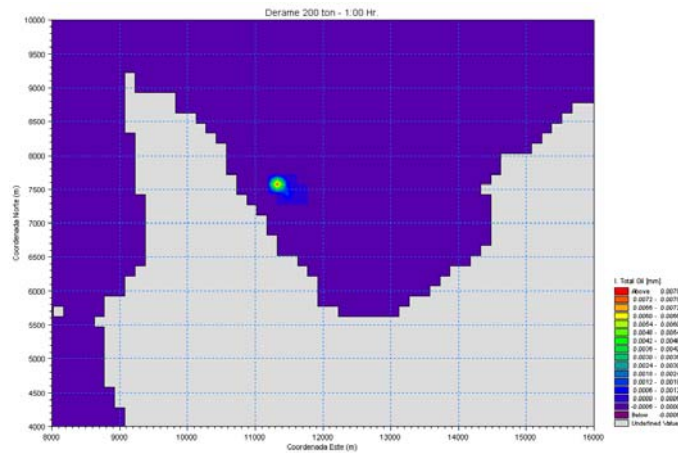


# INFORME TÉCNICO

## **SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS AL MEDIO ACUÁTICO DE LOS ALREDEDORES FUTURO PUERTO CASTILLA – BAHÍA CHASCOS**



Preparado por:  
EcoTecnos Ltda. - División Ambiental



- Junio 2010 -

**SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES  
E HIDROCARBUROS AL MEDIO ACUÁTICO DE LOS ALREDEDORES  
DEL FUTURO PUERTO CASTILLA – BAHÍA CHASCOS**

Solicitado por:  
OMX Operaciones Marítimas Ltda.

**Casa Matriz**  
Av. Kennedy 5735, Torre Poniente  
Oficina 509, 5° Piso  
Las Condes, Santiago  
Fono 56 2 714 2400  
[www.ebx.com.br](http://www.ebx.com.br)


Elaborado por:  
EcoTecnos Ltda.  
Departamento Ambiental  
Quillota 1140, Viña del Mar  
Fono-Fax: 56 32 2481851/2399613  
[www.ecotecnos.cl](http://www.ecotecnos.cl)  
[info@ecotecnos.cl](mailto:info@ecotecnos.cl)

**Profesionales Responsables**  
**EcoTecnos Ltda.**

---


**Prof. Ms. Sergio A. Rosales.**  
Oceanógrafo, experto Modelación Numérica

**Prof. Dr. Humberto Díaz O.**  
Gestión y Ordenamiento Ambiental

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	4
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

## Contenido

<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 MODELAMIENTO DE HIDROCARBUROS CON ADIOS2® .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2 MODELAMIENTO HIDRODINÁMICO CON MIKE 3® .....</b>	<b>12</b>
<b>4. RESULTADOS DE LAS MODELACIONES .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 INTEMPERIZACIÓN DEL DIESEL A1: MODELO ADIOS2® .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1.1 Condición con Vientos Máximos del NW.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1.2 Condición con Vientos Típicos del NW .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 MODELO HIDRODINÁMICO: APLICACIÓN MIKE 3® .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.1 Liberación Accidental de Diesel A1 .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.2 Liberación Accidental de Minerales y Granos .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.3 Áreas Sensibles y Blancos .....</b>	<b>47</b>
<b>5. DISCUSION.....</b>	<b>51</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>53</b>

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	5
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	


## 1. ANTECEDENTES

El Proyecto "Puerto Castilla", de la empresa OMX Operaciones Marítimas Ltda., se localiza en Punta de Cachos, Bahía Chascos, al interior de la Hacienda Castilla, a unos 80 km. al SW de la ciudad de Copiapó, comuna de Copiapó, Provincia de Copiapó, Región de Atacama.

Básicamente el proyecto Puerto Castilla consistirá en la construcción y operación de un puerto multipropósito, privado de uso público, con tres sitios de atraque que permitirían el embarque/desembarque de las cargas de carbón, petróleo diesel, caliza, mineral de hierro, concentrado de cobre, graneles limpios, y carga general unitizada para satisfacer las necesidades de las actividades económicas, especialmente la minería (metálica y no metálica), energía, alimenticia (graneles limpios) y de carga general, tanto a productores nacionales como extranjeros.

El específico, este proyecto contempla obras marítimas y terrestres. Respecto a las obras marítimas, éstas corresponden principalmente a tres sitios de atraque para embarque/desembarque; el **Sitio 1**, destinado al desembarque de carbón y petróleo diesel; el **Sitio 2**, destinado al embarque de graneles como mineral de hierro, caliza y graneles limpios (granos), y el **Sitio 3**, destinado al embarque de concentrado de cobre. (**Figura 1**). A su vez, la carga unitizada podrá ser embarcada/desembarcada en los Sitios 1 y 2.


En el contexto del Estudio de Impacto Ambiental "Puerto Castilla" al cual ha sido sometido el proyecto, se ha efectuado un conjunto de observaciones a éste, a través de los Informes Consolidados Nº 1 y Nº 2 de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y/o Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto (ICSARAs). Precisamente en el ICSARA Nº 2, en la observación 8.1.c) se solicita c) entregar (en el Plan de Contingencias), una modelación de Liberación Accidental de Minerales e Hidrocarburos al medio acuático, relacionado con las actividades efectuadas en el futuro Puerto, es decir,

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	6
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

no se considera un derrame accidental de hidrocarburos producido por un incidente de la embarcación misma. Por lo anterior, se ha efectuado el siguiente estudio para dar respuesta a esta observación.




**Figura 1.** Visualización de los sitios de embarque/desembarque del futuro Puerto Castilla.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	7
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

Para la simulación del comportamiento de posibles derrames o liberación accidental de hidrocarburos y de minerales, se ha considerado la información suministrada por OMX Ltda., el Estudio de Línea Base Marina (INF-PCH/042009, campaña de verano; INF-PCH/102008, campaña de invierno), el cual incluye los antecedentes de corrientes, mareas, vientos, temperatura y salinidad del medio. Con estos antecedentes, como se describirá a continuación, se han utilizado dos nuevos escenarios de simulación ha solicitud de la Autoridad Ambiental: i) uno en que se han considerado vientos constantes del N y NW, con velocidad máxima de acuerdo a los registros obtenidos en las campañas de terreno, al igual que patrones de corrientes que fueren a las sustancias derramadas a dirigirse hacia donde se encuentren localizadas las praderas de macroalgas pardas y pasto marino y; ii) vientos constantes del N y NW, pero con las velocidades que se presentan con mayor frecuencia en las componentes seleccionadas, denominadas velocidades “típicas”, de acuerdo a los registros obtenidos en las campañas de terreno, al igual que patrones de corrientes dirigidas al SE con velocidades “típicas” que fueren a las sustancias derramadas a dirigirse hacia donde se encuentren localizadas las praderas de macroalgas pardas y pasto marino. La diferencia entre ambos escenarios está determinada básicamente por el comportamiento del derrame de hidrocarburos, dada la incidencia que tienen sobre éste los fenómenos de dispersión y evaporación, y la influencia de las velocidades de los vientos y las corrientes y su temperatura sobre los fenómenos descritos.

Con esta información base han sido alimentados los modelos utilizados en este Informe Técnico. Por un lado, para el caso específico de posibles derrames de hidrocarburos, se efectuó un modelamiento del Diesel ciudad (Diesel A1), utilizando el software **ADIOS®2** (Automated Data Inquiry for Oil Spills) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos de Norteamérica, con el fin de determinar *a priori* el posible comportamiento por intemperización de un derrame de diesel en el área de estudio, en las condiciones oceanográficas y meteorológicas utilizadas. Luego, tanto para el caso de los derrames de hidrocarburos como de minerales, se usó un modelo hidrodinámico utilizando **MIKE 3®**, paquete de software profesional de ingeniería utilizado


	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	8
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

para flujos libres superficiales en 3D.

## 2. OBJETIVOS

- Estimar el comportamiento por intemperización de un eventual derrame o liberación de petróleo (Diesel A1) y de mineral (Caliza, Carbón, Cobre, Hierro y granos) que se embarcarán/desembarcarán en el sector donde se emplazará el futuro Puerto Castilla, bajo condiciones de vientos N y corrientes dirigidas al SE, con velocidades máximas y con las velocidades más frecuentes (“típicas”) registradas para estas direcciones en las campañas de terreno.
- Modelar el comportamiento de la liberación accidental de petróleo Diesel A1 y minerales en el área adyacente al Puerto Castilla, bajo las condiciones de invierno y de verano, considerando la hidrodinámica del área en estudio, bajo condiciones de vientos N y NW y corrientes dirigidas hacia el saco de Bahía Chascos, con velocidades máximas y con las velocidades más frecuentes (“típicas”) registradas para estas direcciones en las campañas de terreno.
- Determinar áreas sensibles y blancos posiblemente afectados por los derrames accidentales modelados en las condiciones descritas.



	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	9
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

### 3. METODOLOGÍA


#### 3.1 MODELAMIENTO DE HIDROCARBUROS CON ADIOS2®

El modelo ADIOS2® (NOAA, 1999) <sup>1</sup> se utiliza para evaluar los procesos de envejecimiento o intemperización (*weathering*) de los hidrocarburos en función de las condiciones ambientales, suministradas por los datos obtenidos en terreno a partir de los Estudios de Línea Base (ELB) efectuados en Bahías Chascos.

Básicamente para la utilización del modelo ADIOS2® es necesario contar con información del derrame en sí mismo, esto es, tipo de hidrocarburo derramado, cantidad derramada y continuidad del derrame (de una sola vez o escape progresivo en el tiempo) y condiciones medioambientales. Respecto al tipo de hidrocarburo que se modelará, ADIOS2® posee una base de datos con una biblioteca de tipos de hidrocarburos, a partir de los cuales se debe seleccionar aquel que más se acerca en características físico-químicas a aquel de interés. En el caso a tratar, el hidrocarburo que se descargará en el Puerto Castilla corresponde a Diesel A1, cuyas especificaciones se detallan en el **Anexo 1**. Este tipo de Diesel se asemeja en cuanto a densidad, viscosidad, punto de inflamación, composición y datos de destilación al **Automotive Diesel Fuel** de la base de datos de ADIOS2®, por lo cual fue seleccionado.

En la **Tabla 1** y **Tabla 2** se entregan los datos de entrada para las campañas de verano e invierno, extraídos de los ELB, utilizados en el modelamiento de la intemperización del Diesel A1, bajo condiciones máximas de vientos y corrientes; y bajo condiciones “típicas” de velocidades de corrientes y vientos para estas direcciones. El volumen a modelar fue de **200 toneladas** de Diesel. Para esto se consideró que la tasa teórica de transferencia para este producto en el futuro Puerto se estima en 1.000 toneladas por hora. La capacidad de respuesta para darse cuenta de que se está derramando el producto,

<sup>1</sup> NOAA. 1999. Automated data inquiry for oil spills (ADIOS2®). NOAA Hazardous Materials Response and Assessment Division.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	10
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

debido al sistema automático que se implementará, es de menos de un minuto. No obstante, para modelar en el “peor de los casos”, se consideró un tiempo de respuesta mayor, de 0,2 horas (12 minutos), equivalentes a un derrame de 200 toneladas. La selección del mes del derrame se basó en los meses en los cuales se efectuó el levantamiento en terreno.

**Tabla 1**

Parámetros ambientales utilizados en el modelamiento de la intemperización de un derrame de Diesel A1 en el área de estudio. Condiciones de vientos y corrientes con velocidades máximas.


Parámetros	Verano	Invierno
Volumen derramado (ton)	200	200
Dirección viento constante	NW (315°)	NW (315°)
Velocidad constante del viento (m/s)	11,32	11,32
Dirección corriente constante	SE (135°)	SE (135°)
Velocidad constante de las corrientes (cm/s)	22,0	22,0
Temperatura promedio (° C)	16.7°	14°
Salinidad promedio (psu)	34.2	34.5
Sólidos Suspendidos promedio (mg/l)	21.9	22.0
Mes y Hora del derrame	Febrero, 18:00 hrs.	Agosto, 19:00 hrs.

**Tabla 2**

Parámetros ambientales utilizados en el modelamiento de la intemperización de un derrame de Diesel A1 en el área de estudio. Condiciones de vientos y corrientes con velocidades típicas registradas en terreno.

Parámetros	Verano	Invierno
Volumen derramado (ton)	200	200
Dirección viento constante	NW (315°)	NW (315°)
Velocidad constante del viento (m/s)	2,5	2,5
Dirección corriente constante	SE (135°)	SE (135°)
Velocidad constante de las corrientes (cm/s)	2,5	2,5
Temperatura promedio (° C)	16.7°	14°
Salinidad promedio (psu)	34.2	34.5
Sólidos Suspendidos promedio (mg/l)	21.9	22.0
Mes y Hora del derrame	Febrero, 16:00 hrs.	Agosto, 16:00 hrs.

Respecto a la dirección y velocidad de los vientos predominantes, dado que en el Informe Técnico MODPC/012010 se modeló considerando las direcciones y velocidades

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	11
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

predominantes en las épocas de verano e invierno, en esta oportunidad se seleccionaron dos escenarios: i) **Tabla 1:** teóricamente, el peor de los escenarios posibles de considerar, esto es, que los vientos soplaran de forma constante desde el NW (situación que es muy poco probable que suceda en la zona de estudio) y con la máxima velocidad registrada en el área de estudio (22 nudos, 11,32 m/s). Para las corrientes, también se enfrentó una situación hipotética: corrientes constantes desplazándose en sentido SE, es decir, hacia donde se localizan algas y pasto marino en Bahía Chascos, con una velocidad de 22 cm/s, máximos del área de estudio. Sólo a modo de referencia, las corrientes con dirección SE sólo se presentaron en verano en un 11,78% de las veces, mientras que la velocidad máxima de 22 cm/s se registró con una frecuencia de 1,78% para esta dirección. En el caso del invierno, las corrientes con dirección SE sólo se presentaron en el 15,05% de las veces, mientras que la velocidad máxima de 22 cm/s se registró en esta época del año con una frecuencia de 0,023% para esta dirección. Lo anterior señala que éstas, sin duda, son las peores condiciones de propagación del derrame en superficie considerando la localización de los recursos biológicos y la velocidad de respuesta frente a la emergencia. ii) **Tabla 2:** dado los resultados obtenidos con la primera condición, se contempló un segundo peor escenario posible, con vientos provenientes tanto en invierno como en verano, del NW, pero considerando el rango de velocidades que presentó la mayor frecuencia en esta dirección, la cual resultó ser de 2,5 m/s para el NW, tanto en ambas épocas del año. Para el caso de las corrientes, la mayor frecuencia de velocidades dirigidas al SE para el invierno y verano fue de 2,5 cm/s, las que se presentaron en un 2,64% de los casos en verano y un 7,15% para el invierno. La hora del derrame para este escenario se seleccionó de acuerdo al ciclo diario de los vientos descritos en el ELB.



### 3.2 MODELAMIENTO HIDRODINÁMICO CON MIKE 3®

Para realizar la estimación del comportamiento de los posibles derrames se utilizó software de modelación MIKE creado por DHI Group. Específicamente se utilizaron los módulos hidrodinámico, el módulo de análisis de transporte de partículas y de análisis de derrame de hidrocarburos. Estos módulos utilizan mallas regulares en la horizontal, mientras que en la vertical coordenadas z.


El modelo hidrodinámico **MIKE 3 HD** mediante diferencias finitas, resuelve las ecuaciones de continuidad, momentum, transporte y difusión de temperatura y salinidad. La ecuación de continuidad local es escrita de la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Y las dos ecuaciones horizontales de *momentum* para las componentes x e y respectivamente son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\ = f_v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0 \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz} - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_r \frac{\partial u}{\partial z} + u_s S \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\ = -f_u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0 \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz} - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + F_v \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_r \frac{\partial v}{\partial z} + v_s S \right) \end{aligned}$$

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	13
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

Donde:  $t$  es el tiempo;  $x, y, z$  son las coordenadas cartesianas;  $\eta$  es la elevación de la superficie;  $h$  es la profundidad total;  $d = h - \eta$ ;  $u, v$  y  $w$  son las componentes de la velocidad en las direcciones  $x, y, z$ ;  $f = 2\Omega \sin \phi$  es el parámetro de Corioles ( $\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra, y  $\phi$  es la latitud);  $g$  es la aceleración de gravedad;  $\rho$  es la densidad del agua;  $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx},$  y  $S_{yy}$  son las componentes del tensor de estrés;  $\nu_t$  es la viscosidad turbulenta vertical;  $p_a$  es la presión atmosférica;  $\rho_0$  es la densidad de referencia del agua;  $S$  es la magnitud de la descarga de los emisarios y  $u_s, v_s$  es la velocidad del agua descargada;  $F_u$  y  $F_v$  son los términos de estrés horizontal.

El transporte y difusión de temperatura ( $T$ ) y salinidad ( $s$ ) está dado por las ecuaciones:


$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} - F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S$$

Donde  $D_v$  es el coeficiente vertical de difusión turbulenta,  $\bar{H}$  es el intercambio de calor con la atmósfera,  $T_s$  y  $S_s$  son la temperatura y salinidad de las descargas.  $F_t$  y  $F_s$  son los términos de difusión turbulenta de temperatura y salinidad.

La turbulencia es modelada utilizando un esquema de clausura, y la viscosidad vertical es calculada por la expresión:

$$\nu_t = U_\tau h \left( c_1 \frac{z + d}{h} + c_2 \left( \frac{z + d}{h} \right)^2 \right)$$

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	14
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

Donde  $U_f = \max(U_{Tz}, U_{Bz})$ ;  $U_{Tz}, U_{Bz}$  son las velocidades de fricción asociadas con el estrés de superficie y fondo,  $c_1$  y  $c_2$  son dos constantes que da el perfil parabólico.


