de corte ya que cuando en la superficie y a 4 m la corriente fue hacia el E, en 9 m y 14 m, la corriente fue hacia el N. En un modelo para la región de Punta San Miguel a la parte sur del puerto, con viento del SW, el patrón de la brisa marina fue hacia dentro de la bahía paralelo a la línea de costa, concordando con Álvarez (1971); para la región frente al Ciprés el movimiento fue predominante hacia la costa con una tendencia hacia el S.

Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) realizaron experimentos con boyas de deriva superficial cuyo promedio de estas observaciones mostraron corrientes costeras bien definidas entre marzo y agosto, las cuales siguieron el contorno de la costa, con una convergencia en la región de la boca del estero de Punta Banda. La circulación promedio les indicó ingreso de agua a la Bahía frente a las costas norte y sur, en forma de un flujo superficial hacia el este y sureste, predominantemente a lo largo de la costa. Dicho flujo continúa hacia el sur y sureste en la parte norte y hacia el norte en la parte sur, frente a la barra del Estero de Punta Banda. En la región norte, la más cercana a el área de estudio, entre marzo y agosto predominó la corriente superficial al sureste, hacia las playas interiores de la Bahía, observándose en la isóbata de 10 m un incremento de la componente sur para producir una corriente paralela a la costa, encontrándose una relación directa entre los valores altos de rapidez con alta persistencia.

Argote *et al.* (1990) utilizaron un modelo numérico hidrodinámico barotrópico para predecir la circulación residual inducida por el viento en la Bahía. Estos autores analizaron diferentes condiciones de viento: en verano, invierno y eventos

'Santana", donde las máximas velocidades de la corriente observadas a lo largo de la costa fueron producidas aparentemente por efectos topográficos. También observaron que la presencia de corrientes de retorno fue altamente sensitiva a la dirección el viento. Para Punta San Miguel se observó una dirección reversible, con un flujo entrando en verano y saliendo en invierno. Para condiciones de viento de verano NW, W y N, el modelo predijo un flujo a lo largo de Punta San Miguel, el cual ha sido ya sugerido por Argote *et al.* (1975) y Álvarez *et al.* (1988), bajo condiciones de viento similares. Para vientos del NW y N el flujo se observó a lo largo de las costas de Punta Banda y de Punta San Miguel, donde se observaron áreas de convergencia evidentes. La posición de esta zona de convergencia pareció ser dependiente de la dirección del viento donde un cambio de 45 grados en la dirección del viento del NW a N imposibilitó la formación de la convergencia. Para viento del W también se observó esta convergencia al sur de Punta Morro. Para viento S, SE y Santana (E) el flujo fue a lo largo de Punta San Miguel en dirección opuesta a la predicha para vientos de verano. Para vientos Santana se observó también una zona de convergencia al sur de Punta Morro. De acuerdo a sus resultados, comentaron que para verano las descargas industriales (ubicadas en la parte norte de la bahía) serían transportadas hacia el interior de la Bahía, mientras que en invierno y durante vientos Santana el transporte sería hacia el océano abierto.

II.1.4. Oleaje.

Blanco *et al.* (2002) realizaron un análisis de la dirección y magnitud del oleaje en la zona de Punta Banda y El Ciprés a través de mediciones acústicas. Estos autores encontraron un arribo de oleaje generado localmente proveniente del noroeste para la época de invierno, de diciembre del 2001 a enero del 2002, asociando esta respuesta del oleaje local al régimen de brisas y las diferencias en las mediciones entre la estación de Punta Banda y Ciprés, a la refracción inducida por la topografía de fondo y por las corrientes generadas en la boca del estero de Punta Banda durante los periodos de reflujos de la marea.

II.2 MÉTODOS.

Este capítulo se divide en dos secciones: adquisición de datos y procesamiento de datos. Se menciona la duración de las mediciones, se muestran las variables medidas y las diferentes fechas de su realización (Tabla I), así como la instrumentación utilizada.

Para caracterizar las corrientes en esta zona se analizaron dos series en tiempo y frecuencia, para el mes de mayo y diciembre del 2002. Para obtener las corrientes asociadas a marea, se realizó un análisis armónico y se obtuvieron las corrientes residuales asociadas a la componente de mayor amplitud. Se utilizaron diagramas de vectores progresivos, para observar la trayectoria de la corriente a lo largo de la vertical y se realizó una correlación vectorial compleja entre el viento y la corriente para diferentes capas de profundidad, para observar la posible influencia del viento sobre la corriente observada. Por último, se hizo un análisis de funciones empíricas ortogonales para obtener la variabilidad temporal para las componentes u y v .

Se realizaron, además, recorridos perpendiculares a la línea de costa para medir la velocidad de la corriente sobre una malla de 1 x 1 km sobre el área de estudio, los cuales se describen para las capas en superficie, nivel medio y fondo. Estos transectos fueron realizados durante condiciones de marea viva, marea muerta y a diferentes condiciones de viento.

Para identificar la descarga, se hicieron mediciones *in situ* de la concentración de bacterias coliformes fecales, condiciones hidrológicas como temperatura, salinidad y de algunas otras variables químicas como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, fosfato, amonio y mediciones de clorofila.

II.2.1. Observaciones.

II.2.1.1. Batimetría.

Se utilizó una ecosonda marca Bathy 500 con rangos de profundidad de 0-160 m, comunicándose a través de puertos seriales, con una salida para el posicionador global (GPS) con antena diferencial con resolución de hasta 3 metros, y otro puerto para la computadora donde se almacenan los datos.

II.2.1.2. Nivel del mar.

Los datos de nivel del mar usados en este trabajo fueron proporcionados por la Secretaría de Marina, estos datos fueron comparados con la predicción que realiza CICESE mensualmente, no se observó diferencia significativa. Por lo tanto, para este estudio se utilizó la predicción del nivel del mar de CICESE-UNAM.

II.2.1.3. Corrientes.

Se utilizó un perfilador de corrientes, por efecto Doppler (ADP), marca Sontek con una frecuencia de 1,000 kHz. con el cual se realizaron mediciones durante un mes en un punto fijo ubicado frente a la descarga, en la isóbata de 12 m (Figura 3).

El ADP fue programado previamente a las frecuencias de muestreo mostradas en la Tabla I y alimentado por los parámetros de operación. Se utilizó para ello el software Sontek Sonterm (terminal emulador). En esta tabla se indica el tamaño de celda, la distancia de blanqueo, el intervalo del perfil y el intervalo de promediado para la adquisición de la corriente.

El muestreo fijo se realizó para abril y diciembre del 2002, aunque para este último, sólo se recuperaron tres días de medición debido al cubrimiento del aparato por arena causado por una tormenta.

Tabla II. Frecuencias de muestreo.

Fecha de Muestreo	Tamaño de celda (m)	Distancia de blanqueo (m)	Profundidad del sensor (m)	Intervalo del perfil (s)	Intervalo de promediado (s)
Mayo	1	0.7	Fondo	3600	120
Diciembre	1	0.7	Fondo	3600	120
Recorridos 27/11/02	1	0.7	0	30	30
Recorridos 5/12/02	1	0.7	0.3	15	15
Recorridos 17/02/03	1	0.7	0.55	15	15
Recorridos 28/03/03	1	0.7	0.4	5	5
Recorridos 17/04/03	1	0.7	1	5	5

Con el mismo ADP, se realizaron mediciones de corrientes a lo largo de una malla perpendicular a la línea de costa, formada por transectos con intervalos de 100 m entre cada uno, con una cobertura de aproximadamente 1 x 1 km frente a la zona de la descarga. Estas mediciones fueron realizadas para cubrir los ciclos de marea viva y muerta durante el flujo y reflujo, por lo que se realizaron muestreos durante diferentes fechas: noviembre y diciembre del 2002, y febrero, marzo, abril del 2003, con una duración promedio de 4 hrs para cada malla. La frecuencia de muestreo se muestra en la Tabla II.

El sistema de muestro utilizado consistió de un GPS, acoplado de manera simultánea al perfilador de corrientes, ambas señales fueron capturadas en una computadora portátil comunicados por el programa de cómputo SonTek RiverSurveyor (v.3.4), a través de puertos seriales. El ADP tiene integrada una brújula interna y un sistema de sondeo, el cual mide la velocidad de la embarcación con respecto del fondo, mientras que el ADP mide la velocidad de la corriente referida a los transductores, de tal manera, que la velocidad absoluta será la diferencia entre estas dos velocidades.

Los perfiladores de corrientes funcionan aplicando el principio físico llamado efecto Doppler, por medio del cual se miden las velocidades de las partículas en el agua. Si una fuente de sonido se está moviendo relativamente al receptor (partículas, plancton), la frecuencia del sonido en el receptor es cambiada con respecto a la frecuencia emitida. El ADP registra la reflexión del sonido de las partículas en el agua, donde el cambio en la frecuencia entre la señal emitida con la recibida es proporcional a la velocidad del agua.

La velocidad medida por uno de los transductores del perfilador acústico ADP es la proyección de la velocidad tridimensional dentro de los ejes del haz acústico. El ADP usado en las mediciones (Sontek, ADP 1,000 kHz) tiene tres emisores orientados a 25 grados del eje vertical, igualmente espaciados en ángulos de 120 grados en sentido azimutal. El perfilador acústico ADP combina las tres velocidades a lo largo de los rayos de sonido y usa la orientación relativa a los transductores para calcular la velocidad del agua.

La precisión del aparato después de haber removido el ruido se basa en dos factores principales: la velocidad del sonido y la geometría del rayo de sonido. Los errores por la velocidad del sonido son menores al 0.1%. En cuanto a la geometría del rayo, ésta es fijada durante la fabricación y no necesita una recalibración. La precisión de la velocidad es del orden de $\pm 1\%$ de la velocidad medida. El ruido es el resultado de los procesos físicos por los cuales las ondas de sonido son dispersadas por las partículas del agua y es referido como ruido Doppler, el cual es aleatorio y puede asumirse que tiene una distribución gaussiana, donde el

promedio de datos múltiples converge a un valor real sin introducir margen de error (Sontek ADP Technical Documentation). El ruido decreciente con la raíz cuadrada del intervalo promediado, es decir a un mayor intervalo promediado, menor ruido. Otro parámetro para evaluar el ruido es calculado directamente de los datos medidos por el ADP, el error estándar. Este valor, reportado para cada componente de velocidad y para cada rango de celda, puede ser interpretado como un estimador de la precisión del dato de velocidad, el cual incluye la incertidumbre generada por el instrumento (el ruido Doppler), las variaciones reales en la velocidad del agua y el movimiento de la instalación del ADP (por ejemplo, si es montado sobre una boya o una línea de anclaje o si es usado por una embarcación en movimiento).

El error estándar es calculado como sigue: un número de pulsos son promediados durante un intervalo específico, de esta forma se reporta un valor de velocidad media, de acuerdo al intervalo de promediado escogido. La desviación estándar para todos los pulsos es dividida entre la raíz cuadrada del número de pulsos para calcular el error estándar.

El perfil del error estándar debe ser constante con la intensidad de la señal acústica, donde esta es mayor a 3 db y no hay ninguna frontera presente. La intensidad de la señal es accesada en amplitudes o decibeles. La razón de la señal de ruido (SNR) indica la intensidad en decibeles. Conforme SNR decreciente a un número menor que 3 db, el error estándar incrementa rápidamente, este incremento puede ser usado para determinar el final del perfil en situaciones sin frontera.

El ruido Doppler está en función de la configuración del sistema, de la frecuencia acústica, del tamaño de la celda y del número de muestras usadas para calcular el perfil de la velocidad media (Sontek ADP, Technical Documentation). Este es estimado como:

$$\sigma = \frac{235}{F \Delta z \sqrt{N}},$$

donde:

σ = ruido Doppler de las mediciones de velocidad en la horizontal (ms^{-1}),
 F = frecuencia acústica (kHz), Δz = tamaño de celda y N = número de muestras.

Para el muestreo fijo, el ruido Doppler fue de 0.008 ms^{-1} .

II.2.1.4. Viento.

Los datos de magnitud y dirección de viento provienen de la estación meteorológica a cargo del Instituto de Investigaciones Oceanológicas ubicada en la estación de Punta Morro. Los datos fueron adquiridos con un intervalo de tiempo de una hora. También fueron utilizados los datos de viento de la estación meteorológica a cargo de la Secretaría de Marina, para compararlos con la estación de Punta Morro. La ubicación de la estación de Punta Morro, se muestra en la Figura 3.

II.2.1.5. Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, y clorofila a.

El equipo utilizado para estas mediciones fue un CTD Ocean Seven Idronaut modelo 316/MK317 equipado con siete sensores: presión, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, pH, potencial reducción-oxidación y un electrodo de referencia. En la Tabla III se muestran las especificaciones del sistema.

Se realizaron dos muestreos de CTD, el primero tuvo una falla en el suministro de energía, por lo que sólo se tomaron mediciones en algunos puntos, la Figura 7 muestra los lugares en los que sí hubo colecta de datos.

Los datos para el CTD son recolectados a través de los sensores y cada parámetro es convertido a su unidad específica de medición al aplicar fórmulas sobre la base de la calibración de los datos. Algunos parámetros como la salinidad y densidad, no son obtenidos por medio de un sensor, pero son calculados a partir de otros parámetros.

El primer muestreo fue programado con un intervalo de muestreo de 1s y por medio del método sincronizado. Debido a fallas en el suministro de energía

para este muestreo, para el segundo muestreo se optó por utilizar el método manual, para que cualquier error se corrigiera "in situ".

Se realizó la calibración de los sensores anterior y posterior a las mediciones. Finalmente se obtuvieron los valores de pH y clorofila a través de una curva de calibración.

Tabla III. Especificaciones del CTD Ocean Seven Idronaut.

Parámetro	Rango	Precisión	Resolución
Presión	0-1000 dbar	0.05% escala total	0.03%
Temperatura	-3-+50 °C	0.003 °C	0.0005 °C
Conductividad	0-64 mS cm ⁻¹	0.003 mS cm ⁻¹	0.001 mS cm ⁻¹
Oxígeno	0-50 ppm 0-500% sat	0.1 ppm 1% sat	0.01 ppm 0.1% sat
pH	0-14 pH	0.01 pH	0.001 pH
Redox	-1000-1000 mV	1 mV	0.1 mV
Entradas auxiliares (fluorescencia)	0-5000 mV	0.5 mV	0.076 mV

II.2.1.6. Bacterias coliformes fecales.

Se realizaron muestreos en diciembre del 2001, en noviembre y diciembre del 2002 y en febrero del 2003, los muestreos fueron puntuales y en superficie, cercanos al área de estudio. Se utilizó el método de número más probable (NMP) por repetición de cinco tubos, método descrito en APHA. (1995).

II.2.1.7. Fosfato y amonio.

Las muestras de fosfatos y amonio fueron obtenidas el 17 de febrero y 17 de abril del 2003, frente a la descarga. Los muestreos fueron realizados para la superficie, a 5 m y a 10 m de profundidad. Se analizaron por la técnica de colorimetría descrita en Strickland y Parsons (1972).

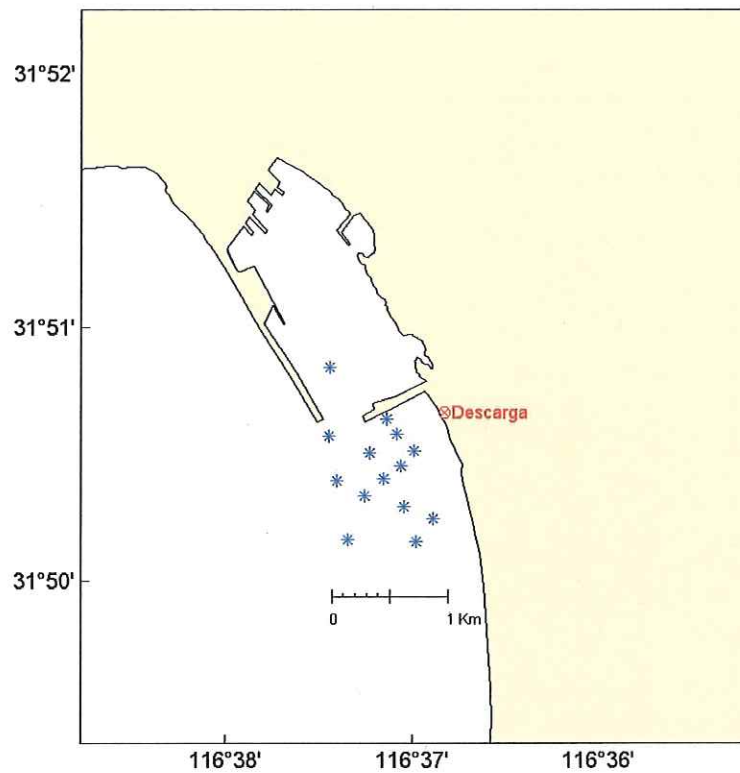


Figura 7. Ubicación de los lugares de muestreo (*) para CTD.

II.2.2. ANÁLISIS DE DATOS.

II.2.2.1. Serie de tiempo de corrientes para mayo del 2002 y recorridos espaciales.

II.2.2.1.1. Calidad de datos y cálculo de la velocidad.

Los datos de velocidad pueden visualizarse mediante el programa de cómputo View ADP Pro (v.3.41) de la marca SONTEK. Se verificó la calidad de los datos mediante una corrección por el sensor de presión, una limpieza del ruido por medio de la inspección de la intensidad de la señal con un límite de 4 dB y por una inspección del error estándar. Posteriormente los datos fueron exportados para su análisis y visualización usando el paquete de programas de cómputo MatLab (ver. 6.5).

Para los recorridos espaciales, cuando la embarcación está en movimiento, se realizó el cálculo de la calidad de datos y a continuación se calculó la corriente. Originalmente, el ADP estima la velocidad de la embarcación más la velocidad de la corriente, la cual es obtenida por los transductores del ADP, adicional a la frecuencia emitida por el ADP la velocidad relativa al fondo es estimada por el mismo aparato, donde mediante la diferencia entre la velocidad de la embarcación y la de los transductores, se obtiene la corriente real para cada celda del perfil estimado, independientemente del movimiento del barco. Debido a que la toma de datos por medio del ADP se realizó con diferentes intervalos de promediado de la corriente (variaron entre 5 y 30 s), y a que la zona está influenciada por oleaje con periodos en un rango de 8.6 a 14.4 s (Perelló, 2002, datos para la estación El Ciprés), se realizaron promediados a 60 s en todos los recorridos, para evitar contaminación por oleaje. También se les realizó un filtrado de datos con un límite de dos desviaciones estándar.

Los análisis siguientes sólo se realizaron para la serie de tiempo para mayo del 2002.

II.2.2.1.2. Análisis armónico.

El análisis armónico fue utilizado para determinar las amplitudes y fases de cada componente de marea, el cual es posible realizar debido a que la marea es la suma de funciones armónicas (seno) en el tiempo con frecuencias específicas.

Para calcular la amplitud y fase de cada componente, se utilizó el programa `t_tide.m`, el cual es una versión adaptada del programa clásico de G. M. Foreman (1977) realizada por Lentz y Beardsley en 1999 y 2000 respectivamente. Este programa puede accesarse en: http://www.ocgy.ubc.ca/~rich/t_tide/t_tide_v0.98.zip.

Para los cálculos se predijo la marea a partir de todos los armónicos resolvibles debido al número de datos de la serie de tiempo y según el criterio de Rayleigh igual a 1.

El porcentaje de variabilidad explicada para la componente u y v de la marea se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$\%Vu = 100 \times \frac{\text{var}(u(t))}{\text{var}(ut(t))},$$

donde $\%Vu$ es el porcentaje de varianza explicado por la serie $u(t)$, u es la componente x de la corriente de la marea y ut es la serie total (serie original de ADP).

II.2.2.1.3. Análisis de Fourier.

Se utilizó la transformada rápida de Fourier mediante el algoritmo FFT para MatLab y utilizando el programa `t_tide.m`. El algoritmo se deriva de Danielson y Lanczos (1942), descrito en Emery y Thomson (1997), donde la transformada para la serie x_t (serie de tiempo de una variable) es encontrada a partir de la serie de Fourier de la mitad de la longitud de la serie (N). Se realiza una partición de la serie

en dos mitades y_t y z_t , donde $y_t = x_{2t-1}$, $z_t = x_{2t}$, para $t=1,2,\dots, N/2$, ambas funciones tienen $N/2$ valores y sus transformadas de Fourier son:

$$Y_m^{(N/2)} = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^{N/2} y_t \exp\left[\frac{-i4\pi t m}{N}\right],$$

$$Z_m^{(N/2)} = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^{N/2} z_t \exp\left[\frac{-i4\pi t m}{N}\right].$$

De esta forma, mediante una relación entre $X_m^{(N)}$, $Y_m^{(N/2)}$ y $Z_m^{(N/2)}$, se obtiene la transformada de Fourier para la serie x_t a través de estas series y_t y z_t . (Emery y Thomson, 1997).

II.2.2.1.4. Corriente residual.

Esta corriente se parametrizó como una función de la velocidad para cada capa de profundidad, Robinson (1983), para lo cual se utilizó la siguiente definición:

$$V_r = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v dt.$$

Donde V_r es la velocidad residual, T es el periodo de la componente de marea asociado a la corriente residual, t_0 es el tiempo inicial y $v dt$ es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo.

II.2.2.1.5. Correlación vectorial compleja.

El método está basado en la descomposición de las series complejas evaluadas en componentes polarizadas. El vector velocidad (de viento y de la corriente) puede ser descompuesto para cada frecuencia, bajo dos movimientos circulares en rotación contraria, cada uno con su propia amplitud y fase, donde los movimientos ciclónicos corresponden a movimientos con frecuencias positivas y los movimientos anticiclónicos con frecuencias negativas. Los valores de fase cambiaron en una cantidad proporcional a la rotación. Por otro lado, las funciones de coherencia y fase de las dos series relacionan sus componentes ciclónicas, sus

componentes anticiclónicas, la componente ciclónica de una con la anticiclónica de la otra y viceversa y finalmente es calculado el coeficiente de correlación a partir de las mediciones de coherencia entre un par de series complejas evaluadas, Mooers, (1973). En este caso, las series evaluadas son el viento y la corriente. La amplitud de la correlación es de 0 a 1 donde 1 indica que están correlacionados mas no asegura que una serie es consecuencia de la otra y viceversa. La fase nos indica la relación entre las direcciones de ambas series.

II.2.2.1.6. Funciones Empíricas Ortogonales.

Las series de tiempo son guardadas como vectores columna de tal forma que se construye una matriz de $m \times n$ datos donde m es el número de datos y n las diferentes profundidades. De este modo se construyó una matriz X_{mn} después de haber removido la media y la tendencia, donde mediante una análisis de la covarianza $cov_{mn} = X^T X$, (Wallace and Dickinson, 1972) para lo cual se utilizó la función eofmat Version 1.0 (12/4/96) por Rich Signell. Se obtuvo V_{mn} , la matriz de vectores propios (eigenvectores) y d_{mn} la matriz de valores propios (eigenvalores), la amplitud del modo $= X_{mn} * V_{mn}$. De esta forma, se obtuvieron n modos de m datos, donde el eigenvalor es el porcentaje de varianza explicado para el modo correspondiente.

II.2.2.2. Batimetría.

Los datos colectados por la ecosonda fueron referidos al meridiano de Greenwich (GMT), tomando como referencia el nivel medio del mar y ajustando las mediciones de acuerdo con el nivel del mar predicho durante el periodo de medición.

II.2.2.3. Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, y clorofila a.

Los datos del CTD fueron leídos por el software IDRODAC-316 del cual fueron exportados como archivo ASCII. Para realizar los contornos y perfiles, se utilizaron sólo los datos de descenso del aparato, eliminando datos no válidos de clorofila y realizando un ajuste por un polinomio. Para los datos en que se realizó el

lance manualmente, los datos medidos fueron sorteados e interpolados. Finalmente se realizaron los contornos a lo largo de la vertical.

II.2.3. Análisis de muestras.

II.2.3.1. Concentración de bacterias coliformes fecales.

Las muestras de agua fueron tomadas "*in situ*" en la capa superficial del mar, se guardaron y refrigeraron, para posteriormente ser analizadas por el Laboratorio de Bacteriología marina del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, en el cual obtuvieron la concentración de coliformes fecales (muestra 100 ml^{-1}) por medio de la técnica del número más probable (NMP) con serie de cinco tubos (APHA, 1995).

II.2.3.2. Concentración de fosfato y amonio.

Se utilizaron botellas Nansen para la toma de muestras en superficie, 5 y 10 m de profundidad. Las muestras fueron guardadas en recipientes y mantenidas en refrigeración hasta su análisis en laboratorio. Estas muestras fueron analizadas por el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Investigaciones Oceanológicas. El método utilizado para su detección fue el colorimétrico, leyéndose en un espectrofotómetro, para amonio a la longitud de 640 nm y para fosfatos, a 885 nm. Posteriormente de acuerdo a una curva de calibración, se determinaron las concentraciones, método descrito en Strickland y Parsons (1972).

III. RESULTADOS

Los resultados se describen en dos secciones: hidrodinámica y trazador de la descarga.

III.1. Hidrodinámica.

Como se menciona en la Metodología, se realizaron dos diferentes tipos de campañas, una en la cual se colocó un ADP fijo en el fondo y otra, en la que se hicieron recorridos con el ADP instalado en la embarcación, ambos bajo diferentes condiciones de marea y viento. A continuación se mostrarán los resultados de corrientes, primero para el ADP fijo, y en seguida para los recorridos.

III.1.1 Serie de tiempo de corrientes (Campaña realizada en mayo del 2002).

La campaña de mediciones de mayo del 2002 se presenta en la Figura 8, el periodo comprendido son 29.5 días. En la parte superior de la Figura se observan los vectores de viento donde se observó que la dirección predominante es del NW. La gráfica intermedia muestra el nivel del mar y en la gráfica inferior de la Figura, se observan los diagramas de astillas de velocidad de la corriente para las capas recuperadas de ADP, se observó una gran variabilidad de la corriente muestreada a profundidad, aunque la capa superficial muestra fluctuaciones más intensas que las capas inmediatas inferiores.

Corrientes, Nivel del mar y Viento. Mayo/02

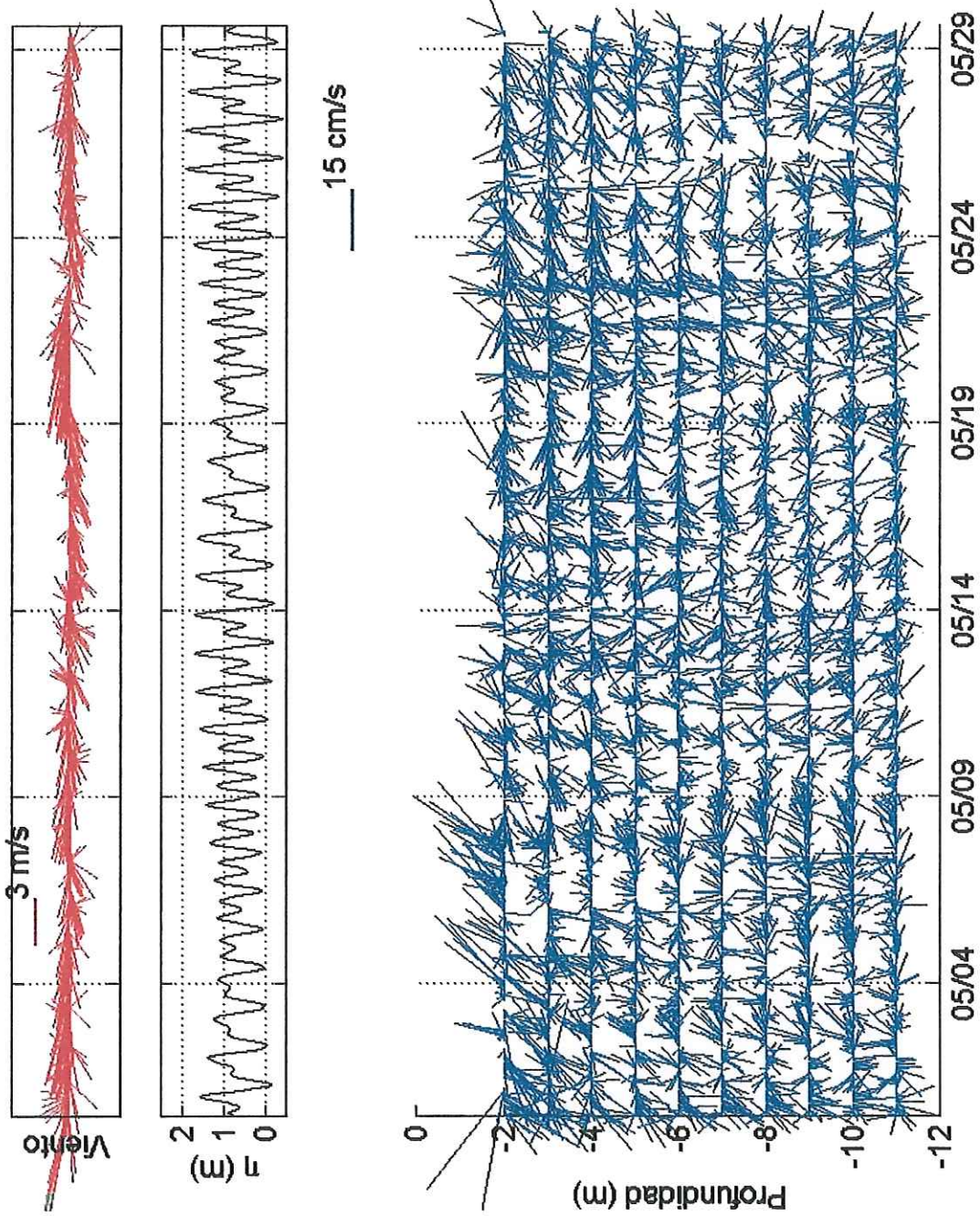


Figura 8. Viento (superior), nivel del mar (medio) y corrientes (inferior) durante el mes de mayo del 2002.

Para una mejor descripción de las magnitudes y direcciones predominantes del viento, se muestra el siguiente diagrama (Figura 9), el cual nos indica una dirección predominante del NW y W. Esta figura está referenciada al norte magnético.

