



UNIVERSIDAD
— DE —
VALPARAISO
C H I L E

Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico

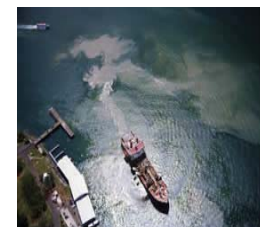
“Evaluación de Herramienta Tecnológica como Apoyo a las Estrategias frente a Derrames de Hidrocarburos en el Mar”

María Karina Oyarce Lineros

Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Naturales, 2009

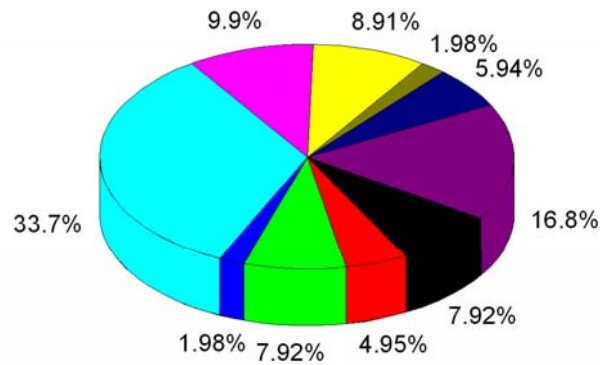
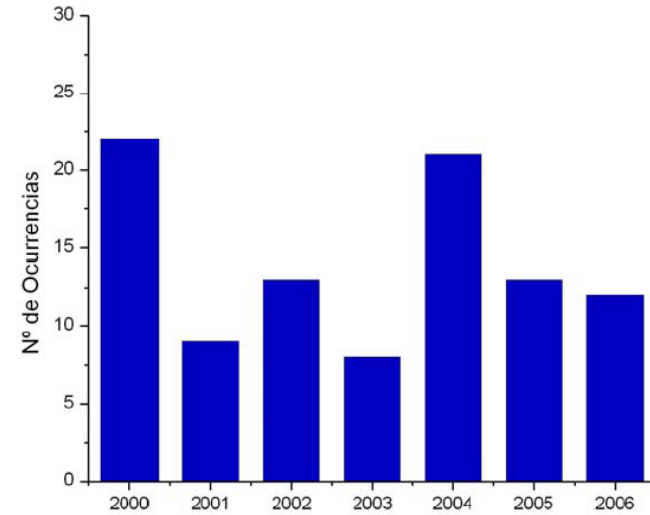
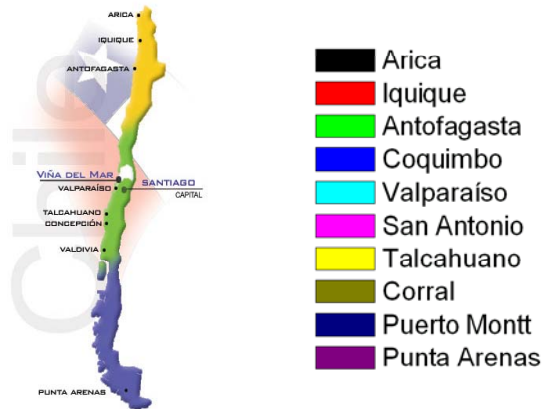
OBJETIVOS

- ❑ Modelar el proceso físico de dispersión que determina el transporte de petróleo en el mar utilizando los modelos RMA2 y RMA4, y evaluar su aplicación como herramienta de prevención y respuesta frente a derrame de hidrocarburo costero.
- ❑ Aplicar los resultados obtenidos a la modelación bidimensional a un derrame simulado en la Bahía de Quintero, V Región; cuya validación se realizará a partir de mediciones de corrientes y mareas.