La viscosidad turbulenta horizontal en muchas aplicaciones puede ser considerada constante, o se puede usar una viscosidad turbulenta relacionada a la longitud de escala característica (Smagorisky, 1963). La viscosidad turbulenta de escala de subgrilla está dada por la siguiente fórmula:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Donde  $c_s$  es una constante,  $l$  es la longitud característica y  $S_{ij}$  es la tasa de deformación.

Se generó una malla regular en coordenadas UTM (Datum WGS84 Zona 19S) con nodos separados cada 450 m tanto en el eje x o coordenada este y en el eje y o coordenada n. A esta malla se le interpoló la información batimétrica del proyecto (Ecotecnos, 2009), que fue complementada con la información de la base de datos ETOPO1 (<http://comlmaps.org/how-to/layers-and-resources/physical-environment/etopo1-global-relief-model>) (Figura 2).

El modelo hidrodinámico fue inicializado con las condiciones invernales y estivales obtenidas de los estudios de línea base de Bahías Chascos (temperatura, salinidad, viento y corrientes), de forma de analizar el comportamiento de la liberación accidental de derrames de minerales y de hidrocarburos. El derrame de hidrocarburos corresponde a 200 toneladas de Diesel A1 (cuya justificación se detalló en el ítem 3.1), y los de minerales se detallan en la **Tabla 2**:

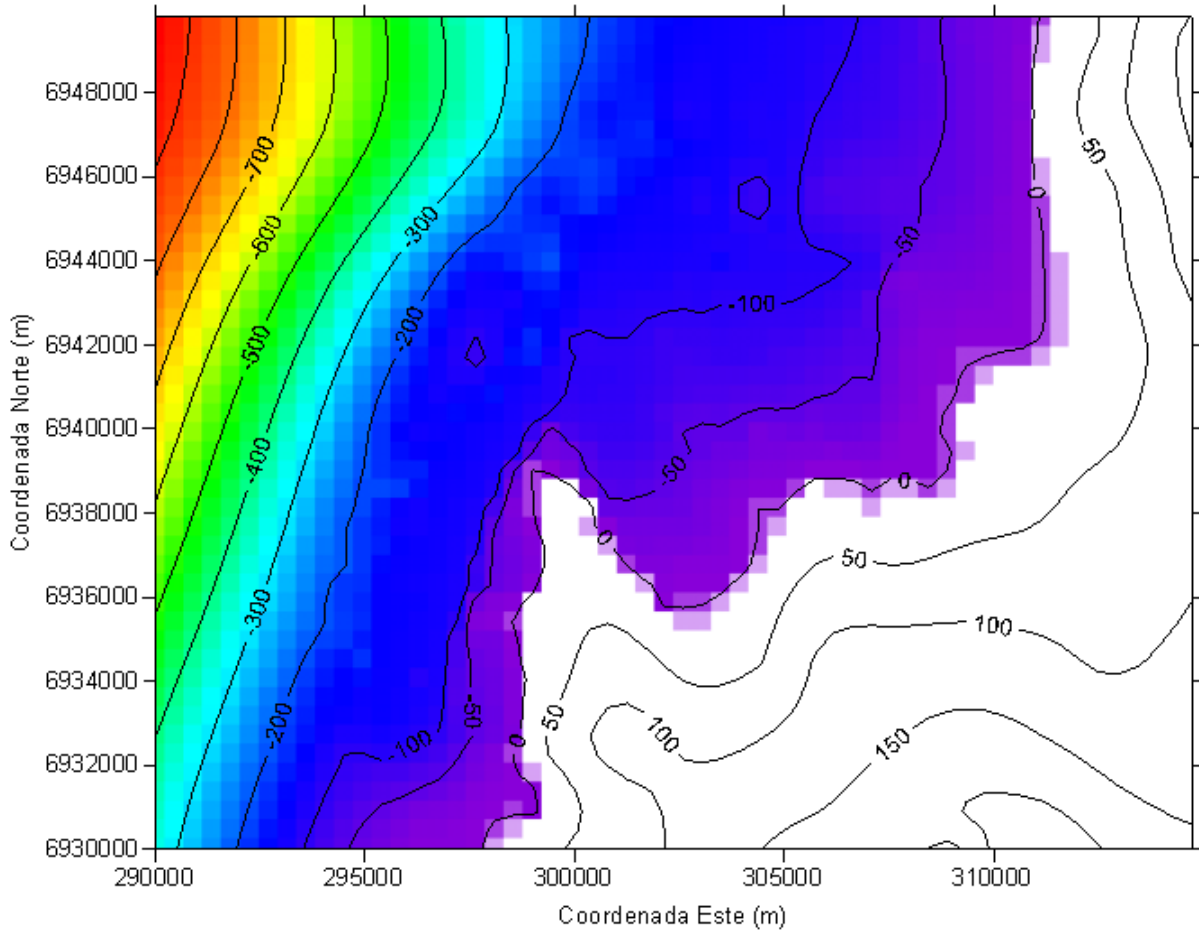
	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	15
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

**Tabla 2**  
Características de los minerales que podrían derramarse en un evento.

	Densidad	Diámetro	Liberación Accidental
<b>Carbón</b>	0.8 - 1.0 ton/m <sup>3</sup>	30 mm	25 m <sup>3</sup>
<b>Cobre</b>	2.3 ton/m <sup>3</sup>	0.1 mm	100 ton
<b>Hierro</b>	2.3 ton/m <sup>3</sup>	0.1 mm	100 ton
<b>Caliza</b>	2.6 ton/m <sup>3</sup>	5 mm	100 ton
<b>Grano grueso</b>	0.6 ton/m <sup>3</sup>	2000 µm	100 ton
<b>Grano mediano</b>	0.6 ton/m <sup>3</sup>	840 µm	100 ton
<b>Grano fino</b>	0.6 ton/m <sup>3</sup>	420 µm	100 ton

Los volúmenes utilizados en los eventuales derrames se justifican considerando que los 25 m<sup>3</sup> de Carbón corresponden al volumen de una “cucharada” completa derramada al mar. En el caso del Hierro, Caliza, Graneles (divididos para efectos del modelamiento en Grano grueso, Grano mediano y Grano fino) y Cobre, se ha considerado que la tasa hipotética (y máxima) de transferencia de estos productos es de un cargador de 6.000 toneladas por hora, por lo que un minuto de liberación accidental de estos productos (velocidad de respuesta mínima), corresponde a 100 toneladas de cada uno de ellos.

En los modelamiento, primero se realizaron las simulaciones hidrodinámicas de cada período, y después se hicieron las respectivas simulaciones de los derrames. Dada las dimensiones de la malla regular, las simulaciones hidrodinámicas se realizaron por un tiempo de 10 días; mientras que las simulaciones de los derrames se realizaron por un periodo de 13 horas.



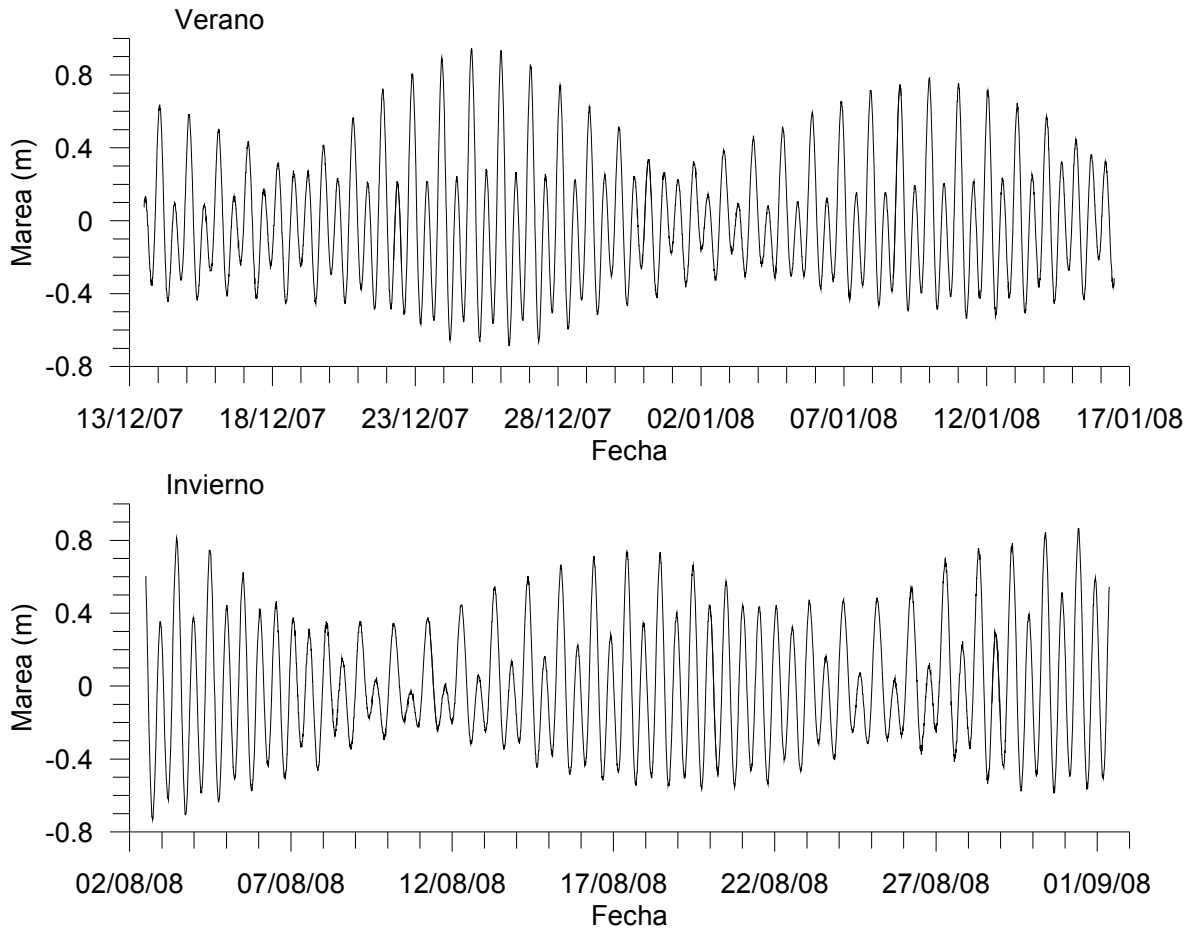
**Figura 2.** Batimetría en la malla regular utilizada en las simulaciones del área de estudio.

El modelo hidrodinámico fue forzado por la marea registrada en el sector en verano e invierno (**Figura 3**), las cuales muestran la típica variación mareal semi-diurna de la costa de Chile. También se utilizó el campo de masa de acuerdo con las mediciones realizadas en terreno en verano e invierno (**Figura 4**). Éstos muestran que en invierno la temperatura es más o menos homogénea en la columna de agua, mientras que en verano la columna está estratificada, con la termoclina principal ubicada a aproximadamente 9 metros de profundidad, profundidad en la cual la temperatura decrece aproximadamente 3° C. La salinidad, tanto en invierno como en verano, se presentó más o menos homogénea, con

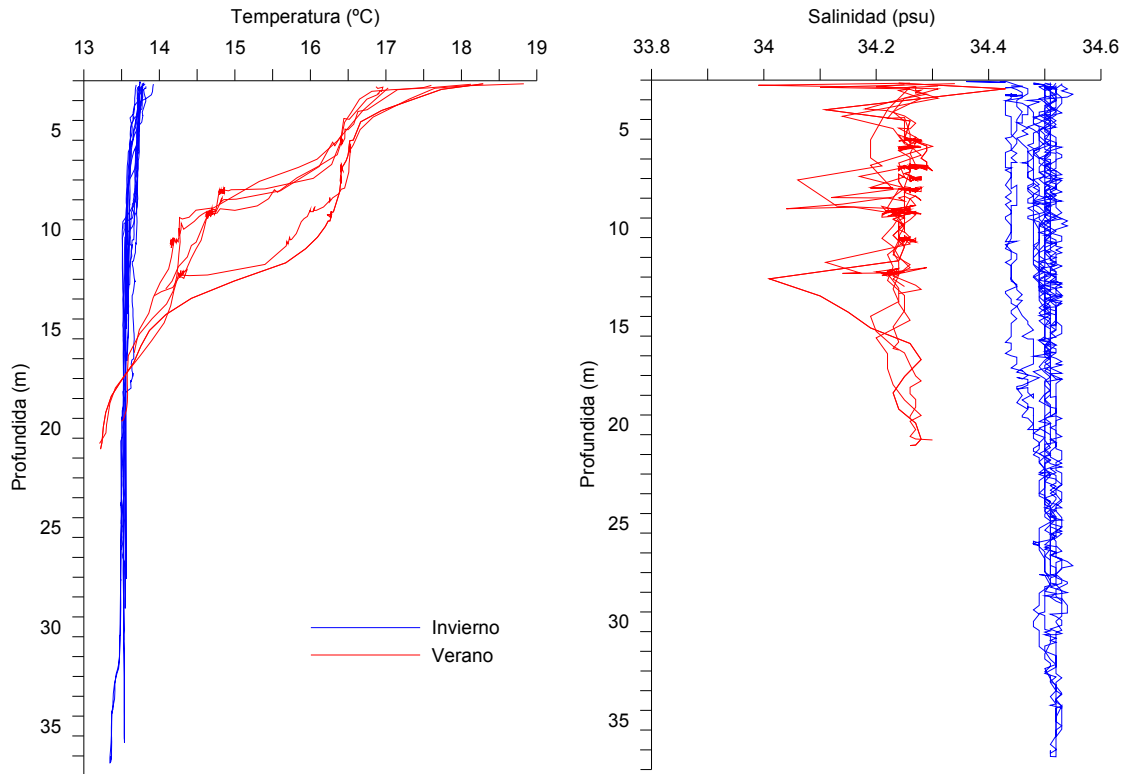




valores levemente más altos en invierno, aproximadamente 0,2 psu más alto, debido al efecto de la surgencia costera.