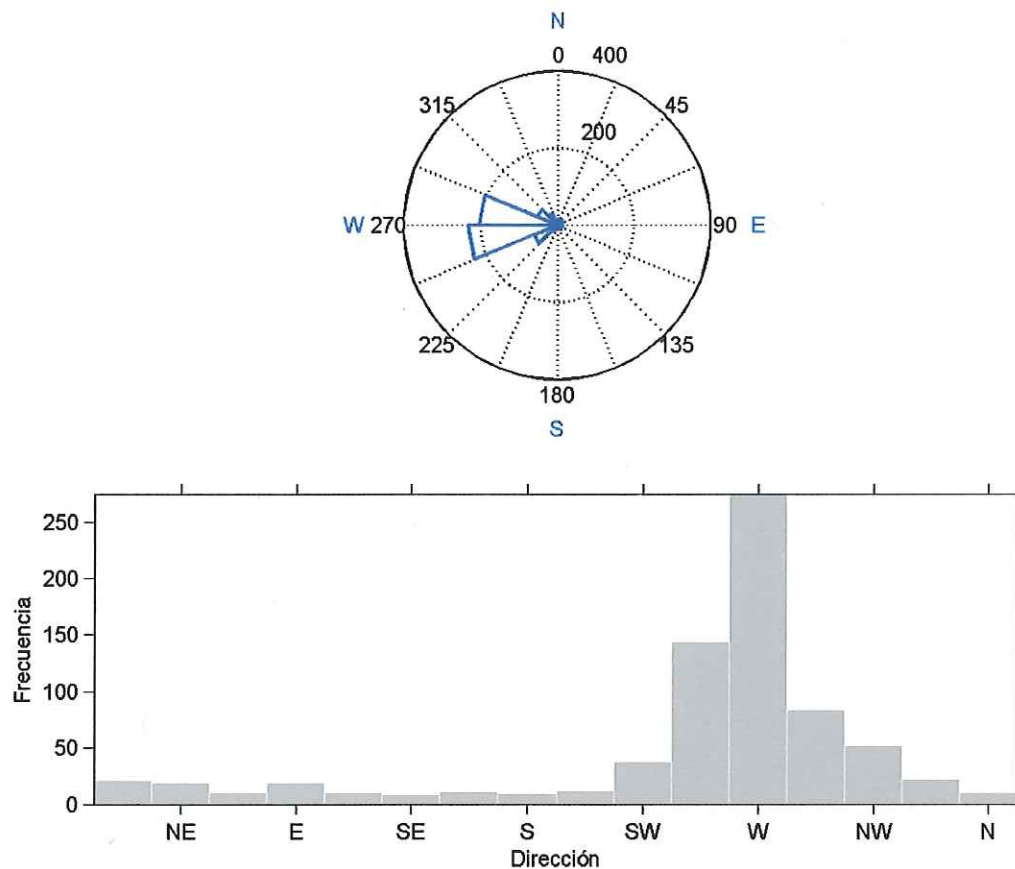


Figura 9. Histograma y diagrama de rosas que muestra la magnitud y dirección del viento para la estación de Punta Morro, para el mes de mayo del 2002.

III.1.1.1. Condiciones de viento.

La magnitud de las velocidades del viento para el mes de mayo y diciembre del 2002, se muestran mediante un histograma (Figura 10), donde se observó una amplia distribución de $1-5 \text{ ms}^{-1}$, para el mes de mayo, disminuyendo en diciembre con menores velocidades de $0-4 \text{ ms}^{-1}$.

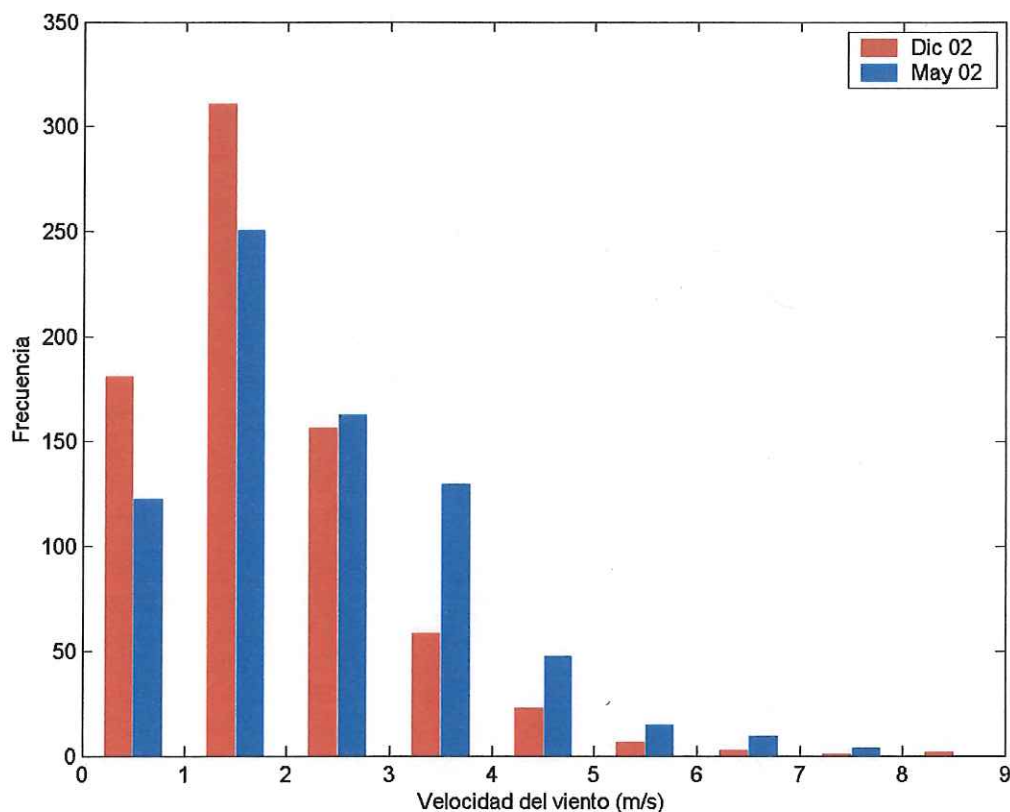


Figura 10. Histograma de la magnitud de velocidad del viento, para el mes de mayo y diciembre del 2002.

La distribución de las magnitudes de la velocidad para u y v , puede observarse en las Figuras 11, 12, 13 y 14, para cuatro diferentes niveles de profundidad, a 2, 3, 7 y 11 m respectivamente. Para las capas de 3, 7 y 11 m de profundidad, se observó una variación en la magnitud de -10 a 10 cm s^{-1} . A 2 m, se observó un mayor rango hasta alcanzar velocidades de $\pm 20 \text{ cm s}^{-1}$.

En estas figuras también se observan las elipses de variación de la corriente para estas profundidades representativas del comportamiento en la columna de agua. A 2 m la inclinación del semieje mayor es en dirección E con un ángulo de inclinación de 48° . Para 3 m, el comportamiento es similar al anterior sólo que la forma de la elipse es más circular, con un ángulo de inclinación de 43° ; hasta 7 m se observó el mismo comportamiento con un ángulo de 57° ; finalmente, a 11 m la inclinación cambió hacia el W.

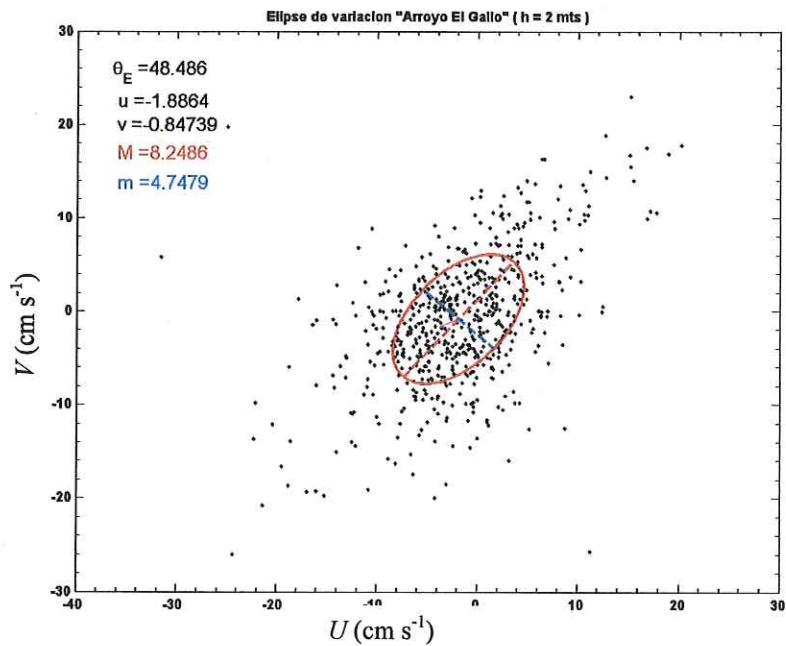


Figura 11. Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 2 m. Se muestran estadísticas como la orientación, promedio de u y v , así como el eje mayor y menor de la elipse.

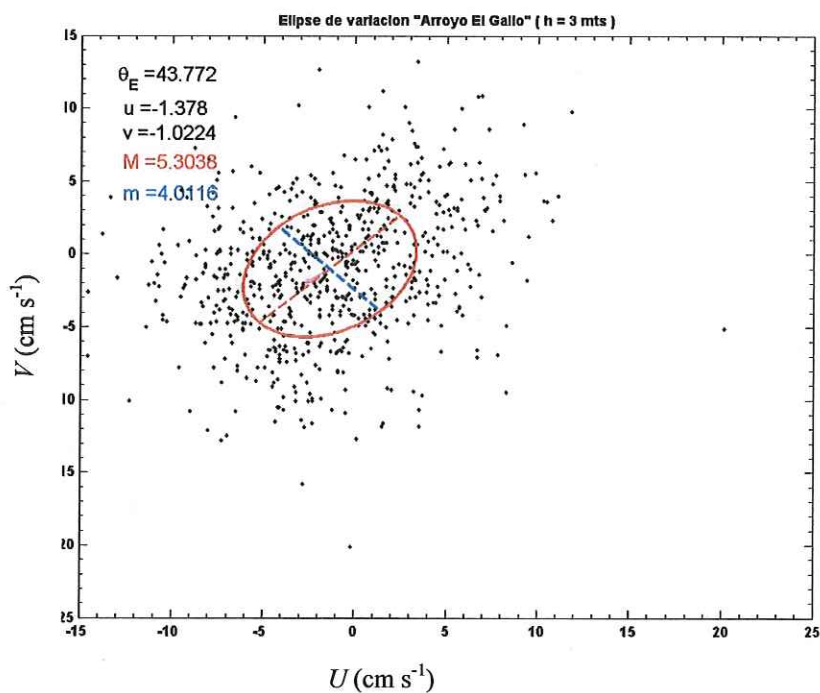


Figura 12. Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 3 m. Se muestran estadísticas como la orientación, promedio de u y v , así como el eje mayor y menor de la elipse.

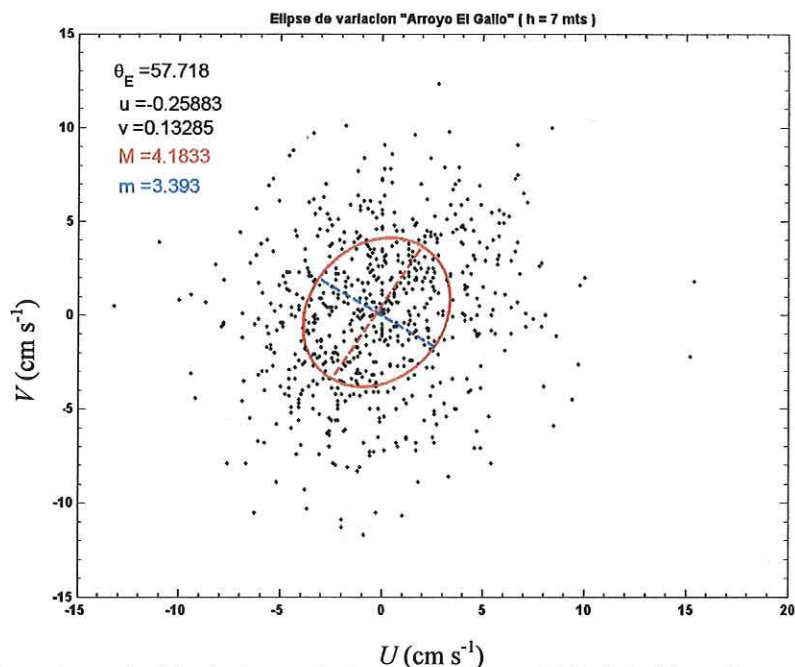


Figura 13. Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 7 m. Se muestran estadísticas como la orientación, promedio de u y v , así como el eje mayor y menor de la elipse.

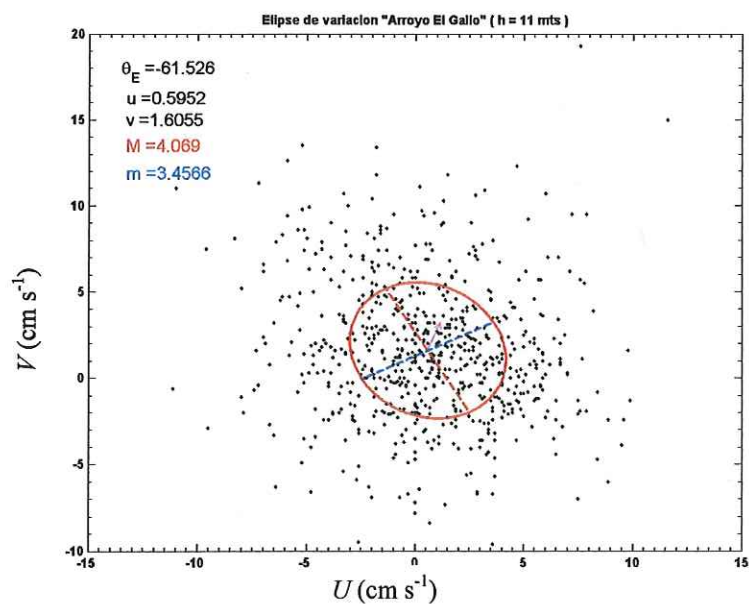


Figura 14. Elipse de variación de la corriente para la profundidad de 11 m. Se muestran estadísticas como la orientación, promedio de u y v , así como el eje mayor y menor de la elipse.

III.1.1.2. Descripción para periodos de marea viva y muerta, bajo diferentes condiciones de viento.

Debido a la gran variabilidad de la corriente, observada en la Figura 7, se analizaron cuatro periodos con eventos de marea y viento de nuestro interés, para los cuales se analizaron las componentes u y v por medio de perfiles velocidad. Los periodos analizados fueron: dos periodos de marea viva, del 11 al 13 de mayo (Figura 15, 16, 17) y del 25 al 27 de mayo (Figura 18, 19, 20); dos periodos de marea muerta, del 3 al 5 de mayo (Figura 21, 22, 23) y del 17 al 20 de mayo (Figura 24, 25, 26), este último, con un periodo de viento intenso del NW posterior a marea muerta. A continuación se describe lo observado.

a. Periodo del 11 al 13 de mayo del 2002 (condición de marea viva).

Durante este periodo, la dirección predominante del viento fue del SW y NW con intervalos alternados del NE. Para la componente v (Figura 15), se observaron cambios en la escala de colores en la vertical, intercalados, de azules que indican el comportamiento de la corriente en dirección hacia el sur a amarillos que indican una inversión del flujo hacia el norte. Cuando la dirección del viento fue NW y SW, la corriente fue hacia el norte, este evento tiene una periodicidad de aproximadamente 24 hrs (entre las 8:00 y 17:00 hrs), con una notable intensificación en las horas en que el viento fue más intenso de 11:00 a 15:00 hrs. Cuando el viento se relajó y coincidió con el reflujó más intenso de la marea (entre las 17:00 y 22:00 hrs aproximadamente), la corriente se observó hacia el sur. También ocurrieron periodos donde la corriente no fue homogénea a lo largo de la vertical y varió la dirección hacia el norte y hacia el sur, generalmente cuando el viento disminuyó, de las 22:00 a 7 hrs.

Con viento proveniente del SW y NW, el comportamiento observado a profundidad fue en general, en un sistema de dos capas, la capa superficial se movió hacia el este, y en el fondo, hacia el oeste; cuando el viento se relajó ocurrió lo contrario. Sólo se observó un comportamiento homogéneo en la vertical cuando el viento fue del SW, observándose una corriente hacia el oeste.

Las correlaciones entre el viento y las capas superficiales (hasta 7 m) fueron bajas (0.5-0.67), aunque fueron mayores que la correlación entre el viento y las capas profundas (valores de 0.3 entre 6 y 11 m de profundidad).

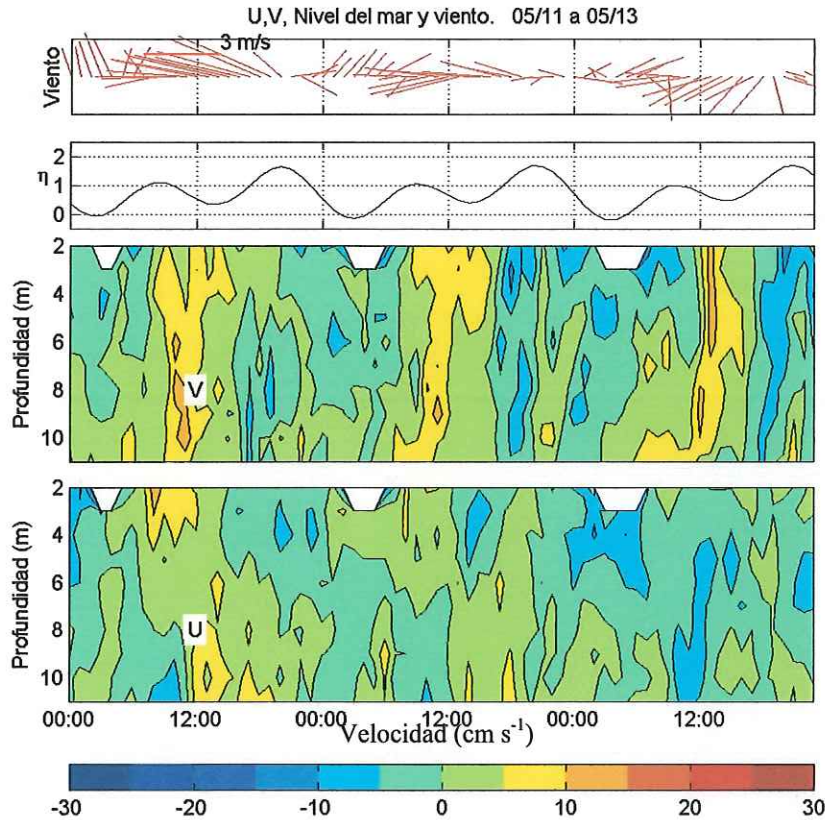


Figura 15. Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 11 al 13 de mayo del 2002.

Particularmente se observaron dos casos: 1) en el refluo de la marea con viento menos intenso (Figura 16), se observó una corriente hacia el suroeste de mayor intensidad en superficie; 2) durante el flujo de la marea cuando el viento de dirección SW intensificó (Figura 17) observándose una corriente hacia el NE y NW, de mayor intensidad nuevamente, en superficie.

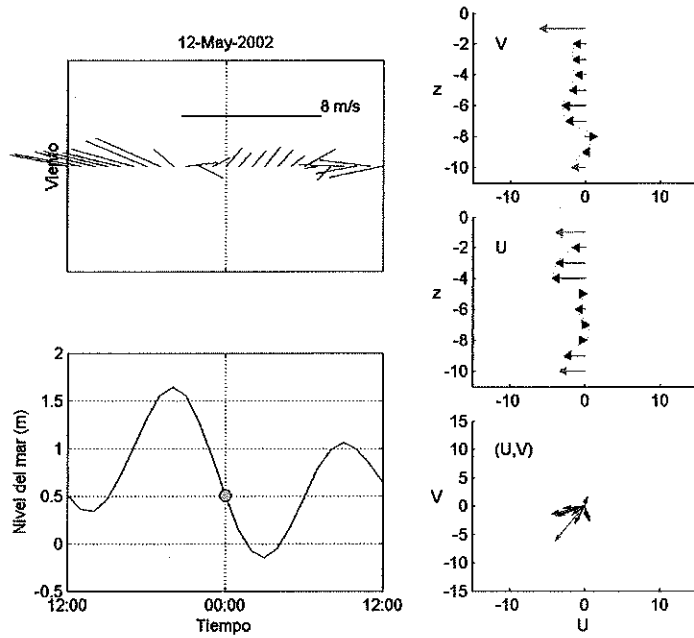


Figura 16. Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 12 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.

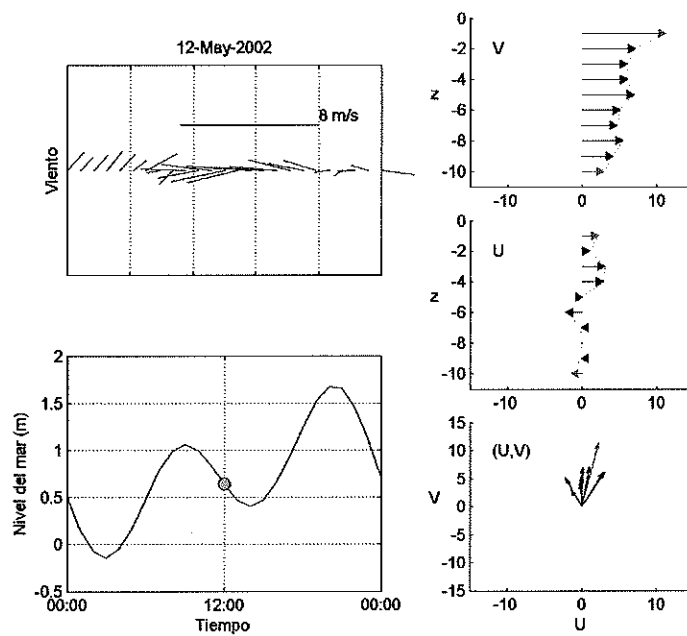


Figura 17. Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 12 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.

b. Periodo del 25 al 27 de mayo del 2002 (condición de marea viva).

Durante este periodo, la dirección predominante del viento fue del NW. En general, se observaron dos casos: cuando hubo cambios en la vertical y cuando la dirección de la corriente en la vertical fue homogénea.

Cuando el viento provino del NW con menor intensidad (durante la noche y primeras horas de la mañana), en la vertical se observaron dos capas, la capa superficial hasta 5 m de profundidad aproximadamente en dirección hacia el SW y la capa de fondo, que cambió hacia el NE (Figura 18).

La corriente en la vertical fue homogénea con viento del NW de 3 m s^{-1} en dirección sur, notándose un cambio de dirección de la corriente hacia el NE, cuando el viento fue del SW y durante el flujo de la marea.

La correlación entre el viento y las capas superficiales (2 a 6 m de profundidad) fueron bajas con valores de 0.06 a 0.31. La correlación entre el viento y las capas profundas (de 7 a 11 m) fueron de 0.4 a 0.6.

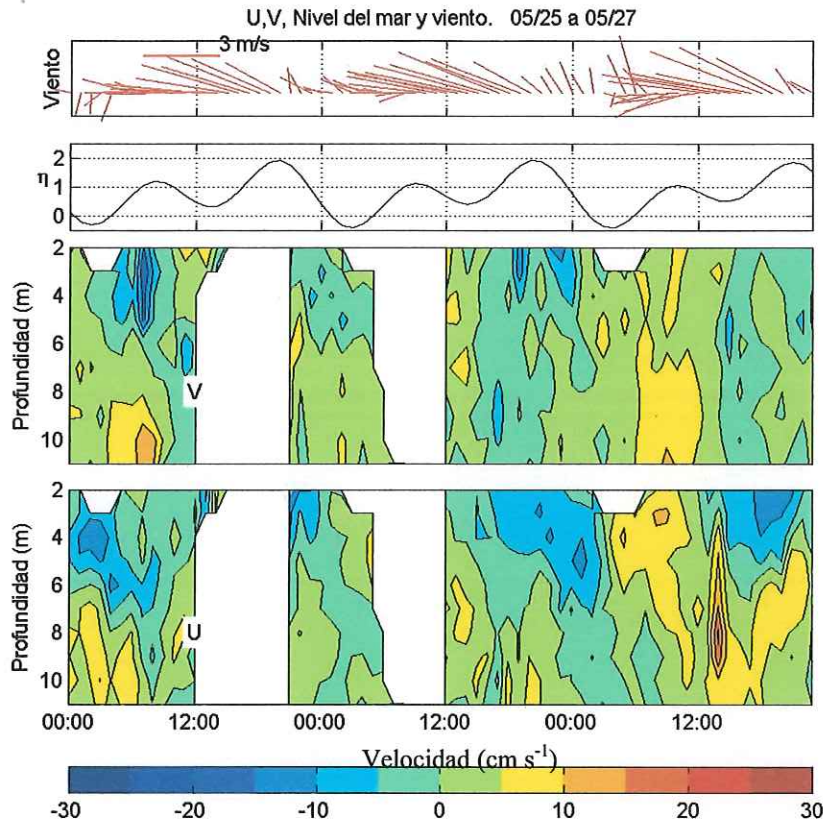


Figura 18. Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 25 al 27 de mayo del 2002.

Particularmente, el 26 de mayo, durante el reflujó de marea con un mínimo de viento, se observó una corriente hacia el SW en superficie y hacia el W en fondo (Figura 19), observándose un cambio de dirección a los 6 m de profundidad más claramente observado para la componente v .

Cuando el viento del WNW se incrementó y durante el flujo de la marea, la corriente fue generalmente hacia el NE (Figura 20).

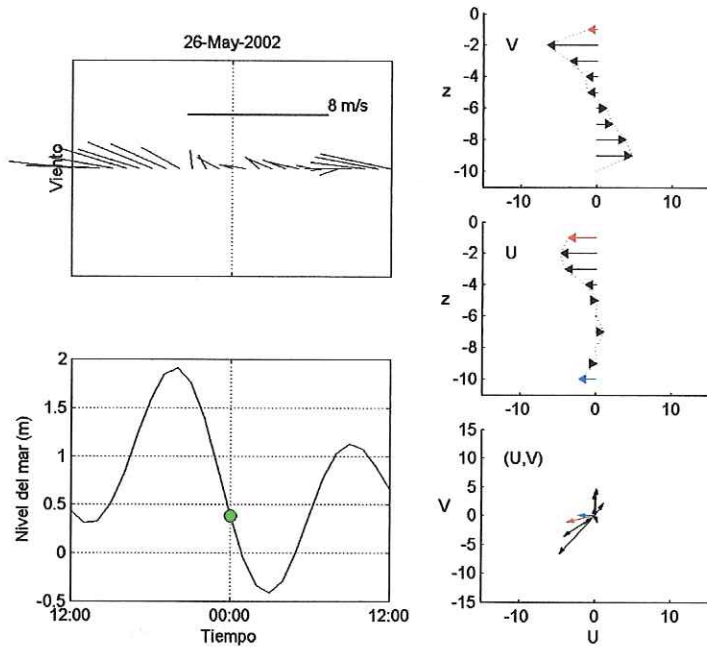


Figura 19. Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 26 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.

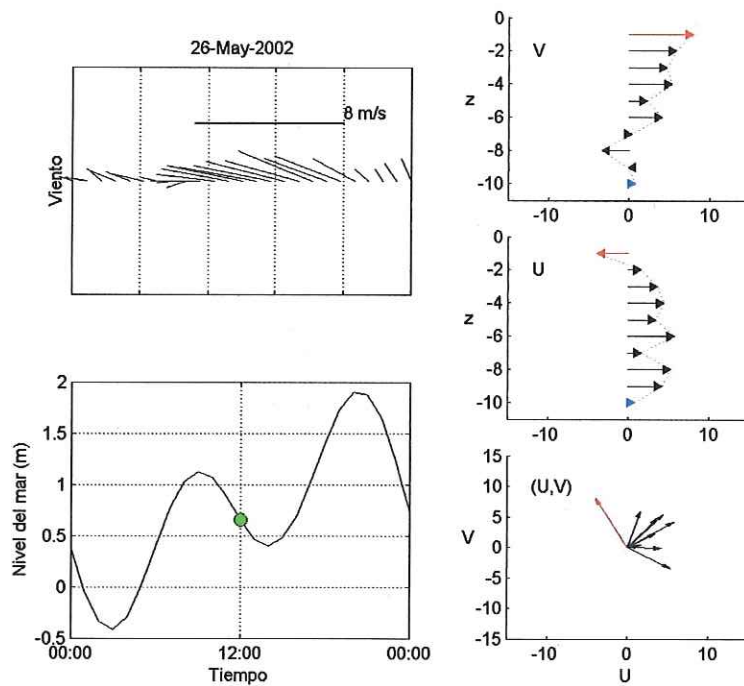


Figura 20. Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 26 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.

c) Periodo del 3 al 5 de mayo (condición de marea muerta).

El viento predominante provino del NW, con magnitudes hasta 6 ms^{-1} (del 3 al 4 de mayo); posteriormente los vientos disminuyeron a magnitudes de 4 m s^{-1} , el día 5 de mayo. La influencia debido al patrón de brisas intensificando la magnitud del viento en el día y disminuyendo en la noche, se pudo observar al generarse una corriente con dirección hacia el sur durante la noche cuando el viento disminuye y hacia el norte en el transcurso del día, cuando el viento intensifica. Cuando el viento fue menos intenso, se observaron unos núcleos de corriente en la superficie con magnitudes de 10 a 20 cm s^{-1} de dirección NE. Para la componente u el comportamiento fue menos homogéneo que para v , principalmente hacia el W en superficie y hacia el E en fondo. (Figura 21).

Se encontraron correlaciones con el viento, de 0.4 a 0.5 para el fondo de 7 a 11 m de profundidad y valores de 0.06 a 0.3 en la capa superficial, de 2 a 6 m de profundidad. Las correlaciones se hicieron para todo un día no distinguiendo madrugada y mediodía por lo que el resultado puede ser poco objetivo.