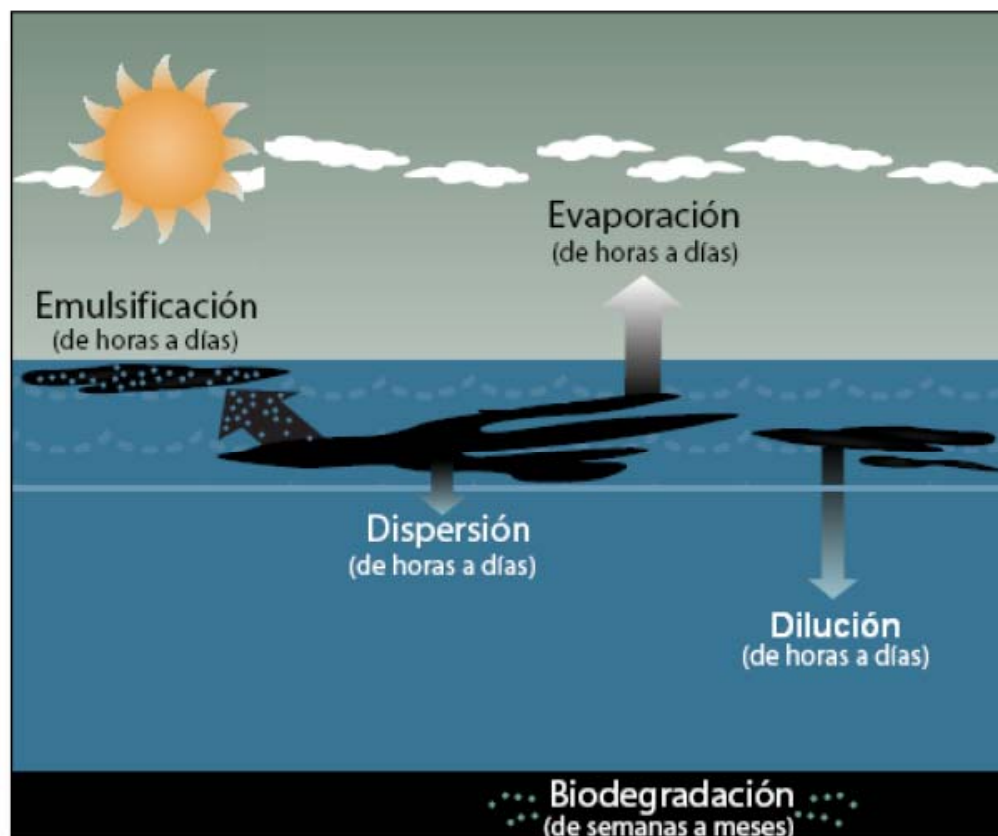
ANTECEDENTES GENERALES

Derrames de Hidrocarburos en Chile



ANTECEDENTES GENERALES

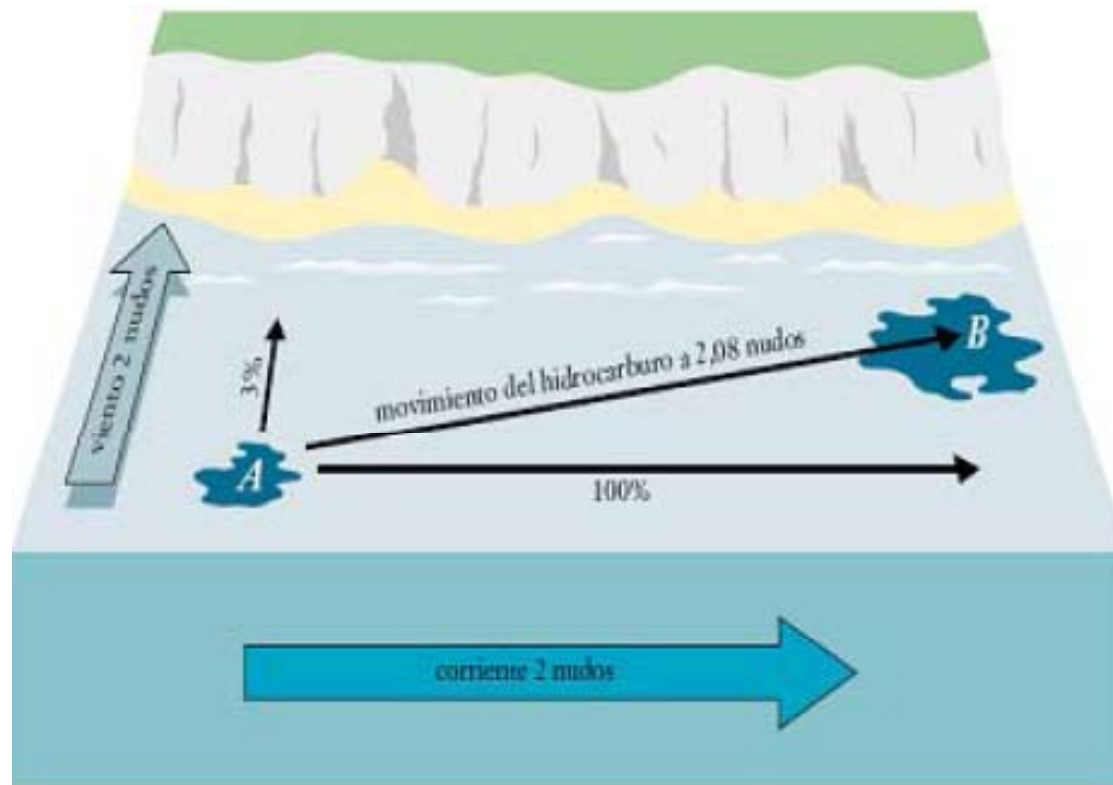
Procesos naturales que actúan sobre los hidrocarburos



Fuente: NOAA. 2001. *Manual de Análisis de Trayectoria [en línea]*. Seattle: Administración Nacional de Océanos y Atmosfera NOAA [fecha de consulta: 03/05/2009]. Disponible en: http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/937_trayect.pdf.

ANTECEDENTES GENERALES

Extensión y movimiento de la mancha de hidrocarburo



$$V_{\text{hidrocarburo}} = V_{\text{corriente}} + (V_{\text{viento}} \times Q)$$

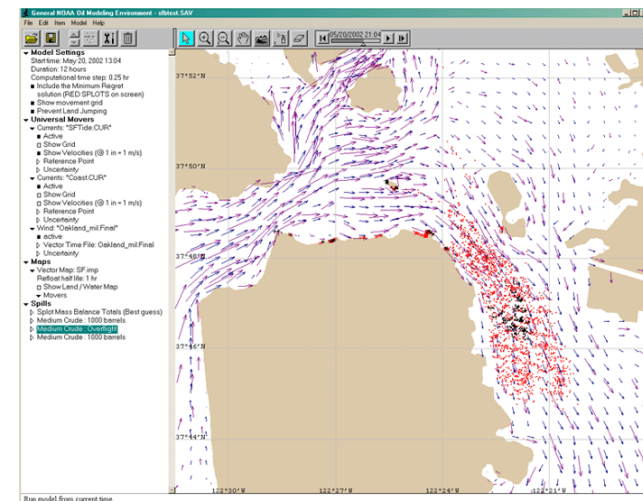
ANTECEDENTES GENERALES

Modelación de hidrocarburos en el mar



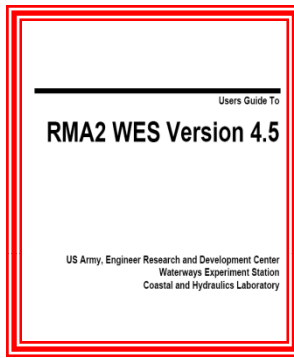
GNOME (General NOAA Oil Modeling Environment), modelo lagrangeano, desarrollado por la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration). La trayectoria de productos derramados es estimada a través de información de condiciones de viento, régimen de circulación, volumen y tipo de producto derramado.

OILMAP, software que permite simular derrames de hidrocarburos en el mar prediciendo con ello el desplazamiento de una mancha de petróleo, modelando matemáticamente su trayectoria sobre una base de datos ambientales, tales como vientos, corrientes, mareas y sobre las características físicas y químicas del elemento derramado.

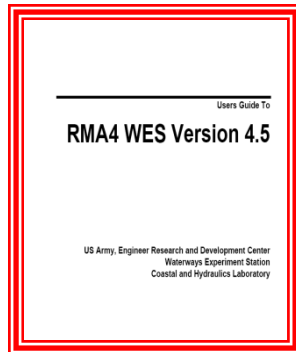


DESCRIPCIÓN DE MODELOS RMA2 Y RMA4

Modelación de hidrocarburos en el mar



RMA4, programa desarrollado por US Army Corps of Engineers. Permite calcular la concentración de un máximo de 6 constituyentes, que pueden ser conservativos o no. Se trata de un modelo euleriano, que resuelve numéricamente las ecuaciones de conservación de masa para cada uno de los constituyentes considerados.



El modelo RMA4 simula procesos de advección y difusión, considerando una distribución vertical uniforme en el ambiente acuático. Para la aplicación de este modelo, utiliza las soluciones hidrodinámicas calculadas por el programa hidrodinámico RMA2.

DESCRIPCIÓN DE MODELOS RMA2 Y RMA4

Características del modelo RMA2

El modelo RMA2 utiliza el método de elementos finitos para resolver un sistema de ecuaciones que describen las condiciones hidrodinámicas de un área determinada definida a través de una malla de elementos finitos, obteniéndose como resultado las velocidades medias del flujo y los niveles de agua.

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g \rho n^2}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) - \tau_x - v 2 \Omega \sin \phi = 0$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g \rho n^2}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) - \tau_y + u 2 \Omega \sin \phi = 0$$

Aceleración local.

Aceleración advectiva para el eje x e y.

Dispersión para el eje x e y.

Elevación superficial.

Fricción del fondo.

Tensión superficial.

Aceleración de coriolis.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

Ec. De continuidad

DESCRIPCIÓN DE MODELOS RMA2 Y RMA4

Características del modelo RMA4

El modelo RMA4 permite evaluar las concentraciones de un máximo de 6 constituyentes, tanto conservativos como no conservativos. Trata de un modelo euleriano, que resuelve numéricamente las ecuaciones de conservación de masa. RMA4 está preparado para simular los procesos advectivos y difusivos, considerando una distribución vertical uniforme en el ambiente acuático.

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma + kc + \frac{R(c)}{h} \right) = 0$$

Término local.

Término advectivo en el eje x e y.

Dispersión en el eje x e y.

Fuentes locales de decaimiento.

Decaimiento exponencial.

Efectos lluvia/evaporación.