**Figura 3.** Variación de la marea en el sector de estudio en verano e invierno.

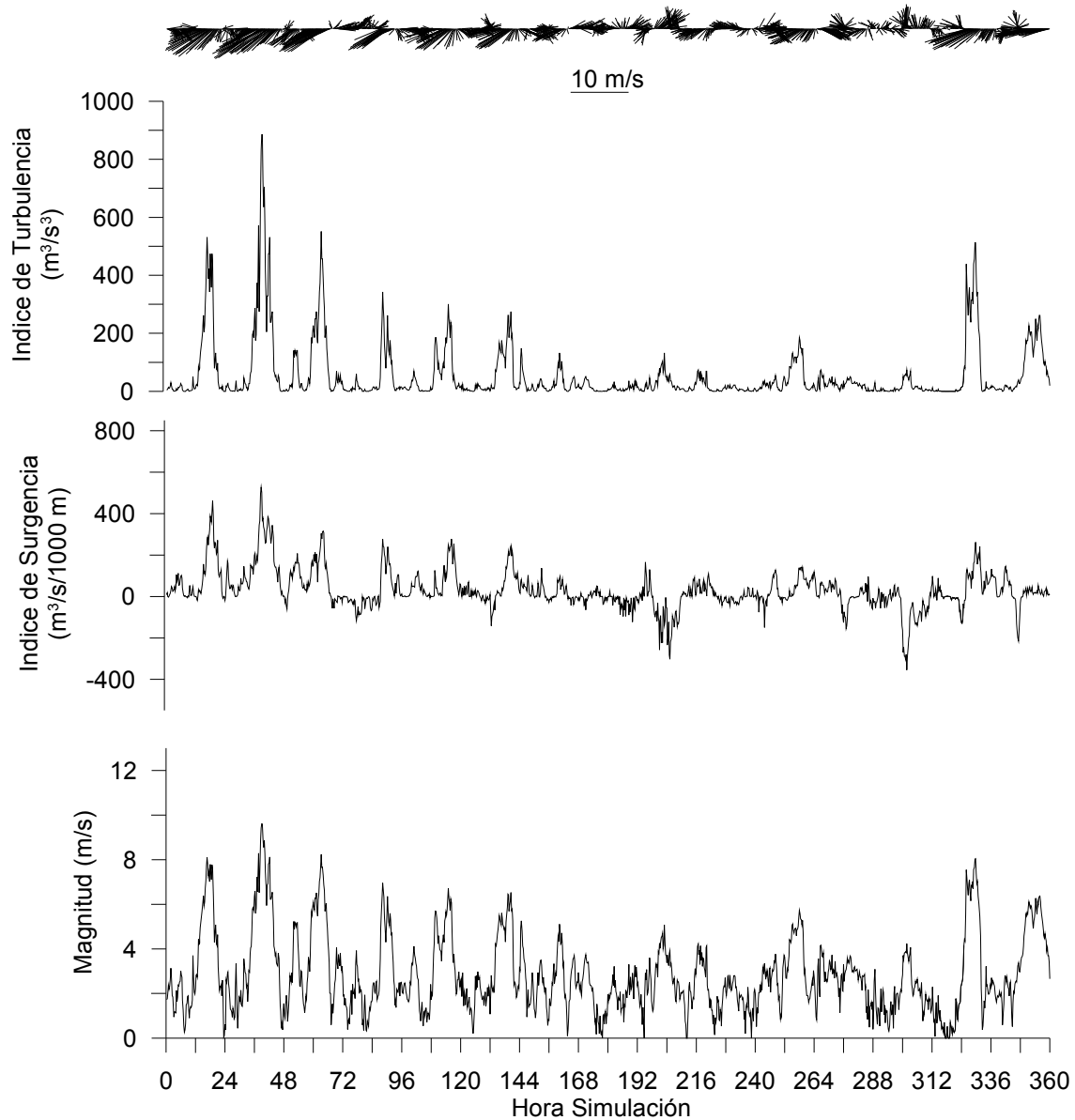


**Figura 4.** Perfiles de temperatura y salinidad del área de estudio en invierno y verano.

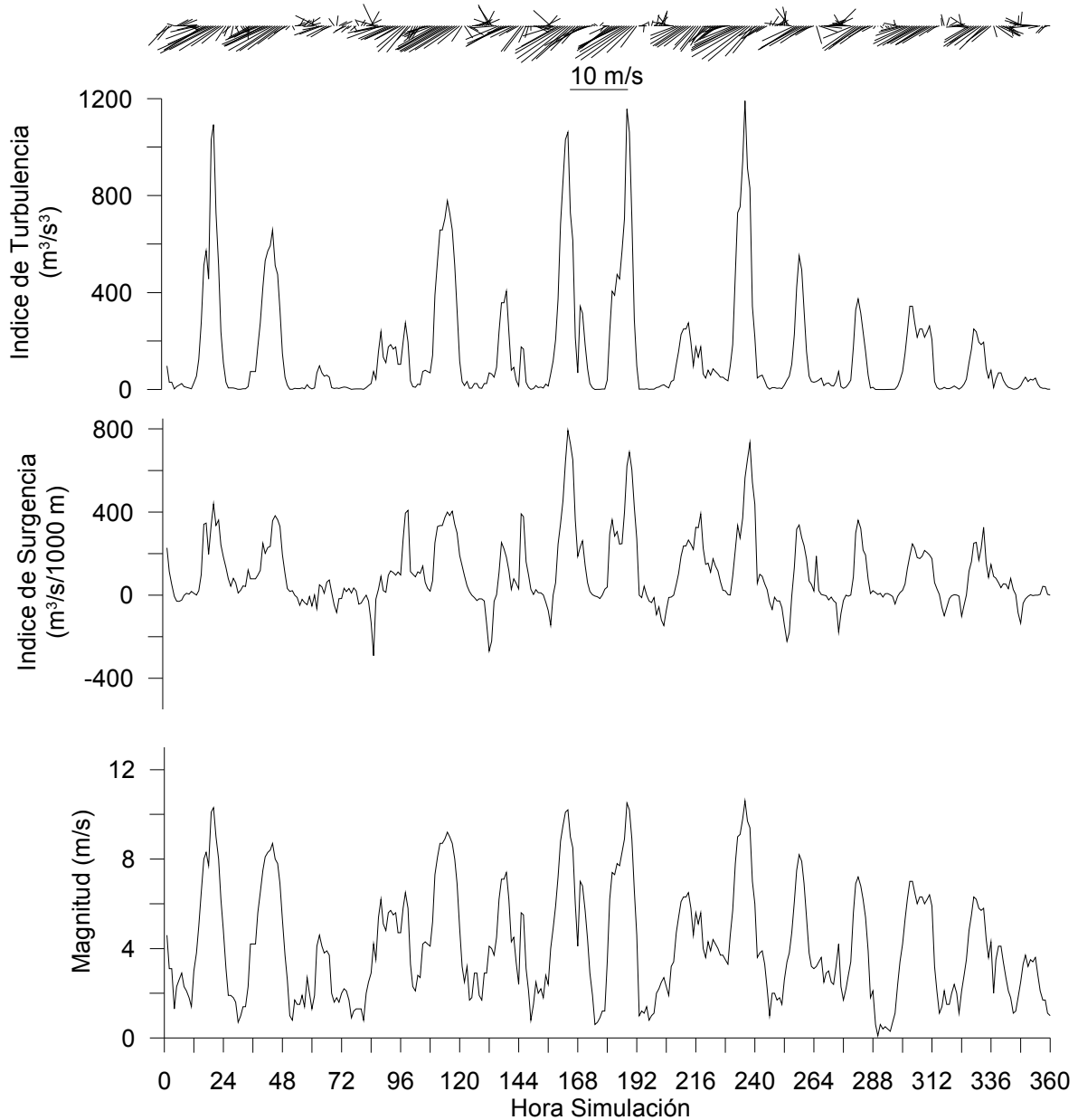
Los registros de viento medidos en la zona de estudio indican que en ésta las direcciones predominantes son las del SW y W, que conforman sobre el 50%, mientras que los vientos del N son observados con una frecuencia de entre 6 y 8%, y los del NW entre un 4 y 6% y no superan los 4 m/s (**Figuras 5 y 6**). En específico, en invierno los vientos fluctuaron entre 0 y 19 nudos (0- 9,8 m/s), con predominio de vientos menores o iguales a 3,6 m/s, siendo su principal variabilidad la diaria, producto de las diferencias de calentamiento entre la tierra y el océano (**Figura 5**). Esto se traduce en que el índice de surgencia fue bajo, cercano a 0, con valores negativos, y con un índice de turbulencia también bajo indicando una condición de relajación y calma durante el período de estudio, con algunos momentos de intensificación de la turbulencia e incremento de la surgencia. El período de mayor surgencia y turbulencia ocurre al inicio de la simulación, período en el cual las forzantes no se usaron en su máxima expresión al corresponder al período de




estabilización de los campos tridimensionales (temperatura, salinidad y densidad).



**Figura 5.** Serie de tiempo de viento utilizada para forzar el modelo en invierno. Panel superior diagrama de vectores, indicando la dirección de procedencia del viento; segundo panel índice de surgencia y panel inferior magnitud del viento (m/s).




**Figura 6.** Serie de tiempo de viento utilizada para forzar el modelo en verano. Panel superior diagrama de vectores, indicando la dirección de procedencia del viento; segundo panel índice de surgencia y panel inferior magnitud del viento (m/s).

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	21
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

En verano el viento fue más intenso y además de mostrar su variación diaria, se presentaron dos eventos de surgencia de dos días de duración (**Figura 6**). Las intensidades del viento no son altas, concentrándose en aquellos que fluctuaron entre 1-4 nudos (0,5-2,0 m/s), reflejándose en índices de surgencia moderados.

Dado que en el Informe Técnico MODPC/012010 se modeló considerando todos los vientos (direcciones y velocidades) y las condiciones de vientos típicos del área de estudio, en esta oportunidad se modeló considerando los peores escenarios posibles de generar para los recursos biológicos de la zona modelada con vientos del N y NW. Considerando que la condición de vientos del N y NW corresponden a una condición típica del paso de un frente de mal tiempo de la zona sur y centro-sur del país, es decir, al sur de la zona de estudio, tal como lo muestran los registros de viento (**Figuras 5 y 6**), se optó por forzar el modelo bajo dos escenarios: i) uno que consideró vientos constantes del N del NW, ambos con una intensidad promedio de 22 nudos (11,3 m/s), la máxima alcanzada en los registros. Este escenario hipotético es imposible de que suceda en la realidad, pero la idea fue modelar en el escenario más desfavorable para las comunidades biológicas, en especial para las de macroalgas y parto marino de Bahía Chascos. i) en el segundo escenario se modeló con vientos del N del NW, pero considerando la velocidad de los vientos que mostraron la mayor frecuencia para esas direcciones (2,5 m/s para ambos períodos del año), lo que se denominó condiciones “típicas” de vientos. A la luz de los resultados que se expondrán, este escenario hipotético permitió determinar la evolución del derrame de hidrocarburos, bajo un escenario muy adverso que transportaría el producto hacia donde se encuentran localizadas las comunidades biológicas de Bahía Chascos (especialmente macroalgas y parto marino), pero bajo regímenes de vientos que disminuyen notablemente la evaporación del derrame y, por tanto, facilitan el transporte de éste a mayores distancias.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	22
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

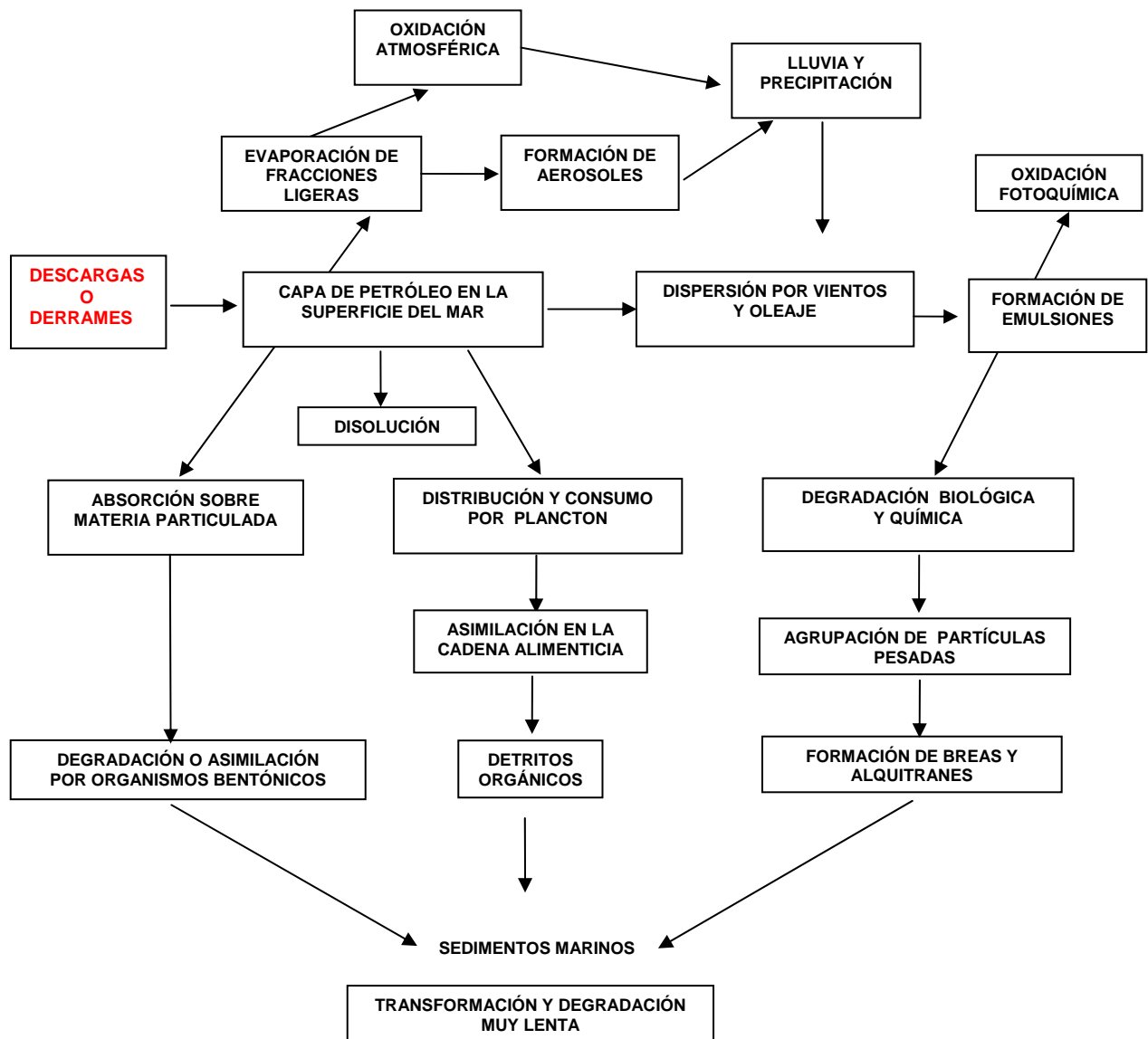
## 4. RESULTADOS DE LAS MODELACIONES

### 4.1 INTEMPERIZACIÓN DEL DIESEL A1: MODELO ADIOS2®


#### 4.1.1 Condición con Vientos Máximos del NW

Es importante indicar, antes de entregar un detalle de los resultados, que en la *intemperización* o envejecimiento de un hidrocarburo derramado al medioambiente, es decir, hidrocarburos sujetos a procesos de degradación natural, éstos son sometidos a una serie de diferentes fenómenos que ayudan a la degradación de los compuestos, como se aprecia en la **Figura 7**. Cada uno de estos procesos ayuda en la degradación de los hidrocarburos, pero tienen diferente incidencia en el mismo dependiendo del tiempo en que el hidrocarburo se encuentra expuesto al medioambiente, el tipo de hidrocarburo y las condiciones climáticas. Por ejemplo, al incrementarse el área del vertido en el mar, aumenta también la tasa de **evaporación**, pero la velocidad y extensión de la evaporación varían considerablemente dependiendo de la composición del hidrocarburo. Los de poca densidad, como la gasolina o el fuel oil ligero, se evaporan con gran rapidez (entre una y dos terceras partes en unas pocas horas), mientras que los hidrocarburos pesados se disipan más lentamente. La evaporación se ve afectada también por la velocidad del viento y la temperatura; cuantas más altas sean ambas más será la evaporación. Otro fenómeno de importancia es la **dispersión**; en este proceso la acción de las olas y la turbulencia debida a las mareas y a las corrientes, hacen que una parte de los hidrocarburos se fragmenten formando pequeñas gotas que pueden ser arrastradas hacia el fondo en la columna de agua. El hidrocarburo remanente puede también ser sometido a fenómenos de **fotoxidación** y de **degradación biológica**, entre otros procesos.

El modelo ADIOS2® considera estos procesos. Además, puede incluirse en el modelo la quema *in situ* del producto remanente o su extracción mediante *skimmer*. Esto no ha sido considerado en el modelamiento actual, con el fin de determinar que sucedería en el peor de los escenarios.




**Figura 7.** Principales procesos involucrados en el destino de los hidrocarburos (del petróleo) en el mar, después de un derrame (Botello, 1978).

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	24
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

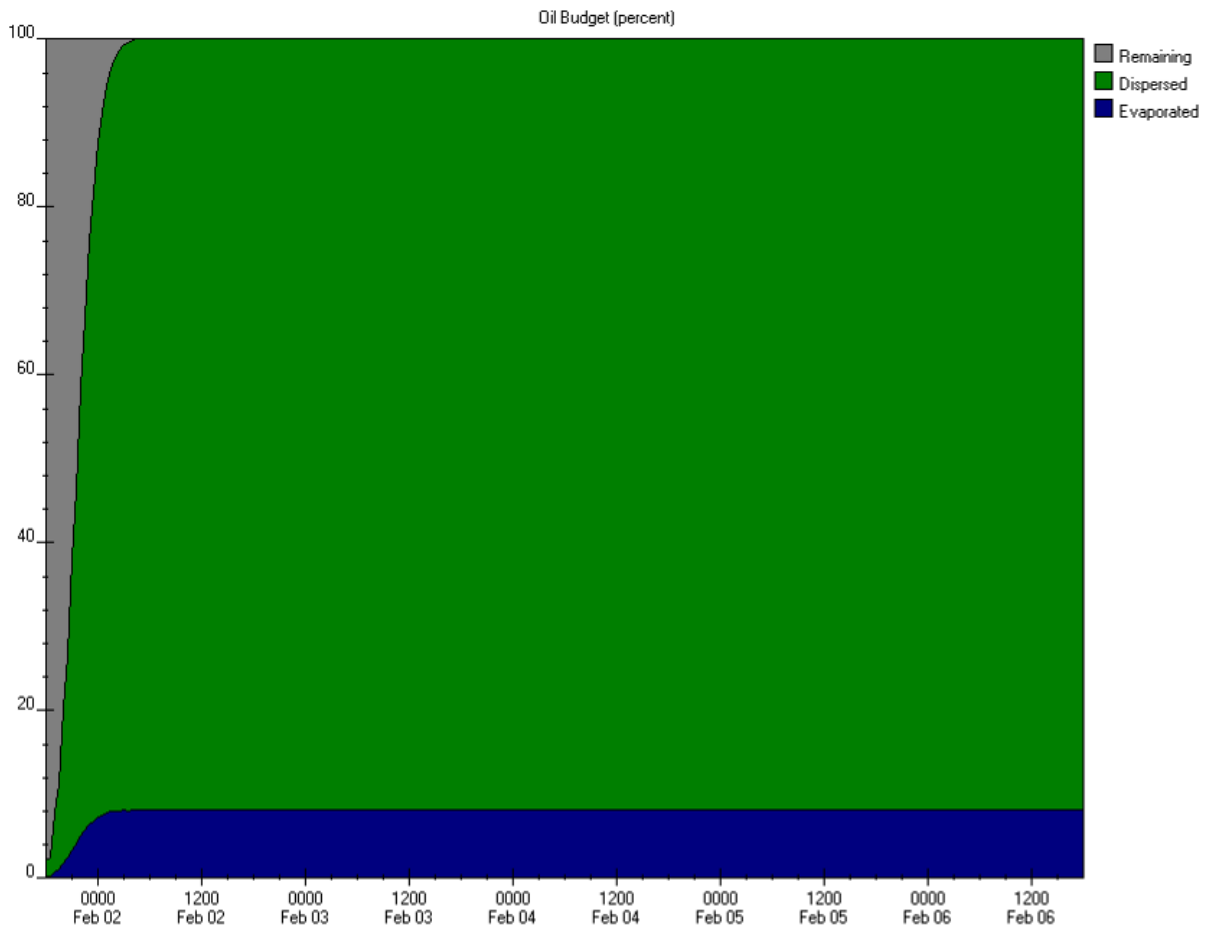
Los resultados para el modelamiento de la intemperización bajo régimen de vientos NW máximos, en la campaña de verano, se detallan en las **Figuras 8 a 11**. En la **Figura 8** se aprecia que ya en las primeras horas de haberse vertido el Diesel, prácticamente no queda hidrocarburo remanente en el mar. Este ha sido eliminado por dos procesos principalmente: por dispersión (**Figura 9**) y por evaporación (**Figura 10**). La dispersión sería el proceso responsable de alrededor del 91,9% de la eliminación del Diesel derramado en situación de verano. Cerca del 8,1%, en tanto, es eliminado del mar por el proceso de evaporación a las 9 horas de haberse vertido el hidrocarburo. Como se aprecia en la **Figura 11**, a las 9 horas de haberse producido el derrame no queda remanente del Diesel A1 derramado en el medio marino.