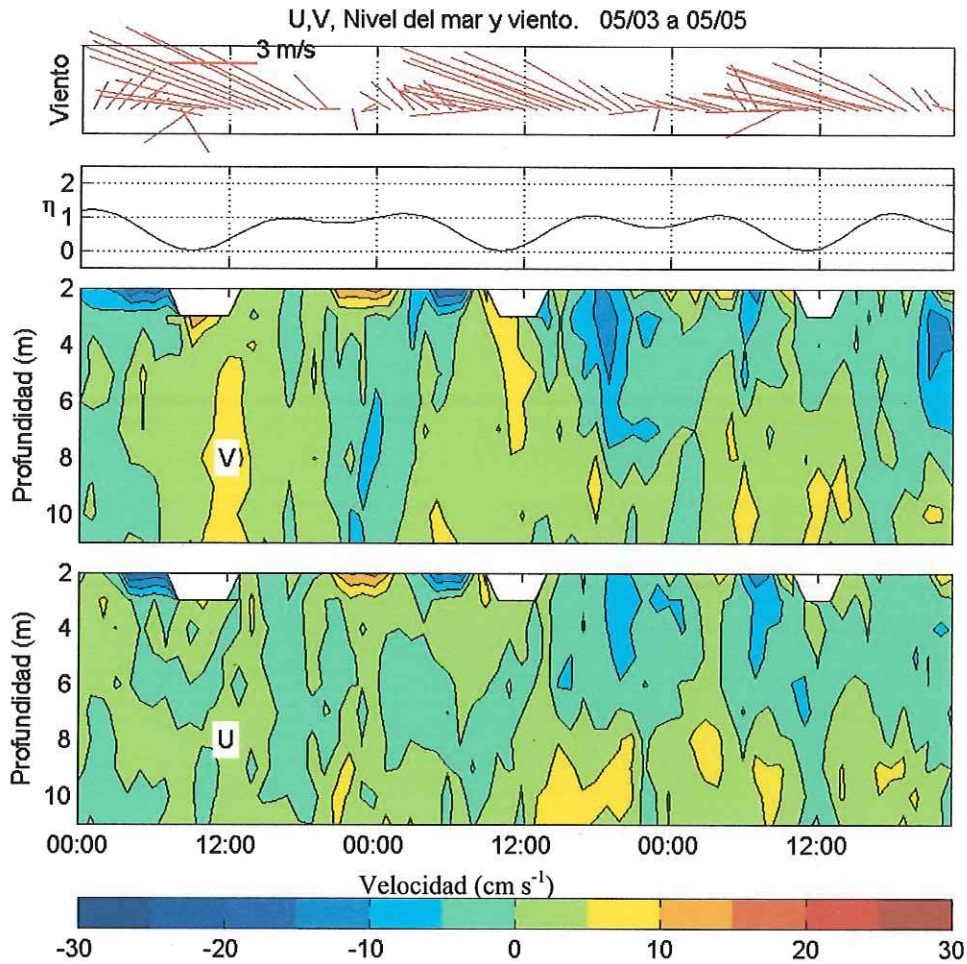


Figura 21. Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 3 al 5 de mayo del 2002.

En la Figura 22, se puede observar un perfil vertical, cuando la marea está subiendo, con viento del NW, menos intenso, bajo estas condiciones se observó una corriente superficial en general hacia el SE y en el fondo hacia el SW. Cuando el viento intensificó (Figura 23) hasta 6 ms^{-1} , se observó un movimiento de toda la columna de agua para la componente v , hacia el norte y para u el comportamiento fue menos homogéneo, produciéndose como resultante una corriente hacia el NE con magnitud aproximadamente de 10 cm s^{-1} .

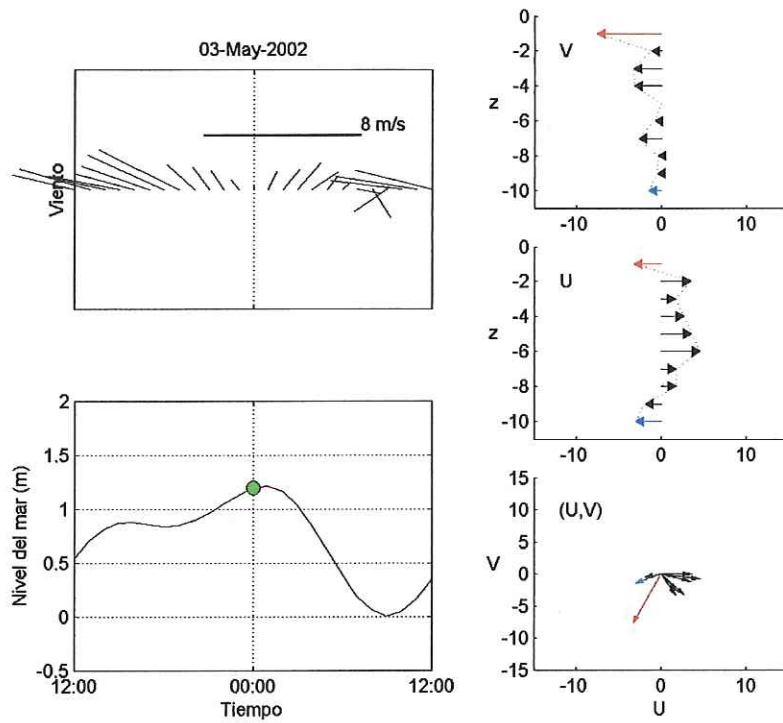


Figura 22. Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 3 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.

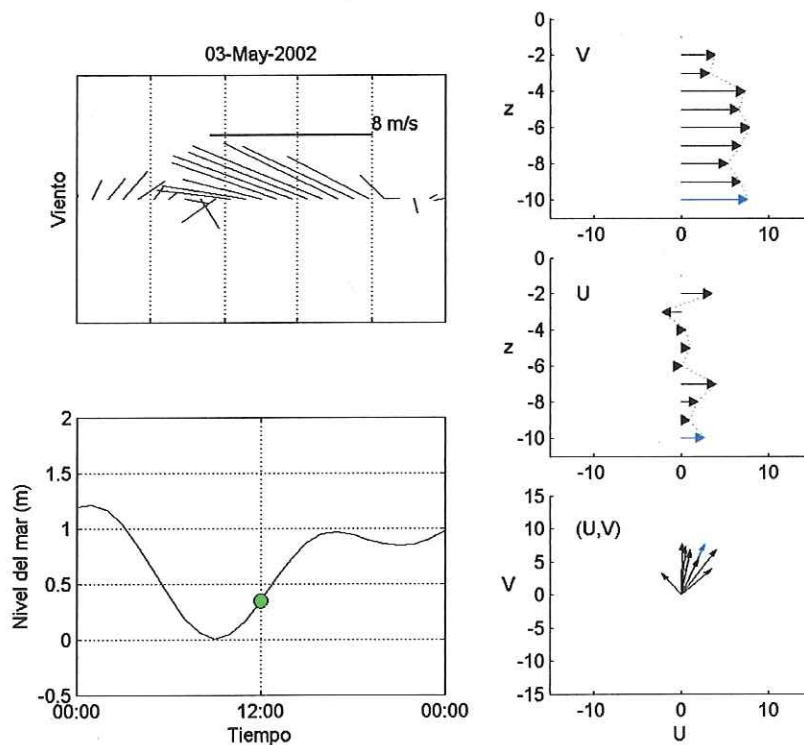


Figura 23. Condiciones de viento, marea y componente u y v para el día 3 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.

d). Periodo durante marea muerta del 19 al 23 de mayo.

La dirección del viento provino del NW, intensificándose hasta alcanzar velocidades de 6 ms^{-1} (del 21 al 23 de mayo), causando la mezcla de toda la columna de agua. Durante este periodo se observaron corrientes de 20 cm s^{-1} dirigiéndose hacia el SW en la noche y hacia el NE en el transcurso de la mañana, cuando la magnitud del viento fue mayor. Cuando el viento decreció a 4 ms^{-1} , la columna de agua no se mezcló, observándose núcleos de agua hacia el SW de la superficie hasta 6 m de profundidad y hacia el NE en la capa de fondo (Figura 24).

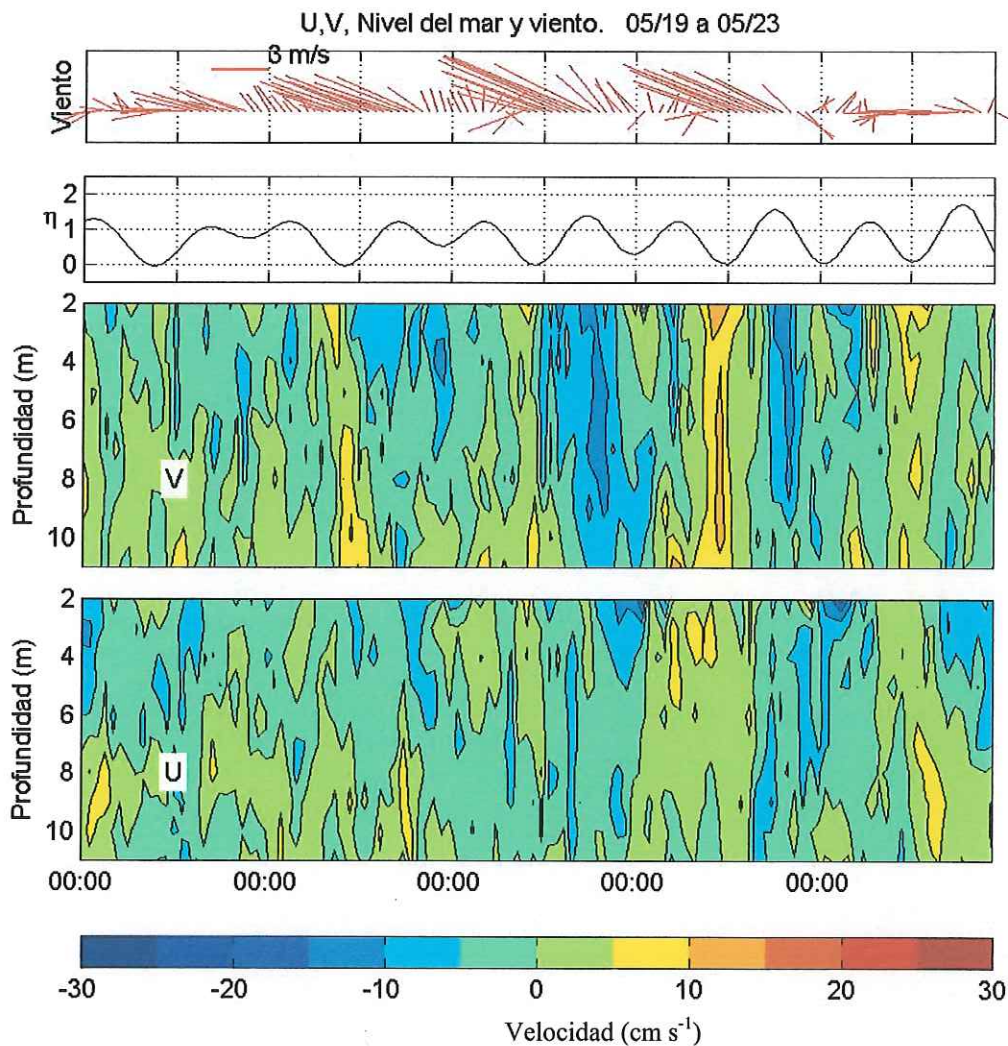


Figura 24. Condiciones de viento, nivel del mar y contornos de velocidad para u (inferior) y v (superior), del 19 al 23 de mayo del 2002.

Particularmente, analizando un evento con viento menos intenso (Figura 25), se observó un comportamiento homogéneo en la vertical para la componente v , en dirección hacia el norte, no así para u , ya que ésta en superficie se dirigió hacia el oeste y posteriormente a los 6 m se dirigió hacia el este. La resultante, fue una corriente hacia el W y NW en superficie y NE en fondo. Cuando el viento intensificó (Figura 26), la componente v cambió de dirección en la vertical, en superficie, fue hacia el sur y en fondo (después de 6 m) hacia el norte; por su parte, la componente u se dirigió hacia el W. Bajo estas condiciones se produjo una corriente superficial hacia el SW y en el fondo hacia el NW.

Se encontraron bajas correlaciones con el viento, con valores de 0.2 en superficie (2m), alrededor de 0.1 de 3 a 8 m y de 0.3 de 9 a 11 m de profundidad.

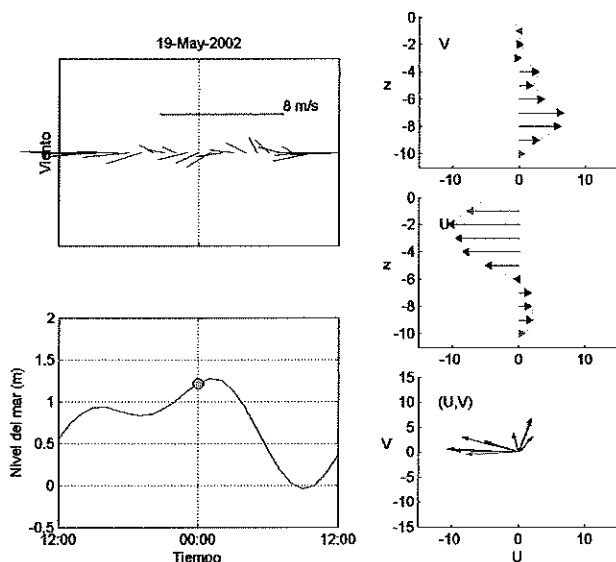


Figura 25. Condiciones de viento, marea, componente u y v , así como los vectores resultantes para el día 19 de mayo del 2002 a las 0:00 hrs.

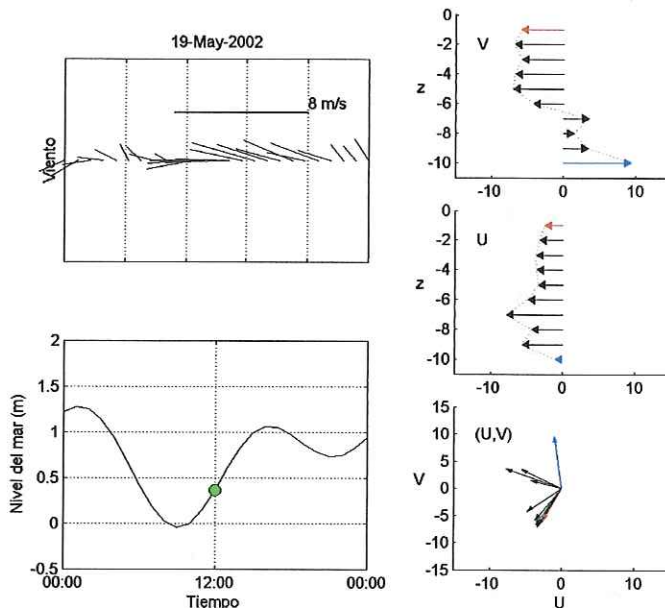


Figura 26. Condiciones de viento, marea y componente u y v , así como los vectores resultantes para el día 19 de mayo del 2002 a las 12:00 hrs.

III.1.1.3. Estimación de la amplitud y fase de la correlación entre el viento y diferentes capas de corrientes así como entre ellas mismas.

A partir de la correlación compleja definida por Mooers (1973) se obtuvieron los coeficientes de amplitud y fase, los cuales son mostrados en la figura 27 y 28. En estas figuras se observan las diferentes correlaciones realizadas: viento con diferentes capas (línea negra), capa superficial (2 a 4 m de profundidad) con el resto de las capas (línea roja), capa media (5,6,7 m) con el resto de las capas (línea azul) y capa de fondo (9,10, 11 m) con el resto de las capas (línea verde).

La correlación entre el viento de Punta Morro y diferentes capas de corrientes (Figura 27, línea negra) resultó baja. Este resultado pudo deberse a que la correlación se realizó diariamente y no cada 12 horas, en que ocurre el cambio de vientos más intensos durante la mañana (donde se esperaría mayor correlación) y menores durante la noche. Otra razón de este resultado, fue que la correlación con el viento de la estación de Punta Morro efectivamente fue baja debido a que como se menciona en los antecedentes, la zona de estudio se localiza dentro de

una zona de convergencia influenciada por el patrón de vientos de toda la bahía y no estrictamente de una estación particular.

En esta misma figura (línea roja), se muestran las correlaciones calculadas entre la capa de 3 m (superficial) con el resto de las capas. La amplitud de correlación fueron valores mayores a 0.5 con las capas a 4, 5 y 6 m de profundidad y menores a 0.5 con las capas de 7 a 11 m de profundidad. La capa de 11 m de profundidad (línea verde), en cambio, presentó una relación inversa a la anterior, mostró una baja correlación con la capa superficial de los 2 a 7 m de profundidad y correlaciones mayores a 0.5 con las capas de 8 m en adelante. Finalmente, la capa media (línea azul), presentó una correlación mayor a 0.5 con las capas de 5 a 9 m y amplitudes menores para los primeros cuatro metros de profundidad y los últimos 2 metros. Estos resultados reflejaron tres zonas bien correlacionadas (valores >0.5): una en superficie de 3 a 6 m de profundidad, una en el fondo de 8 a 11 m y una en medio, de 6 a 8 m. En la gráfica sólo se observan tres profundidades: 3, 7 y 11 m, cada una fue representativa de diferentes profundidades, la de 3 m, para 2, 3 y 4 m, la de 7 m para 5, 6, 7 y 8 m y la de 11m para 9,10 y 11 m.

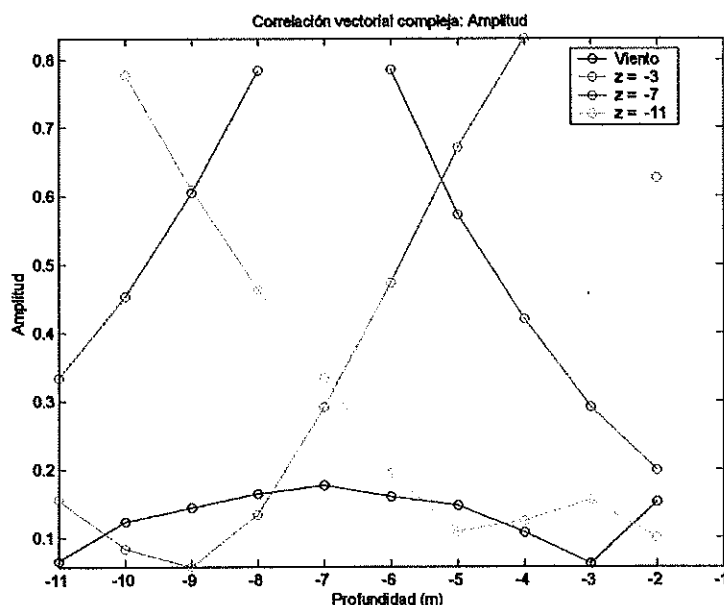


Figura 27. Correlación entre el viento y la corriente en la vertical (línea negra). Correlación entre capas y la superficie (línea roja), con la capa media (línea azul) y con el fondo (línea verde). En el eje horizontal se observa la profundidad de las capas y el eje vertical muestra la amplitud de correlación.

La Figura 28 muestra la fase entre la dirección del viento y la dirección de la corriente (línea negra). Se observó que entre las capas de 3 a 8 m de profundidad ocurrió un desfase positivo mayor a 20 grados con respecto al viento, alcanzando el valor más alto en la capa de 4 m (40 grados); un desfase negativo en la capa de 2 m y, para las capas de 9 a 11 m, el desfase fue menor a 10 grados.

Estos resultados indicaron un desfase diferente entre capas con respecto al viento, mayor en superficie que en fondo.

Para la fase a partir de la correlación compleja entre capas, se observó que con la capa superficial (línea roja), se tuvo un desfase de 5 grados entre esta y las capas de 2 hasta 7 m de profundidad, de 0 grados a 8 m, y a partir de la capa de 9 m de profundidad un desfase de 20 a 120 grados con respecto a la capa superficial. En la capa media no se observó un cambio notable, sólo se alcanzó un desfase de 10 grados con las capas extremas. Finalmente, la línea verde representó la relación entre la capa profunda con el resto de las capas y ocurrió lo contrario que lo observado en la capa superficial (línea roja), ya que no hubo desfase con las capas de 8 a 11 m. Sin embargo, se observó un mayor desfase entre los 2 a 7 m de profundidad, alcanzando un valor de 120 grados en las capas de 2 y 3 m de profundidad.

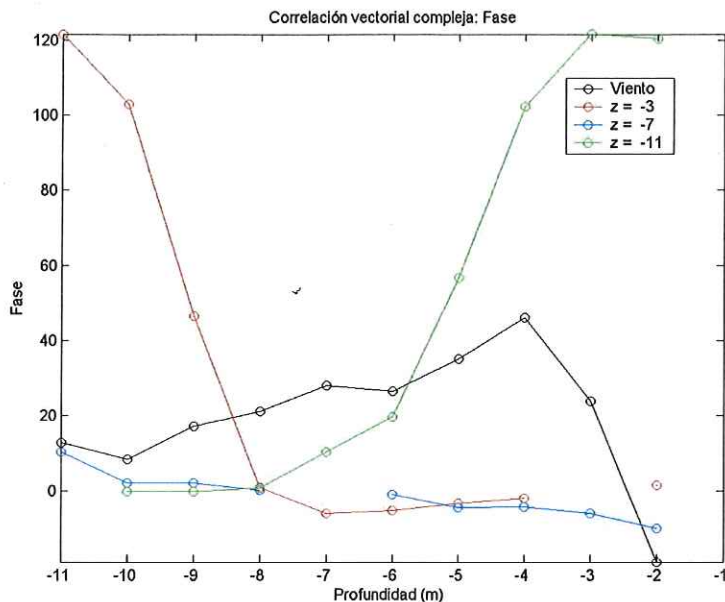


Figura 28. Fase entre el viento y la corriente a diferentes profundidades (línea negra). Fase entre capas y superficie (línea roja), con la capa media (línea azul) y con el fondo (línea verde). En el eje horizontal se observa la profundidad y el eje vertical muestra la fase.

III.1.1.4. Corrientes de marea.

En esta sección se presentan los resultados del análisis armónico, para la componente u y v , la Figura 29 muestra la componente u medida por el ADP (línea negra) y la predicha para la marea (línea roja). Se muestran valores promedio para las diferentes profundidades (3 m, 7 m y 11 m). La Tabla IV, muestra el porcentaje de varianza explicada por la marea, tanto para la componente u como para v , en las diferentes profundidades, cuyo valor oscila alrededor del 20 % para cada componente. La Figura 30 muestra la componente v medida por el ADP (línea negra) y la predicha para la marea (línea roja), a las profundidades anteriores.

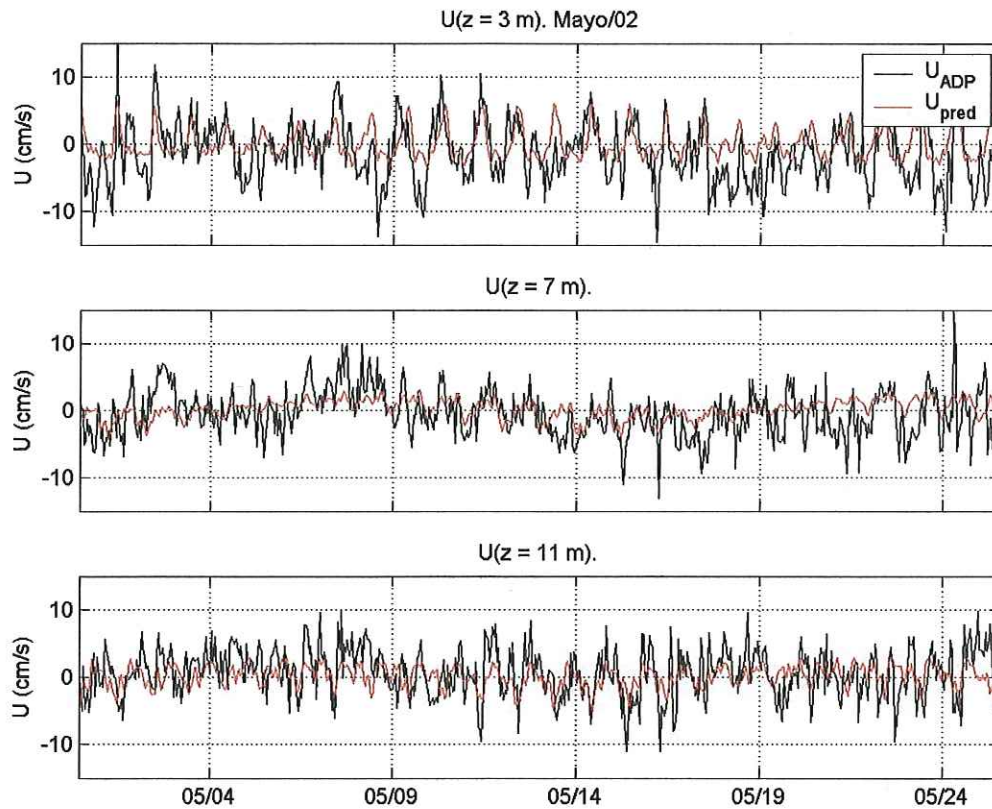


Figura 29. Velocidad medida por el ADP (línea negra) y la corriente de marea predicha (línea roja), para la componente u a diferentes profundidades.

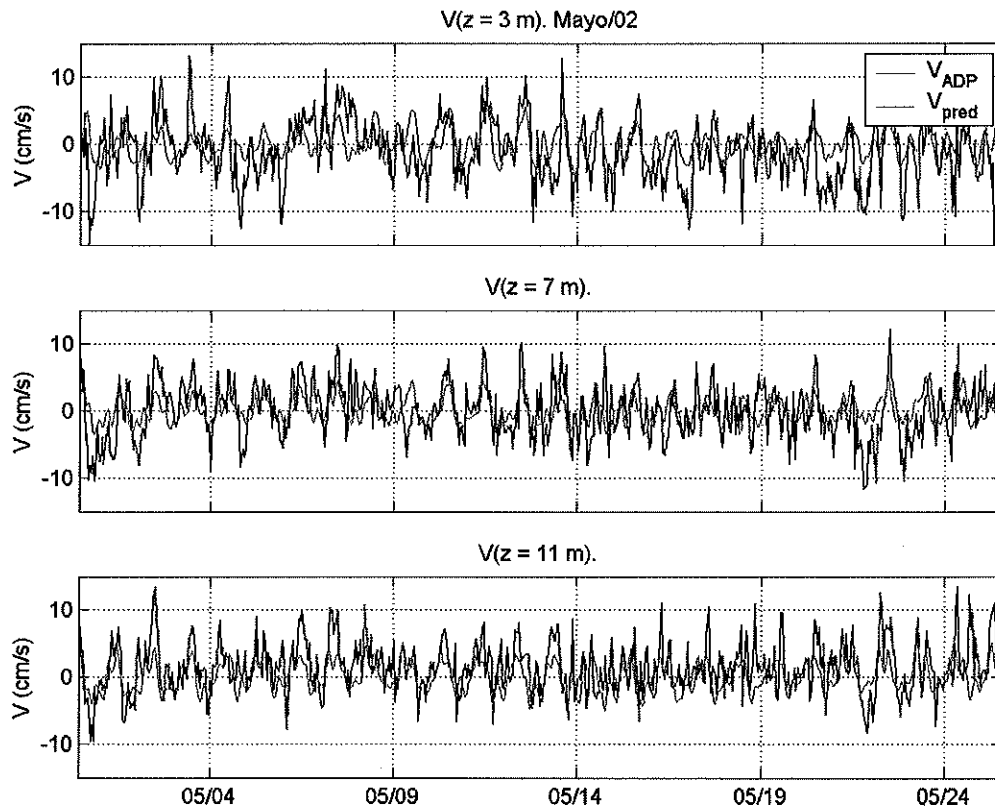


Figura 30. Velocidad medida por el ADP (línea negra) y la corriente de marea predicha (línea roja), para la componente v a diferentes profundidades.

Tabla IV. Promedio de la magnitud y desviación estándar de la velocidad de la corriente para la serie original (ADP) y para la corriente de marea. Porcentaje de varianza explicado por la componente u y v de la corriente de marea, para tres profundidades representativas: 3, 7 y 11 m.

Prof.	V ADP	DES ADP	V Corriente de marea	DES Corriente de marea	% varianza explicada (u)	% varianza explicada (v)
3 m	6	3.2	3.4	1.8	23	21
7 m	4.7	2.6	2.4	1.3	15	22
11 m	4.8	2.8	2.8	1.5	21	32

III.1.1.5. Frecuencias principales observadas para la serie original de ADP y habiendo filtrado la corriente de marea.

Las frecuencias presentes se muestran para la capa a 3 m de profundidad. La línea azul muestra las frecuencias principales de la serie original de datos para la componente u (Figura 31) y para la componente v (Figura 32). Estas fueron: 0.04 cph (periodo de 24 horas) y 0.08 cph (periodo de 12 horas). La línea roja muestra la energía analizada habiendo filtrado el efecto de la marea y se siguen observando estas frecuencias de 0.04 cph y 0.08 cph aunque decreciendo en amplitud.

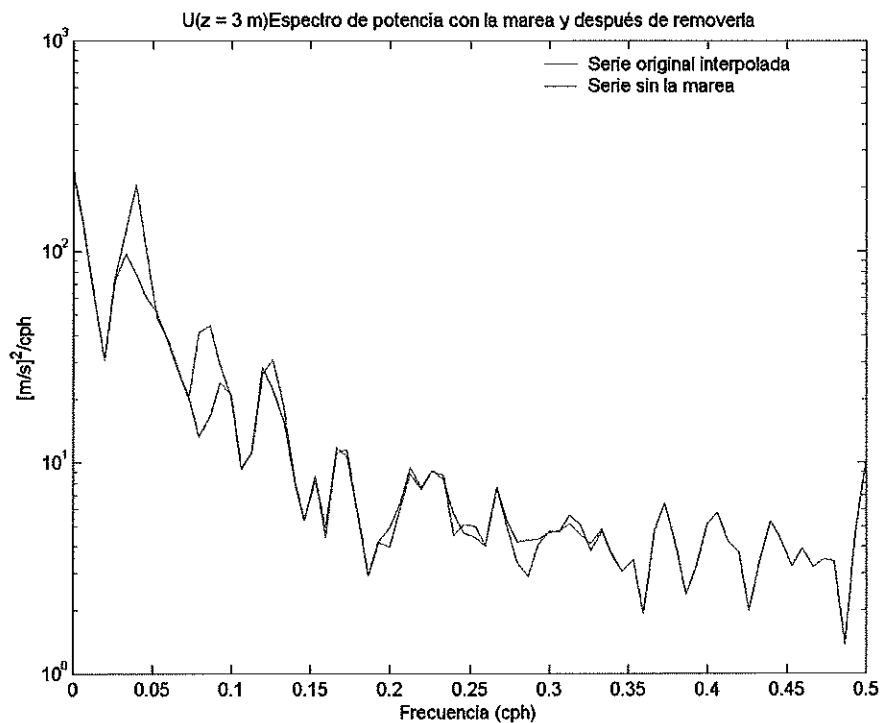


Figure 31. Espectro de potencia para la serie original de la corriente (línea azul) y para la serie removiendo la marea predicha por el análisis armónico (línea roja), para la componente u a los 3 m.