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Área de estudio



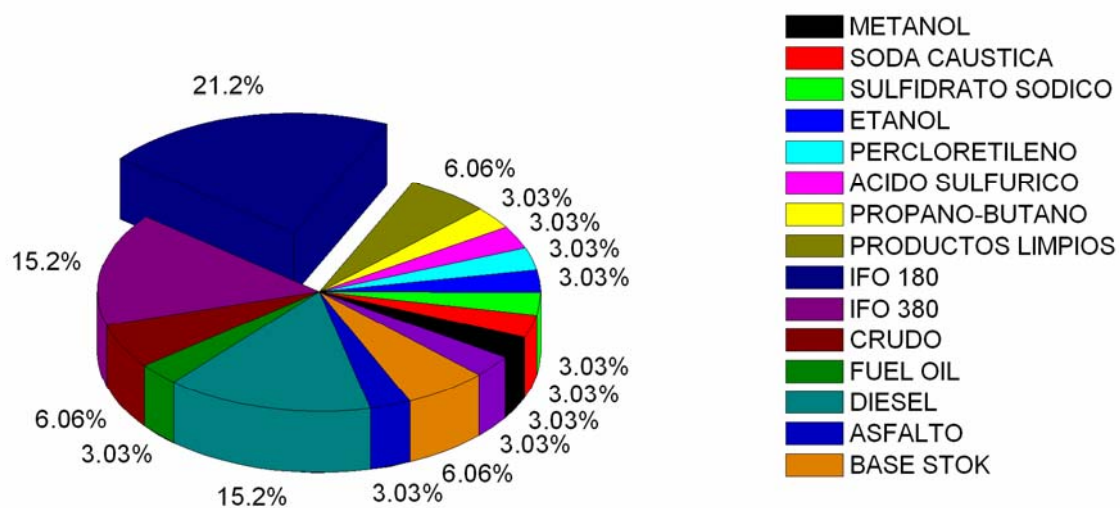
La Bahía de Quintero se extiende entre la superficie de 174,5 km², lo que representa el 1% de la superficie regional.

La comuna de Quintero presenta tres grandes áreas de desarrollo que permiten definir en términos globales los roles en que se desea potenciar y que presenta directa relación con sus connotaciones geográficas, morfológicas y su condición costera marítima:

- ❑ “Portuario e Industrial de Industrias peligrosas”
- ❑ “Habitacional y Turístico”
- ❑ “Equipamiento y Servicios”

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Derrames de hidrocarburos en Quintero

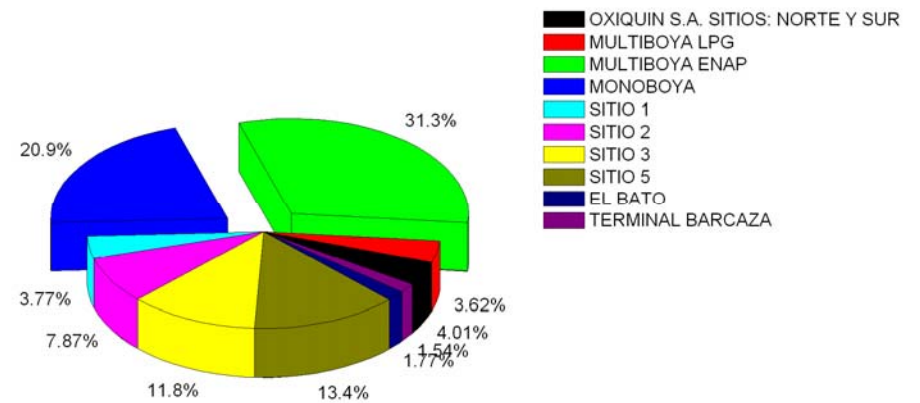
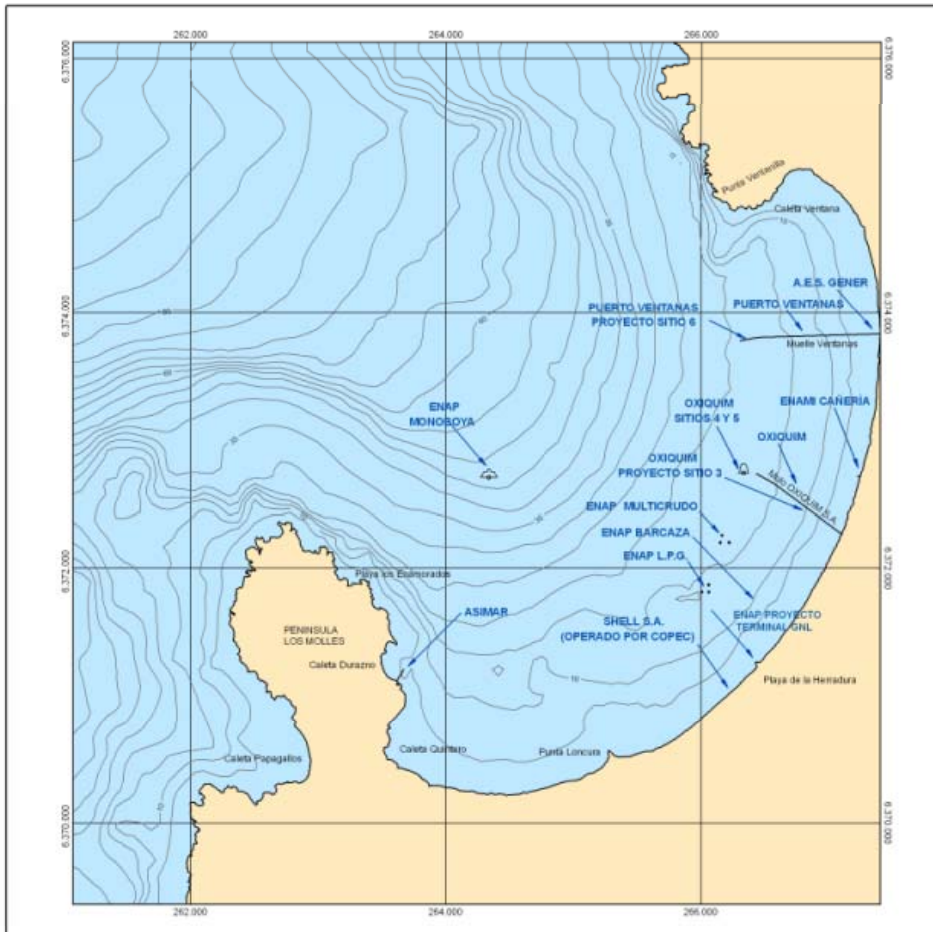


Terminal Monoboya (ENAP Refinerías Aconcagua S.A.), posee una tasa de transferencia de recepción máxima de 1.300 ton/hora y de entrega entre 2.580 a 5.500 ton/hora.