Una situación similar se aprecia para la intemperización del Diesel A1 derramado en época de invierno. Los resultados para el modelamiento de la intemperización en la campaña de invierno bajo régimen de vientos máximos del NW se detallan en las **Figuras 12 a 15**. En la **Figura 12** se aprecia que a aproximadamente 11 horas de haberse vertido el Diesel A1, alrededor del 100% de éste ha sido intemperizado y eliminado del medio marino. Al igual que en el caso de la situación de verano, para el invierno el Diesel se ha eliminado principalmente por los procesos de dispersión (**Figura 13**) y evaporación (**Figura 14**). La dispersión sería el proceso responsable de cerca del 93,2% de la eliminación del Diesel derramado en situación de invierno con vientos máximos en las primeras 11 horas de vertido el hidrocarburo, mientras que alrededor del 6,8% lo haría a través de la evaporación a las 11 horas de haberse vertido el hidrocarburo. Como se aprecia en la **Figura 15**, alrededor del 100% del Diesel A1 derramado desaparece del medio marino a las 11 horas de simulación. Este resultado es de esperar pues, como se mencionó anteriormente, la evaporación, por ejemplo, se ve afectada por la velocidad del viento y la temperatura (cuantas más altas sean ambas componentes, más será la evaporación): luego, dado que la velocidad del viento se mantuvo constante e igual para invierno y verano, es la variación en la temperatura del agua de mar de 3° C (menor en invierno), la que explicaría las pequeñas variaciones de la tasa de eliminación del hidrocarburo a las 9 horas (verano) y 11 horas (invierno) de transcurrido el derrame.

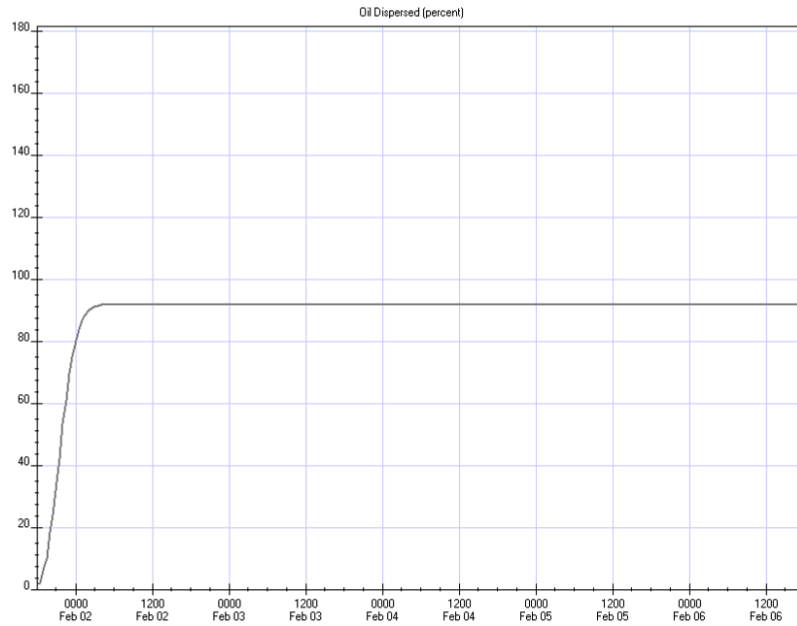


	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	25
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

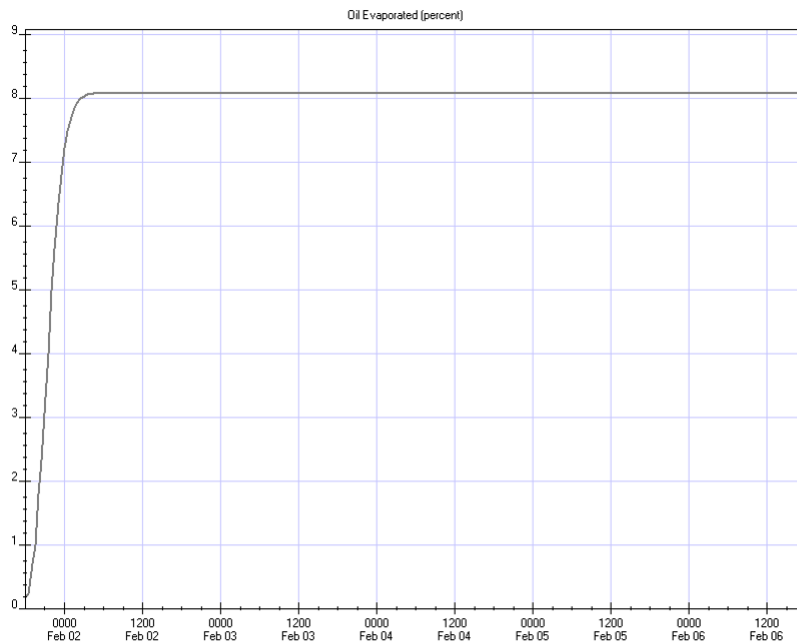
Se hace hincapié nuevamente a lo señalado en el capítulo de 3.1 de metodología, en que el proceso de derrame evaluado no incluye ni la quema del hidrocarburo ni la recuperación previa de ésta, antes de que comience a expandirse la mancha, por lo que seguramente la aplicación del Plan de Contingencia en esta dirección, mejoraría sustancialmente el comportamiento del derrame de Diesel A1 en verano e invierno.



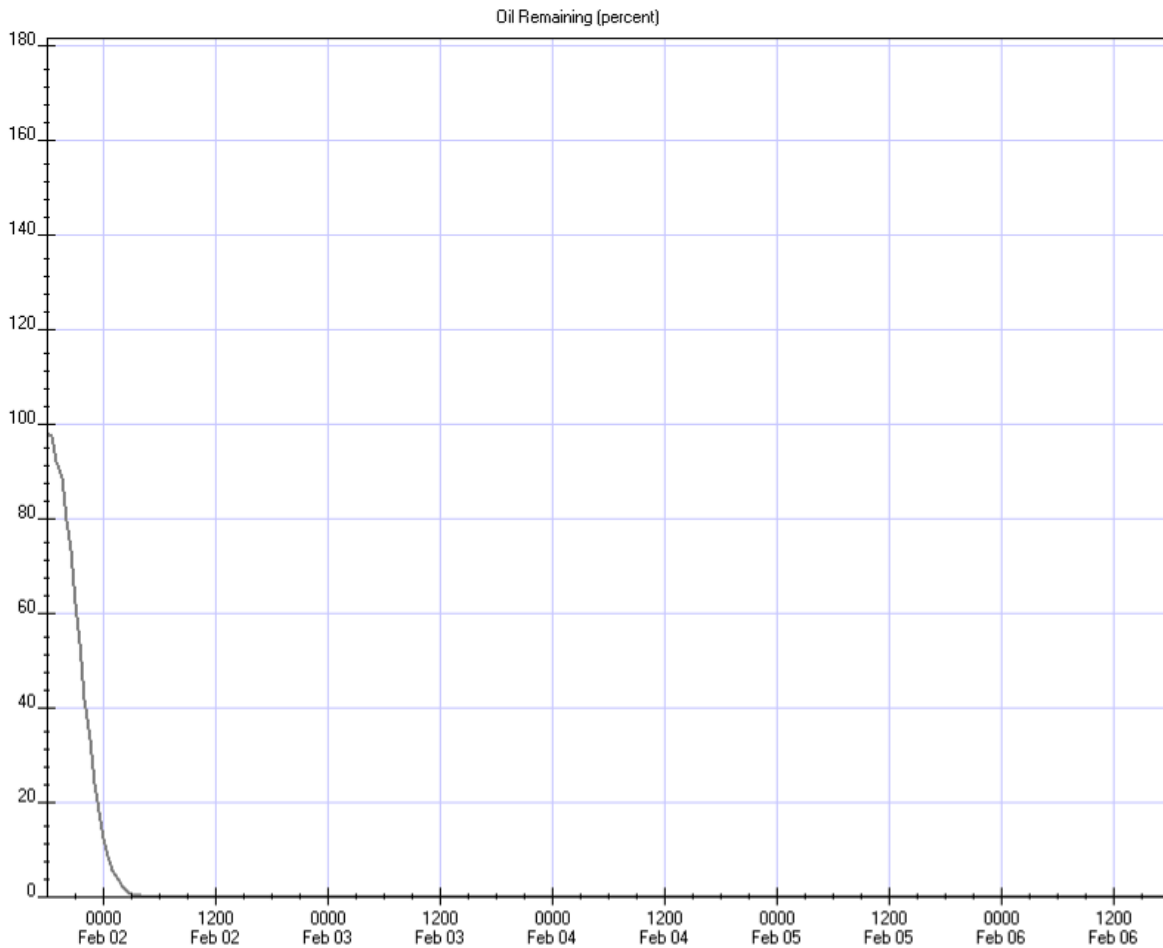
**Figura 8.** Resultados del modelo ADIOS2® para la situación de verano. Se aprecia el porcentaje de Diesel remanente, el evaporado y el disperso. Condición con vientos extremos del NW.




**Figura 9.** Evolución de la dispersión de Diesel en la situación de verano. Condición con vientos extremos del NW.

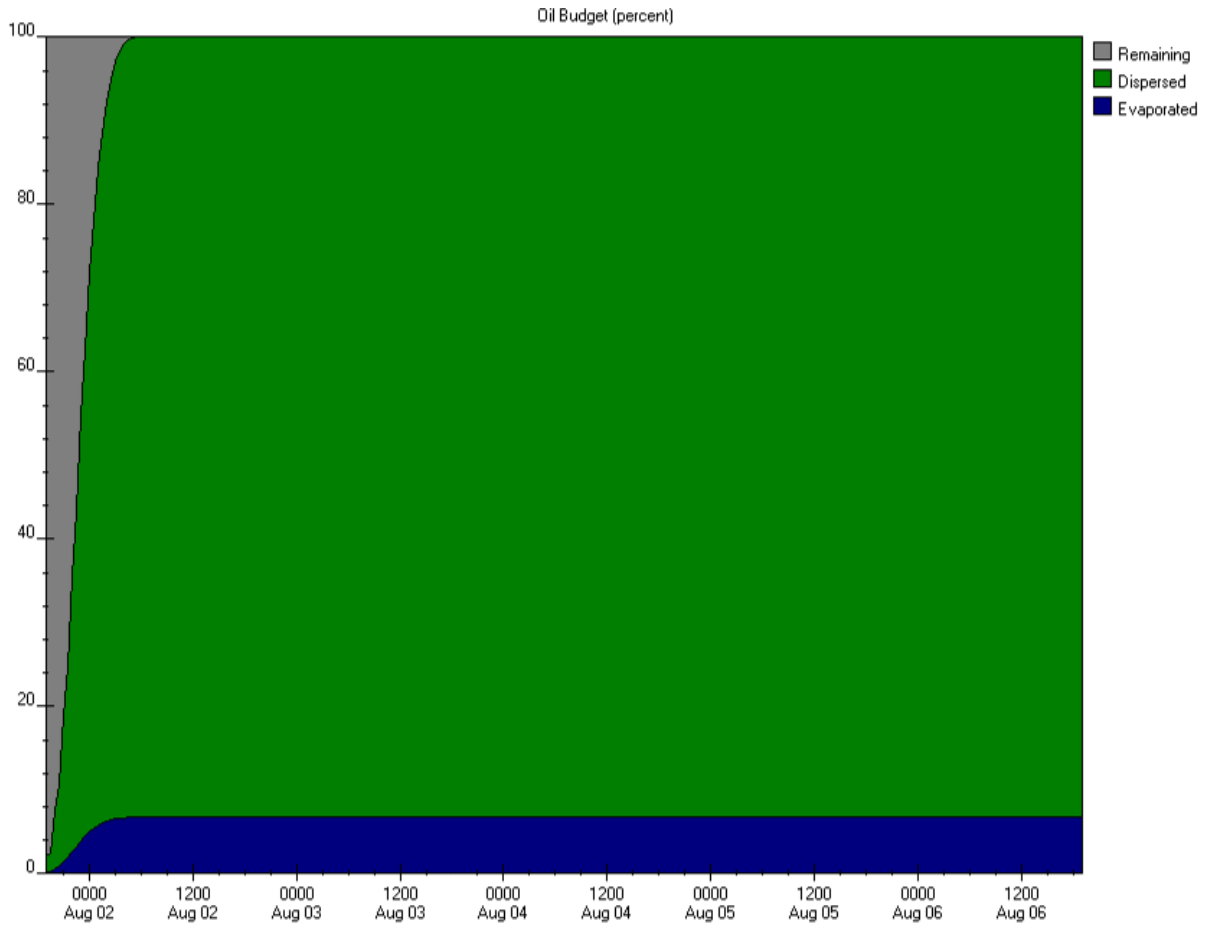


**Figura 10.** Evolución de la evaporación de Diesel en la situación de verano. Condición con vientos extremos del NW.

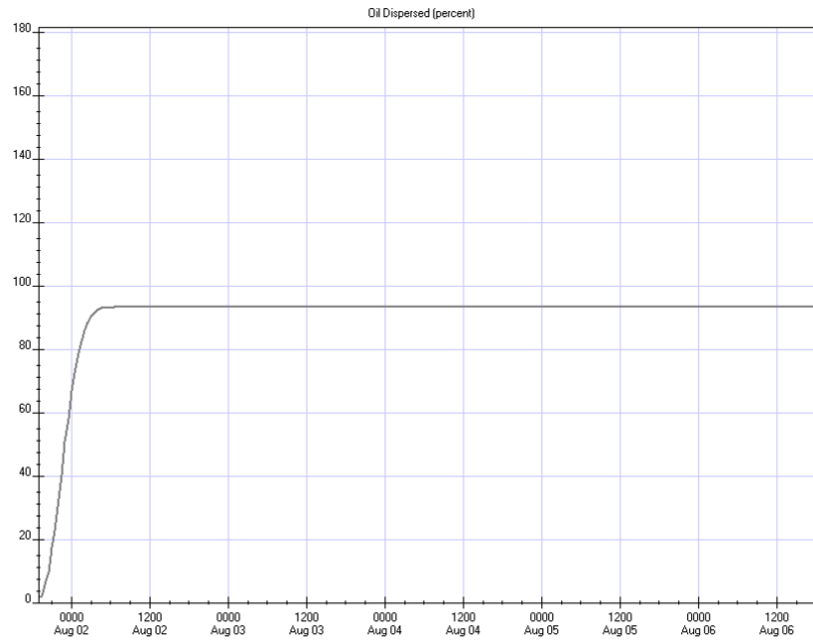


**Figura 11.** Porcentaje de Diesel remanente después de 5 días de vertido el hidrocarburo en la situación de verano. Condición con vientos extremos del NW.