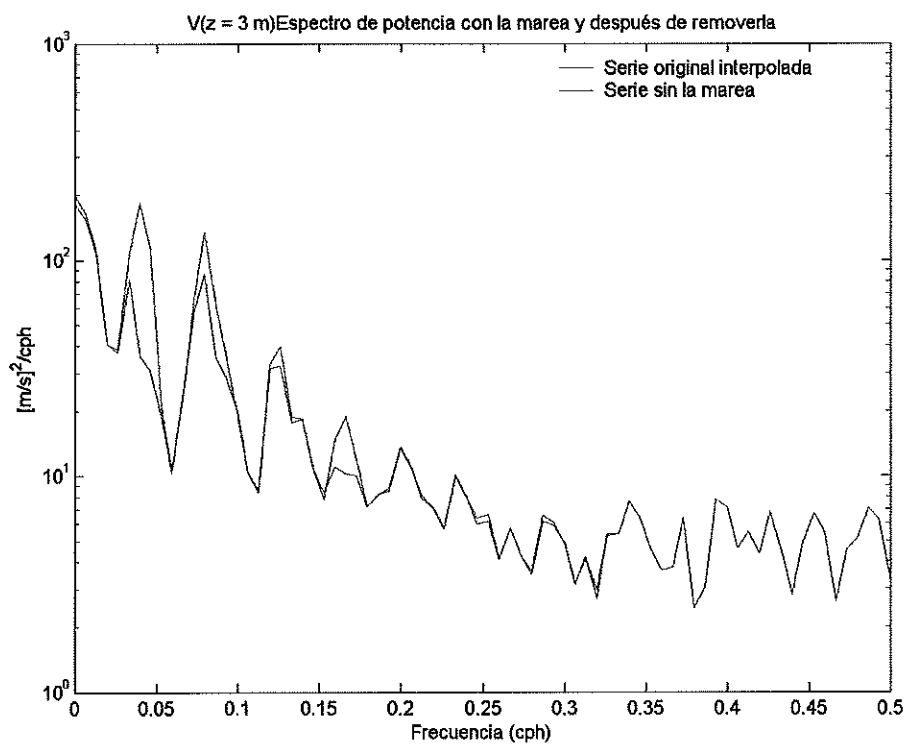


Figura 32. Espectro de potencia para la serie original de la corriente (línea azul) y para la serie removiendo la marea predicha por el análisis armónico (línea roja), para la componente v a los 3 m.

De un análisis posterior, se observó que los constituyentes significativos al 95% de confianza fueron los armónicos K_1 , M_2 y S_2 , para u y para v (Figuras 33 y 34).

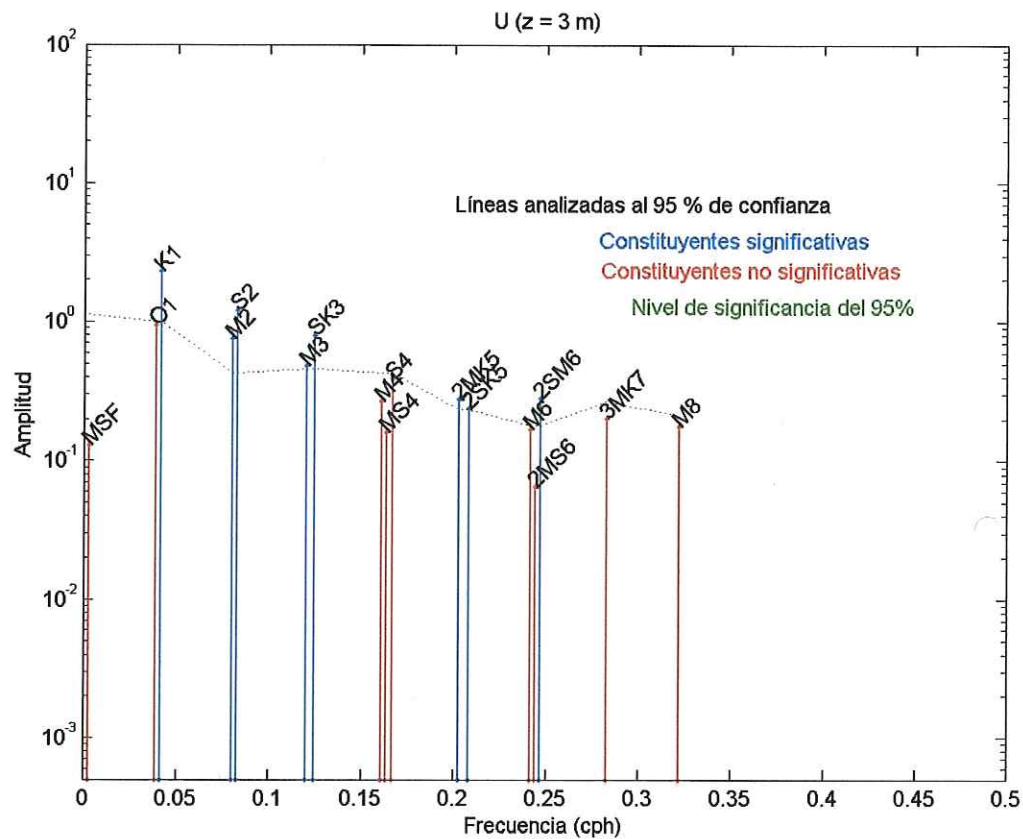


Figura 33. Constituyentes significativos de la marea (líneas azules) para la componente u a los 3 m de profundidad.

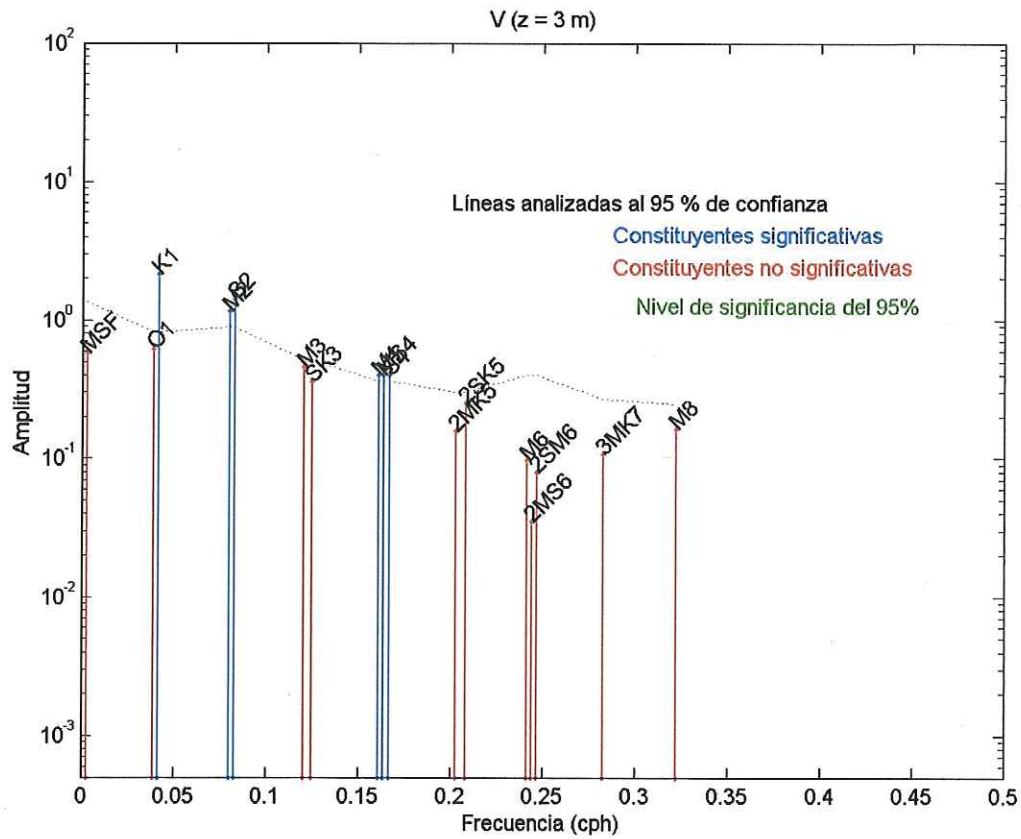


Figura 34. Constituyentes significativas de la marea (líneas azules) para la componente v a los 3 m de profundidad.

III.1.1.6. Diagrama de vectores progresivos.

De acuerdo a los datos anteriores, la marea explicó, cerca del 40% de la varianza (20% para u y 20% para v), por lo que debe existir otro forzamiento que explique el porcentaje de la varianza no explicada por este evento. Esto se puede observar al analizar el siguiente diagrama (Figura 35). En el caso en el que la marea fuera el principal forzamiento, el comportamiento sería oscilatorio tendiendo a regresar al mismo punto periódicamente, sin embargo, esto no se observa en la figura. En la Figura 35, se muestran 3 capas que representan la estructura vertical de velocidad de toda la columna de agua. Aunque se escogieron las profundidades de 3, 7 y 11 m, estas representaron respectivamente los intervalos, 3(2-5) m, 7 (6-8) m y 11 (9-11) m. El punto rojo fue el lugar del que partieron las trayectorias,

observándose un transporte neto inicialmente con trayectorias hacia el NE y SW predominando finalmente la dirección SW en la capa superficial, una transición en la capa media y un transporte hacia el NE en la capa de fondo.

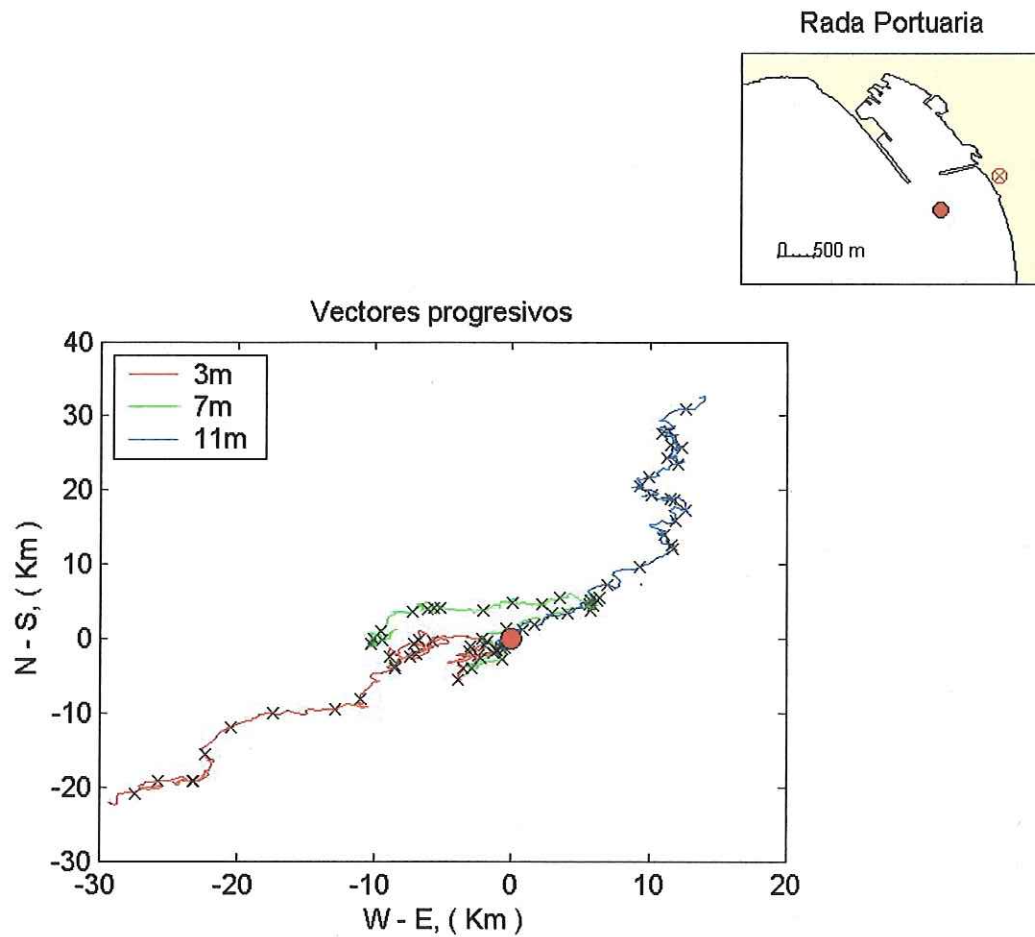


Figura 35. Diagrama de vectores progresivos, se muestra la posición del ADP (●). La línea roja indica la trayectoria de la superficie (3m), la línea verde, la capa intermedia (7 m) y la línea azul, la de fondo (11 m).

III.1.1.7. Corrientes residuales asociadas a un periodo de 24 horas.

Una vez localizadas las principales frecuencias (Figuras 31 y 32), se obtuvo la corriente residual asociada al periodo principal observado que fue de 24 horas (el cual estuvo asociado a la componente de marea, pero también a otro forzamiento que se desconoce), como se puede observar también en el diagrama de vectores progresivos. Este otro forzamiento, diferente a la marea, está posiblemente asociado a la brisa marina (que fue del mismo periodo de la marea, 24 horas) pero, sobretodo, a una zona de convergencia presente en el área, por lo que no se observó una correlación con la dirección del viento (estación Punta Morro) y la corriente residual calculada (Figura 36).

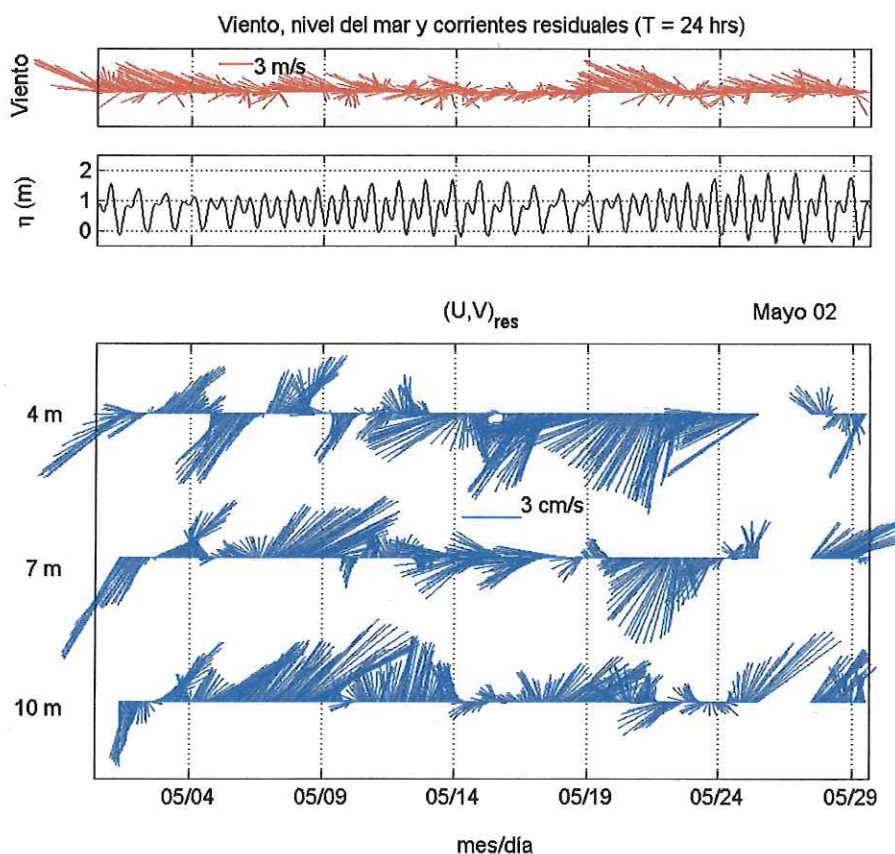


Figura 36. Viento, nivel del mar y corrientes residuales para un periodo de 24 hrs.

Esta figura, muestra las condiciones de viento, nivel del mar y corrientes residuales asociadas al periodo de 24 hrs (K_1 y viento). Se observan tres

profundidades: 4 m, 7 m y 10 m, como representantes de toda la columna de agua. En superficie, inicialmente se observó que el cambio de la corriente del NE al SW fue periódico, observándose que predominó la corriente hacia el SW en condiciones de marea muerta y viento de 6 m s^{-1} . En la capa media, a lo largo del tiempo, inició en dirección NE y finalizó en dirección SW, cuando el viento del NW intensificó a 6 m s^{-1} . La capa de fondo, en cambio, se comportó a lo largo del tiempo en dirección predominantemente NE. Este comportamiento coincidió con el diagrama de vectores progresivos, observando que las corrientes residuales asociadas a un periodo de 24 horas pueden representar el comportamiento general de la serie de mayo. La dirección resultante fue el conjunto de los forzamientos de la marea y del viento (no sólo de Punta Morro, sino también de El Ciprés) el cual junto con la configuración de la bahía, induce una convergencia en el área, intensificada cuando el viento aumenta y produciendo corrientes hacia el SW en superficie y como reemplazo al NE en fondo, lo cual se discutirá más adelante.

III.1.1.8. Variabilidad vertical y temporal para los modos principales observados.

Como una forma de evaluar la estructura de los modos verticales, para observar la forma y porcentaje de varianza que pudieran corresponder a la marea o al viento, u otro forzamiento, se realizó el análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEOS). Primero se aplicó un filtro pasa-bajos a los datos de corrientes, con una frecuencia de corte de 0.09 centrado en 0, utilizando un filtro de Lanczos. A las series ya filtradas de u y v , de forma independiente, se les hizo un análisis de funciones empíricas ortogonales donde se analizó la variabilidad entre las diferentes capas de cada componente de la corriente.

Para la componente u , los dos modos principales fueron el modo 1 (Figura 37) y modo 2 (Figura 38) baroclínicos. El modo 1 vertical explicó el 50% de la varianza donde la mayor variabilidad ocurrió en el fondo después de los 7 m de profundidad (varianza local >0.5), con un nodo a los 4 metros, observándose una variabilidad diurna. La Figura 37 inferior muestra la variabilidad temporal del modo 1. El modo 2 vertical (Figura 38), explicó el 39% de la varianza donde la mayor

variabilidad se observó en los extremos de las capas y presentó un nodo a los 7 metros de profundidad, con variabilidad semidiurna. En la parte inferior se muestra la variabilidad temporal.

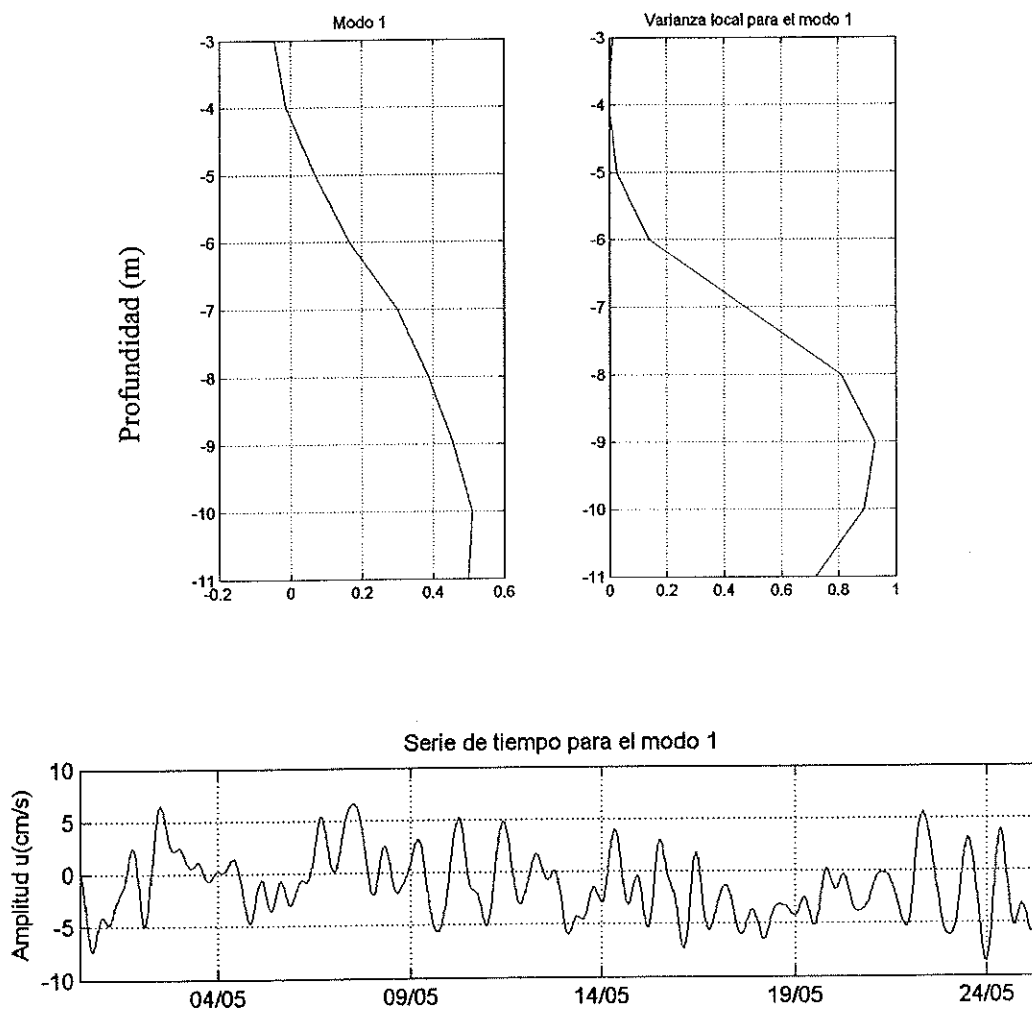


Figura 37. Modo 1 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente u .

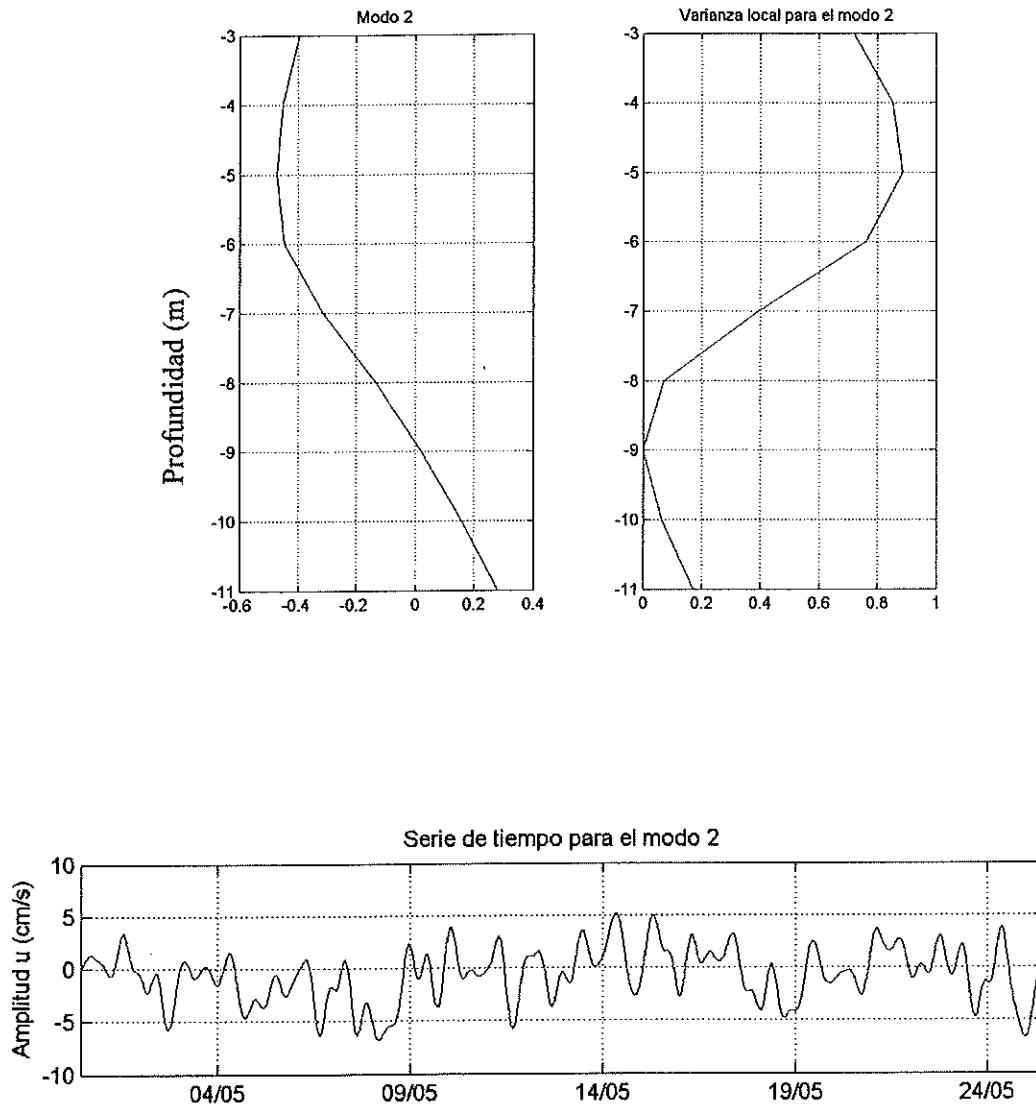


Figura 38. Modo 2 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente u .

Para la componente v , el comportamiento fue diferente, el modo principal (Figura 39) no presentó ningún nodo, lo que representa a un modo barotrópico, este modo explicó el 75% de la varianza, con una variabilidad en toda la vertical, mayor a 0.5, con mayor varianza en la capa intermedia, la serie temporal presentó variaciones diurnas. El modo 2 (Figura 40) sólo explicó el 17% de la varianza, observándose un nodo a los 9 m de profundidad, este fue un modo baroclínico con mayor variabilidad en superficie de 3 a 7 m de profundidad, la serie temporal presenta variaciones semidiurnas.

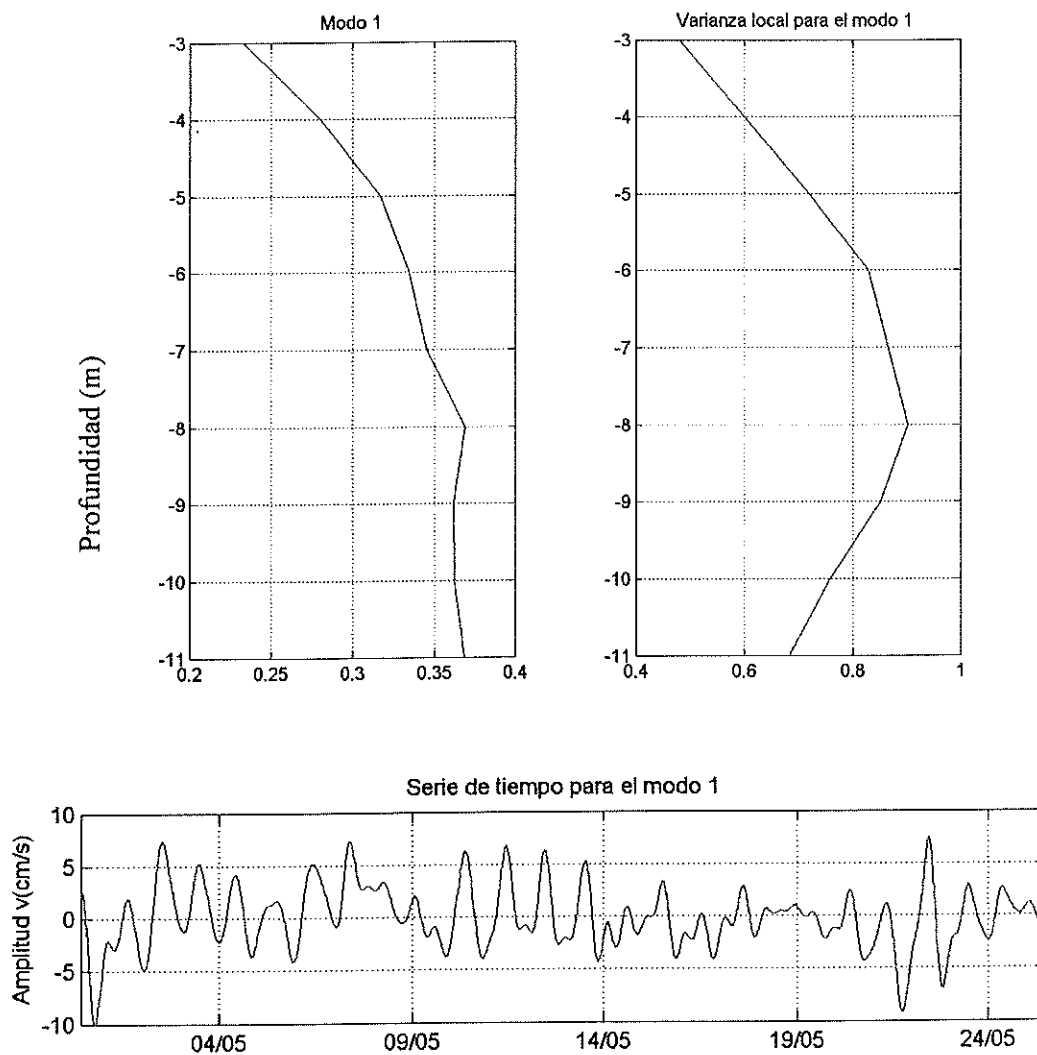


Figura 39. Modo 1 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente v .