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

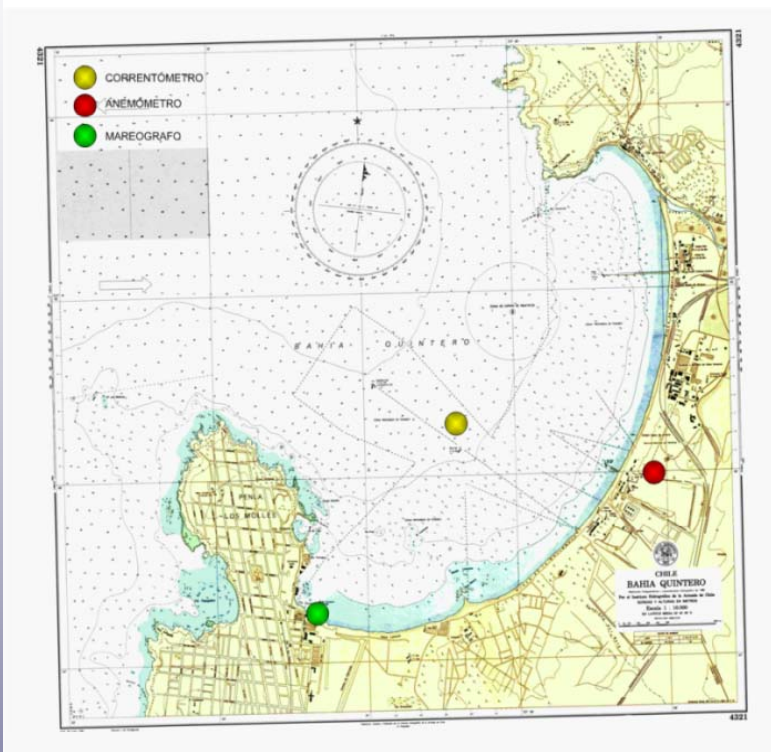
Derrames de hidrocarburos en Quintero

Los principales Terminales Marítimos Petroleros y de Gas de la Bahía de Quintero desde el año 2000 a 2006.



APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Ubicación de equipos de medición



El principal criterio empleado para la selección de los datos de campos fue la disponibilidad de dicha información; y las especificaciones en “Instrucciones Oceanográficas SHOA Pub. 3201 Instrucciones Oceanográficas N° 1 Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, 3ª edición 2005”.

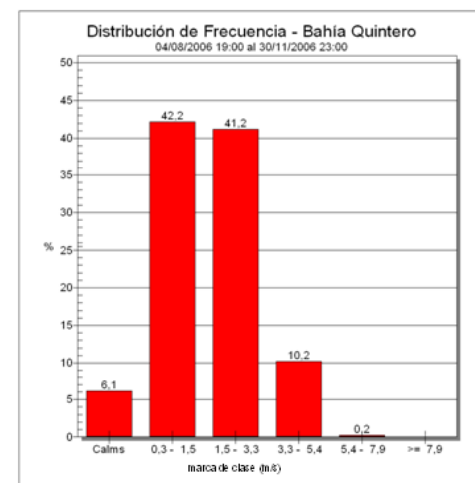
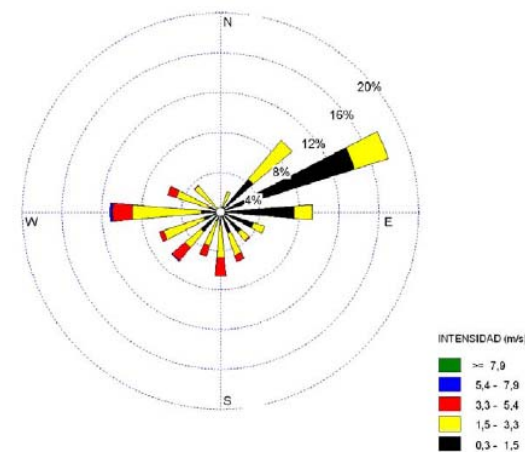
Equipo	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
Anemómetro	32°46'20.38"S	71°29'24.63"O
Correntómetro	32°46'15" S	71°30'21"O
Mareógrafo	32°46'48.20"S	71°31'35.63"O

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Vientos locales

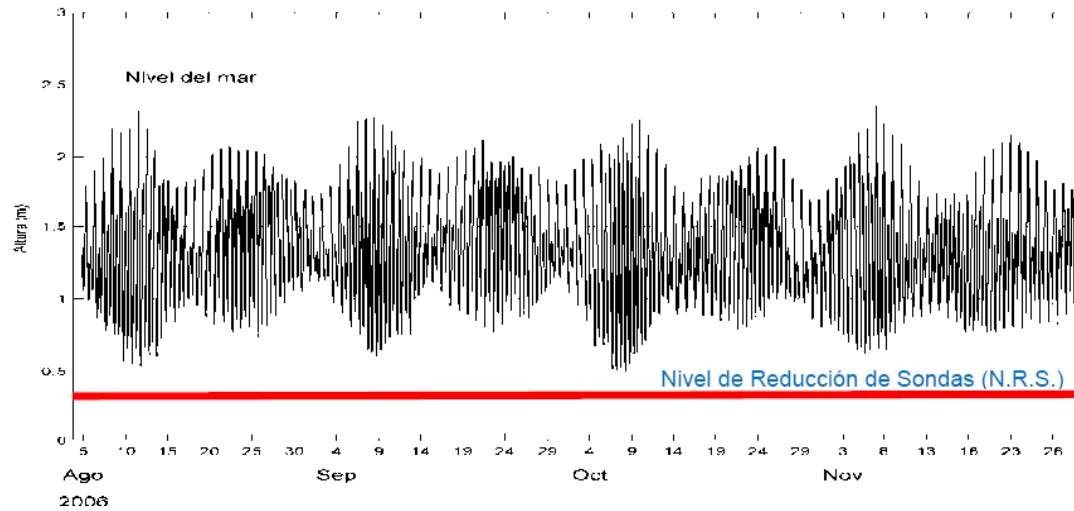
Valor Estadístico	Magnitud m/s
Máximo	6,750
Mínimo	0,000
Media	1,838
Varianza	1,297

Dirección/ Rangos de Magnitud m/s	0,3 - 1,5	1,6 - 3,3	3,4 - 5,4	5,5 - 7,9	>=8,0	Total
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NE	6,3	6,3	0,1	0,0	0,0	12,7
E	16,1	3,2	0,0	0,0	0,0	19,3
SE	6,8	2,6	0,4	0,0	0,0	9,8
S	3,9	6,9	2,7	0,0	0,0	13,5
SW	3,5	5,7	3,3	0,0	0,0	12,6
W	4,1	11,7	2,7	0,2	0,0	18,7
NW	1,4	4,7	1,0	0,0	0,0	7,2
Sub-Total	42,2	41,2	10,2	0,2	0,0	93,9
Calmas						6,1
Total						100,0



APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Mareas



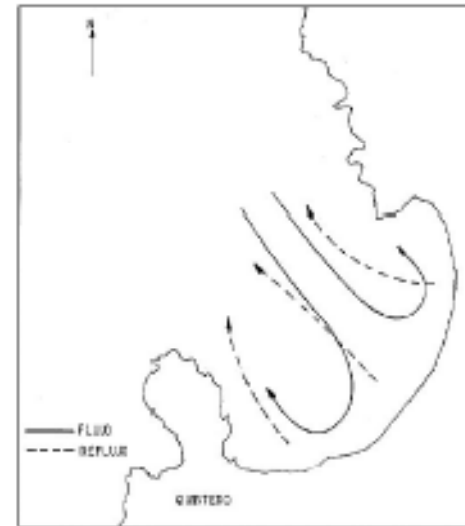
Plano Mareal	Sobre Cero Registro (m)	Sobre el NRS (m)
Altura Pleamar más Alta Observada	2,350	1,942
Nivel Medio del Mar	1,343	0,935
Nivel Medio de la Marea	1,333	0,925
Altura Bajamar más Baja Observada	0,500	0,092
Nivel de Reducción de Sondeas (N.R.S.)	0,408	0,000