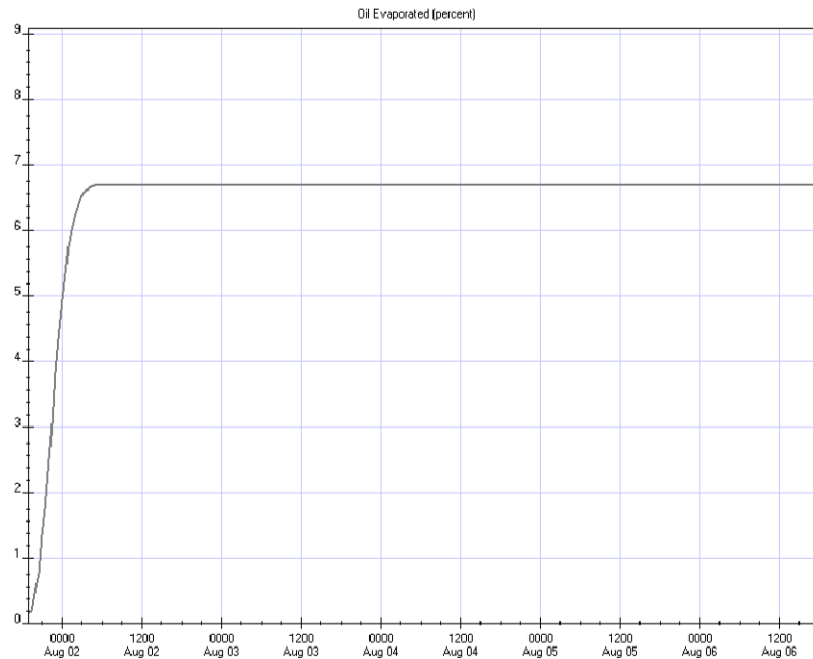
	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	28
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	



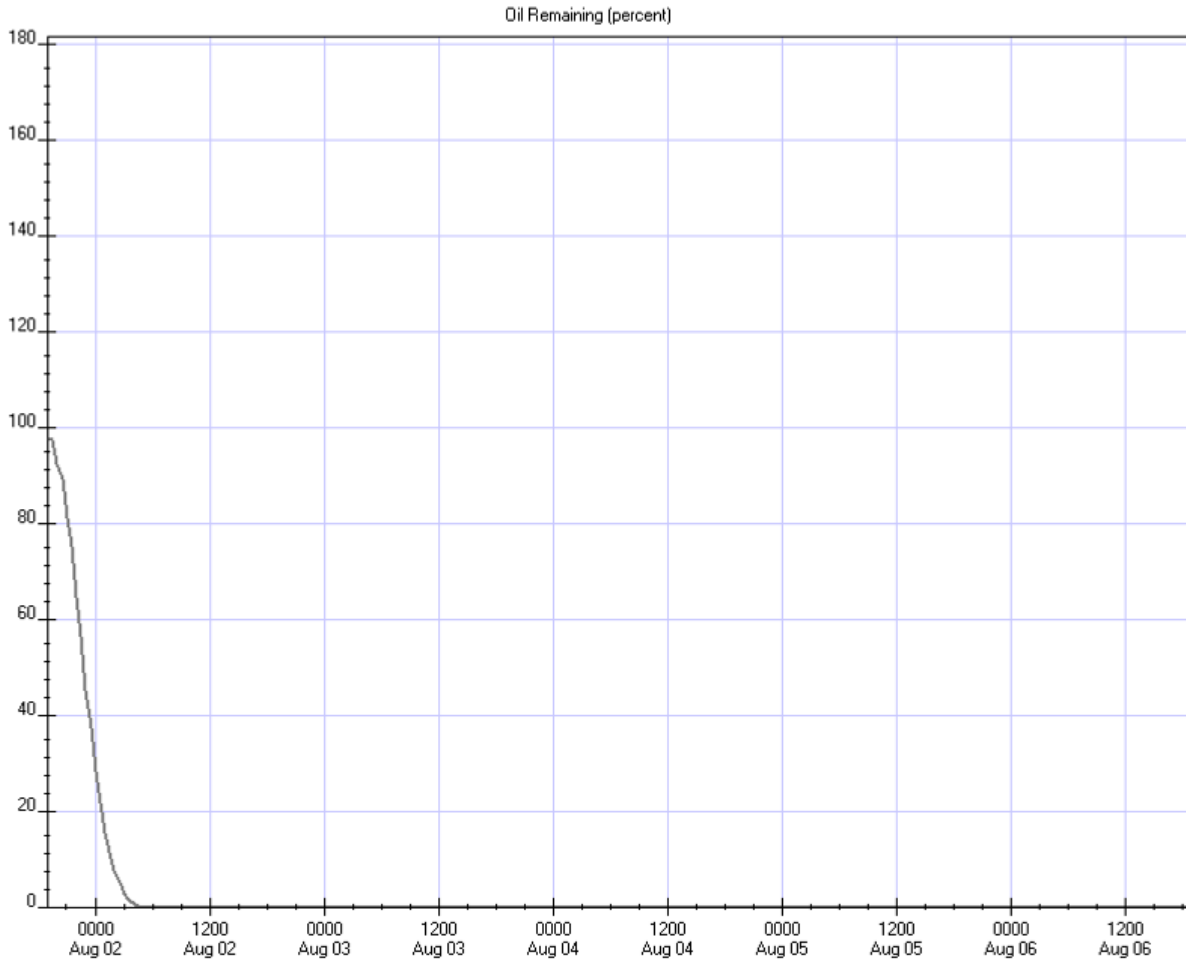
**Figura 12.** Resultados del modelo ADIOS2® para la situación de invierno. Se aprecia el porcentaje de Diesel remanente, el evaporado y el disperso. Condición con vientos extremos del NW.




**Figura 13.** Evolución de la dispersión de Diesel en la situación de invierno. Condición con vientos extremos del NW.



**Figura 14.** Evolución de la evaporación de Diesel en la situación de invierno. Condición con vientos extremos del NW.



**Figura 15.** Porcentaje de Diesel remanente después de 5 días de vertido el hidrocarburo en la situación de invierno. Condición con vientos extremos del NW.


	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	31
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

#### **4.1.2 Condición con Vientos Típicos del NW**

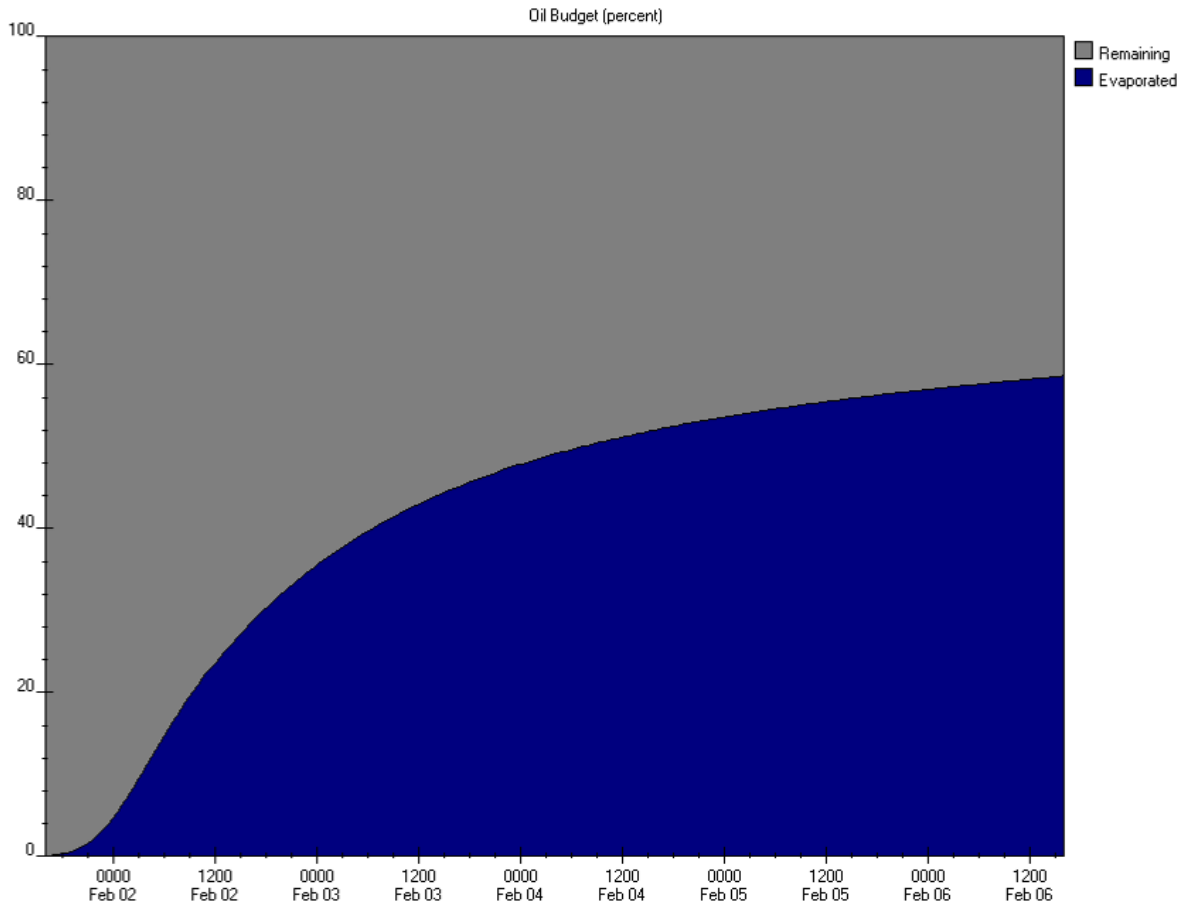
Los resultados para el modelamiento de la intemperización en la campaña de verano, bajo condición de vientos del NW con velocidades típicas de la zona se detallan en las **Figuras 16 a 18**. En la **Figura 16** se aprecia que bajo estas condiciones el derrame prácticamente es intemperizado a través del proceso de evaporación, sin intervenir el de dispersión. Con utilizadas en el modelo, al final de los 5 días de simulación, una parte importante del hidrocarburo derramado queda como remanente. Como se aprecia en la **Figura 17**, a los 5 días de haberse producido el derrame, un 58% se ha evaporado. En tanto, a los 5 días quedaría un remanente del 42%, equivalente a 84 toneladas, lo cual, considerando la densidad del hidrocarburo, puede estimarse en 98,71 m<sup>3</sup> (98.707 litros) (**Figura 18**).

Una situación similar se aprecia para la intemperización del Diesel A1 derramado en época de invierno, con velocidades de viento y corrientes típicos invernales (**Figuras 19 a 21**). En la **Figura 19** se aprecia que a los 5 días de haberse producido el derrame, más del 40% de éste queda remanente en el mar. Al igual que en el caso de la situación de verano, para el invierno el Diesel se ha eliminado principalmente por el proceso de evaporación (**Figura 20**), el cual alcanza alrededor del 56%. Como se aprecia en la **Figura 21**, alrededor del 44% del Diesel A1 derramado queda en el medio marino a los 5 días de simulación, lo que equivaldría a cerca de 103,4 m<sup>3</sup> (103.408 litros), lo cual sería recuperable a través de skimmer u otros implementos utilizados en las faenas de recuperación de hidrocarburos, y que se encuentran incluidas en el Plan de Contingencia del Puerto Castilla. Como se ha indicado anteriormente, la diferencia de un 2% de eliminación del Diesel A1 por evaporación, entre verano e invierno, se explicaría básicamente por la mayor temperatura del agua de mar en verano (~3° C).

Se hace hincapié en que el proceso de derrame evaluado no incluye en esta condición simulada ni la quema del hidrocarburo ni la recuperación previa de ésta, antes de que comience a expandirse la mancha, por lo que seguramente la aplicación del Plan de Contingencia en esta dirección, mejoraría sustancialmente el comportamiento del derrame de Diesel A1 en verano e invierno, sin dejar finalmente remanentes en la condición

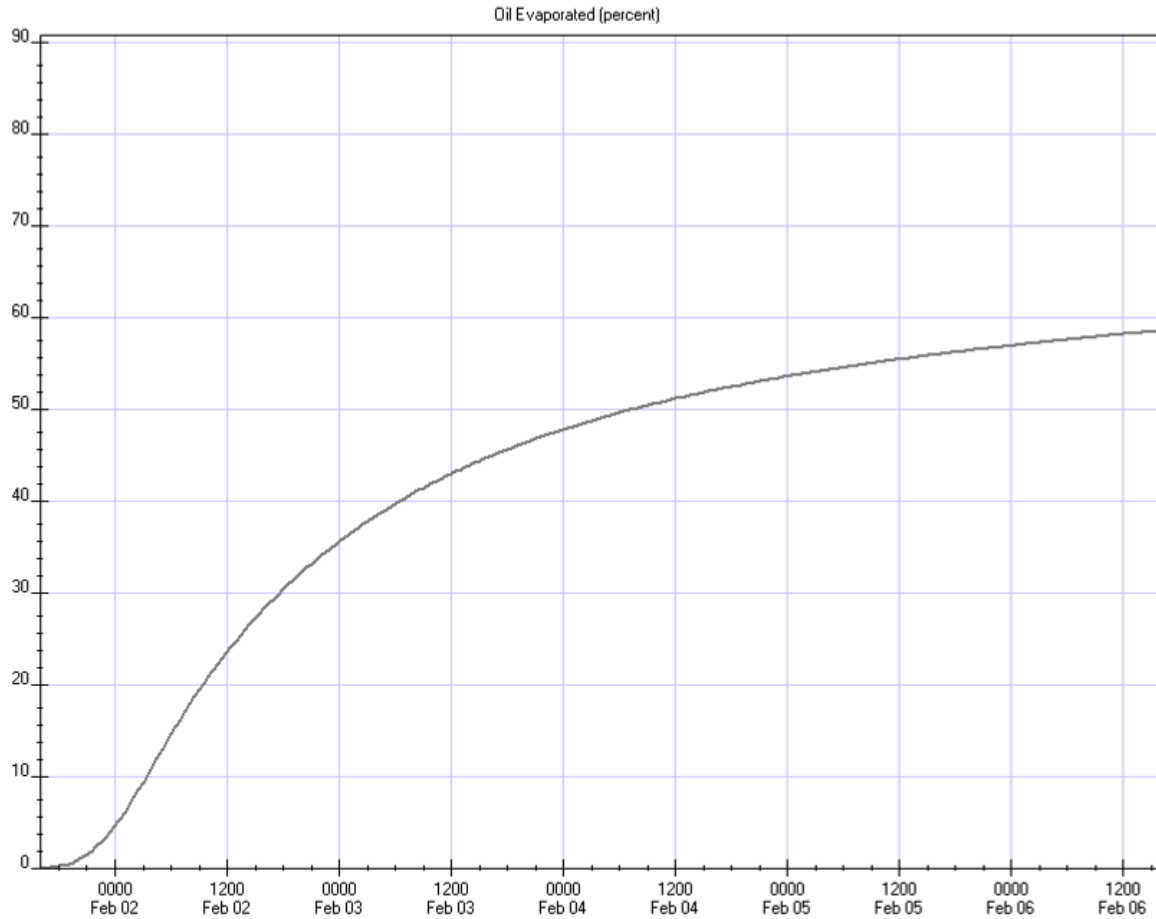
	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	32
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

simulada al día de haberse producido el derrame.

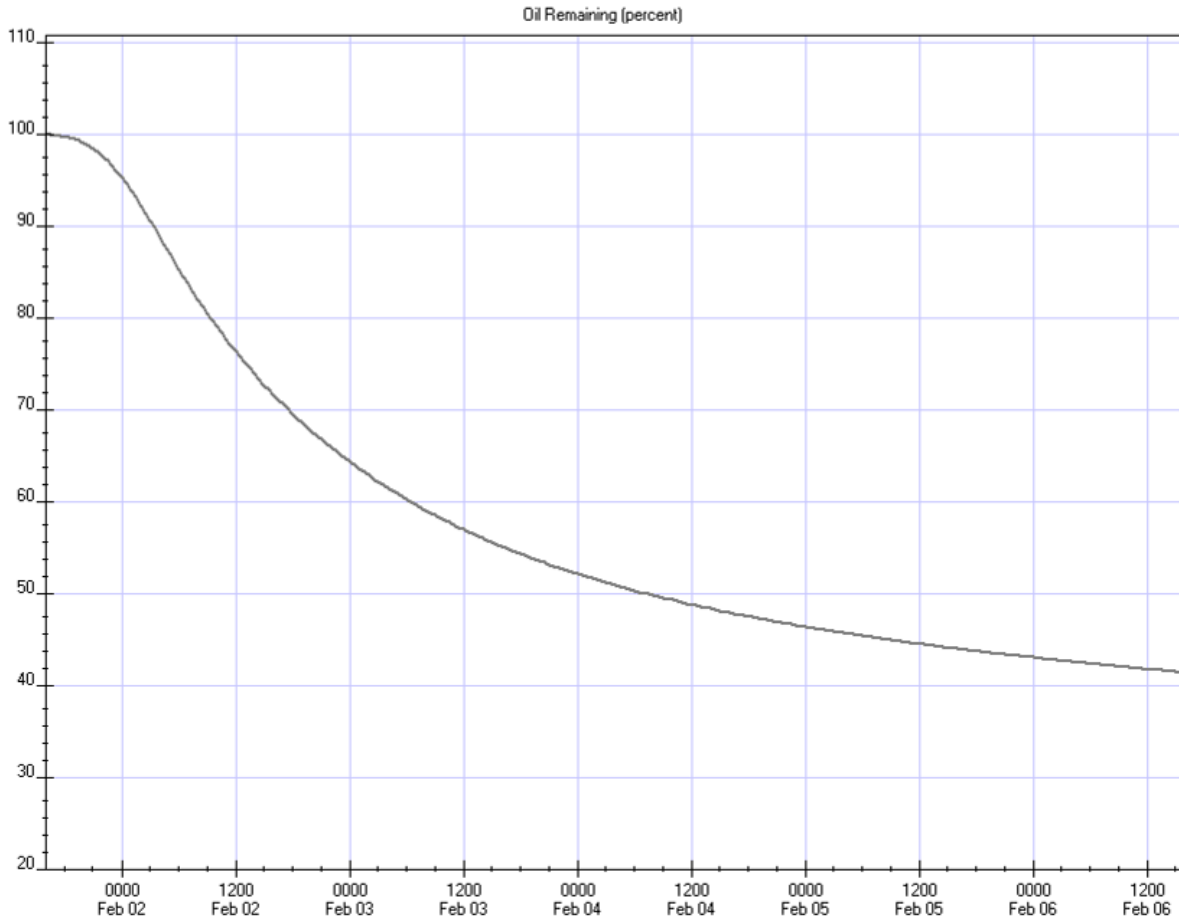


**Figura 16.** Resultados del modelo ADIOS2® para la situación de verano. Se aprecia el porcentaje de Diesel remanente, el evaporado y el disperso. Condición con vientos típicos del NW.