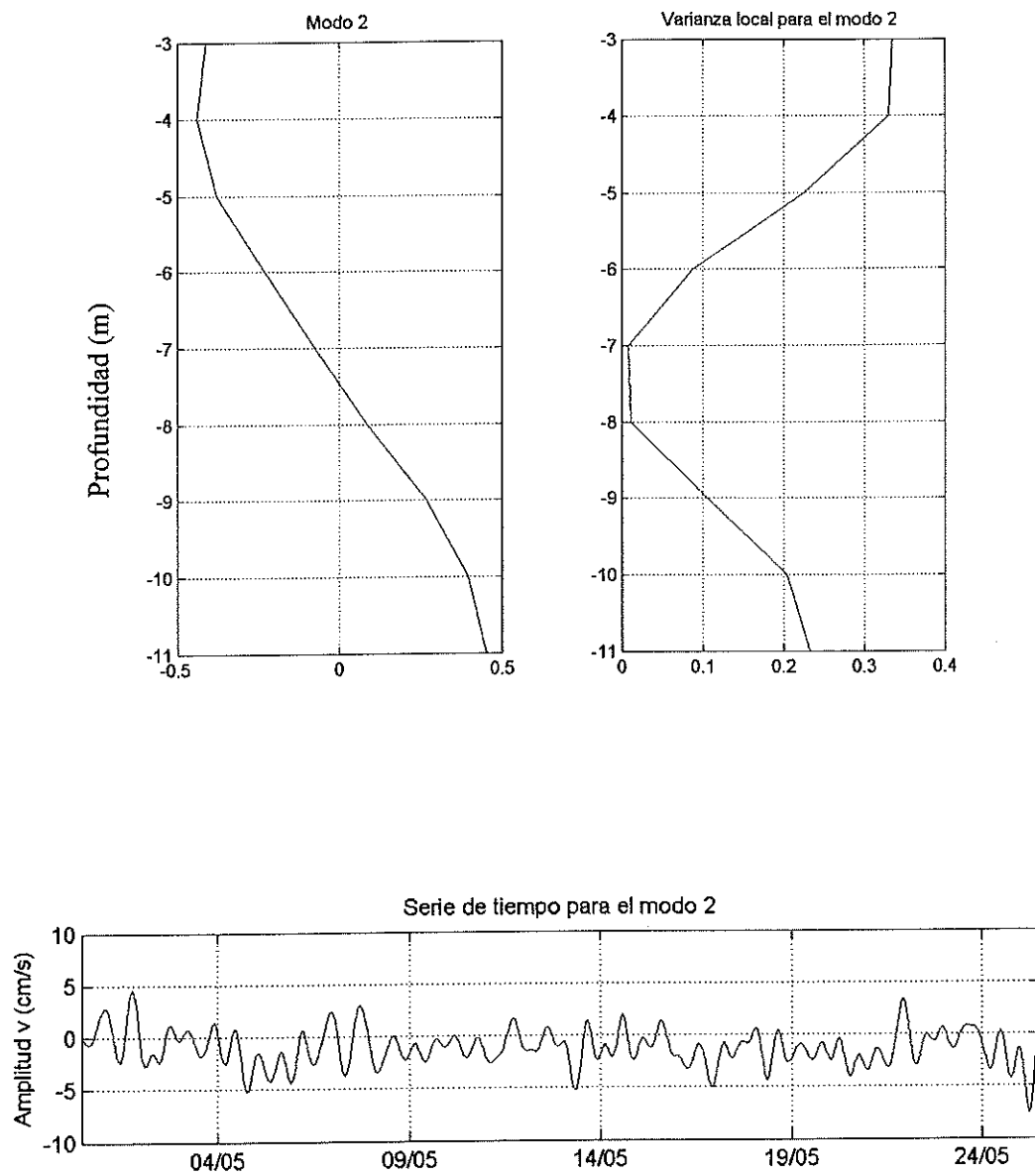


Figura 40. Modo 2 vertical, su varianza y serie temporal, para la componente v

III.1.2. Serie de tiempo de corrientes (campaña realizada en diciembre del 2002).

Esta campaña de medición fue realizada para monitorear las corrientes durante el invierno. La intención original fue mantener el ADP midiendo por un periodo de 30 días. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas al momento de realizar el experimento, esto no fue posible, ya que la presencia de una tormenta invernal alrededor del 16 de diciembre volteó y enterró el ADP aproximadamente 2 m, lo que impidió la estimación correcta de la velocidad de la corriente, por lo que después de recuperado sólo se tuvieron 3 días de datos.

En la Figura 41 se observan las velocidades resultantes para este periodo, se incluye la velocidad del viento y el nivel del mar. En la figura se observa que el viento provino del NE y SW principalmente con magnitudes menores a 3 m s^{-1} , con un incremento el día 16 de diciembre hasta 9 m s^{-1} de dirección S. Las mediciones de la corriente se hicieron durante marea muerta. Para el 13 de diciembre inicialmente se observó una corriente hacia el SE (con viento predominante del NE) hasta 9 m y hacia el NE en fondo, cambiando la dirección a partir del 14 de diciembre (con viento del SW) hacia el NW en toda la columna de agua con magnitudes de 5 a 10 cm s^{-1} en promedio. En el último día de medición, anterior a la tormenta, se midieron corrientes de 20 cm s^{-1} en dirección hacia el NW en los primeros 9 metros y hacia el SW de 10-11 m de profundidad. Estas corrientes fueron observadas previo a la tormenta, por lo que la causa de estas, pudieron deberse al arribo de oleaje generado remotamente (swell).

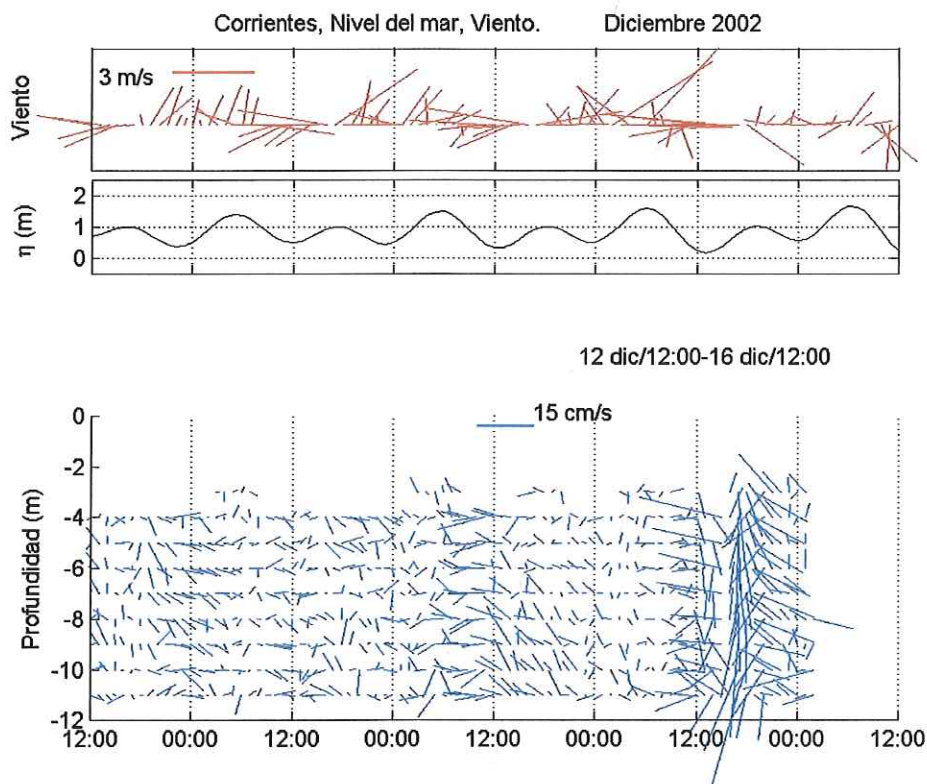


Figura 41. Diagrama de astillas para el periodo del 12 al 14 de diciembre del 2002, en la columna de agua.

Para analizar las condiciones de viento para el mes de diciembre, se muestra el siguiente histograma de frecuencias referenciado al norte magnético. En este diagrama se observa que predominó la dirección NE y WNW del viento (Figura 42).

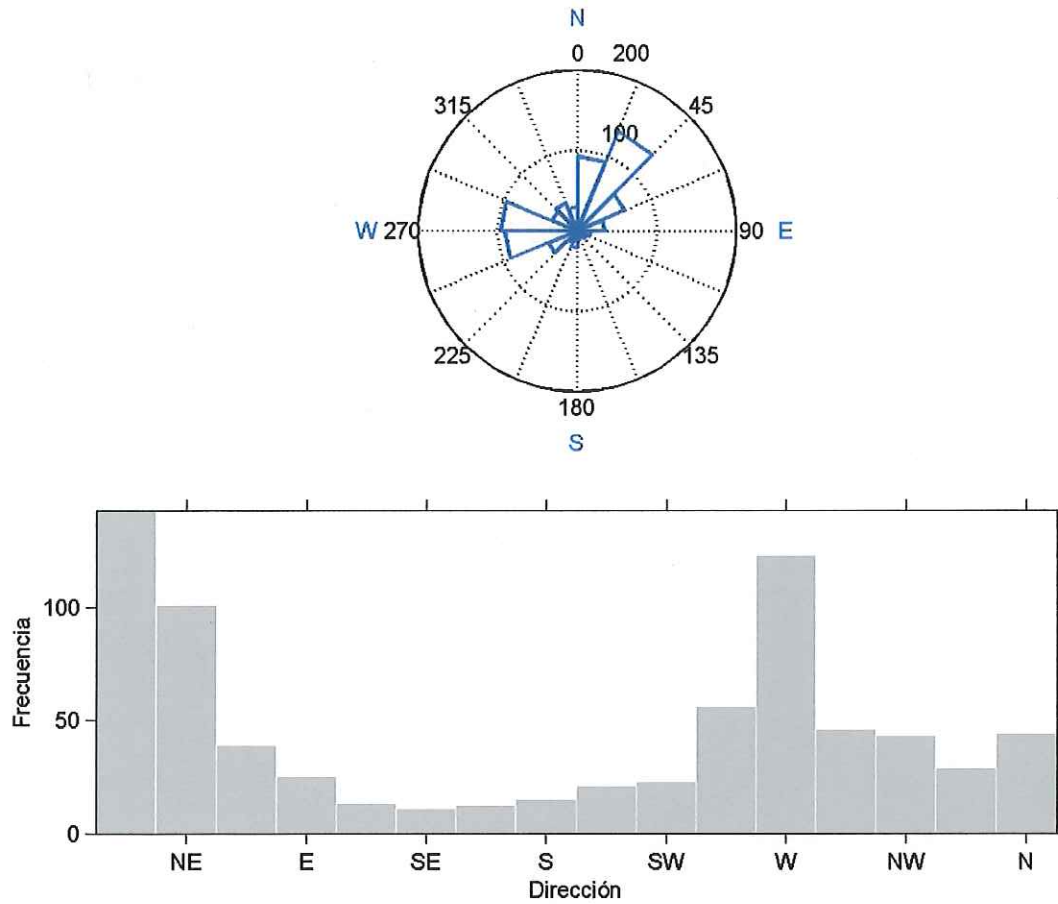


Figura 42. Diagrama de rosas e histograma y que indican la dirección W y NE predominante para la estación de punta Morro, para el mes de diciembre.

III.1.3. Patrón de corrientes para los recorridos perpendiculares a la línea de costa.

III.1.3.1. Condiciones de marea muerta durante el refluo con viento del SW de 3 m s^{-1} (Fecha: 27 de noviembre del 2002).

La corriente esperada para estas condiciones de viento es hacia el NE, sin embargo, lo que se observó fue una corriente hacia el SW (Figuras 43 y 44), con magnitudes promedio de 15 cm s^{-1} , como consecuencia del refluo de la marea y del apilamiento en la costa debido al forzamiento del viento que al ser encajonado por el espigón y la línea de costa, produjeron corrientes en sentido contrario a lo esperado. Se observaron también algunas magnitudes de velocidad mayores a 20 cm s^{-1} en zonas cercanas a la costa y en la boca del puerto. El mismo patrón se presentó a lo largo de la vertical, con algunas intrusioniones de agua hacia el norte. En la boca del puerto se observaron magnitudes de 30 cm s^{-1} en dirección SW.

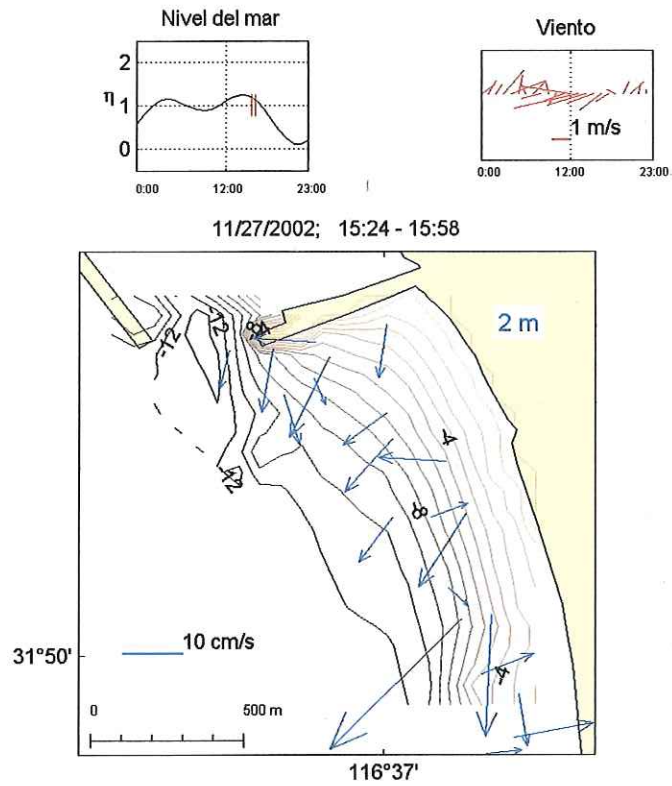


Figura 43. Corrientes durante marea muerta con viento del SW a 2 m de profundidad.

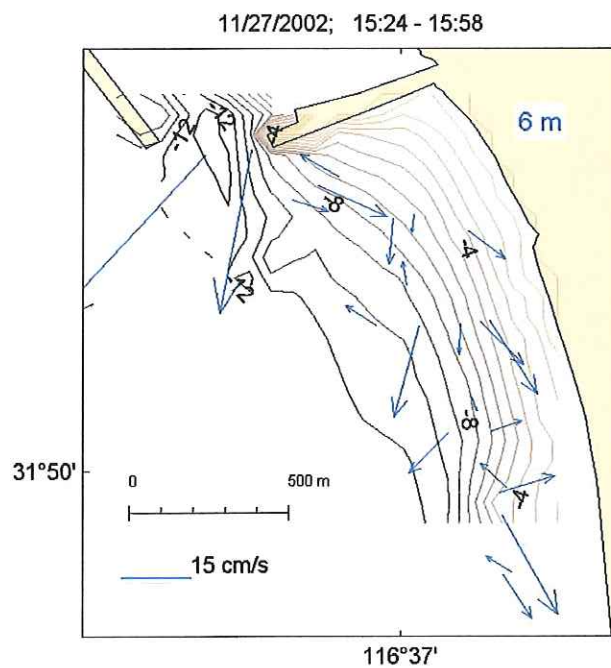


Figura 44. Corrientes durante marea muerta con viento del SW a 6 m de profundidad.

III.1.3.2. Condiciones de marea viva en el refluo con viento predominante del SE y SW de 1 m s^{-1} (Fecha: 5 de diciembre del 2002 inicio 8:52 hrs).

Para este periodo no se observó un claro comportamiento horizontal en toda la columna de agua. En general, se observaron corrientes de 6 cm s^{-1} . En la zona junto al espigón, en superficie se observaron corrientes del NE con chorros de agua hacia el SE y SW extendiéndose en forma de brazos a través de la malla (Figura 45), en la capa media (Figura 46) estos brazos disminuyeron y se presentaron corrientes hacia el NE y NW. Finalmente, a profundidad de 9 m nuevamente se ensanchó la corriente hacia el SW aunque continuó la presencia de intrusioniones de agua hacia el norte (Figura 47). En el extremo sur de la malla mientras que en superficie la corriente fue hacia el S mientras que en la capa media y fondo la corriente cambió hacia el W.

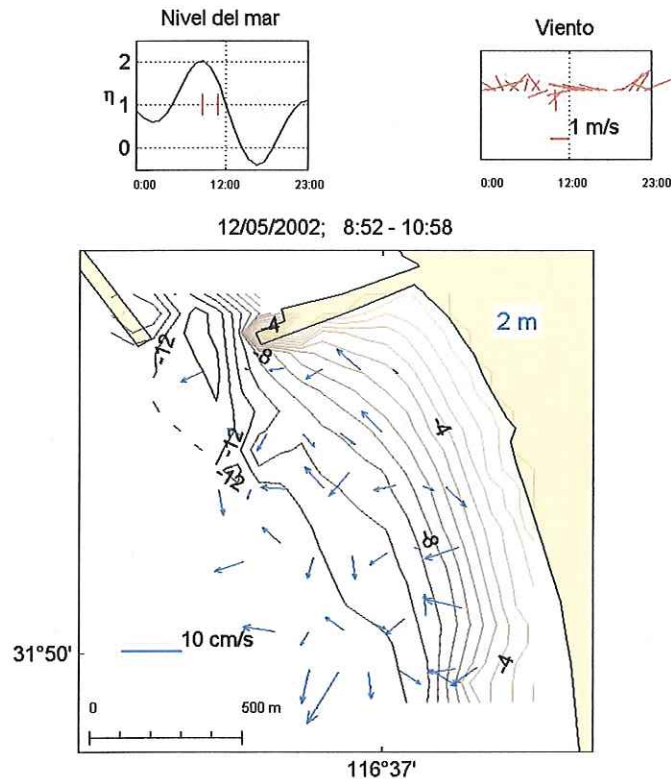


Figura 45. Corrientes en condiciones de refluo durante marea viva y viento del SW a 2m de profundidad.

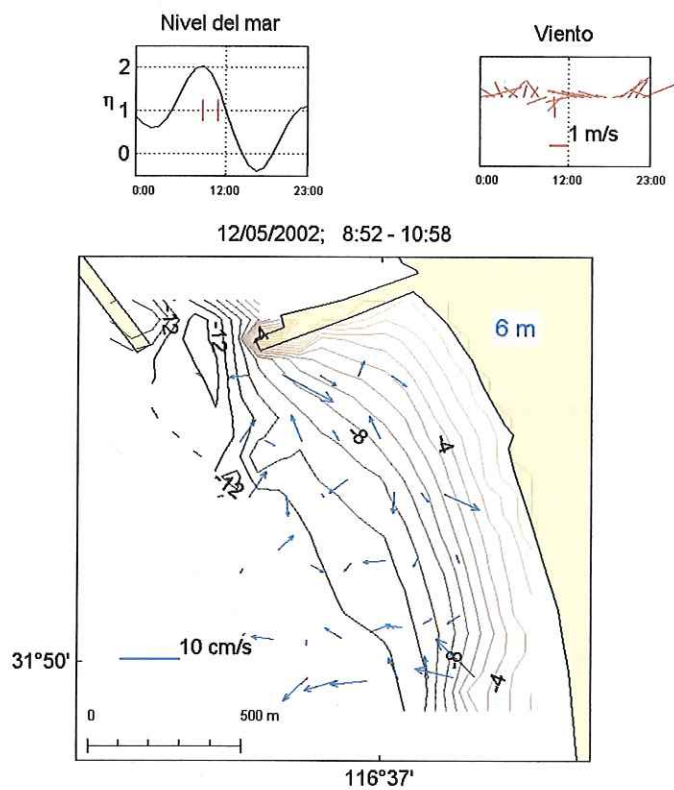


Figura 46. Corrientes en condiciones de refluo durante marea viva y viento del SW a 6 m de profundidad.

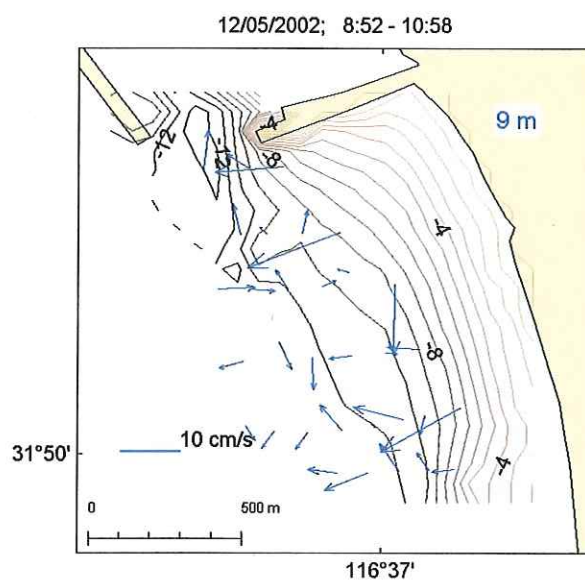


Figura 47. Corrientes en condiciones de refluo durante marea viva y viento del SW a 9 m de profundidad.

III.1.3.3. Condiciones de marea viva en el reflujó con viento predominante del NW de 2 m s^{-1} (Fecha: 5 de diciembre del 2002, inicio 13:11 hrs).

Se observó un comportamiento diferente en la horizontal a lo largo de la misma profundidad, con corrientes de aproximadamente 10 cm s^{-1} . En la boca del puerto, se observaron corrientes de 10 cm s^{-1} en dirección SW a 2 m de profundidad (Figura 48), en la misma figura se observó un cambio en la dirección a 9 m (Figura 50), en dirección SE. En general, a 2 m se observó una corriente predominante hacia el SW y SE con intrusiones al N en la parte cercana al espigón. En la capa media (Figura 49) se observó una mayor variabilidad; para u , junto al espigón la dirección fue W mientras que 500 m al sur de este, la dirección fue hacia el E, para la componente v , las intrusiones hacia el norte fueron mayores junto a la costa, aunque en el canal de navegación continuaron hacia el sur. A 9 m de profundidad la corriente fue hacia el SE en la boca del puerto y hacia el NE en el resto de la malla (Figura 50).

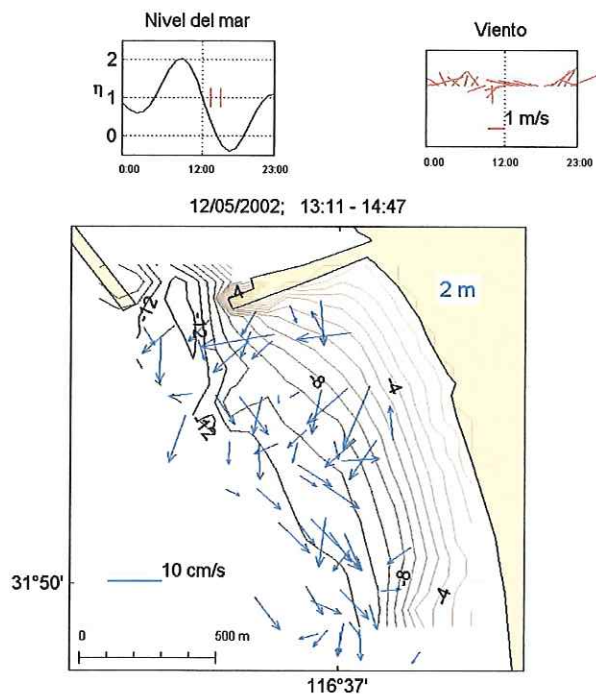


Figura 48. Condiciones de marea viva durante el reflujó de marea con viento del NW a 2 m de profundidad

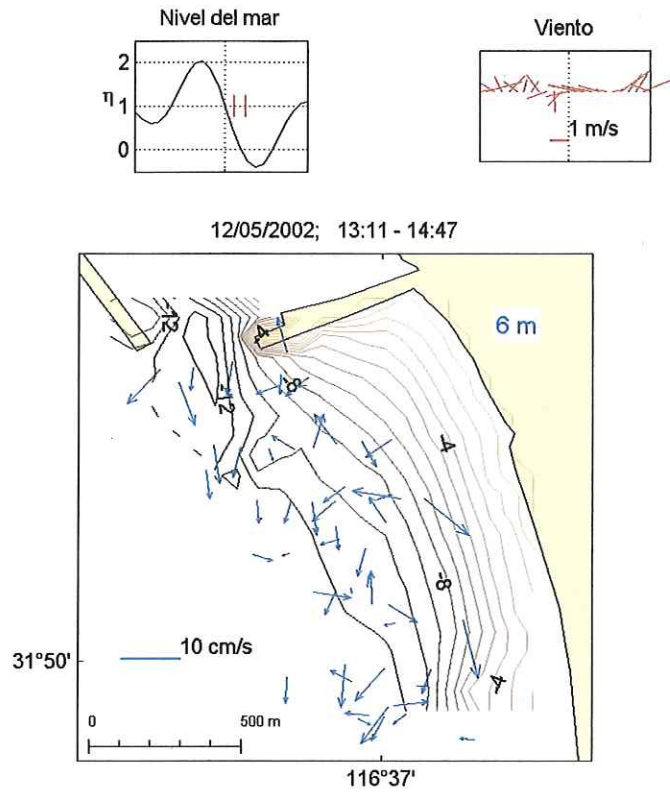


Figura 49. Condiciones de marea viva durante el reflujó de marea con viento del NW a 6 m de profundidad

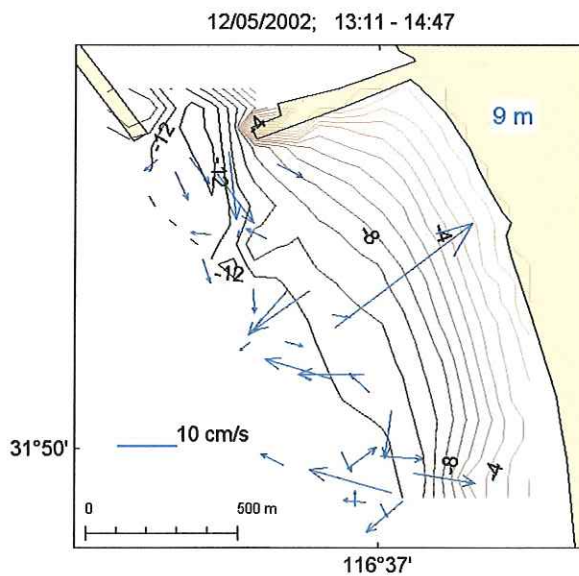


Figura 50. Condiciones de marea viva durante el reflujó de marea con viento del NW a 9 m de profundidad.

III.1.3.4. Condiciones de reflujos durante marea viva con viento del NW de aproximadamente 6 ms^{-1} (17 de febrero del 2003).

La corriente promedio fue de 10 cm s^{-1} . En la boca del puerto a 2.25 m de profundidad (Figura 51), el comportamiento de la corriente fue variable en dirección norte y sur; junto al espigón, la corriente fue hacia el NE principalmente, replegándose hacia el SW 300 m al sur del espigón conservando esta dirección a lo largo de la costa siguiendo el contorno de las isóbatas. En el canal de navegación paralelo a la boca, la corriente fue hacia el SW uniéndose a este punto una corriente proveniente del sur de dirección NE. Se observó en general, entrada por el espigón y salida hacia el sur a lo largo de la costa. A 6.25 m el comportamiento de la corriente fue más homogéneo hacia el NW, del espigón hasta 500 m al sur del mismo y hacia el WSW en la parte sur de la malla (Figura 52). A 8.25 m la corriente hacia el NE se extendió hasta 700 m al sur del espigón y cambió al SE y SW en el extremo sur de la malla (Figura 53). A 11.25 m se observó una corriente de magnitud promedio de 30 cm s^{-1} hacia el NW (Figura 54).

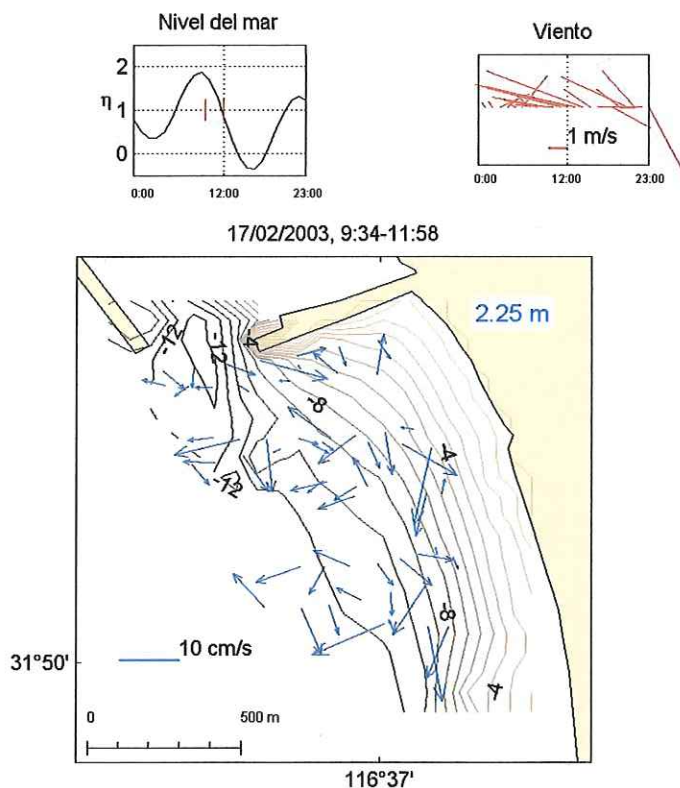


Figura 51. Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 2.25 m de profundidad.

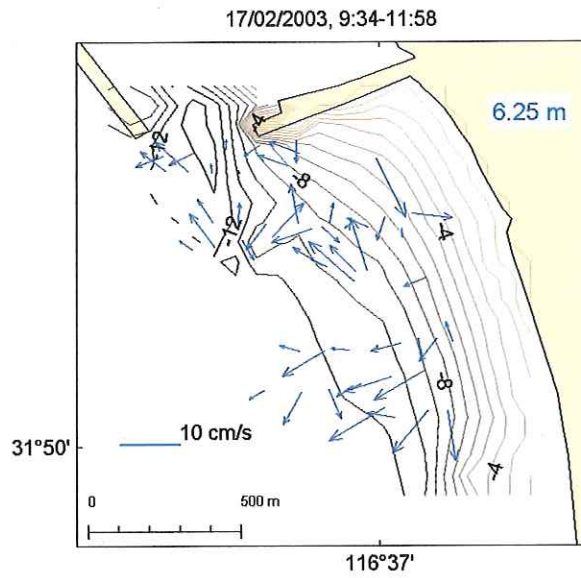


Figura 52. Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 6.25 m de profundidad.