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

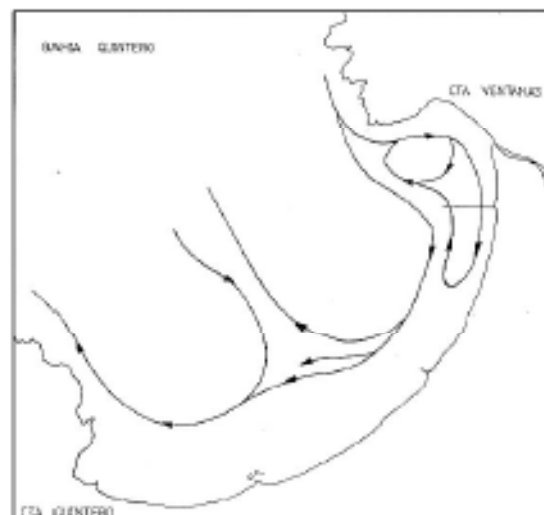
Corrientes



a) Circulación de las corrientes marinas superficiales y profundas de la bahía de Quintero (Escobar et al 1971).



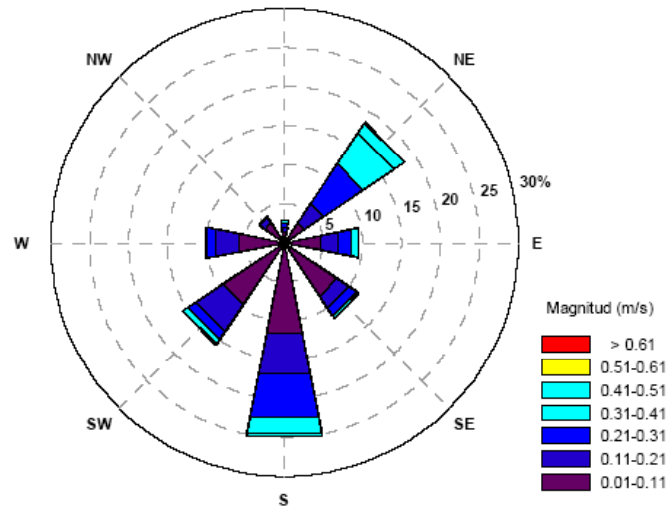
b) Patrón de circulación de corrientes marinas superficiales en llenante y vaciante de la bahía Quintero (Bakovic y Balic, 1984).



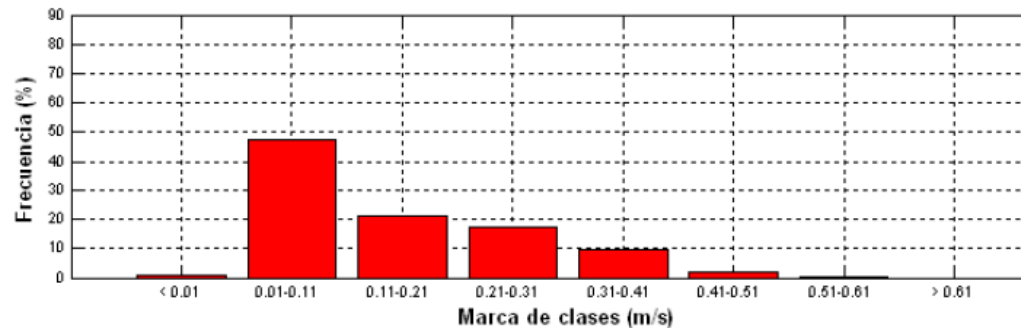
c) Modelo de circulación superficial de las aguas de la bahía de Quintero (Malet y Andrade, 1991).

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Corrientes



Distribución de Frecuencia - Celda 16



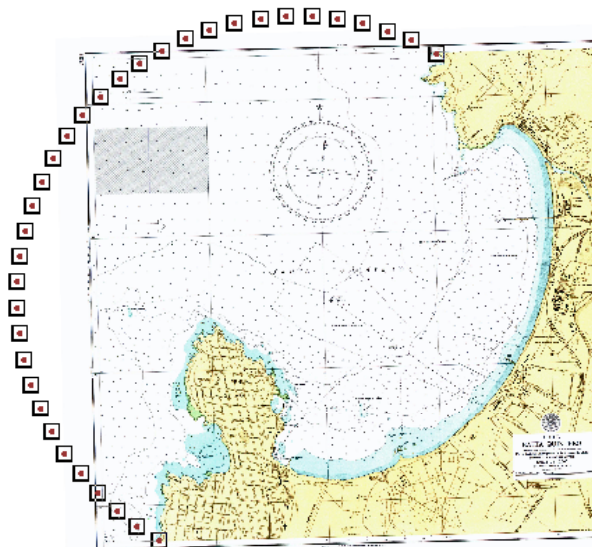
Valor Estadístico	Celda 16 (m/s)	Celda 8 (m/s)	Celda 2 (m/s)
Máximo	0,56	0,27	0,15
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Media	0,15	0,05	0,05
Varianza	0,01	0,00	0,00

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

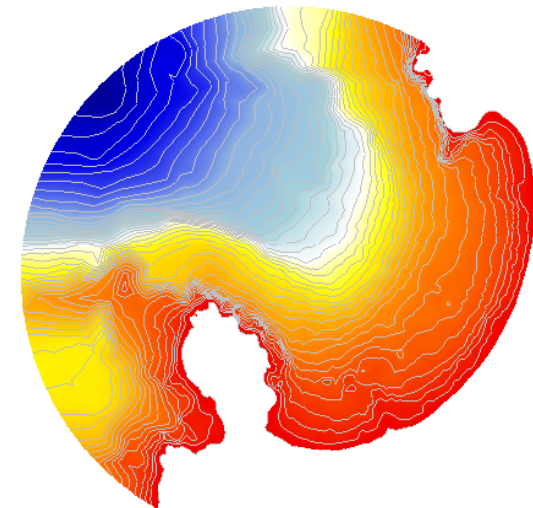
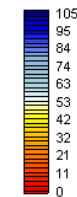
Generación de grilla computacional

Antecedentes y datos

- ❑ Geografía costera: para la definición de la línea de costas.
- ❑ Batimetría: información que resulta imprescindible en el desarrollo de modelos numéricos.
- ❑ Nivel del mar: principalmente para la asignación de las condiciones de contorno del modelo.
- ❑ Corrientes: información utilizada principalmente en el proceso de calibración del modelo.



Profundidad (m)



Región de modelación

Número de elementos	6697
Numero de nodos	13728
Profundidad mínima m	0,00
Profundidad máxima m	105,12
Tipo de elemento	Cuadrático
Número de elementos triangulares	6697

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Condiciones de borde



El mar abierto, cuyo límite corresponde a la región abierta fue definida mediante un arco semicircular, que permite forzar el modelo mediante la asignación de parámetros que representan la variación temporal del nivel del mar a través de éstos.