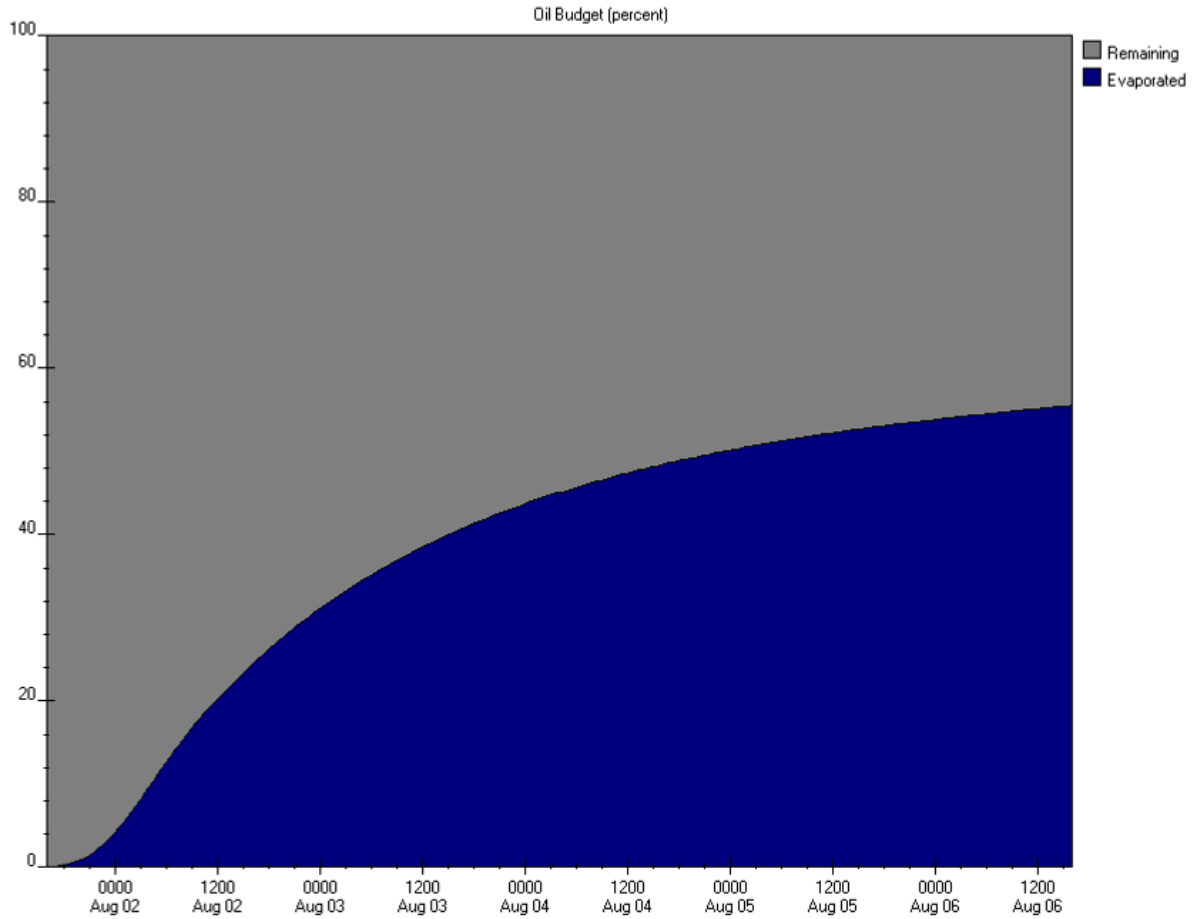


**Figura 17.** Evolución de la evaporación de Diesel en la situación de verano. Condición con vientos típicos del NW.

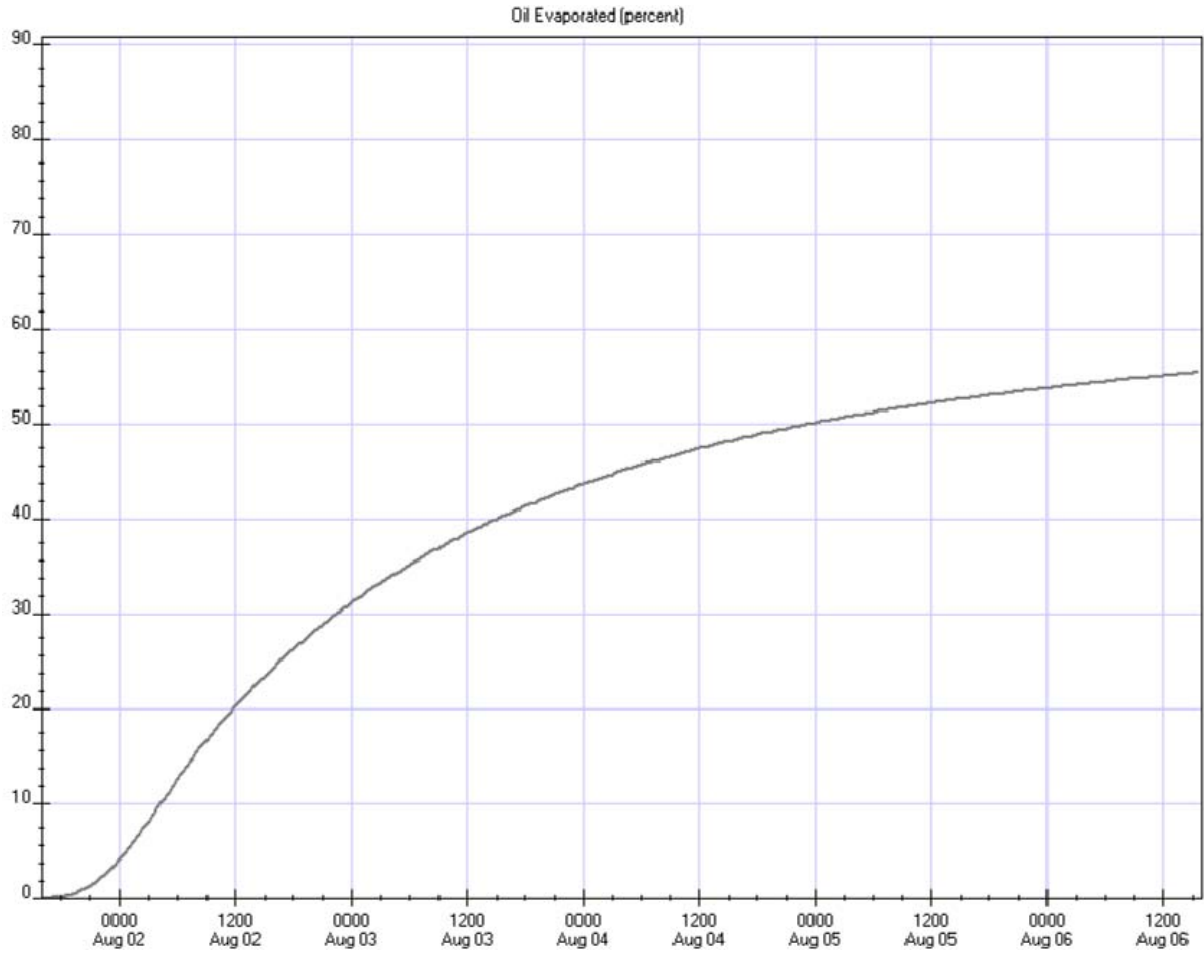


**Figura 18.** Porcentaje de Diesel remanente después de 5 días de vertido el hidrocarburo en la situación de verano. Condición con vientos típicos del NW.

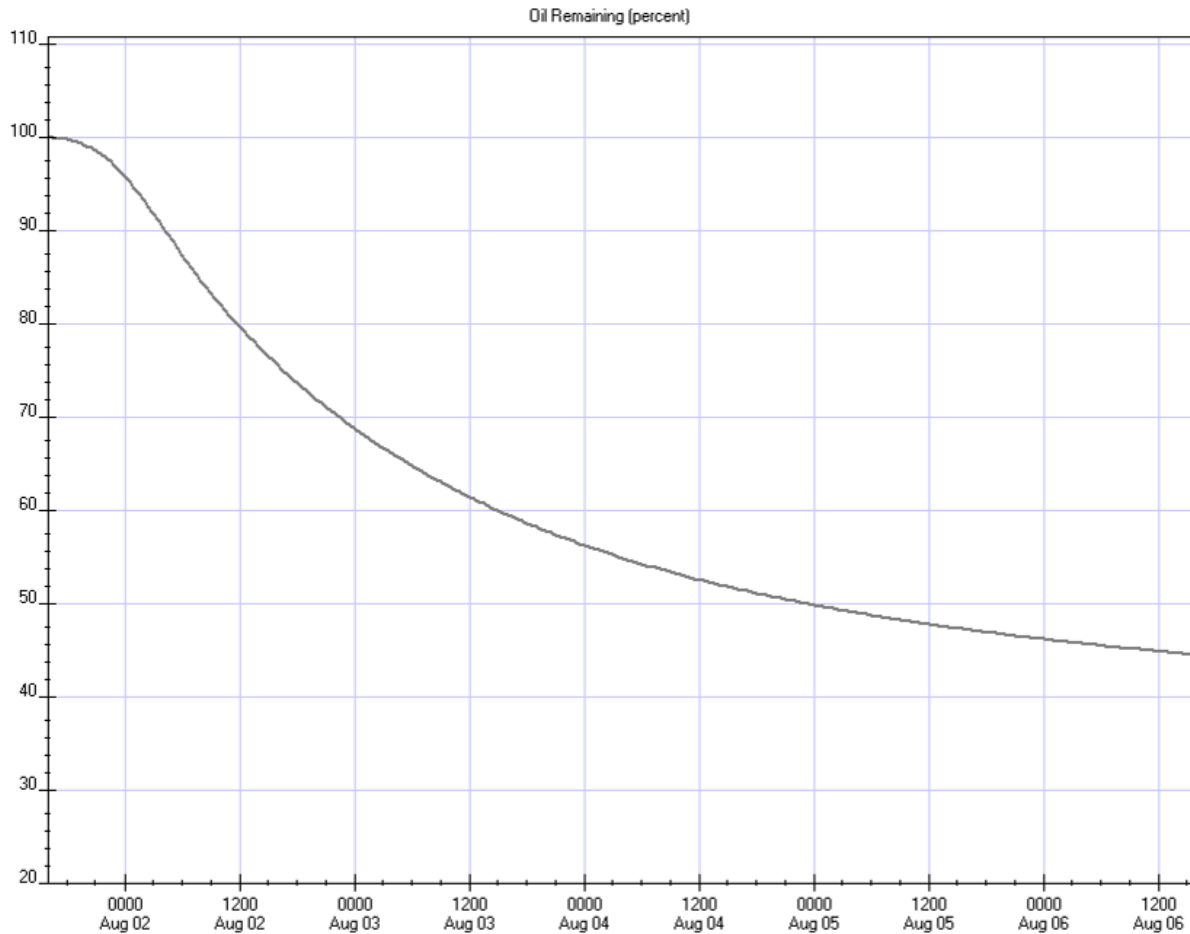
	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	35
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	




**Figura 19.** Resultados del modelo ADIOS2® para la situación de invierno. Se aprecia el porcentaje de Diesel remanente, el evaporado y el disperso. Condición con vientos típicos del NW.



**Figura 20.** Evolución de la evaporación de Diesel en la situación de invierno. Condición con vientos típicos del NW.



**Figura 21.** Porcentaje de Diesel remanente después de 5 días de vertido el hidrocarburo en la situación de invierno. Condición con vientos típicos del NW.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	38
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

## 4.2 MODELO HIDRODINÁMICO: APLICACIÓN MIKE 3®


### 4.2.1 Liberación Accidental de Diesel A1

#### 4.2.1.1 Vientos Constantes del N y NW

Debe señalarse, antes de entregar los resultados obtenidos, que dado que tanto en verano como en invierno el viento utilizado en las simulaciones es el mismo para ambos períodos, y esta variable es la que tiene la mayor incidencia en el comportamiento del derrame de combustible, los resultados no mostraron diferencias entre ambas épocas del año, por lo que son válidos para ambos casos.

En primer lugar, con las condiciones hidrodinámicas generadas con un **viento constante del N de 22 nudos (11,32 m/s)**, el derrame de 200 toneladas de Diesel A1 se mantiene la mayor parte del tiempo en la zona del derrame, con un desplazamiento paralelo a la costa hacia el sur. A una hora de producido el derrame, la concentración de la mancha se ha reducido notablemente como se puede ver en la **Figura 22**; mientras que a los 90 minutos de acaecido el derrame, ya no se encontraría Diesel A1 en el agua marina. Nótese que a los 60 minutos del derrame, la concentración del hidrocarburo se hallaría entre los 0,0001 y 0,0003 mg, lo que de acuerdo a lo indicado en la **Tabla 3**, podría apreciarse en el mar como brillos del tipo iridiscente.

Sin embargo, para manchas de petróleo, el color marrón o naranja indica probablemente la presencia de una emulsión de agua en petróleo, lo cual no existiría en el caso simulado. En términos de respuesta frente a un derrame, el brillo puede ser descartado ya que representa una cantidad insignificante de petróleo, no puede ser recuperado o tratado de otra manera por las técnicas de respuesta existentes, y probablemente se disipe rápida y naturalmente, como lo indica los resultados del modelo ADIOS2®, sección 4.1.1.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	39
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

**Tabla 3**

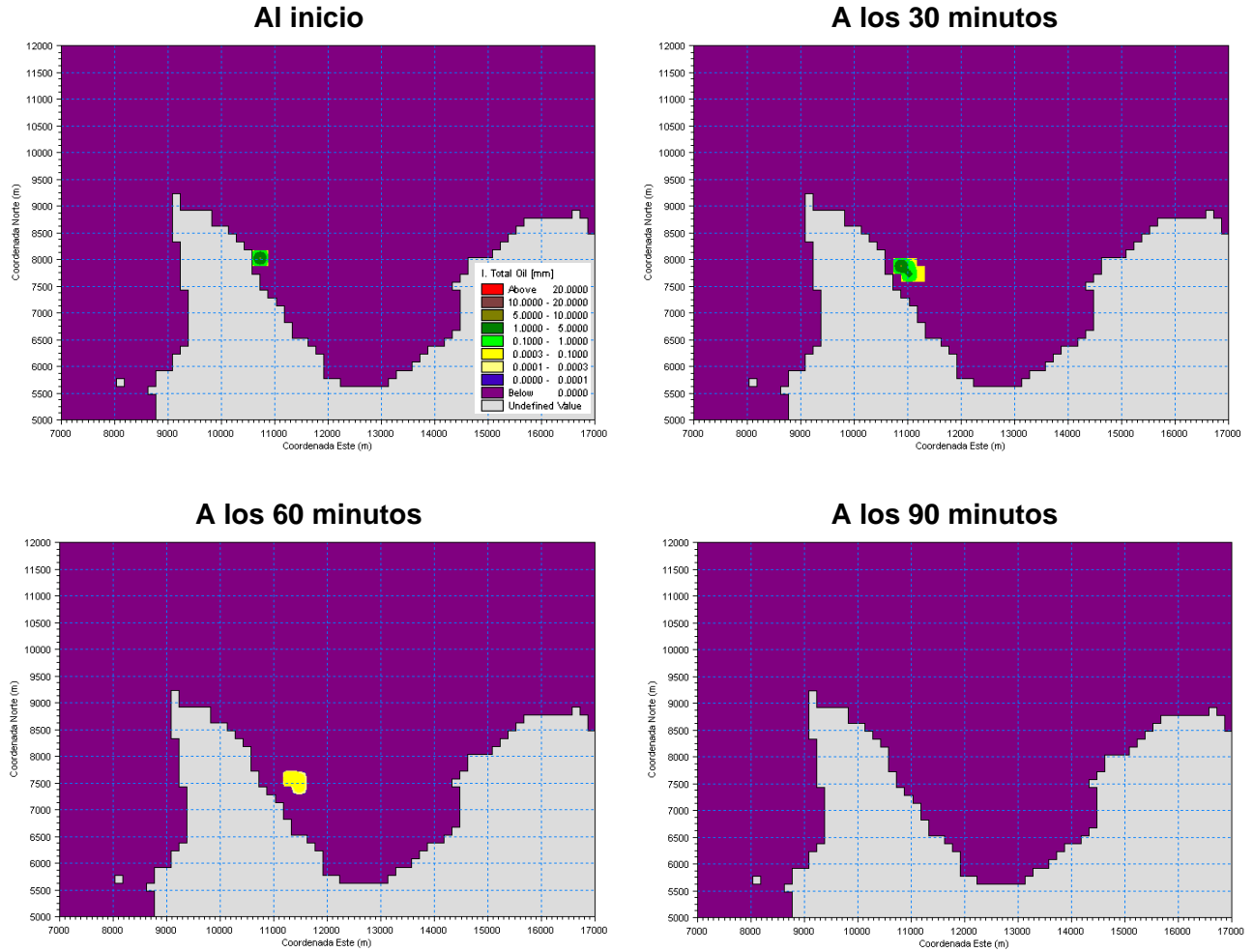
Relación entre el espesor del hidrocarburos en el mar (en mm) y su apariencia.

<i>Tipo de Hidrocarburo</i>	<i>Apariencia</i>	<i>Espesor Aproximado (mm)</i>
Brillos	Plateado	$0,0001 < X < 0,0003$
Brillos	Iridiscente	$0,0003 < X < 0,01$
Crudo y Combustible	Negro / Marrón Oscuro	$0,01 < X < 1,0$
Emulsión de Agua en Hidrocarburos (“mousse”)	Marrón / Anaranjado	$X > 1,0$

X: Espesor de la mancha en mm.


(Fuente: modificado de [http://www.cethus.org/mar\\_limpio/pop\\_vigilancia.html](http://www.cethus.org/mar_limpio/pop_vigilancia.html)).

El escaso volumen de Diesel A1 que se aprecia en el mar ya a una hora de haberse producido el derrame indica también que gran parte de éste queda depositado en la orilla de la playa, dado el viento utilizado en la simulación (y requerido por la Autoridad Ambiental para su simulación), por lo que una fracción pequeña es la que queda “disponible” en el mar, y que sólo logra desplazarse no más de 750 metros al sur del punto del derrame, por el borde costero.