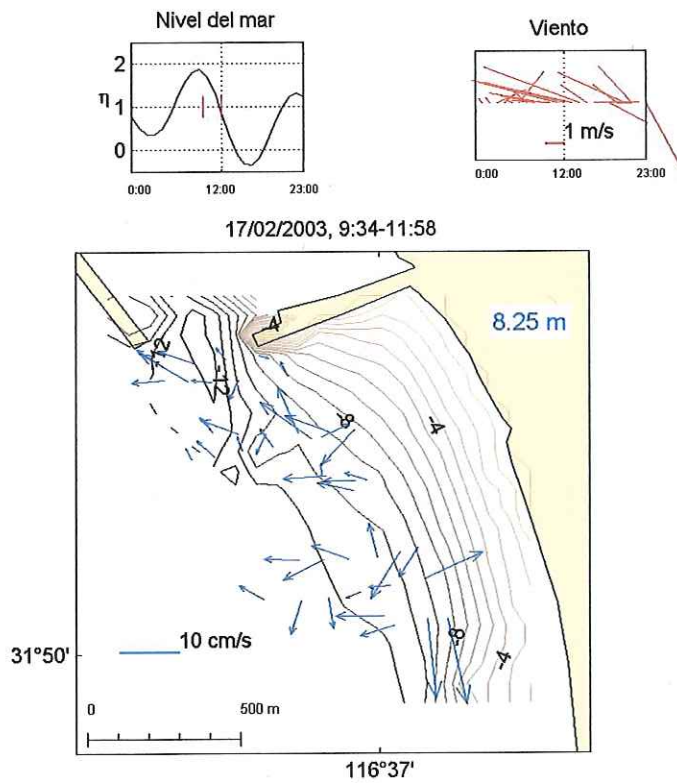


Figura 53. Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 8.25 m de profundidad.

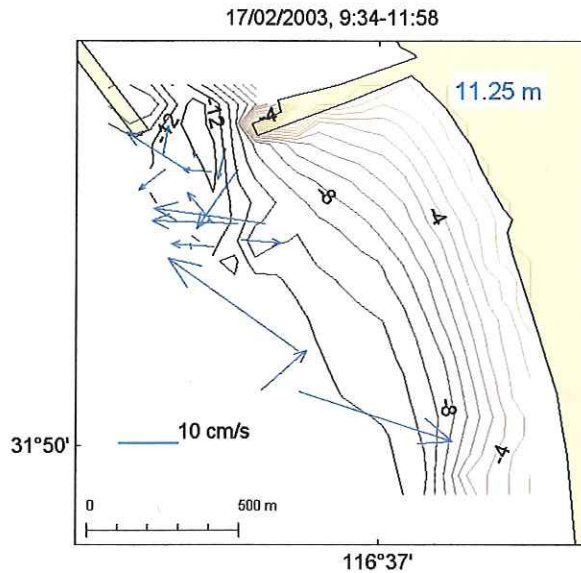


Figura 54. Corrientes en condiciones de marea viva y viento del NW a 11.25 m de profundidad.

III.1.3.5. Marea viva con viento del SW de 4 m s^{-1} (Fecha: 17 de abril del 2003).

Para estas condiciones se observaron corrientes promedio de 10 cm s^{-1} . En superficie predominaron corrientes hacia el NE junto al espigón hasta 400 m y hacia el SE y SW en el resto de la malla (Figura 55). A 6.7 m la corriente cambió, se observó principalmente una corriente hacia el NE junto al espigón seguido por un corto transecto hacia el SE, sin embargo dominando una corriente al NW en el resto de la malla (Figura 56).

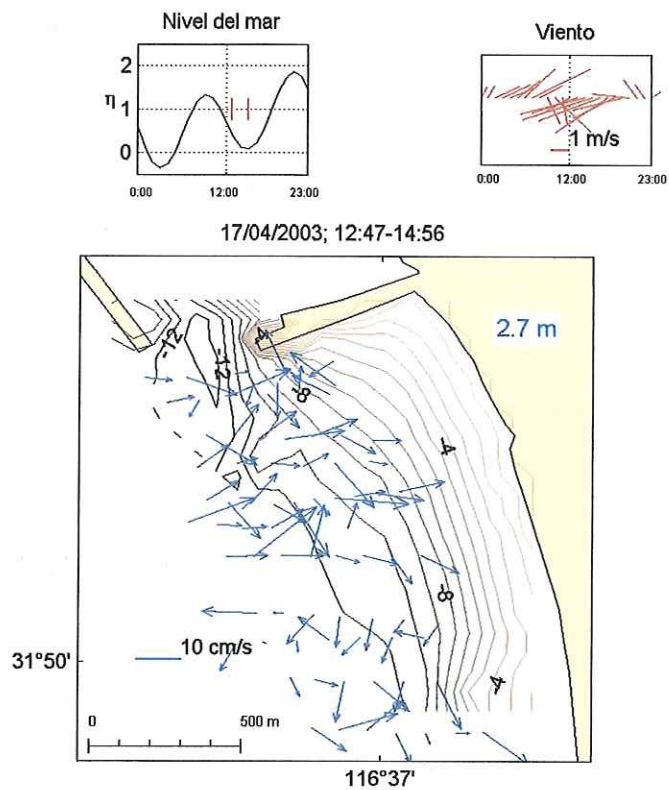


Figura 55. Corrientes bajo condiciones de marea viva durante el reflujó y con viento del SW a 2.7 m de profundidad.

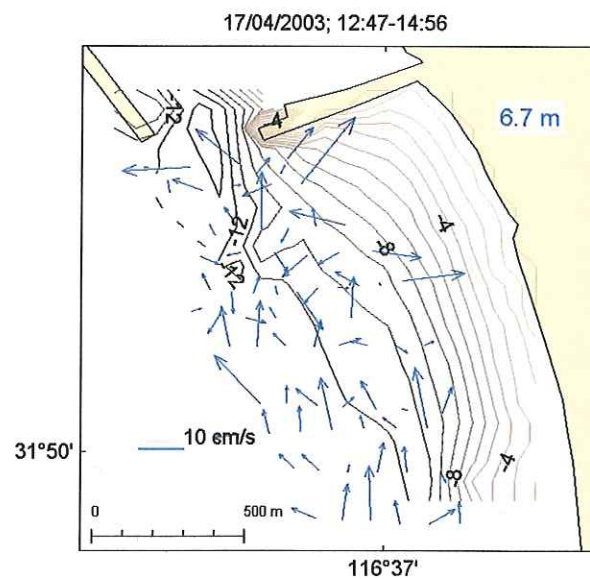


Figura 56. Corrientes bajo condiciones de marea viva durante el reflujó y con viento del SW a 6.7 m de profundidad.

III.1.3.6. Descripción del comportamiento de la corriente durante un evento Santana registrado y su efecto sobre la boca del puerto.

Los eventos Santana se caracterizan por viento proveniente del NE, de tierra a mar, de una duración de 4 a 5 días aproximadamente, con magnitudes de $6-8 \text{ m s}^{-1}$. Durante dicho evento, la dirección del viento fue del ENE con intensidades de 6 m s^{-1} y durante el reflujó bajo condiciones de marea viva. La Figura 57 muestra el efecto sobre la boca del puerto cuando ocurrieron estas condiciones. Con fines de comparación, la Figura 58 muestra condiciones con viento del SW nuevamente durante el reflujó de marea viva. Para condiciones con viento del NE, la corriente se intensificó hacia el sur de lado del espigón (a los 250 m), con un flujo neto de salida de aproximadamente $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En cambio, para el recorrido cercano aunque no tan transversal a la boca como en el caso anterior y bajo condiciones de viento del SW (Figura 58), el flujo neto fue de $14 \text{ m}^3 / \text{s}$. De estos cálculos, se obtuvo que en condiciones Santana el flujo fue cinco veces mayor que cuando el viento provino del SW, en el cual sigue apareciendo una corriente hacia el sur pegada al espigón (extremo este de la figura 58), pero de menor intensidad.

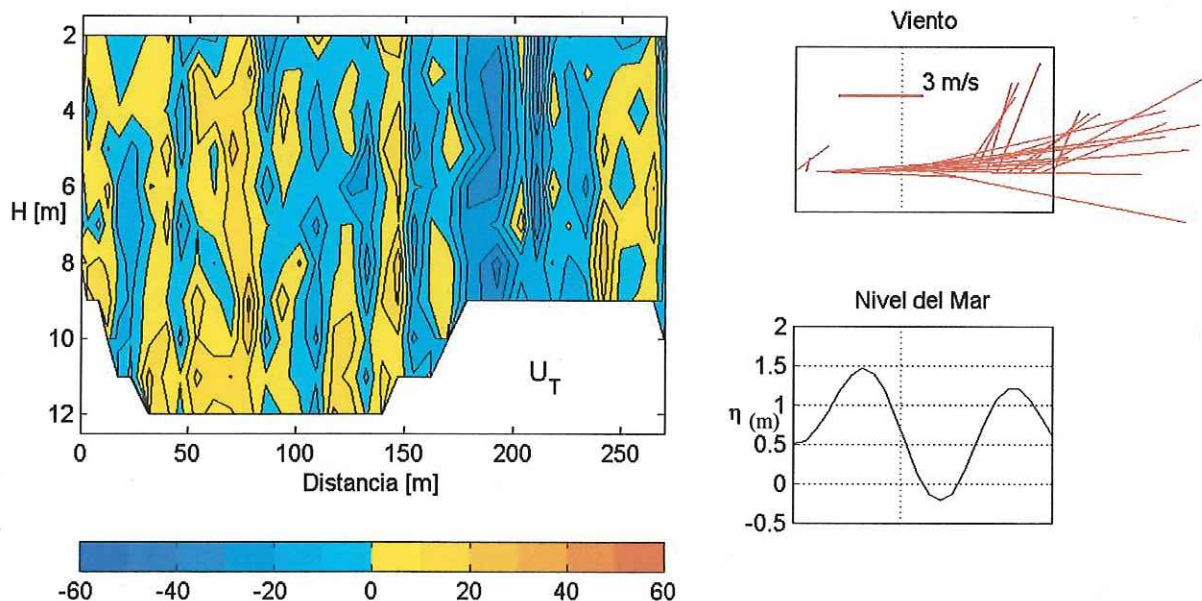


Figura 57. Campo de velocidad (cm s^{-1}) en un transecto transversal a la boca del puerto durante reflujó de marea viva y con viento del NE.

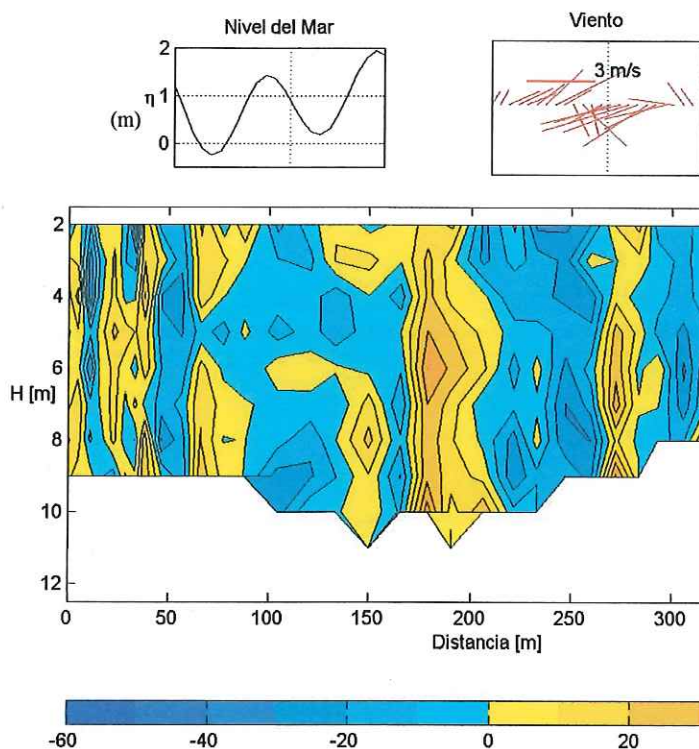


Figura 58. Campo de velocidad (cm s^{-1}) en un transecto transversal a la boca del puerto durante reflujos de marea y con viento del SW.

III.2. Trazador de la descarga.

III.2.1. Bacterias coliformes fecales (CF).

Las concentraciones de coliformes fecales, el 7 de diciembre del 2001 (Figura 59) mostraron un punto máximo dentro de la rada, cuya concentración fue de 130 coliformes fecales 100 ml^{-1} , el cual estuvo por debajo del nivel máximo recomendado para un área recreativa según la legislación de California (400 límite diario 100 ml^{-1}). En el área cercana al arroyo El Gallo, los niveles fueron menores a 2 coliformes fecales 100 ml^{-1} , esto bajo condiciones de viento variable mayor a 1 ms^{-1} y durante el flujo en marea muerta. El siguiente muestreo (27 de noviembre del 2002) fue efectuado durante el flujo de marea durante un periodo de marea muerta (Figura 60) con viento de dirección SW de 1 m s^{-1} . En este se observó un aumento de la concentración de coliformes ($70 \text{ coliformes fecales } 100 \text{ ml}^{-1}$), con

respecto al muestreo anterior. La mayor concentración fue cerca de la descarga y de la costa, dispersándose hacia el SW, coincidiendo con lo observado en los vectores progresivos en superficie (Figura 35). Para esta fecha se realizó un recorrido de ADP posterior a la hora del muestreo de bacterias (Figura 43), pero, bajo condiciones de viento y marea muy similares, se observó que en superficie la corriente fue hacia el SW coincidiendo con lo observado en bacterias.

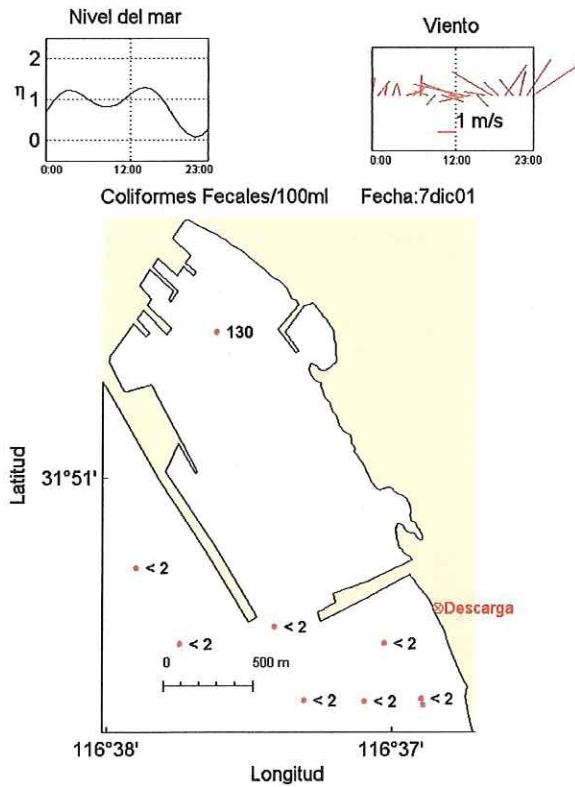


Figura 59. Concentración de bacterias coliformes fecales durante marea muerta (hora de muestreo: 11:00 a 13:00).

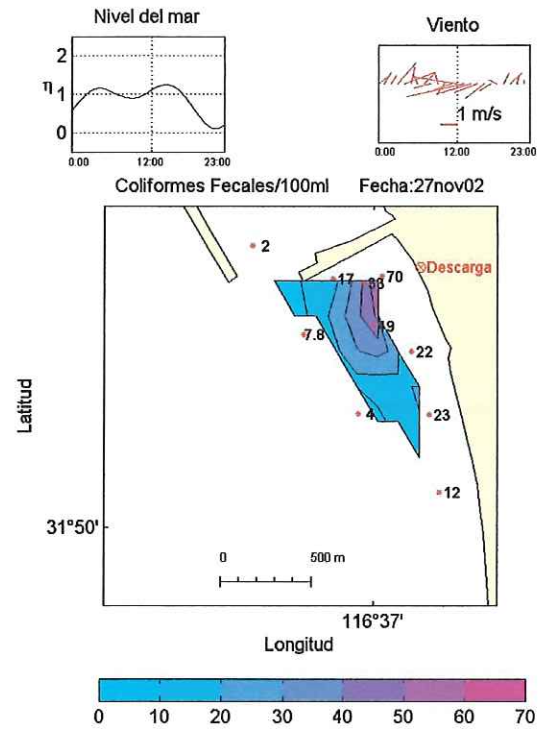


Figura 60. Concentración de coliformes fecales durante marea muerta y viento del SW (hora de muestreo: 14:00 a 15:00)

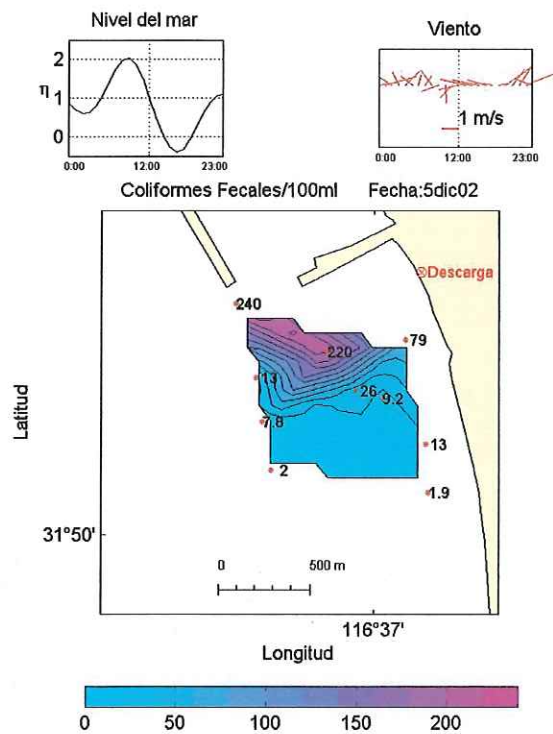


Figura 61. Concentración de bacterias coliformes fecales en condiciones de marea viva durante el reflujó y viento del SW (hora de muestreo: 8:30 a 10:30).

Para condiciones de marea viva (5 de diciembre del 2002) en el reflujó y con viento del SW de 1 m s^{-1} se observaron valores de 240 coliformes fecales (CF)100 ml^{-1} junto a la boca del puerto y 220 frente a la descarga, observándose nuevamente valores de 70 CF100 ml^{-1} junto a la costa y descarga, disminuyendo rápidamente hacia el S dispersándose a 500 m hacia el sur y a lo largo de la costa hasta alcanzar valores $< 2 \text{ CF}100 \text{ ml}^{-1}$ (Figura 61). Para estas condiciones en los datos de ADP a nivel superficial se observaron, corrientes hacia el NW, SE y SW; junto a la boca donde aumentaron los valores de bacterias, se observó una entrada hacia el NW y paralelo a la costa y hacia el sur de la malla corrientes en dirección SE y SW (Figura 48).

Las condiciones de marea y viento en que fueron realizados estos muestreos, se presentan en la tabla V.

Tabla V. Concentraciones máximas y mínimas de CF con las diferentes condiciones de marea y viento en que fueron observadas.

COFE 100 ml^{-1}				
Límite permisible= 400 CF 100 ml^{-1} aguas parra uso recreativo (Assembly Bill 411)				
Fecha	Máximo	Mínimo	Viento	Condiciones de marea
7/dic/01	130	<2	Variable	Marea muerta (flujo)
27/nov/02	70	2	SW	Marea muerta (flujo)
5/dic/02	240	<2	SW	Marea viva (reflujo)
17/feb/03	130	2	NW	Marea viva (reflujo)

III.2.2. Concentraciones de amonio y fosfato (febrero y abril del 2003).

Para las fechas de febrero y abril se tomaron muestras de amonio, de fosfato y se realizaron recorridos con ADP. En febrero, también se tomaron muestras de bacterias coliformes fecales.

Bajo condiciones de marea viva durante el refluo (17 de febrero) y con viento de 6 m s^{-1} de dirección NW, para bacterias, la mayor concentración se observó junto al extremo sur del rompeolas y junto a la descarga en la costa, disminuyendo hacia el canal hasta concentraciones $< 2 \text{ CF } 100 \text{ ml}^{-1}$ (Figura 62).

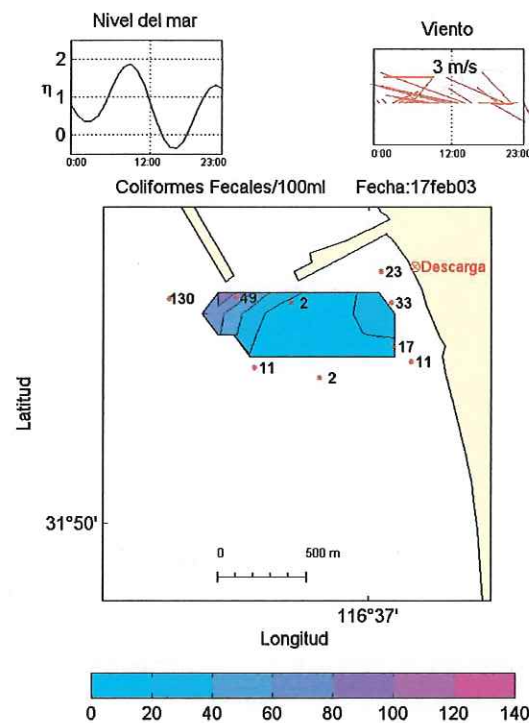


Figura 62. Concentración de CF durante el refluo en marea viva con viento del NW (hora de muestreo: 9:00 a 12:00).

El amonio alcanzó concentraciones de $54.87 \mu\text{M}$ junto al espigón disminuyendo hacia el sur (Figura 63). Para fosfato (Figura 64), nuevamente se presentó una mayor concentración en el espigón, de $31 \mu\text{M}$ con una dispersión hacia el SW. El comportamiento de la corriente en esta zona para la superficie a 2.25 m fue de una corriente saliendo de la rada y entrando hacia el espigón

siguiendo la línea de costa y saliendo finalmente hacia el SW por la costa, con algunas entradas hacia el NE. Las corrientes en promedio fueron de 10 cm s^{-1} . La dispersión de los nutrientes y bacterias coliformes siguió el sentido de las corrientes, concentrándose en la zona cercana al espigón y a la descarga, y dispersándose hacia el S conforme se aleja de la línea de costa.

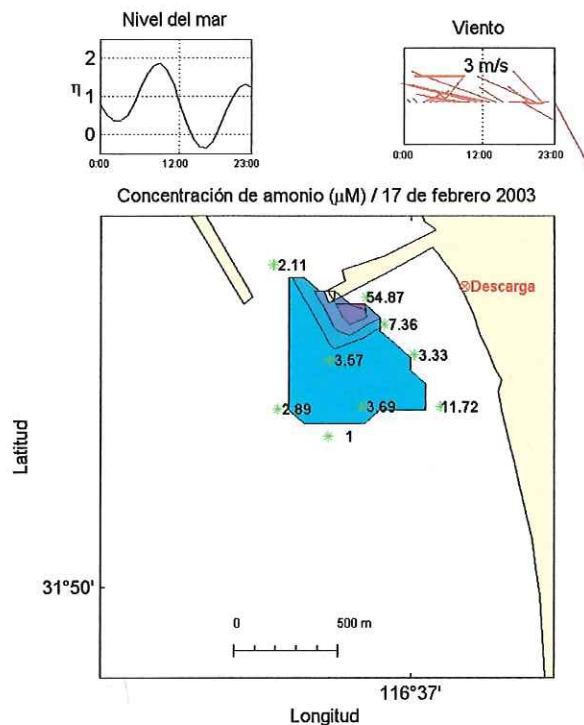


Figura 63. Concentración de amonio durante el reflujó en marea viva y viento del NW (hora de muestreo: 9:00 a 12:00).

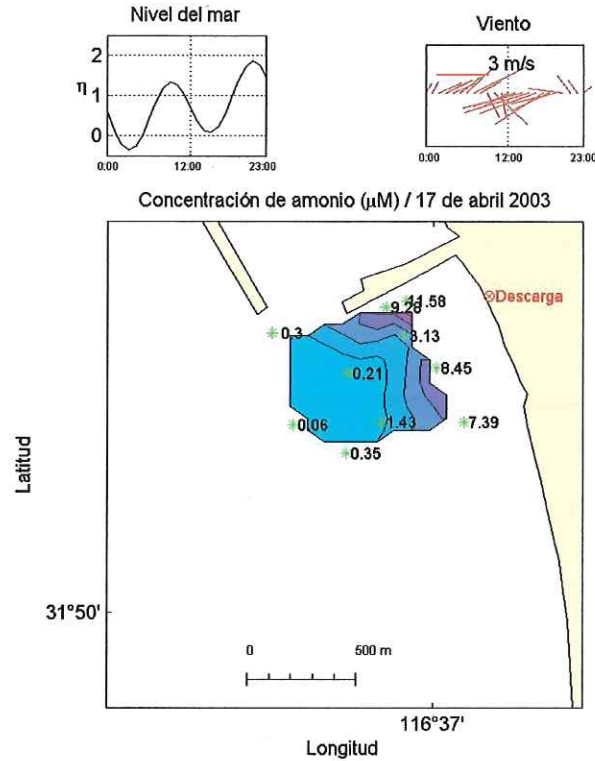


Figura 64. Concentración de amonio durante el reflujó en marea viva, con viento del SW (hora de muestreo: 10:00 a 12:00 hrs).

Bajo condiciones de marea viva nuevamente durante el reflujó, con viento de 6 m s^{-1} pero de dirección SW se observaron concentraciones altas de amonio ($41 \mu\text{M}$) y dispersión hacia el canal de navegación ($0.06 \mu\text{M}$) (Figura 65). Para fosfatos la concentración mayor fue junto al espigón y en la costa con máximos de $3.97 \mu\text{M}$ y mínimos de $0.8 \mu\text{M}$ (Figura 66). La corriente observada fue en promedio de 10 cm s^{-1} y hasta 15 cm s^{-1} en superficie. A 2.7 m de profundidad, la corriente fue en general hacia el NE junto a la espigón, hacia el SE paralelo a la costa y hacia el SW en el canal de navegación al sur de la entrada. En este caso fue evidente el efecto del viento sobre la capa superficial hasta 4.7 m como una consecuencia del encajonamiento en esta esquina, apilamiento de agua y su salida por el sur (Figura 55), además del cambio de dirección a partir de 6.7 m hacia el NW.

La Tabla VI resume las condiciones de marea y viento en las que fueron realizadas las mediciones de amonio y fosfato, así como las concentraciones máximas y mínimas.

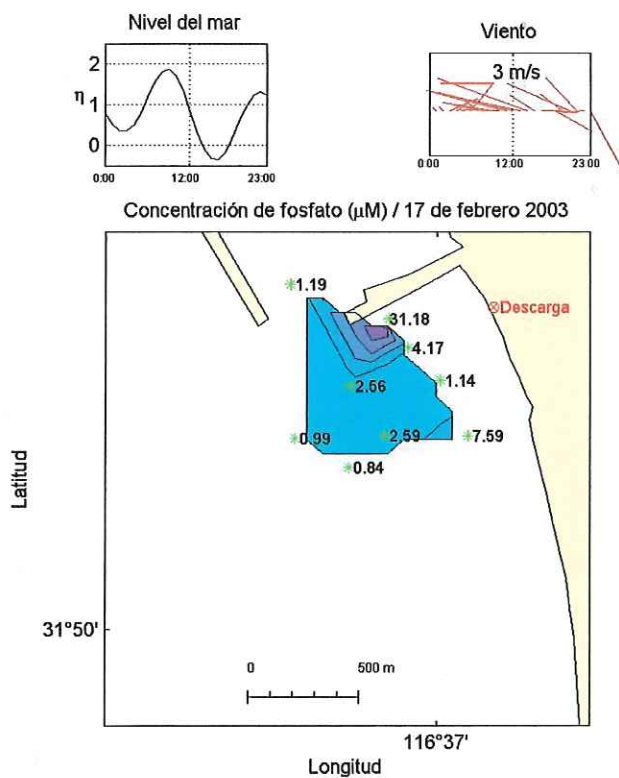


Figura 65. Concentración de fosfato en condiciones del reflujo de marea viva, con viento del NW (hora de muestreo 9:00 a 12:00 hrs)

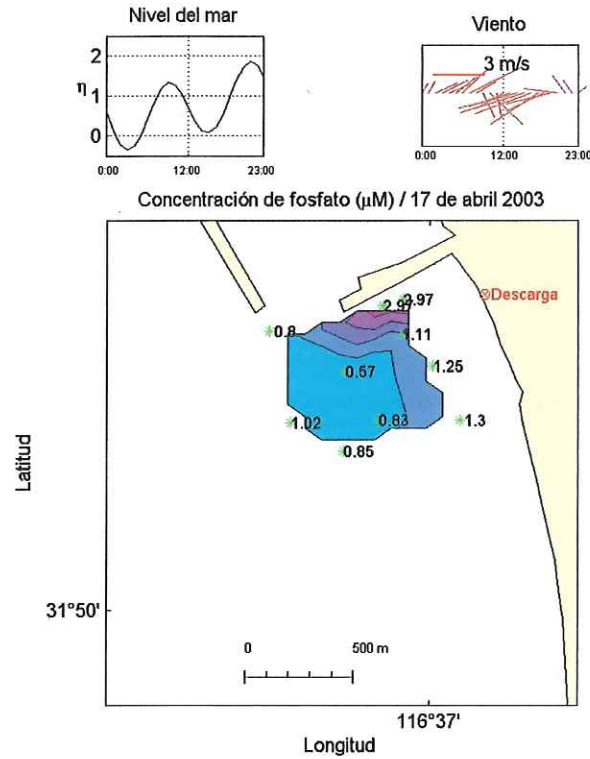


Figura 66. Concentración de fosfato en el reflujó durante marea viva y con viento del SW (hora de muestreo: 10:00 a 12:00 hrs).

Tabla VI. Concentraciones máximas y mínimas de amonio y fosfato, con las diferentes condiciones de marea y viento en que fueron observadas.

Amonio (μM) superficie				
Fecha	Máximo	Mínimo	Viento	Marea
17/02/03	54.87	1	NW	Viva (reflujo)
17/04/03	11.58	0.06	SW	Viva (reflujo)
Fosfato (μM) superficie				
17/02/03	31.18	0.84	NW	Viva (reflujo)
17/04/03	2.97	0.57	SW	Viva (reflujo)

Para estas últimas dos condiciones, 17 de febrero y 17 de abril, también se realizaron muestreos a profundidad para amonio y fosfato (la Figura 67 muestra las estaciones y la Tabla VII los valores). Se notó un cambio en las concentraciones disminuyendo con respecto al valor de superficie, con valores mayores para abril que para febrero, lo que ocurrió también en superficie. Las corrientes aumentaron en magnitud para ambos casos después de 9 m y se dirigieron hacia el W.