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Condiciones Iniciales

- ❑ **Superficie libre:** Las tensiones generadas por viento, serán excluidas del presente trabajo debido a que no influyen en las corrientes generadas por mareas.
- ❑ **Fricción del fondo:** Valor de Manning's recomendado de 0,025.
- ❑ **Coefficiente de viscosidad de remolino:** Asignación directa con valor inicial de 100 kg/m²s⁻¹, llegando en el proceso de calibrado a un valor de 2000 kg/m²s⁻¹.
- ❑ **Coefficiente de dispersión:** Determinado aplicando formulación implementada en el documento denominado "Efecto de los Coeficientes de Dispersión sobre la Modelación Bidimensional del Transporte de Contaminantes. Caso de Estudio", realizado por G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky, Bariloche. Argentina. 2004.

$$D_{lon} = k_l hu^* \quad D_{tran} = k_t hu^* \quad u^* = 3,13 Un/h^{1/6}$$

h=47,98 m considerando una velocidad uniforme de |U|=0,45 m/s y =0,025 resultando u^{*}=0,0185 m/s. Se adoptó k_l=k_t=0,3, recomendado para canales meandrosos, resultando D_{lon} = D_{tran}=0,2658 m²/s; valor utilizado para las simulaciones iniciales.

Posterior a la calibración se llego a valores de 6,66·10⁻³ m²/s y 0,129 m²/s para x e y, respectivamente.

APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Condiciones iniciales

- ❑ **Volumen derramado:** Para las condiciones de borde se consideró una cantidad derramada de 100 m³, de acuerdo a la clasificación de tipo de derrames mayores.
- ❑ **Concentración del hidrocarburo:** Para IFO-180 la densidad es de 950 kg/m³, por lo que la masa es de 95000kg; además del volumen del elemento de **100 m³**, obteniendo una concentración de 95 kg/m³.



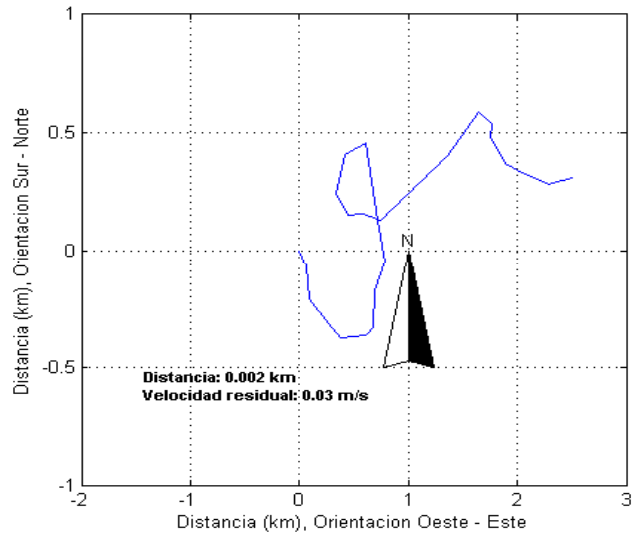
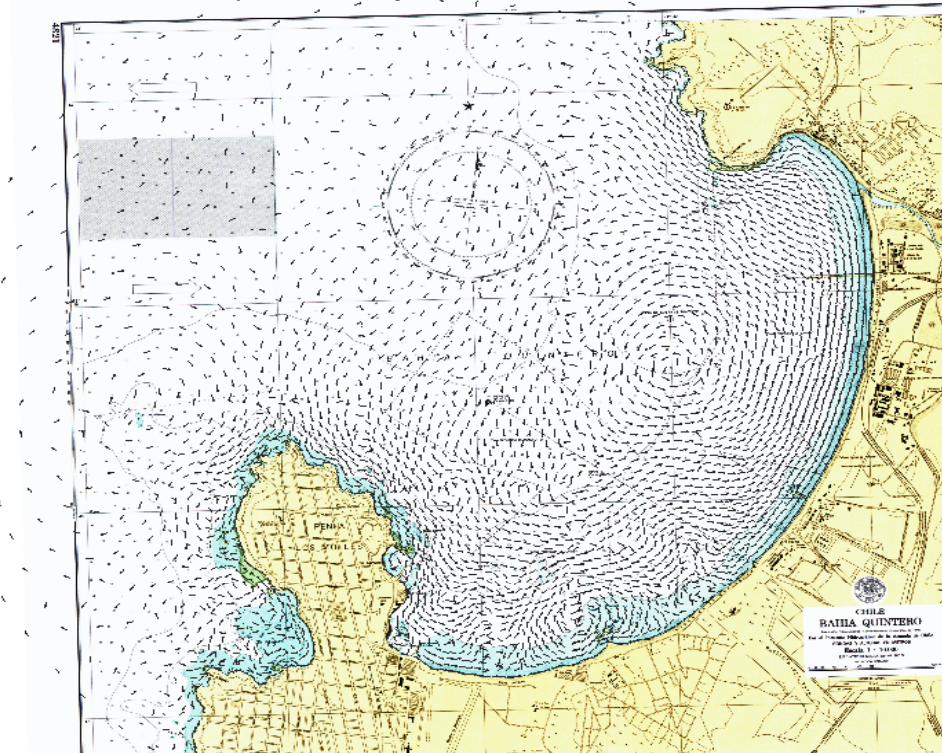
RESULTADOS

Hidrodinámica de la Bahía Quintero



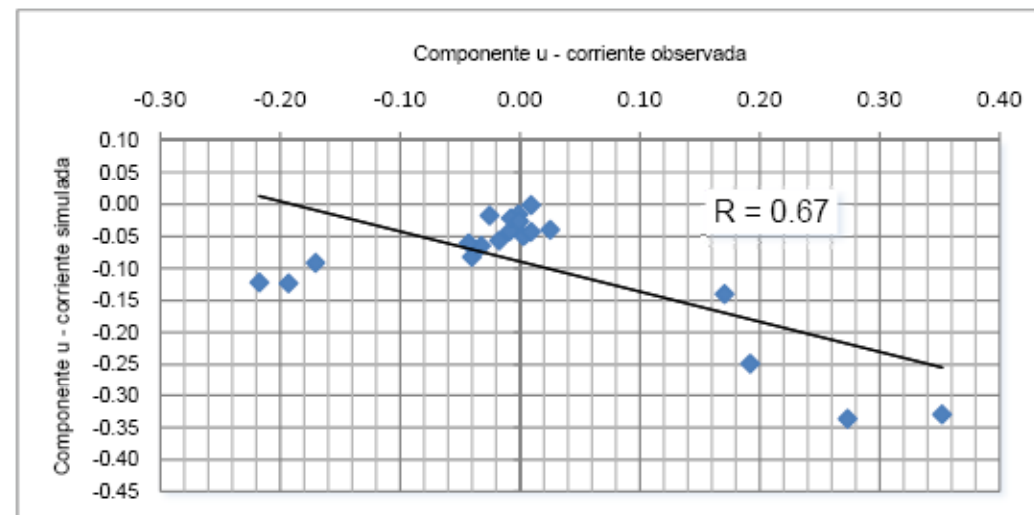
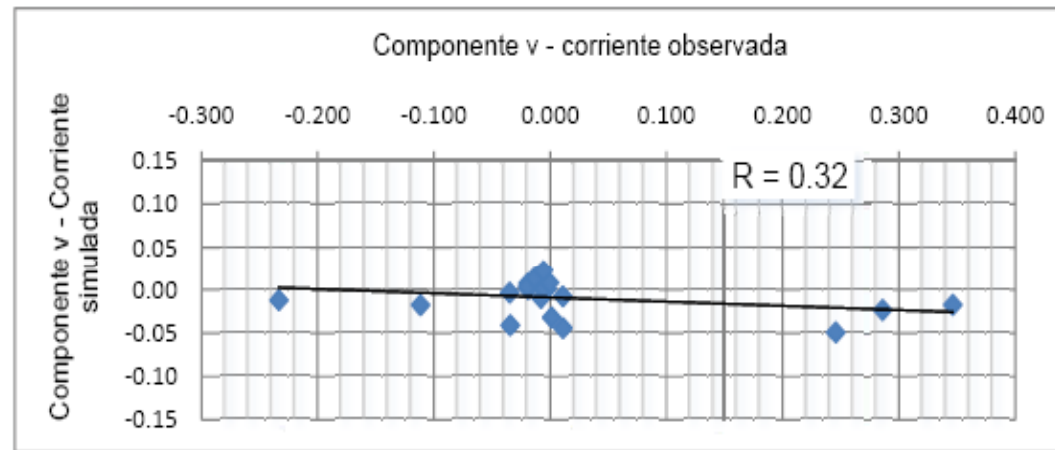
Leyenda Vector