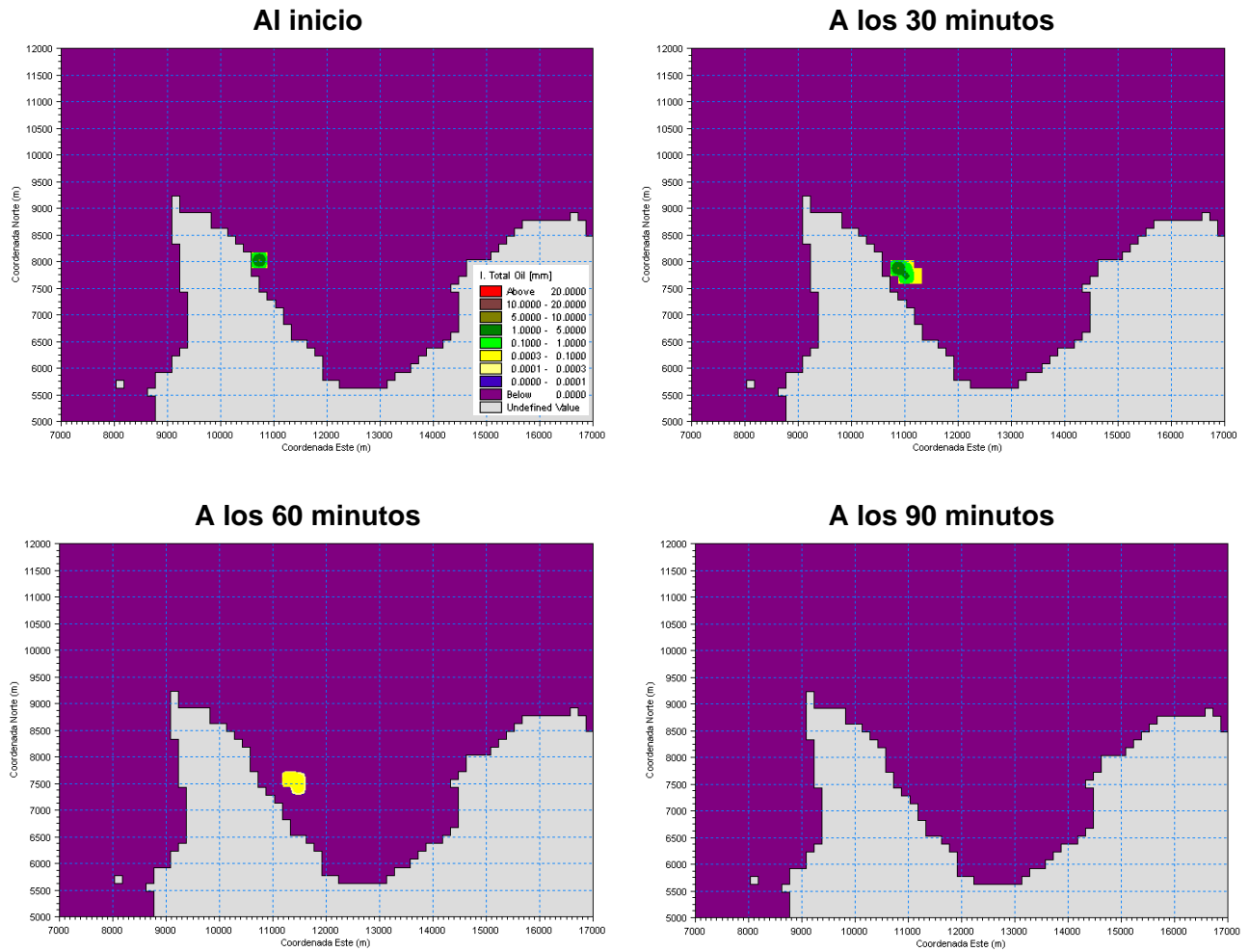
**Figura 22.** Desplazamiento de un derrame de 200 toneladas de Diesel A1 bajo condiciones de viento N constantes de 22 nudos.




	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	41
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

En tanto, las condiciones hidrodinámicas generadas con un **viento constante del NW de 22 nudos (11,32 m/s)**, indican que la mancha de diesel se aleja parcialmente de la costa hacia el centro de la bahía (**Figura 23**). Sin embargo, al igual que lo simulado con viento del N, la macha se diluye rápidamente, pudiendo desplazarse en una hora algo más de 650 metros al sur del punto del derrame y posicionándose a unos 600 metros de la costa. Asimismo, las concentraciones que se tienen del hidrocarburo a una hora de producido el derrame presenta un máximo de 0,0003 mm. A los 90 minutos del derrame el modelo indica ausencia de hidrocarburos perceptibles.

Los resultados obtenidos se comparan absolutamente con lo indicado por el modelo ADIOS2®. Éste último indica, sin embargo, una permanencia mayor del hidrocarburo (por alrededor de 9 a 11 horas en las condiciones simuladas); sin embargo, éste sólo explica la intemperización del Diesel A1, y no incluye los forzantes utilizados en el modelo hidrodinámico, así como las características topográficas del sector donde se instalará el futuro Puerto, y el patrón mismo de corrientes.



**Figura 23.** Desplazamiento de un derrame de 200 toneladas de Diesel A1 bajo condiciones de viento NW constante de 22 nudos.

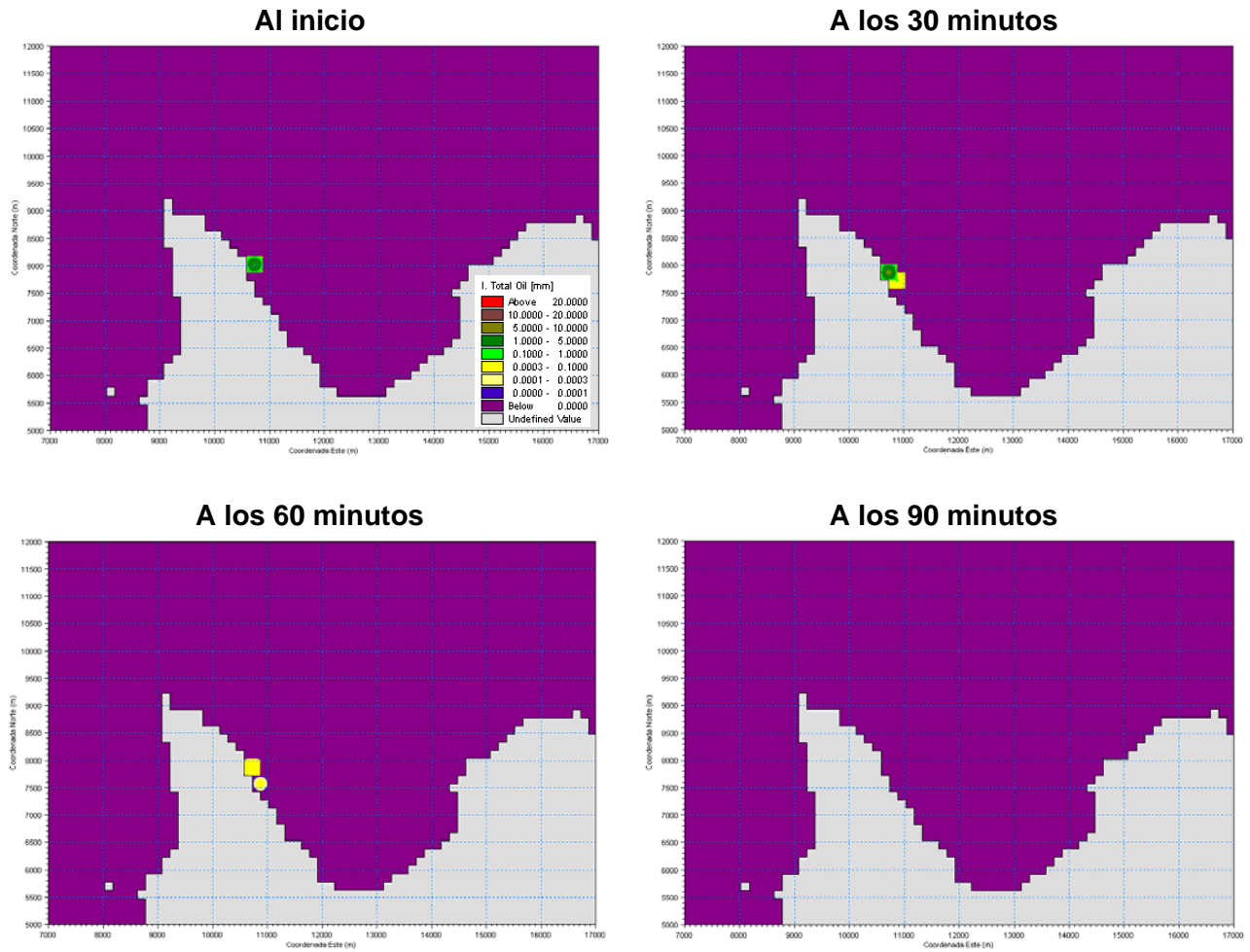
	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	43
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

#### 4.2.1.2 Vientos Típicos del N y NW


A continuación se presenta los resultados obtenidos con un viento de magnitud 2,5 m/s, que corresponde a una magnitud promedio de los vientos registrados del N y NW, en las campañas de verano e invierno. Estos vientos son generados por la rotación del viento producto de la diferencia de calor que existe entre la tierra y del mar durante el día y que en las tarde produce un gradiente térmico entre el mar y la tierra que modifica el patrón predominante de circulación del aire.

Al igual que en el caso de las simulaciones con viento constante de magnitud de 11,32 m/s (22 nudos), las diferencias mayores se producen entre las direcciones del viento y no entre verano e invierno, por lo que a continuación se presentan los resultados sólo en función de la dirección del viento.

El desplazamiento de una mancha de Diesel A1 de 200 toneladas con un viento de 2,5 m/s del N es muy similar al que se aprecia con un viento de dicha dirección y de 11,32 m/s, lo que se debe a que la dirección del viento hace que la mayor parte del Diesel derramado se acumule en la costa quedando poco diesel en el agua (**Figura 24**). A los 60 minutos de acaecido el derrame el espesor de éste es de alrededor de 0,0001 mm, por lo que se desprende también que el escaso volumen de Diesel A1 que se aprecia en el mar ya a una hora de haberse producido el derrame indica que gran parte de éste queda depositado en la orilla de la playa, dado el viento utilizado en la simulación, por lo que una fracción pequeña es la que queda “disponible” en el mar, y que sólo logra desplazarse no más de 610 metros al sur del punto del derrame, por el borde costero.

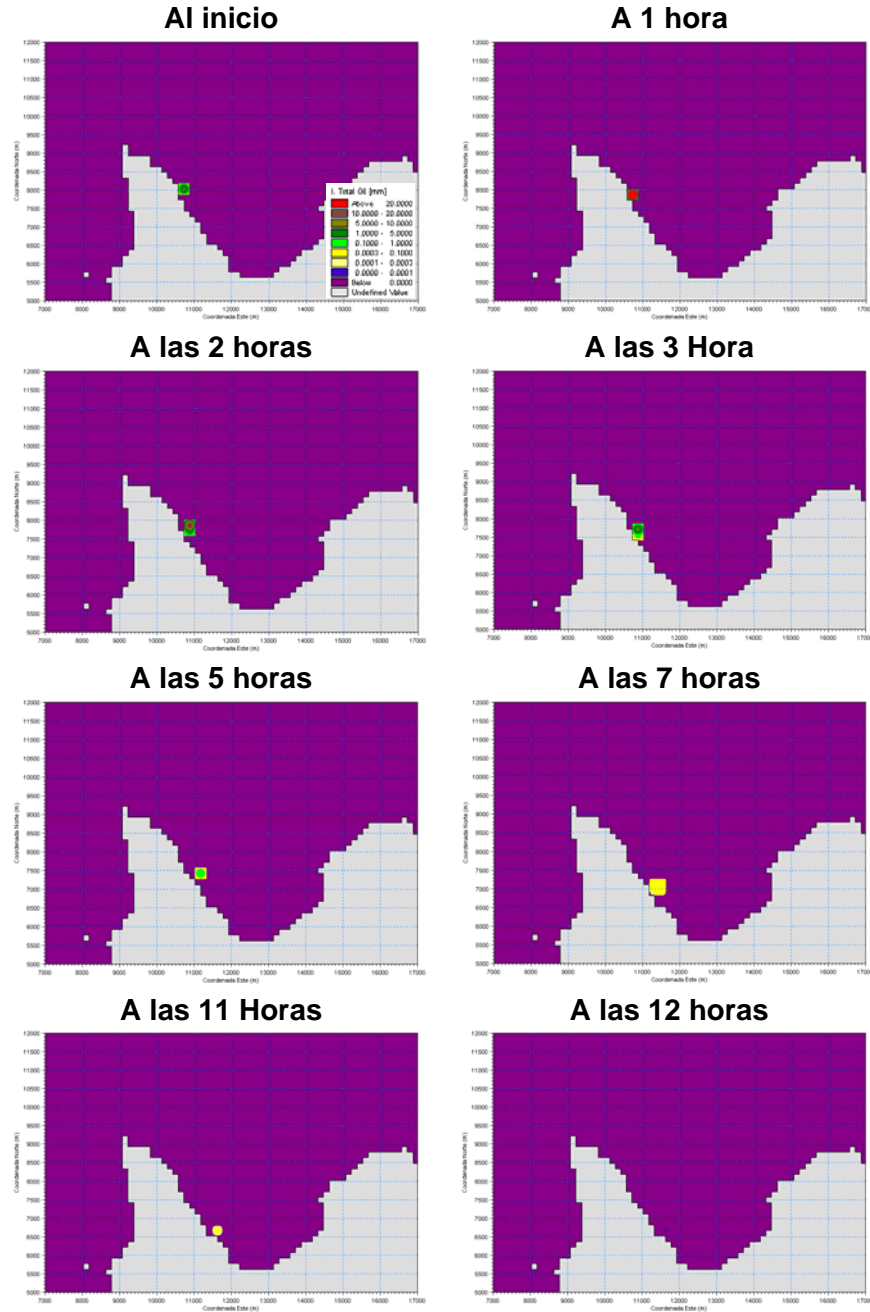


**Figura 18.** Desplazamiento de un derrame de 200 toneladas de Diesel A1 bajo condiciones de viento N de 2,5 m/s.


	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	45
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

En cambio, con un viento del NW de 2,5 m/s no ocurre lo mismo que con el viento de 11,32 m/s de esta dirección; en este caso, la mancha de Diesel A1 se puede seguir por cerca de 13 horas en el agua, manteniendo un desplazamiento hacia el sur. Aún cuando se acerca al área donde se encuentran las macroalgas, finalmente queda retenida en un sector al sur del derrame a las 9 horas, a una distancia aproximada de 2.200 metros del área de vertimiento por la costa, alcanzando caleta Chascos, lugar en que se va reduciendo su concentración hasta desaparecer totalmente antes de completarse las 13 horas post derrame (**Figura 25**). En ningún caso el derrame alcanza las praderas de macroalgas, pero si vería afectada las de pasto marino, las que se distribuyen aproximadamente en la isobata de los 5 metros.

El motivo más probable del por qué la mancha no sigue avanzando, es que en ese sector se produce algún tipo de frente que no permite el paso de la mancha, y que a la vez genera el límite físico entre la zona de dispersión y la zona de retención, la que probablemente crea la misma pradera de macroalgas que se encuentra en este sector de la Bahía Chascos.

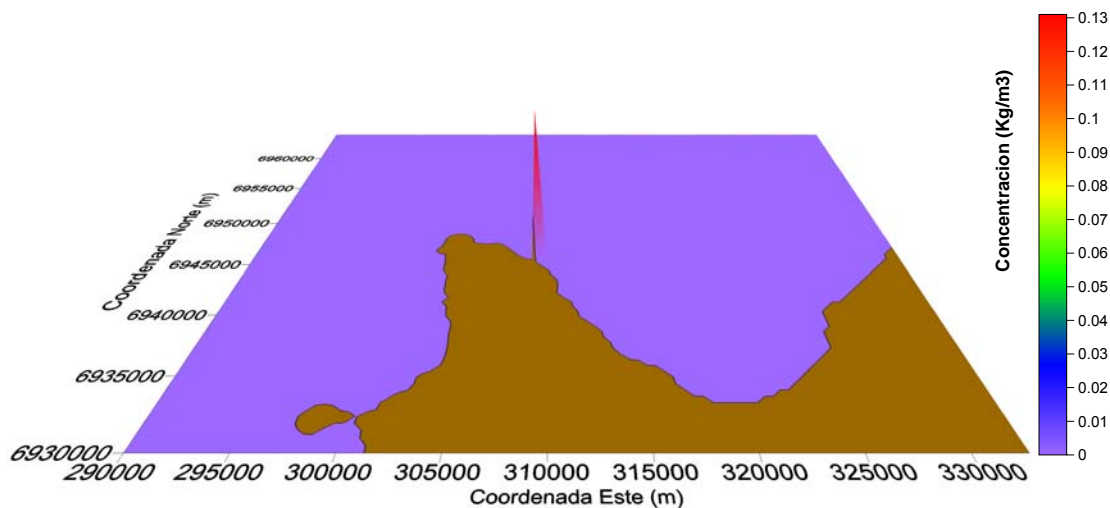


**Figura 25.** Desplazamiento de un derrame de 200 toneladas de Diesel A1 bajo condiciones de viento NW de 2,5 m/s.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	47
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

#### 4.2.2 Liberación Accidental de Minerales y Granos


La situación de los derrames de minerales y granos, es bastante más sencilla en cuanto a su comportamiento. Como lo indica la **Figura 26**, la simulación con viento N y NW entre el mismo resultado, donde los minerales y granos, dada su densidad y tamaño de partículas, se depositan en el lugar en que ocurre la liberación accidental, no importando si ésta se produce en verano o en invierno. Estos resultados ya habían sido obtenidos con la simulación de invierno y verano del Informe Técnico MODPC/012010.