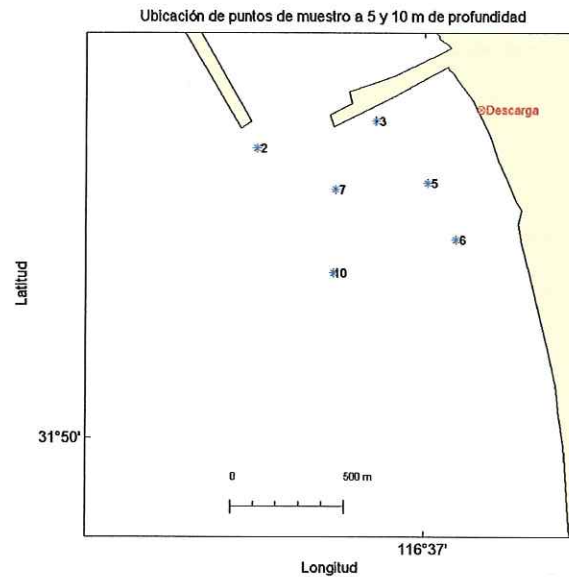


Figura 67. Localización de las estaciones para muestras de fosfato y amonio a 5 y 10 m de profundidad.

Tabla VII. Concentraciones de amonio y fosfato para las muestras a 5 y 10 m de profundidad.

Muestreo realizado el 17 febrero del 2003.			
Estación	Profundidad (m)	Amonio(μM)	Fosfato(μM)
05	10	0.71	0.60
10	5	0.36	0.53
10	10	0.31	0.26
Muestreo realizado el 17 de abril del 2003.			
Estación	Profundidad (m)	Amonio(μM)	Fosfato(μM)
02	10	0.56	0.82
03	5	3.65	1.24
06	5	1.38	0.95
07	5	1.70	1.10
10	10	3.38	1.13

Las concentraciones de amonio y fosfato, en la mayoría de las muestras resultaron ser mayores a la concentración esperada para una zona costera, inclusive mayores a valores de surgencia. Como ejemplo, Millán *et al.* (1988), obtuvieron concentraciones de fosfato, con un rango de valores de 0-0.4 μM en superficie y de 0.5 a 0.9 μM a 10 m de profundidad, en la Bahía de Todos Santos. Estas concentraciones, consideran los autores, fueron altas debido a la presencia de la construcción del espigón en esas fechas, por el aporte de material terrígeno, así como a las descargas de aguas residuales. Mendoza-Espinosa (1994), hizo referencia a diferentes ambientes oceánicos sin influencia de descargas residuales obtenidas por diferentes autores, por ejemplo, Álvarez y Gaxiola (1988), que

reportaron rangos de 0.7 μM a 1 μM de concentraciones de fosfato para el Golfo de California. Con respecto a amonio, Camacho *et al.* (2003) reportaron para el sistema de San Quintín, el cual no fue influenciado por descargas residuales, para el mes febrero de 1996, valores de amonio en el océano de 1.8 μM incrementando hacia los dos brazos interiores a 3.4 μM dentro del sistema.

III.3. Condiciones hidrológicas.

III.3.1. Salinidad y temperatura abril del 2003.

Estas mediciones no fueron realizadas en forma simultánea al ADP colocado el mes de mayo del 2002, sino durante abril del 2003. La distribución espacial de temperaturas presenta un gradiente vertical de 2 °C siendo la temperatura promedio de 15.8 °C, con un mínimo de 13.5 °C y máximo de 16.8 °C (Figura 68).

La salinidad (Figura 69), presentó un incremento de la costa hacia el mar y hacia el fondo con valores mínimo y máximo de 33.2 y 33.8 respectivamente, con un valor promedio 33.5. La figura 70 muestra la estación en el punto donde fue instalado el ADP, observándose una picnoclina entre 5 y 6 m de profundidad con un gradiente de 0.6 kg m^{-3} .

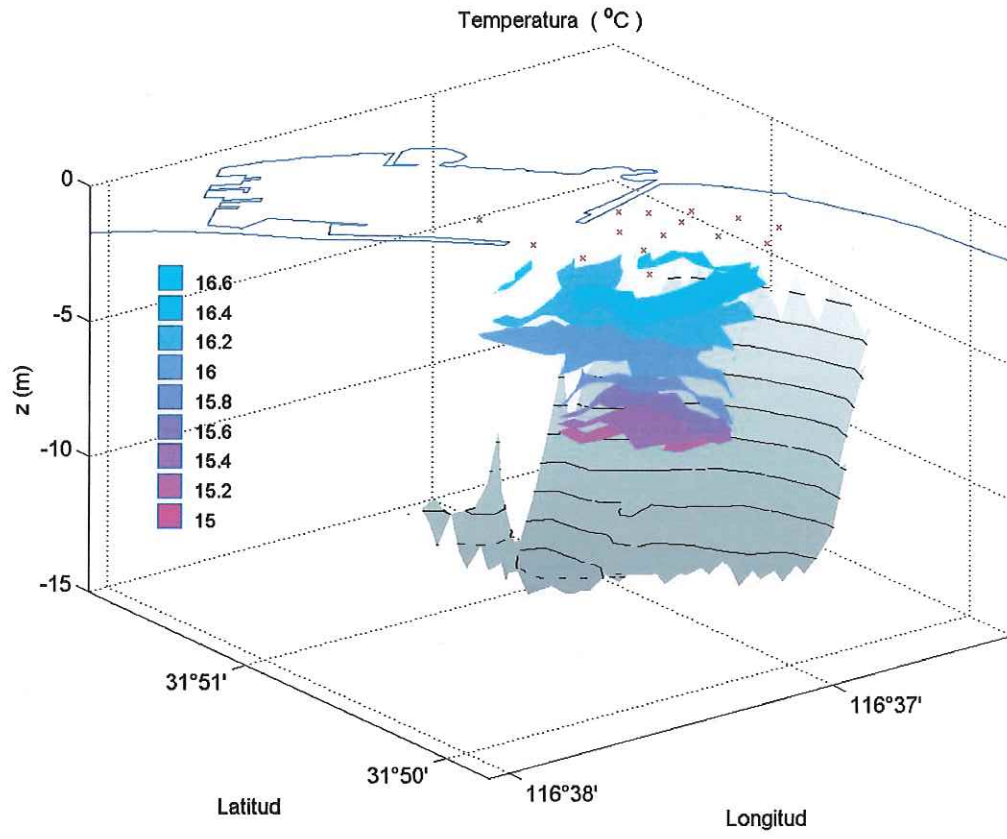


Figura 68. Distribución horizontal y vertical de temperatura para abril del 2003.

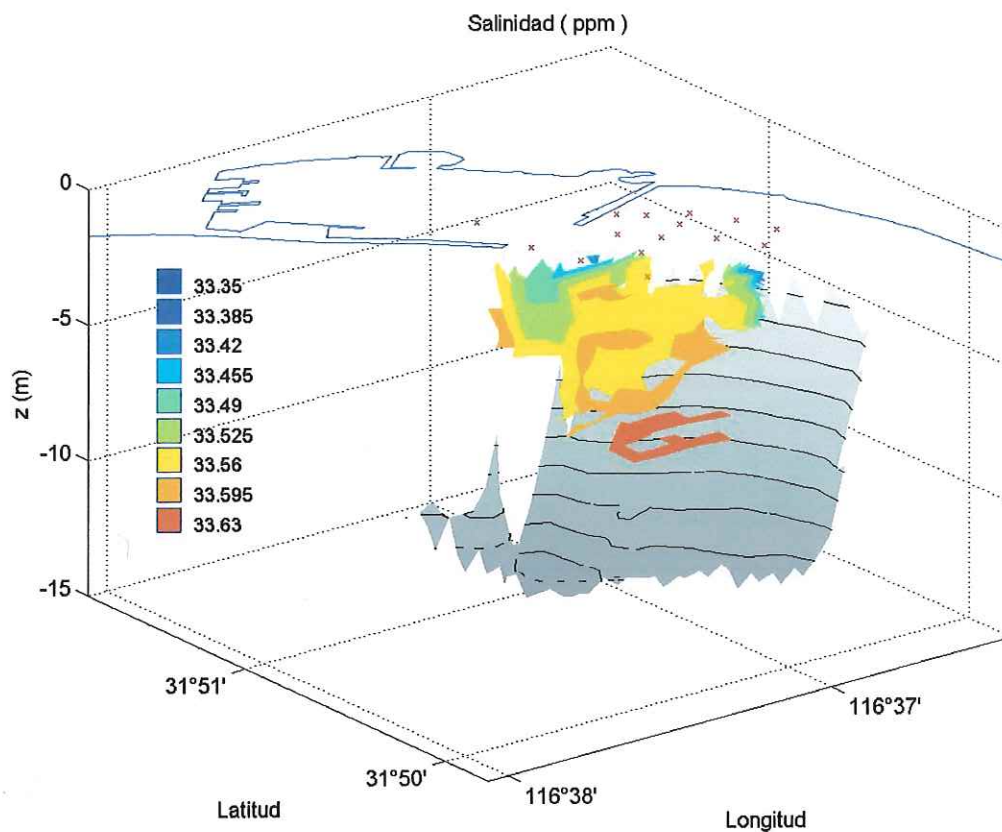


Figura 69. Distribución horizontal y vertical de salinidad en abril del 2003.

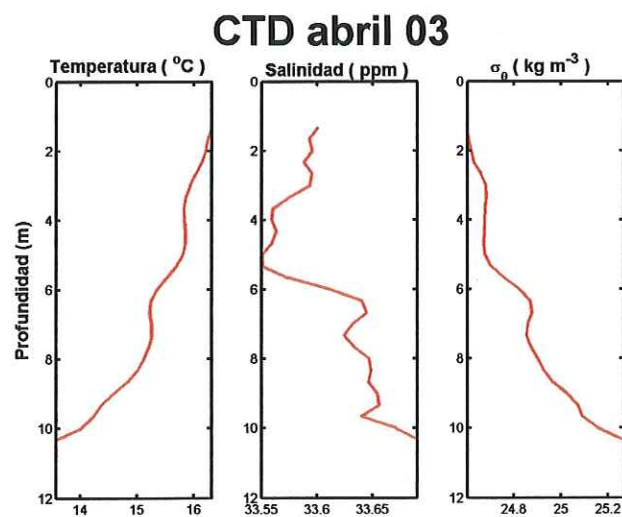


Figura 70. Perfil de temperatura, salinidad y densidad para el punto donde fue colocado el ADP.

III.3.2. Clorofila y pH.

La concentración de clorofila *a* tuvo un máximo superficial de 3.3 mg m^{-3} disminuyendo hasta 0.2 en el fondo, no observando variación hacia fuera de la costa (Figura 71). El valor promedio fue 2.10 mg m^{-3} .

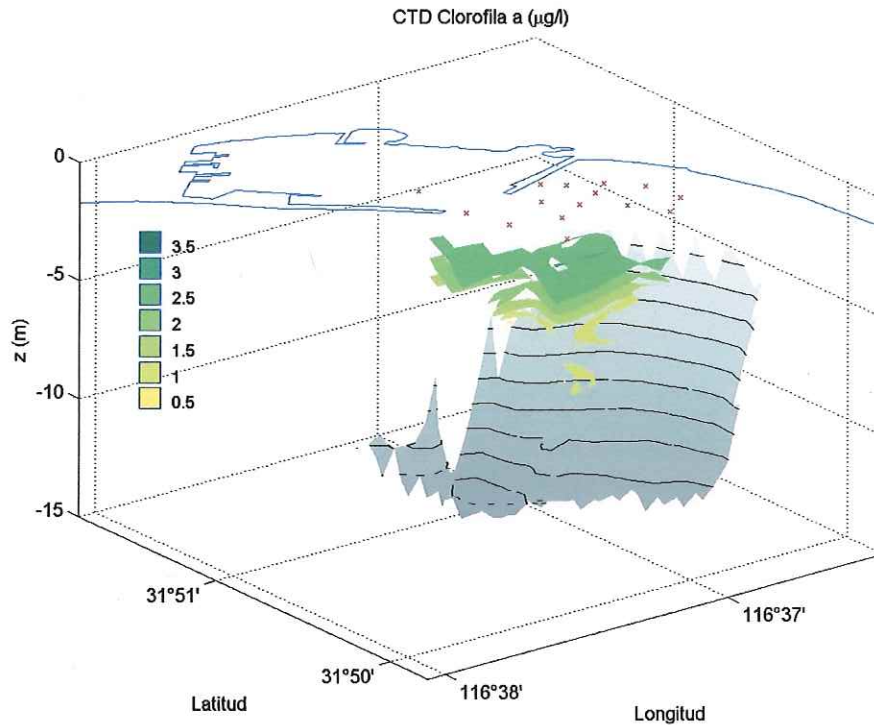


Figura 71. Distribución horizontal y vertical de clorofila *a* para abril del 2003.

El valor promedio para el pH fue de 8.5 (Figura 72), con un mínimo de 8.3 y un máximo de 8.6, condiciones normales del mar. Millero (1992) reporta valores de pH para agua de mar superficial en equilibrio con la atmósfera de 8.2 ± 0.1 y para cuerpos cerrados pequeños, el pH con variaciones diurnas entre 8.2 y 8.9. La Secretaría de Marina en sus mediciones trimestrales para el año 2002 reportó valores de 8.01, 8.26 y 8.37 en muestras de agua superficial, por lo que los valores del presente trabajo fueron ligeramente mayores.

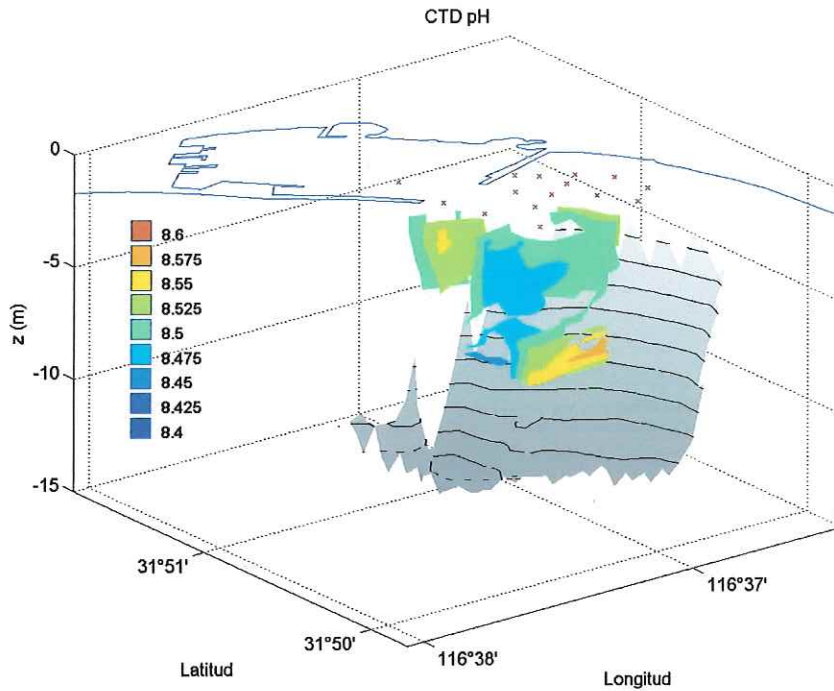


Figura 72. Distribución de pH para abril del 2003.

III.3.3. Oxígeno disuelto.

La concentración de oxígeno disuelto presentó valores mayores en aguas en fondo y junto al rompeolas (valor máximo de 9.9 ppm), con valores menores en superficie y cerca de la descarga (valor mínimo de 7.7 ppm), mostrados en la Figura 73. E valor promedio fue de 8.8 ppm.

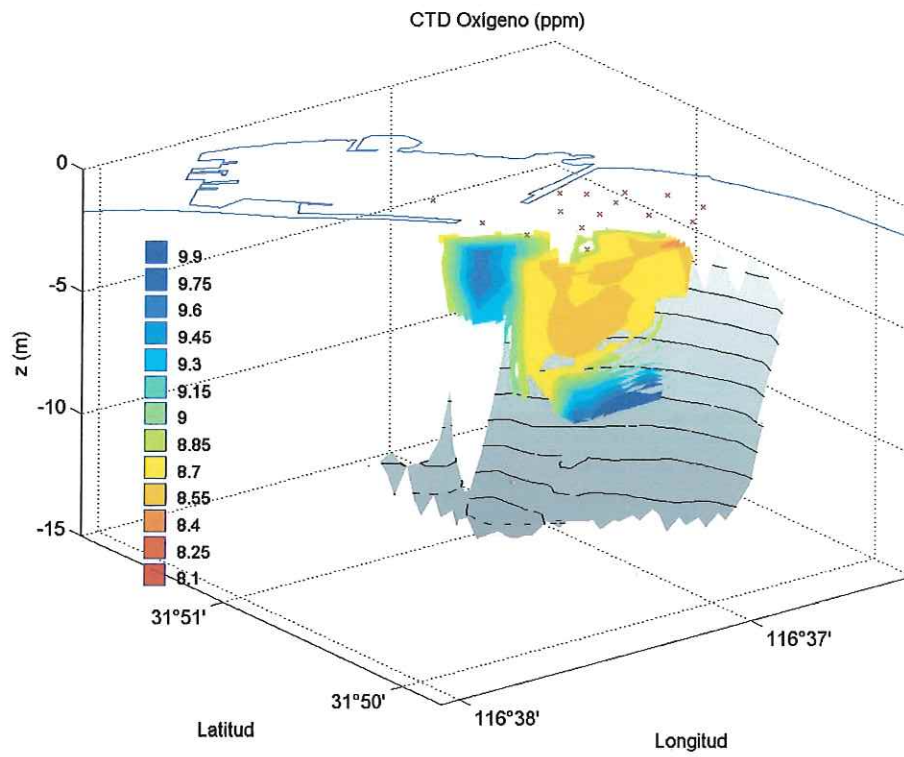


Figura 73. Distribución de oxígeno disuelto (ppm) en abril del 2003.

IV. DISCUSIONES.

La zona de estudio es un área que presenta características muy especiales, tales como, la presencia del espigón, la orientación de la línea de costa, la batimetría, así como la entrada del puerto, lo que hacen que las corrientes sean altamente variables tanto espacial como temporalmente. Solamente en condiciones de marea y viento cuando se suman los forzamientos o alguno de ellos fue despreciable se observa un comportamiento claro. A continuación se discuten diferentes capítulos sobre la circulación en la zona y su efecto en la dispersión de contaminantes.

IV.1 Comportamiento de la corriente bajo diferentes condiciones de marea y viento en la isóbata de 12 m, frente al arroyo El Gallo.

Durante periodos de marea viva con viento variable del SW y NW (Figura 15) de aproximadamente 3 m s^{-1} , se observó que la marea se sumó al forzamiento causado por el viento. Cuando el viento fue más intenso (durante el día) y durante el flujo de marea se observó una corriente hacia el NE, sin embargo, cuando el viento disminuyó y durante el reflujos de la marea, la corriente fue hacia el S. Con viento del WNW (Figura 18) ocurrió un cambio en la vertical, durante el flujo de la marea, en superficie, la corriente fue hacia el SW y en fondo hacia el NE. Con vientos del WSW la corriente incrementó hacia el NE, coincidiendo con el flujo de la marea. Esto hizo evidente una buena respuesta de la corriente a la marea durante el flujo y reflujos, a excepción de condiciones en que el viento provino de la dirección WNW.

Durante marea muerta se observaron dos comportamientos diferentes: cuando el viento del NW incrementó a 6 m s^{-1} y cuando el viento fue de $3\text{-}4 \text{ m s}^{-1}$. Cuando el viento incrementó a 6 m s^{-1} se mezcló la columna de agua. En estas condiciones, se observó un efecto claro de los vientos en la dirección de la corriente, hacia el SW en la madrugada cuando los vientos debilitan y hacia el NE durante el día cuando el viento incrementó. Este comportamiento se acentuó con viento del WNW, el cual puede explicarse como respuesta a que la zona de estudio se ubica dentro de una zona de convergencia inducida por viento, debido a

la circulación de la Bahía y particularmente a la diferencia entre la magnitud y dirección del viento en Punta Morro y Ciprés los cuales pueden ocasionar esta convergencia en el área de estudio, la cual se está moviendo dependiendo de la intensidad y dirección del viento. Este efecto fue lo que pudo determinar, que se presentaran periodos en que la corriente superficial se dirigiera hacia el NE y otros hacia el SW. Argote *et al.* (1990) mencionó que esta zona de convergencia se mueve con vientos del NW hacia Punta Banda y con vientos del W hacia la zona de estudio. El siguiente caso fue cuando el viento osciló entre $3-4 \text{ m s}^{-1}$ observándose una corriente en dirección SW en la superficie, la cual se propagó hasta los 7 m de profundidad aproximadamente, mientras que en el fondo, fue hacia el NE, como un reemplazo de la salida de agua a través de la superficie.

Para el mes de mayo, el histograma de frecuencias (Figura 9) mostró que las magnitudes más frecuentes del viento fueron entre $1-3 \text{ m s}^{-1}$, por lo que la corriente que predominó fue hacia el SW en superficie y hacia el NE en fondo. Con viento del W y NW la corriente esperada sería hacia el SE si fuese el único forzamiento. Sin embargo, se observó una corriente hacia el SW en superficie, debido a la configuración de la costa, a su orientación y a la presencia del espigón. Este efecto se observó más claramente en los recorridos, donde se observó una corriente hacia el NE cerca del espigón, saliendo por el SW hacia la costa. La corriente hacia el NE en el fondo, pudo deberse a un reemplazo de la corriente que sale por el SW en superficie, por un efecto de balance por continuidad. Álvarez-Sánchez *et al.* (1988), observaron una corriente superficial hacia el SE, en una zona cercana a el área de estudio, con vientos predominantes del W y NW de 4 a 6 m s^{-1} para marzo y agosto, hacia las playas interiores de la bahía, lo que también se observó en las mediciones del presente trabajo bajo condiciones similares. Las mediciones de Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) fueron realizadas en la isóbata de 10 m, donde observaron un incremento de la componente sur para formar una corriente casi paralela a la línea de costa, con corrientes promedio de 10 a 14 cm s^{-1} y de 30 cm s^{-1} cuando el viento intensificó a 5 y 6 m s^{-1} . Estas observaciones coincidieron con los resultados aquí presentados, con la diferencia de que en estos se encontró una corriente en superficie hacia el SW y no hacia el SE, lo que pudo

deberse al efecto del espigón. Además, las mediciones de Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) fueron realizadas en el primer metro en superficie, y las del presente trabajo a profundidades mayores a 1 m.

Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) coincidieron con Argote *et al.* (1975) al detectar la presencia de un giro anticiclónico en la parte norte de la bahía, el cual no sólo afectó las aguas profundas sino que también se extendió hasta aguas someras formando un flujo hacia al este que luego giró hacia el SE frente al puerto de Ensenada. Tales autores coincidieron con Hernández-Walls (1986) al señalar que el viento del NW, modificado por la configuración de la bahía, pudo producir corrientes cercanas a la costa hacia el SE.

Las corrientes reportadas por estos autores fueron superficiales, sobre el primer metro de la columna de agua, siendo que tales datos se pierden por la reflexión en la superficie de la señal del ADP. Sin embargo, se observó que la corriente a partir del siguiente metro sigue el mismo transporte hacia el sur hasta aproximadamente 5 m. Álvarez-Sánchez (1971), observó que cuando el viento tiene intensidades de 5 m s^{-1} sí hay correspondencia con el sentido del viento hasta los 2 m. Sin embargo, en general concluyó que el viento dominante tuvo efecto sobre una capa superficial de espesor reducido donde se produjo una corriente de deriva apreciable que se redujo considerablemente al sumarse con la corriente en lo que resta de los 2 m superiores.

Otra condición que fue que al incrementarse el viento hasta 6 m s^{-1} , durante marea muerta, se observó una corriente hacia el NE como producto del patrón de convergencia de vientos provenientes del NW (Punta Morro) y del WNW (El Ciprés). Mejía-Trejo y Gil-Silva (comunicación personal), realizaron un análisis entre la estación el Ciprés y Punta Morro. Con dos meses de mediciones, encontraron que en El Ciprés la magnitud de la velocidad del viento fue mayor que para Punta Morro y que se presentó una diferencia de -20° con respecto a Punta Morro (cuya dirección fue NW), dando lugar a vientos WNW en el Ciprés. Estas diferencias entre Punta Morro y Ciprés pueden producir un gradiente y un cambio en la orientación del viento, lo cual origina pudo originar esta dirección NE en la

corriente. Normalmente esta convergencia induce corrientes hacia el S, sin embargo, esta zona de convergencia inducida por el viento, se mueve y puede acercarse más a la zona abordada en el presente estudio de tal forma que produzca las corrientes con dirección N, como menciona Argote *et al.* (1991). Álvarez-Sánchez *et al.* (1988), también observaron esta corriente superficial hacia el NE, para los meses de septiembre y enero con un viento del SSW de magnitud de 5 m s^{-1} .

Pavía y Reyes (1983) observaron la influencia de la configuración de la línea de costa en la dirección de los vientos. Estos autores notan un efecto friccional y de orientación de la línea de costa respecto a la dirección del viento observando, además de la brisa marina-terrestre, la presencia de viento sinóptico en la isla de Todos Santos la cual explican se debió a que la estación en la isla fue la menos afectada por las condiciones locales, como orografía, línea de costa y calentamiento terrestre. La influencia sinóptica para las estaciones costeras sólo se produjo en condiciones extremas como lluvias, condiciones Santana y nieblas profundas, por lo que para las observaciones aquí presentadas, sólo pudo haber habido influencia de viento sinóptico durante eventos Santana. Los autovectores para las estaciones costeras fueron en general aproximadamente perpendiculares a la línea de costa, lo que pudo dar origen, por el tipo de costa cóncava de la bahía, como menciona Pavía-López (1978), a un flujo divergente de vientos en la bahía. En la zona aquí estudiada, con viento del NW en Punta Morro, la corriente observada en superficie fue en general hacia el sur como otros estudios lo han señalado (Hernández-Walls, 1986; Argote *et al.* 1991; Ramírez-Mendoza, 1994); cuando se intensificó el gradiente, se observó una corriente hacia el NE. Estos autores mostraron una variación diurna evidente en la dirección así como una variación semidiurna en la rapidez, debidas a las intensificaciones de la brisa marina y terrestre durante el día y la noche, lo cual fue observado en las presentes mediciones y a los procesos de convección libre.

Argote *et al.* (1991) identificó mediante un modelo numérico, una zona de convergencia cuando los vientos fueron del NW y W. Cuando estos vientos

fueron del NW esta zona se observó en Punta Banda, y se movió hacia la zona de este estudio cuando los vientos fueron del W, desapareciendo esta condición con viento del N. De acuerdo a esto, la zona de convergencia en la zona de estudio apareció con vientos del W, lo cual coincidió con los resultados de este trabajo, en el cual, esta zona de convergencia que ocasionó corrientes hacia el NE, sucedió cuando incrementó el gradiente entre el viento que provino de El Ciprés, viento de dirección WNW y el viento de Punta Morro de dirección NW. También se observó en las predicciones por Argote *et al.* (1991), que cuando el viento viene únicamente del NW, la corriente en la zona fue hacia el sur, coincidiendo con lo obtenido en los resultados. Las diferencias entre el modelo y las mediciones de corrientes fueron principalmente debido a que el modelo no tomó en cuenta la presencia del espigón, así como la diferente estructura del viento en la Bahía como, por ejemplo, la diferencia entre el viento de El Ciprés y Punta Morro.

IV.2. Comportamiento de la corriente por el efecto de la línea de costa, presencia de espigón y rompeolas.

Al acercarse a la costa, los recorridos mostraron la influencia de la geometría de la línea de costa y el efecto del espigón se hizo evidente. Junto a este, se produjeron corrientes hacia el NE. Ramírez-Mendoza (1994), también observó esta dirección, el cual encontró que bajo viento predominante del NW con magnitudes entre 3 a 7 ms^{-1} , las corrientes presentaron una dirección predominante hacia el este, paralelas al espigón, con una ligera tendencia a seguir a lo largo de la línea de costa, hacia el E-SE. Tal tendencia fue observada en los recorridos, donde predominó una entrada cerca del espigón en dirección NE y una salida hacia la costa en dirección SE y SW. Esto sucedió con viento del NW, SW y SE y durante el reflujó de la marea.

IV.3. Comparación entre eventos Santana con vientos del NE y condiciones con viento del SW, durante el reflujó de la marea.

Para un evento Santana se calculó en la boca del puerto un flujo de salida aproximado de $74.73 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La Figura 57 muestra el patrón de velocidad transversal a la orientación de la entrada, mostrando un flujo de salida irregular en toda la extensión, pero principalmente la salida se intensifica en el lado este, adyacente al espigón. En este transecto se observó que el viento proviene del ENE y las mediciones fueron realizadas durante el reflujó de la marea, por lo que se suman estos forzamientos y producen corrientes de 30 a 40 cm s^{-1} . Comparado con un transecto en condiciones de viento del SW, el forzamiento de la marea predomina, con un flujo saliente; sin embargo, el flujo aproximado fue de $13.4578 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tres veces menor que en condiciones Santana. Con base en estos resultados, el efecto de viento del NE sobre la boca del puerto se manifiesta en un incremento en el flujo neto de salida en la boca del puerto.

IV.4. Periodos de primavera (mayo del 2002) e invierno (diciembre del 2002).

Carrillo-Bibriezca (1993) mencionó diferencias diurnas de temperatura entre 4 y $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en otoño (meses de septiembre, octubre y noviembre), a una profundidad de 10 m , disminuyendo durante los meses fríos hasta hacerse imperceptible en enero y febrero debido a homogeneidad en la columna de agua. Cruz-Colín (1997), encontró variaciones claramente diferenciadas entre verano e invierno, con una termoclina a los 9 metros de profundidad, y para invierno, condiciones de mezcla. Observó que durante verano este comportamiento estuvo definido por las mareas vivas y muertas que lo debilitan o refuerzan, dándose la ruptura del gradiente cuando la termoclina desapareció desde finales de otoño hasta principios de primavera. De acuerdo a estos autores, las mediciones de ADP fueron realizadas a finales de primavera (mayo del 2002) cuando comenzó la formación de una termoclina, que en verano fue a 10 m de profundidad y en condiciones de mezcla en invierno (diciembre del 2002).