0.05 m/s —
0.00 m/s —



RESULTADOS

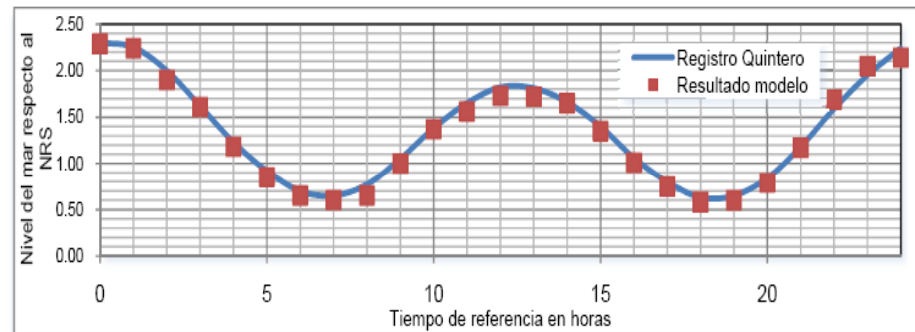
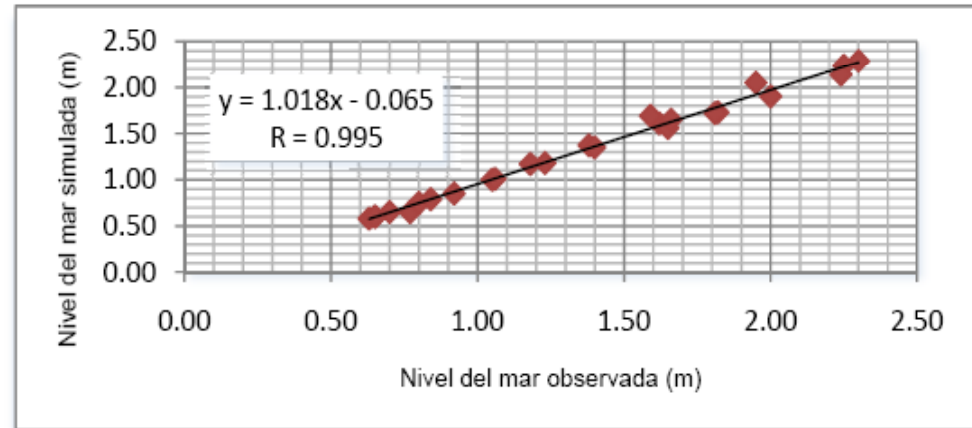
Hidrodinámica de la Bahía Quintero

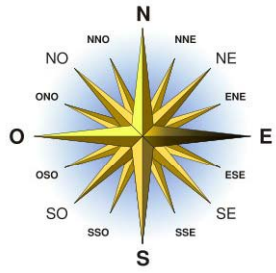


RESULTADOS

Hidrodinámica de la Bahía Quintero

Se reconoce un alto grado de correlación de 0,99 y para saber si la correlación es significativa se aplicó la prueba de t-Student en el nivel de significancia 0,01 (99% de confianza) con un grado de libertad, obteniendo como resultado 23,27 mayor que el valor crítico de $t_{0,99}$ por lo que la correlación es significativa, concluyendo que el modelo hidrodinámico simula en forma óptima el nivel medio del mar.

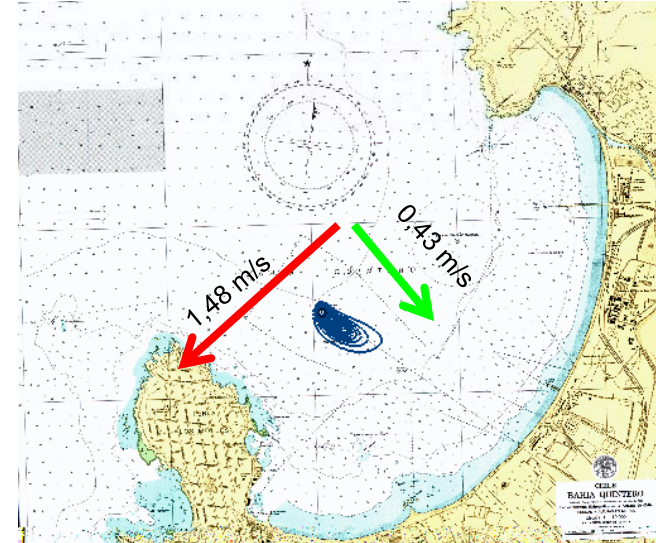
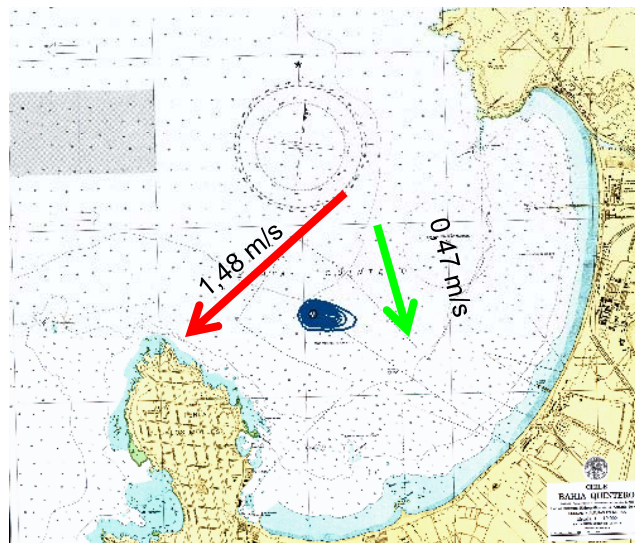
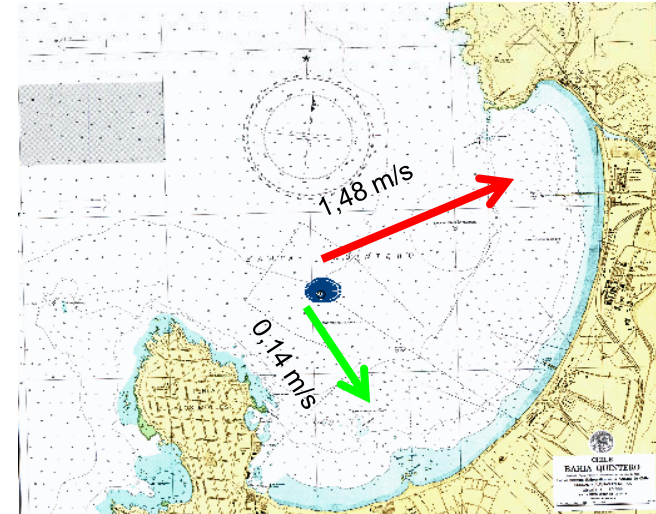
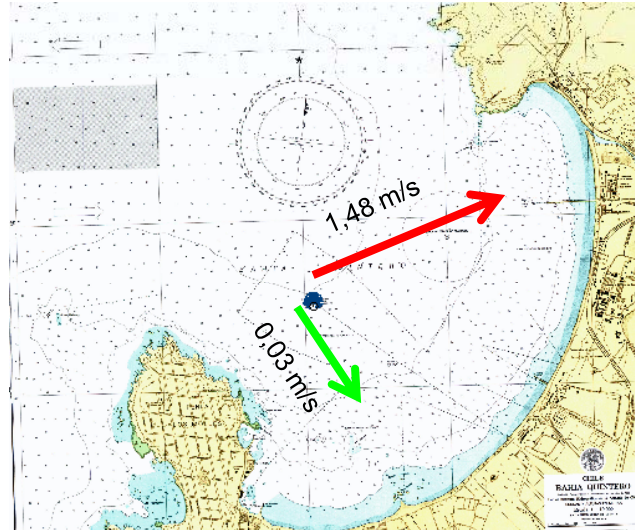


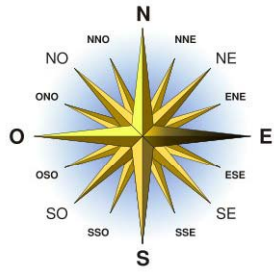




Viento →
Corriente →

RESULTADOS

Derrame de hidrocarburo en Bahía Quintero

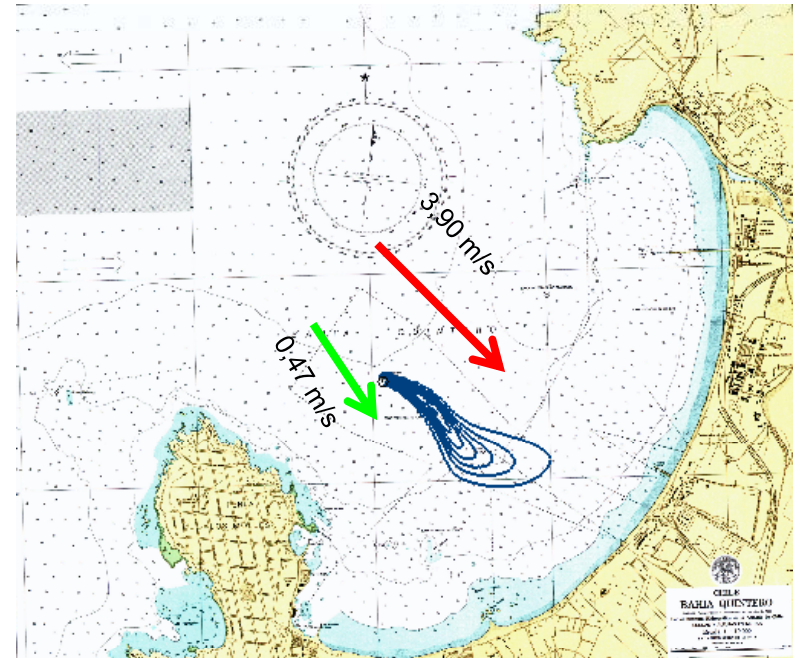
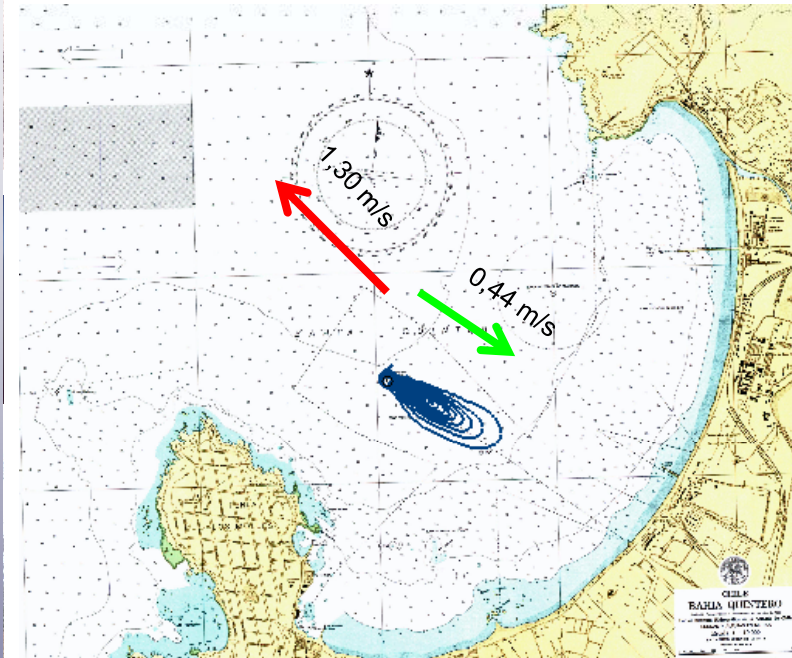




Viento 
Corriente 

RESULTADOS

Derrame de hidrocarburo en Bahía Quintero



CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio desarrollado son:

- ❑ En la actualidad son numerosas los modelos matemáticos empleados para determinación de las características hidrodinámicas de una zona litoral, si bien, es necesario señalar que el estado de conocimiento actual no garantiza, debido a las dificultades propias de un buen calibrado y a la hipótesis de formulación que los modelos mas sofisticados proporcionan los mejores resultados. En general se considera una aproximación de $\pm 5\%$ en niveles y $\pm 20\%$ en velocidad es aceptable.
- ❑ La elección de la hidrodinámica y las condiciones que se utilizan para representar le comportamiento del petróleo en el fondo o a la costa son determinantes para obtener resultados próximos a la realidad.



CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio desarrollado son:

- ❑ No es recomendable utilizar el modelo RMA2 para resolver problemas donde los vórtices o aceleraciones verticales sean de principal importancia.
- ❑ La aplicación de los modelos RMA2 y RMA4 permiten modelar el proceso físico de dispersión que determina el transporte de petróleo en el mar, así como también su aplicación como herramienta de prevención frente a derrame de hidrocarburo en sectores costeros.
- ❑ Por lo anterior, los modelos evaluados establecen ser buenas herramientas de prevención de derivas de derrames y en la preparación de planes de contingencia de instalaciones fijas (boyas, puerto y terminales marítimos).





UNIVERSIDAD
DE
VALPARAISO
CHILE

María Karina Oyarce Lineros