Las mediciones de CTD no fueron realizadas para el mismo periodo de medición de ADP, mayo del 2002, pero sí para abril del 2003, representativo de

condiciones de primavera para la BTS. Los resultados mostraron una termoclina a los 7 m de profundidad (Figura 68) más somera que la reportada por Carrillo-Bibriezca (1993) y Cruz-Colín (1997), con un gradiente entre superficie y fondo de 2 °C menor, que aquellos. Las correlaciones entre capas, mostraron cómo en las corrientes hay un cambio de dirección a los 8 m, marcando una diferencia entre las capas superficiales y las de fondo (Figura 27 y 28).

Estas observaciones reflejaron un sistema de dos capas (observado también en las corrientes para mayo del 2002 y durante los recorridos con ADP). Aunque las mediciones de temperatura y salinidad no fueron realizadas para el mismo año, Cruz-Collins (1997) y Carrillo-Bibriezca (1993), mencionaron que en la BTS el régimen primavera-otoño fue el representativo de la zona con una aparición de la termoclina a 10 m en verano y condiciones de mezcla para invierno y que sólo un cambio en las condiciones por presencia de un fenómeno del Niño o Niña alterarían el resultado entre un año y otro.

Además de los cambios descritos en la temperatura, la dirección y magnitud del viento también cambió, siendo en primavera, proveniente del W y NW y para invierno del NE, con mayor magnitud en primavera (Figura 10).

Para invierno no se tuvieron suficientes datos, sólo tres días de medición, sin embargo, se pudo observar que hay homogeneidad en la columna de agua, observándose una corriente hacia el SE con viento predominante del NE y hacia el NW con viento del SW.

IV.5. Surgencia local.

Las condiciones de temperatura encontradas favorecieron a lo observado en las corrientes, cuando en superficie la corriente se dirigió hacia el SW y en fondo hacia el NE. De tal forma que el modelo conceptual que se propone para esta zona con vientos del NW de $3-4 \text{ m s}^{-1}$, es agua menos densa transportada en dirección SW, y una capa de agua mas fría en el fondo, que entra por el NE, como un reemplazo de agua debido a continuidad. La causa de este patrón de corrientes fue una zona de convergencia inducida por viento, en la superficie y a

reemplazamiento de agua por continuidad. Reid (1967), menciona diferentes formas de surgencia en el océano, una de ellas fue una surgencia local, la cual ocurre cuando los vientos fueron apropiados, generalmente a lo largo de una costa irregular, con una topografía compleja, además de no depender de la fuerza de Coriolis. Debido a que el área estudiada presentó estas características en mayo del 2002, bajo estas condiciones se presentó una surgencia local. Se ha observado que los forzamientos por viento pueden causar desviaciones en los niveles del mar predichos con base en registros históricos, donde la intensidad y persistencia del viento pueden provocar corrientes superficiales y causar apilamientos de agua o desalojos, los cuales pueden variar la elevación del nivel del mar (Johnson, 1960). Al respecto, Obeso *et al.* (2002) mencionaron que la energía del viento es transferida directamente a las corrientes superficiales en la interfase agua-aire las cuales, impulsadas por el viento, pueden converger en la costa y producir un incremento del nivel del mar en la costa; por el contrario, cuando las corrientes superficiales, con una componente mar adentro, divergen en la costa, producen una disminución del nivel del mar.

IV.6. Influencia de la marea y del viento en la corriente.

Las corrientes de marea promedio y su desviación estándar, se muestran en la tabla IV, siendo a 3 m de profundidad $3.4 \pm 1.7 \text{ cm s}^{-1}$ y a 9 m de profundidad de $4.74 \pm 2.76 \text{ cm s}^{-1}$. Álvarez-Sánchez (1971), mediante argumentos teóricos calculó una corriente de marea de 6 cm s^{-1} para la isóbata de 12 m con un rango de marea de 2 m, cuyo valor estuvo dentro de las mediciones observadas.

En el mes de mayo el forzamiento por marea no fue el forzamiento principal (varianza explicada por u 20% y por v 20%). Esto se observó al graficar los datos para las diferentes capas en un diagrama de vectores progresivos (Figura 35) en el que la partícula no regresó al mismo punto donde inició, de acuerdo a lo esperado si la marea fuera el principal comportamiento (Thorade, 1936). Por lo tanto, tal observación evidenció que existe otra componente diferente a la marea, de gran importancia. Sin embargo, hay que señalar que, durante marea viva, se observó

una respuesta de la corriente al flujo y reflujos de la marea, sumada al efecto del viento.

Por otro lado, cuando se removió esta señal de marea, se continuó observando las frecuencias diurna y semidiurna aunque de menor amplitud. Esto pudo ser debido a que también hay una frecuencia de 0.04 cph (diurna) debido a un forzamiento diferente a la marea, el cual, para nuestro caso, fue el viento, ya que en el caso de la BTS la presencia de la brisa marina es un forzamiento importante (Pavía y Reyes, 1983; Álvarez *et al.*, 1988; Argote *et al.*, 1990).

Argote *et al.* (1975) mencionó que para aguas superficiales de la BTS en la costa el viento es fuente de energía. Tal patrón se pudo observar, en mayor medida durante marea muerta lo cual se discutió con anterioridad.

La variabilidad temporal de la serie y sus modos principales dieron como resultado para u un modo 1 baroclínico que explicó el 50% de la varianza principalmente en la capa de fondo, con un nodo a los 4 m de profundidad, con una serie temporal de variabilidad diurna y un modo 2 también baroclínico que explicó el 39% de la serie con un nodo a los 7 m de profundidad, siendo la varianza mejor explicada por superficie y fondo con variabilidad temporal semidiurna.

Para v , el modo 1 explicó el 75% de la varianza, resultando un modo barotrópico de variabilidad temporal diurna; el modo 2 explicó el 17% de la varianza y presentó una estructura de un modo baroclínico con un nodo a los 9 m de profundidad de variabilidad semidiurna, explicando principalmente lo que sucedió en superficie.

Si se sumara el comportamiento del modo 1 para u y v se obtendría un comportamiento hacia el NW hasta 4 m de profundidad y hacia el NE de 4 m en adelante, explicando el comportamiento en el fondo principalmente y de variabilidad temporal principalmente diurna (la marea y el viento en la zona presentaron estos cambios). Si se realizara lo mismo para el modo 2 para u y v , la estructura del modo sería en superficie hasta 7 m hacia el SW, de 7-9 m hacia el NW y de 9-11

m hacia el NE, de variabilidad temporal principalmente semidiurna (la marea presentó estos cambios semidiurnos).

IV.7. Corrientes residuales asociadas a un periodo de 24 horas.

Las corrientes residuales encontradas fueron de aproximadamente 6 cm s^{-1} . Estas corrientes fueron asociadas a periodos de 24 horas, los cuales pueden deberse a la marea y brisa marina. Se pudo observar que en general las corrientes residuales fueron representativas de la serie original, ya que muestran el mismo comportamiento que los diagramas progresivos (Figura 35). Estas corrientes fueron asociadas en mayor medida al viento, el cual generó zonas de convergencia que coincidió con la dirección de las corrientes observadas, SW en superficie y NE en fondo. Sin embargo, la marea sigue teniendo un papel importante.

IV.8. Respuesta de la descarga ante diferentes condiciones de marea y viento.

Los trazadores utilizados para la descarga fueron CF, amonio, fosfato, temperatura y salinidad. Se observó que el patrón de corrientes influenciado por el espigón, ocasionó que estos contaminantes, fueran transportados en la superficie en dirección SW. Para CF este transporte debido a corrientes coincidió con lo observado en la dispersión de las bacterias en dirección SW (Figuras 59 a 62).

Para el amonio y fosfato, se observó una dispersión de estos nutrientes hacia el SW, mayor junto a la costa y dispersándose hacia fuera de la costa, observando una correspondencia entre las corrientes superficiales y la distribución de amonio y fosfato.

La temperatura presentó cambios verticales, los cuales no pudieron asociarse a la descarga. Sin embargo, en la salinidad sí se observó el efecto de la descarga, aunque ligeramente, con un cambio en la distribución horizontal. Se observaron salinidades de 33.35 paralelo a la costa y de 33.56 fuera de la costa (Figura 69). González-Moreno (2003) reportó salinidades con valores máximos de 1.60 para El Naranjo, 2.10 para El Gallo y en el punto de mezcla de 20.5, 20 m al norte 31.82 y 20 m al sur 33.21, asociando estos últimos valores a la mezcla de

agua residual con el agua de mar. Los valores al norte y sur de la descarga (31.82 y 33.21) se aproximaron a los datos observados de 33.35 junto a la costa. Mostrando un tendencia horizontal a dispersarse hacia fuera de la costa.

IV.9. Calidad de agua (bacterias, amonio, fosfato, O₂, clorofila a).

Las concentraciones de bacterias coliformes fecales estuvieron por debajo del límite para muestras simples (400 CF100 ml⁻¹) según la legislación de California para aguas de uso recreativo con contacto primario. La máxima concentración obtenida fue de 240 CF100 ml⁻¹, en condiciones de marea viva durante el refluo y con viento del SW, en la zona cercana al rompeolas, por lo que la fuente, de acuerdo al patrón de corrientes, no pareció provenir de la descarga, sino de la rada portuaria. Sin embargo, otras posibles fuentes de contaminación microbiológica pueden ser los escurrimientos clandestinos, las lluvias o que tales condiciones pudieran provocar resuspensión de materia orgánica y sedimento con microorganismos, aumentando los contaminantes en el agua, ya que hay que mencionar que esta zona ha estado expuesta a descargas de aguas residuales durante largo tiempo.

Este descenso en la concentración de CF en el agua comparado con lo reportado por Orozco-Borbón y Gutiérrez-Galindo (1983) para muestras en agua de mar, coincidió con lo reportado por González-Moreno (2003). Sin embargo, esta última reportó que ocasionalmente aumentaron los niveles de CF en los efluentes de las plantas de tratamiento, por fallas en la operación de las mismas, lo que repercutiría en el medio marino y por tanto es importante conocer su transporte.

Se observaron altas concentraciones de fosfato y amonio, para los meses de febrero y abril y concentraciones altas de oxígeno y clorofila a para el mes de marzo. La descarga de El Gallo contribuyó con una concentración de 2941 µM de amonio y 9 µM de fosfato, para El Naranjo, de 2318 µM de amonio y 49 µM de fosfato, que de acuerdo al flujo de la descarga respectiva dió por resultado una carga de amonio de 401.8 kg d⁻¹ para El Gallo y de 1075.7 kg d⁻¹ para El Naranjo, así como, 7.2 kg d⁻¹ para fosfato en El Gallo y 126.6 kg d⁻¹ en El Naranjo (Mendoza-Espinosa, comunicación personal). Los nutrientes como fosfato y

amonio, son elementos no conservativos, los cuales pueden tener adición o pérdida por diferentes procesos, aunado al efecto de transporte por advección y difusión, el cual fue observado. Debido a esto, las concentraciones observadas con respecto a la fuente original de la descarga disminuyeron notablemente. Algunas posibles rutas que podrían seguir los nutrientes una vez que llegan al mar son: solución, reacción con material en suspensión, consumo biológico o precipitación, Millero (1992).

El amonio presente en aguas residuales proviene como resultado de los compuestos excretados por organismos por actividades metabólicas. El amonio puede ser oxidado a nitratos a través de bacterias nitrificantes (proceso de nitrificación). Este proceso requiere la presencia de oxígeno por lo que para que se oxide 1 mg de amonio se requieren 4.5 mg de O₂. Debido a que la concentración de saturación de oxígeno en agua es alrededor de 9 mg l⁻¹, se requiere una pequeña concentración de amonio para consumir el oxígeno de un cuerpo de agua, Horan (1990). La zona de estudio es muy dinámica y con alta concentración de oxígeno por lo que aún con altas concentraciones de amonio, no se producen zonas anóxicas.

Con respecto a las altas concentraciones de O₂ encontrado, se puede decir que en un sistema con alta concentración de nutrientes, como lo observado, estos pueden ser oxidados hasta el punto en que se produzcan zonas anóxicas en el área, sin embargo, esto no sucedió. Al contrario, el O₂ se incrementó y esto debido a la recirculación del agua en esta zona por las corrientes e inclusive por renovación de agua de fondo por corrientes del NE, lo que se discutió como un proceso de surgencia local.

El fosfato también tuvo valores altos con respecto a ambientes naturales, lo cual es una fuente de energía utilizable por las plantas, por lo que esta zona puede ser una zona productiva por efecto en conjunto de la descarga y de la circulación.

Con respecto a la concentración de clorofila *a* observada, en la mayoría de las estaciones del presente trabajo, las concentraciones fueron mayores a las

reportadas con anterioridad, por ejemplo Millán-Nuñez y Rivas-Lozano (1988), reportaron para la Bahía de Todos Santos concentraciones de clorofila *a* para mayo de 1983 mayores en el SE, con un intervalo de 0.3 a 0.6 mg m⁻³ para muestras superficiales decreciendo hacia la costa. A 10 m encontró un rango de 0 a 1.4 y en 30 m, de 0.2 a 1 mg m⁻³. Para estos autores, las máximas clorofilas correspondieron a valores no detectables de nutrientes, lo que en nuestro caso no sucedió, ya que altos valores de clorofila coincidieron con altos valores de nutrientes, posiblemente debido a la descarga.

Peña *et al.* (2001) han reportado para el puerto interior y para la zona frente a El Gallo en la isóbata de 20 m, especies abundantes de dinoflagelados, productores de mareas rojas en el área, durante primavera y verano, cuya presencia pudiera asociarse a las condiciones dadas por efecto de la descarga, aunque esta no es la única zona en la que reportan la presencia de estos quistes. Comentan que los factores determinantes para inducir el desenquistamiento para que haya marea roja son la concentración de nutrientes, la duración del día y la temperatura. En este caso, el aumento en la concentración de nutrientes como amonio y fosfato pueden favorecer estas condiciones.

IV.10. Incertidumbre de las mediciones por ADP.

La incertidumbre en los datos fue la suma de errores sistemáticos y aleatorios. Para el instrumento utilizado con transductores de 30° y una frecuencia de 1,000 kHz el ruido Doppler calculado para el muestreo fijo fue de 0.008 ms⁻¹ y para los recorridos de 0.006 ms⁻¹, lo cual dependió del tamaño de celda utilizado, del número de datos y de la frecuencia de aparato utilizado.

Con respecto a los recorridos, los errores aleatorios posibles mencionados por García *et al.* (1997), fueron: turbulencia, mal alineamiento, velocidad de la embarcación no constante, burbujas frente al transductor o presencia de organismos con movimiento no pasivos. Kosro (1985), en García *et al.* (1997), mencionó que en mediciones de barco, la diferencia entre las mediciones

corregidas por movimientos verticales y cabeceo a las que no fueron corregidas fue de 1 cm s^{-1} .

Otro indicador de la incertidumbre fue la señal de ruido (SNR) del ADP cuyo límite fue 4 db, para lo cual se eliminaron los datos no válidos de acuerdo a este parámetro. Los datos fueron limpiados además por mala señal del GPS. Se realizó también una limpieza de datos que no estuvieran dentro del rango de ± 2 desviaciones estándar y se promediaron las velocidades cada 60 s, sin embargo no se realizó la corrección por escalamiento y mal alineamiento (factores α y β , de acuerdo a Joyce, 1989).

También hay que señalar que el ADP no tiene resolución en las mediciones para la capa de 0.7 m en el fondo y para la superficie, debido a la dispersión del sonido en estas zonas, aún así, los resultados en superficie (hasta donde puede medir) mostraron un panorama de lo que se ha observado en el primer metro de agua para la bahía por diferentes autores (Argote *et al.* 1992; Álvarez *et al.* 1988), con la ventaja de conocer lo que sucede en fondo.

IV.11. Difusión.

Directamente no fue cuantificada la difusión, pero de las corrientes observadas para los recorridos bajo diferentes condiciones de marea y viento (Figuras 43 a 54), se puede afirmar que la difusión turbulenta incrementó bajo condiciones de refluo durante marea viva, con viento del NW y SW de 6 m s^{-1} , sobretodo paralelo al espigón y junto a la boca del puerto, dominando los términos de advección al alejarse del espigón. Esto se observó cuando en los recorridos no se realiza filtrado de oleaje. Sin embargo cuando se promediaron los datos cada minuto, los términos de difusión turbulenta disminuyeron y aumentó la advección, por lo que el oleaje fue fuente de difusión turbulenta.

V. CONCLUSIONES

La frecuencia principal observada fue la diurna, con un periodo de 24 horas, la cual coincide con periodos de la marea y del viento (brisa marina).

La corriente de marea promedio a 3 m de profundidad fue de $3.4 \pm 1.7 \text{ cm s}^{-1}$ y a 9 m de profundidad de $4.74 \pm 2.76 \text{ cm s}^{-1}$. La componente u explicó alrededor del 20 % de la varianza de la serie y v otro 20 %. La marea fue semidiurna.

Se observó que el efecto de la marea viva sobre la corriente causó que las corrientes se dirigieran hacia el norte durante el flujo y hacia el sur en el reflujo aún con la presencia del viento.

Durante marea muerta se incrementó el efecto del viento, haciéndose más evidente los efectos de la zona de convergencia debido a viento. De esta forma, en superficie se observaron corrientes hacia el NE cuando el viento aumenta y hacia el sur cuando los vientos se relajaron.

No hubo correlación entre el viento de Punta Morro y la corriente observada, por lo que la corriente pudo deberse a la presencia de la zona de convergencia en el área de estudio como resultado del patrón de circulación de vientos en la bahía, aunado a los efectos de la presencia del espigón y al arribo de oleaje.

La corriente que predominó, con vientos del NW de $3-4 \text{ m s}^{-1}$ fue una corriente hacia el SW en la superficie de magnitud promedio de $6 \pm 3.2 \text{ cm s}^{-1}$ como consecuencia de la circulación de la Bahía, a un flujo convergente al sur de la zona de estudio, debido al patrón de viento en el área, principalmente por las diferencias entre El Ciprés y Punta Morro, así como por la configuración de la línea de costa. En fondo se observó una corriente principal hacia el NE, como un reemplazo de agua por el fondo, cuyo mecanismo pudiera dar lugar a un surgencia local en la zona causada por el patrón de viento, la configuración de la costa, así como los efectos batimétricos.

Esta área de convergencia en la zona, se puede mover, y acercarse a nuestra zona de estudio al incrementar el gradiente entre El Ciprés y Punta Morro. Esto se observó con vientos del NW de 6 ms^{-1} , lo cual originó que la corriente fuera

hacia el NE cuando el viento intensificó y cuando esta condición se relajó, nuevamente cambiara hacia el SW.

La corriente residual asociada al periodo de 24 hrs, reflejó tanto la influencia de marea como el patrón de corrientes inducido por viento.

Las mediciones de temperatura y salinidad para marzo y abril del 2003, mostraron una termoclina ubicada aproximadamente a los 7 m, lo cual favorecería la presencia de surgencia local en esta zona, en un sistema de dos capas. Sin embargo, las mediciones de temperatura y salinidad no fueron sincronizadas con el ADP, por lo que no es posible confirmar esta afirmación.

En los recorridos se observaron los siguientes patrones de circulación diferenciando tres zonas principales: junto a la boca del puerto, junto al espigón y hacia el mar. La corriente junto a la boca fue influenciada en mayor medida por la marea, así como por la geometría de la rada y la presencia del espigón. Paralelo al espigón se observaron corrientes hacia el NE con alta variabilidad, continuando su salida a través de la línea de costa, algunas veces siguiendo el contorno de las isóbatas en dirección predominantemente S y SW, continuando este patrón hasta 1 km al sur del espigón y hacia fuera de la costa (a 1 km aproximadamente). Se observó una influencia de la geometría y configuración de la línea de costa, principalmente un apilamiento entre el espigón y la línea de costa y una consecuente salida por el sur. Se notaron diferencias en la dirección de la corriente en la columna de agua, evidente en el mes de abril durante el reflujó de marea viva y con viento del SW de aproximadamente 5 m s^{-1} observándose corrientes superficiales hacia el NE cerca del espigón y hacia el SW, en el resto del malla y corrientes hacia el N en el fondo.

Las bacterias coliformes fecales estuvieron por debajo del máximo diario permitido para aguas de uso recreativo (legislación de California) de 400 CF 100 ml^{-1} . De acuerdo a las corrientes las bacterias se dispersaron hacia el SW hasta ser <2 a aproximadamente 500 m de la descarga. Las concentraciones mayores observadas, de acuerdo a las corrientes, no parecieron provenir de la descarga, sino del puerto o de otras fuentes como resuspensión de sedimento, lluvias, o descargas clandestinas.

Los mejores trazadores de la descarga fueron salinidad (conservativo), amonio y fosfato (no conservativo). Las distribuciones de amonio y fosfato indicaron que fueron transportados en dirección de las corrientes, las máximas concentraciones se encontraron junto al espigón y paralelos a la línea de costa, dispersándose hacia fuera de la costa. Se observaron menores concentraciones en fondo, sin embargo, aún en fondo fueron mayores a los reportado por sistemas naturales no influenciados por descargas residuales con un incremento en las concentraciones de abril.

Para abril del 2003, las clorofilas indicaron valores mayores (0.5 a 3.5 mg m³) con respecto a lo reportado anteriormente (0 a 0.4 mg m⁻³). Las concentraciones de oxígeno estuvieron en un rango de 8.4 a 9.8, lo que puede explicarse ya que la zona fue muy dinámica y presenta recirculación inclusive por aporte de agua proveniente de fondo.

Estas condiciones en conjunto con el efecto de las corrientes sobre la zona, indicarían un incremento en la productividad de la zona por influencia de la descarga con un efecto de eutroficación de la zona estudiada.

Finalmente, los trazadores de la descarga como bacterias coliformes fecales, amonio y fosfato, en general, fueron transportados siguiendo el patrón de circulación descrito en esta zona, principalmente hacia el SW en la superficie.

VII. REFERENCIAS.

- Álvarez-Sánchez, L.G. (1971). Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura. UABC-FCM. 54 pp.
- Álvarez-Sánchez, L.G., R. Hernández-Walls, y R. Durazo-Arvizu. (1988). Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*. **14** (4), 135-162.
- Argote-Espinoza, M.L., A. Amador-Buenrostro, y C. Morales-Zúñiga. (1975). Distribución de los parámetros de salinidad y temperatura y tendencias de la circulación en la Bahía de Todos Santos, B.C. *CIBCASIO*. **2**, 3-30.
- Argote-Espinoza, M.L., F.J. Gavidia-Medina, y A. Amador-Buenrostro. (1991). Wind induced circulation in Todos Santos Bay, B.C. México. *Atmósfera*. **4**, 101-115.
- American Public Health Association (1995), American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19 th. Ed. American Pub. Health Association, New York, 9-49.
- Annika, M.V., D. A. Fain, D.J. Wilson, P.M. Orton, y A. Baptista. (2001). Seasonal and tidal monthly patterns of particulate matter dynamics river estuary. *Estuaries*. **24** (5), 770-786.
- Blanco-Betancourt, R., A. Martínez-Díaz de León, y R. Lizárraga. (2002). Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra (Noviembre de 2002). **22**(2), 301.
- Bowden, K.F. (1965). Horizontal mixing in the sea due to a shearing current. *J. Fluid Mech.*, **21** (2), 83-95.
- Bowden, K.F. (1983). Physical Oceanography of Coastal Waters. John Wiley & Sons, New York. 302 pp.
- Camacho, V. F., J.D. Carriquiry, y S.V. Smith. (2003). Non conservative P and N Fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintín Bay, México. *Estuaries*. **26** (5), 1220-1237.
- Carrillo-Bibriezca, L. (1993). Cambios de temperatura en la Bahía de Todos Santos durante Otoño-Invierno 91-92. Tesis de licenciatura. UABC-FCM, 45 pp.
- Cruz-Colín, M. E. (1997). Variabilidad de temperatura del mar en la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Tesis de maestría. UABC-FCM. 97 pp.

- Csanady, G.T., (1963). Turbulent diffusion in Lake Huron. *J. Fluid Mech.* **17**, 360-384.
- Csanady, G.T., (1970). Dispersal of effluents in the Great Lakes. *Water Research*, **4**, 79-114.
- Dasic, T., y B. Djordjeic. (1999). International Environmental Modelling and Software Society. Meeting 2002. Assesment Integrating Management and Decision Support. Part 1. Prediction and Management of Water Quality in Water Storage Reservoirs. Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Yugoslavia. 257-262.
- Durazo-Arvizu, R. (1983). Circulación superficial y cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura. UABC-ESCM. 69 pp.
- Durazo-Arvizu, R. y L.G. Álvarez-Sánchez. (1988). Cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*. **14**(1), 95-114.
- García-Górriz, E., J. Font, y J. Candela. (1997). Data Quality Control for Vessel Mounted Acoustic Doppler Current Profiler. Application for the Western Mediterranean Sea. *Scientia Marina*. **61** (4), 417-430.
- Gavidia-Medina, F.J. (1988). Simulación numérica de la circulación barotrópica en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada. Ensenada, B.C., México, 95 pp.
- González-Moreno, L. (2003). Contaminación microbiológica en la zona costera adyacente a la descarga El Naranja/El Gallo en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura. UABC-FCM. 64 pp.
- Gómez-Reyes, E., H. S. Vélez-Muñoz, J. R. Blanco-Betancourt, R. Morales-Pérez, y M. Ortiz-Figueroa. (1999). Proyecto medición de corrientes en Coyuca. Universidad Autónoma Metropolitana. Reporte técnico. Diciembre de 1999.
- Hernández-Walls, R. (1986). Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de licenciatura. UABC-FCM. 69 pp.
- Horan, N.J. (1990). Biological Wastewater Treatment Systems, Theory and operation. John Wiley and Sons. Great Britain. 310 pp.

- Johnson, J.W. (1960). The effect of wind and wave action on the mixing and dispersión of wastes. Proc. First Int. Conf. on Waste Disposal en the Marine Environment. Pergamon Press, New York. 328-343.
- Joyce, T.M., (1989). On *in situ* "calibration" of shipboard ADCPs. J. Atmos. Oceanic Technol. **6**, 169-172.
- Sontek ADP Acoustic Doppler Profiler. Technical Documentation. November, 1977.
- Mendoza-Espinosa, L.G. (1994). Variación diurna y estacional de variables hidrológicas y clorofila *a* en bahía Willard, Golfo de California. Tesis de licenciatura. UABC-FCM. 52 pp.
- Millán-Nuñez, R., y A.M. Rivas-Lozano. (1988). Nutrientes y clorofilas en la Bahía de Todos Santos (mayo 1983). *Ciencias Marinas*. **14** (4), 23-42.
- Millero, F.J. y M. L. Sohn. 1992. Chemical Oceanography. CRC press. London. 531pp.
- Mooers, C. N. K. (1973). A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariants. *Deep-Sea Res.* **20**, 1129-1141.
- Obeso-Nieblas, M., J. H. Gaviño-Rodríguez, A.R. Jiménez-Illescas, y B. Shirasago-Germán. (2002). Simulación numérica de la circulación por marea y viento del noroeste y sur en la Bahía de La Paz, B.C.S. *Océanides*. **17**(1), 1-12.
- Orozco-Borbón, M.V., y F. Delgadillo-Hinojosa. (1989). Contaminación fecal en sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*. **15** (1), 47-62.
- Parés-Sierra, A. (1981). Análisis de las componentes principales de los vientos superficiales sobre la Bahía de Todos Santos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. Ensenada, B.C. México, 50 pp.
- Pavía-López, E. (1979). Brisas en la Bahía de Todos Santos durante los meses de marzo a agosto de 1978. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C. México, 70 pp.
- Pavía-López, E., y S. Reyes-Coca. (1983). Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*. **9**, 151-167.

- Peña-Manjarrez, J.L., G. Gaxiola-Castro, J. Helenes-Escamilla, y E. Orellana-Cepeda. (2001). *Ciencias Marinas*. 27(4), 543-558.
- Perelló-Reina (2002). Estimación del campo de oleaje en la Bahía de Todos Santos mediante el uso de un modelo de predicción de oleaje en aguas someras. Tesis de licenciatura. UABC-FCM, 74 pp.
- Pérez-Higuera, R., y A. Chee-Barragán (1984). Transporte de sedimentos en la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*. 10, 31-52.
- Pritchard, D.W. (1960). The movement and mixing of contaminants in tidal estuaries. Proceedings of the first international conference on waste disposal in the marine environment at the University of California, Berkeley. Pergamon Press, 512-525.
- Ramírez-Mendoza, R. (1994). Difusión y Cinemática frente a la rada del puerto de Ensenada, B.C. México utilizando cuerpos de deriva. Tesis de licenciatura. UABC-FCM, 60 pp.
- Reid, J.L. (1967). Upwelling. SCRIPPS. I.O. Contr. 2232.
- Robinson, I. S. (1983). Tidally induced residual flows, in *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*. Elsevier, New York. 321-356 pp.
- Seañez-Reyes, R. (2001). Aislamiento de bacteriófagos y su aplicación en la contaminación de la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de maestría. UABC-ESCM. 62 pp.
- Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (1997). Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997.
- Sherwin, T.J. (1993). Modelos de calidad del agua cerca de descargas costeras. Notas de curso. Comunicaciones académicas. Serie Oceanografía Física, CICESE. 66 pp. CIOFP9301.
- Strickland, J. D., and T.R. Parsons, 1972. A practical handbook of Seawater analysis. 2nd. Edition. Bull. Fish. Res. Bd. Canada. 167 pp.
- Thorade, H. (1936). Methods used in the study of Ocean Currents (Traducción al inglés, G.F. Mc. Ewen). *Handbuch der Biologischen. Arbeitmethoden*, Berlín.

- Thorpe, S.A. (1984 a). A model of turbulent diffusion of bubbles below the sea surface. *J. Phys. Oceanogr.*, **14**(5), 841-854.
- Thorpe, S.A. (1984 b). On the determination of K_v in the near surface ocean from acoustic measurements of bubbles. *J. Phys. Oceanogr.*, **14**(5), 855-863.
- Thorpe, S.A. (1985). Small-scale processes in the upper boundary layer. *Nature*. **318**, 519-522.

Fuentes de material no publicado:

- Mendoza-Espinosa L.G. Comunicación personal. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, Baja California 22830, México.
- Mejía-Trejo, A., y E. Gil-Silva. Comunicación personal. Departamento de Oceanografía Física Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, Baja California 22830, México.