**Figura 26.** Concentración de minerales en el fondo después de 4 horas de simulación.

#### 4.2.3 Áreas Sensibles y Blancos

Los modelamiento efectuados en esta oportunidad han considerado los peores escenarios posibles de modelar, teniendo en cuenta la ubicación de las praderas de macroalgas y pasto marino dentro de la Bahía Chascos (**Figuras 27 y 28**). Tanto en el modelo de intemperización (ADIOS2®) como en el hidrodinámico, se han utilizado las forzantes

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	48
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

oceanográficas y meteorológicas de manera que la mancha de hidrocarburos generada tienda a desplazarse hacia el centro de la bahía o hacia el saco de la misma, con el fin de poder simular la posibilidad de que los recursos hidrobiológicos sean alcanzados por el derrame.

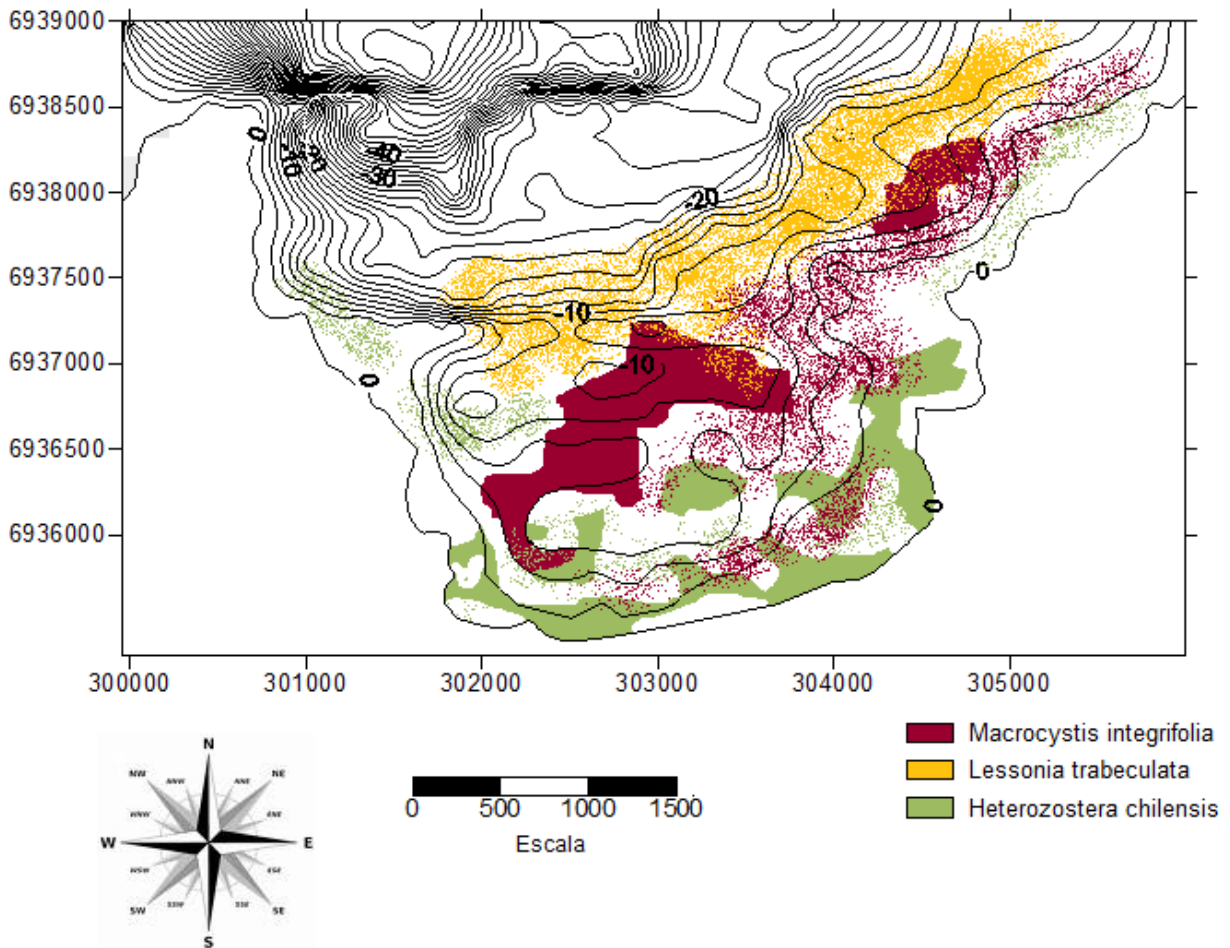
Como se aprecia de los resultados de los modelamientos, sólo en un escenario existe la posibilidad que puedan ser alcanzadas las praderas de pasto marino *Heterozostera chilensis* (**Figuras 27 y 28**). Éste corresponde al escenario con viento del NW de 2,5 m/s, tanto en invierno como en verano. En este caso la mancha de Diesel A1 puede desplazarse por la costa hasta 2.200 metros aproximadamente del lugar de vertimiento, pudiendo hallarse trazas de hidrocarburos hasta cerca de 13 horas de acaecido el evento. El modelo de intemperización muestra que bajo estas condiciones, en verano, al final de los 5 días de simulación, una parte importante del hidrocarburo derramado queda como remanente, correspondiendo a aproximadamente 84 toneladas (98,71 m<sup>3</sup>). En invierno, el panorama sería similar, quedando después de 5 días aproximadamente 103,4 m<sup>3</sup> (103.408 litros). Estos volúmenes remanentes corresponden a lo que el modelo hidrodinámico indica, es decir, parte del hidrocarburo derramado quedaría depositado en la orilla de playa (donde no están las macroalgas ni el pasto marino).

En todos los demás casos simulados, pese a movilizarse la mancha de derrame, no alcanzaría a las zonas de presencia de recursos macroalgales ni tampoco a las poblaciones de *Heterozostera chilensis*.

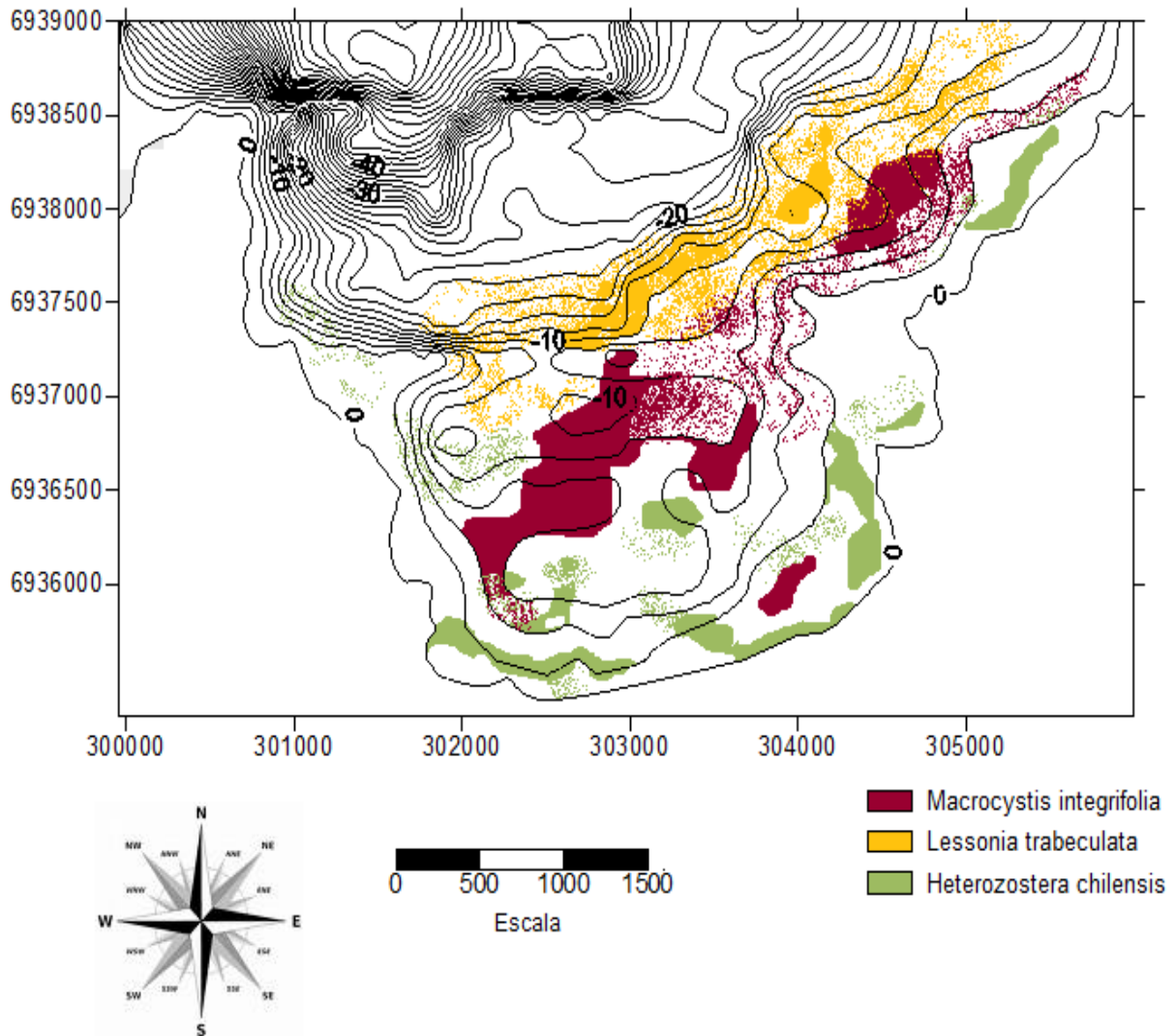
En conclusión, considerando los escenarios propuestos en las simulaciones efectuadas, sólo aquel que considera vientos del NW de 2,5 m/s, tanto en invierno como en verano, podrían llegar a afectar las comunidades de pasto marino de Bahía Chascos. No obstante lo anterior, es muy importante destacar que la simulación en esta condición, considera vientos del NW de 2,5 m/s simulados por un período de 13 horas, lo cual es muy poco probable que suceda en el área de estudio, pues esta condición no se da más allá de 2 horas al día, de acuerdo a los registros con los cuales se cuenta.




Respecto a los derrames de minerales y grano, éstos sólo tendrían un efecto local, transiente en el caso de la composición de la columna de agua y del fondo marino.



**Figura 27.** Distribución de las especies monitoreadas en Bahía Chascos para mayo de 2009 (Fuente: Informe Técnico MODPC/012010).



**Figura 28.** Distribución de las especies monitoreadas en Bahía Chascos para enero de 2010 (Fuente: Informe Técnico IT GEOSBCH/012010).


	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	51
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

## 5. DISCUSION

Los resultados obtenidos muestran que los derrames de Diesel A1 bajo una condición de vientos máximos para la zona provenientes del N y NW, condición anormal en la zona pero requerida para su simulación por la Autoridad Ambiental, se mantendrían en las proximidades del derrame. En el caso de un derrame con vientos máximos del N, el combustible quedaría concentrado en la costa y en la zona del puerto, y una fracción se desplazaría en forma paralela a la costa hacia el sur. Algo similar ocurriría con vientos máximos del NW, en la cual, producto de la batimetría, las corrientes del sector llevarían la fracción de combustible que no se deposita en el borde costero, hacia la zona central de la bahía.

En el caso de las simulaciones efectuadas con los vientos con componente N y NW, pero con las velocidades habituales de hallar en la zona de estudio, resultan ser los vientos del NW con velocidades promedio de 2,5 m/s las que generarían el peor escenario de simulación, permitiendo desplazarse la mancha de hidrocarburos por cerca de 2,2 kilómetros por la costa al sur del punto de vertimiento, llegando a alcanzar sectores cercanos a Caleta Chascos y, por tanto, a las praderas de pasto marino. No obstante, se deben efectuar 2 salvedades: i) la primera de ellas es que estos vientos no son posibles de hallar den el área de estudio bajo las condiciones simuladas, por lo que este resulta ser, si bien el peor escenario, es muy poco probable que llegue a producirse; ii) si bien se alcanzan las praderas de pasto marino, el espesor de la mancha no supera los 0,0003 mm, lo que cual, para efectos ambientales, es despreciable.


Estos resultados, junto con los resultados de las simulaciones previas, indican que la topografía y batimetría del sector modula el patrón de circulación en el sector y que el mayor desplazamiento de la mancha de un derrame de combustible está asociado a vientos permanente del NW, de velocidades del orden de 2,5 m/s; y a las condiciones normales del viento en la zona, como fue demostrado en el Informe Técnico MODPC/012010. Asimismo, las condiciones batimétricas y topográficas que favorecen por

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	52
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

una parte que las macroalgas y el pasto marino se concentren en el sector sur de la Bahía Chascos, son las mismas que reducen las probabilidades que la mancha de combustible se acumule en donde se encuentran localizadas las comunidades biológicas citadas, en el caso simulado de que el derrame se produce en la zona colindante al Puerto.

Dadas las condiciones anómalas utilizadas para la simulación, sólo en las condiciones de vientos del NW de 2,5 m/s, el derrame de Diesel A1 podría mantenerse por más de 5 días, probablemente en la orilla de playa. En los demás casos, el derrame sería disipado aproximadamente un par de horas después de efectuado el derrame en el mar. Esto se debe a que gran parte del hidrocarburo llega a depositarse en la orilla de playa, lo que para el proyecto es una situación muy favorable, ya que bajo este escenario las medidas de emergencia de limpieza estipuladas en el Plan de Contingencia pueden llevarse a cabo para recuperar el Diesel derramado. Aquel que queda en el mar se disiparía en un tiempo no mayor a 11 horas, a excepción de la condición de vientos NW de 2,5 m/s ya comentada.


En el caso de las simulaciones para el derrame de minerales y granos, los resultados obtenidos se encuentran dentro de lo esperado, puesto que éstos tenderían a concentrarse bajo la zona del derrame o liberación accidental, lo que coincide con los resultados de las simulaciones anteriores realizadas con las condiciones registradas en terreno de vientos en invierno y verano. Un efecto no incluido sobre el mineral derramado es el transporte de sedimento generado por la acción del oleaje, en especial del oleaje con períodos sobre 12 s correspondiente al oleaje generado por temporales en zonas remotas. Sin embargo, el oleaje podría producir más bien una remoción y acumulación del mineral en el sector, dependiendo del tamaño de sedimento utilizado en el estudio sedimentológico realizado dentro del marco del diseño del Puerto, lo que podría incluso aumentar su concentración en el área misma de liberación.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	53
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

## 6. CONCLUSIONES

De los resultados expuestos se puede concluir que:


1. Las simulaciones de la intemperización de Diesel A1 y las modelaciones hidrodinámicas del mismo, indican que la mancha de este producto será transportada básicamente por la orilla de playa cuando el viento sea máximo y constante desde el N, o se desplazará levemente de la orilla de playa hacia el centro de la bahía cuando el viento sea máximo y constante desde el NW.
2. Un comportamiento similar del derrame de Diesel A1 se apreciaría con magnitudes de vientos típicas del área de estudio (promedio de 2,5 m/s), provenientes del N y NW, aunque en el segundo caso, la mancha se desplazaría hacia el sur, por la costa, una distancia aproximada de 2.200 metros, pudiendo alcanzar el sector de Caleta Chascos.
3. La situación más desfavorable para los recursos hidrobiológicos presentes en el área de estudio, se presenta, tanto en invierno como en verano, con vientos del NW de 2,5 m/s. En específico, el modelo de intemperización muestra la condición más adversa para este tipo de vientos en invierno, donde quedaría un remanente luego de 5 días, de alrededor de 88 toneladas (103,4 m<sup>3</sup>). El modelo hidrodinámico confirma lo obtenido con el de intemperización, toda vez que en este escenario, la mancha de hidrocarburos se desplazaría alrededor de 2.200 metros al sur del punto de descarga, llegando a una concentración “cero” en el mar a aproximadamente 12 horas después de haberse vertido. El restante Diesel A1 quedaría depositado en la orilla de playa, sometido a procesos de intemperización.
4. Para el caso de las liberaciones accidentales de minerales y granos, dada su densidad y tamaño de partículas, en todos los casos van a depositarse en el lugar en que ocurre la liberación accidental, no importando si ésta se produce en verano

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	54
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

o en invierno.

5. Respecto a las áreas sensibles y/o blancos a proteger frente a derrames accidentales, las simulaciones muestran que en el caso de los derrames de minerales y granos, sólo habría que concentrarse en los alrededores del accidente mismo, pues éstos tienden a decantarse rápidamente. Esto tanto en invierno como en verano.
  
6. Para el caso del Diesel A1, las áreas sensibles y/o blancos a proteger frente a derrames accidentales son distintas dependiendo de las condiciones simuladas. Con vientos constantes de máxima velocidad del NW, habría que asegurarse de que no se alcancen las praderas de *L. trabeculata* presentes en el centro de la bahía. Con vientos de 2,5 m/s del NW, son las praderas de pasto marino ubicadas en el costado oeste de Bahía Chascos las que habría que proteger.
  
7. Las simulaciones permiten concluir que, bajo los supuestos utilizados y los volúmenes de producto modelados, las posibilidades que sean afectadas las praderas de macroalgas explotadas por los pescadores son muy escasas. En tanto, sólo bajo condición de vientos NW de 2,5 m/s existe la posibilidad de que sean afectadas las poblaciones de pasto marino de Bahía Chascos, producto de un derrame de diesel desde Puerto Castilla, situación que puede ser, no obstante, manejada con el Plan de Contingencia con el cual cuenta el Puerto.

Viña del Mar, 07 de junio de 2010.

	<b>SEGUNDA MODELACIÓN LIBERACIÓN ACCIDENTAL DE MINERALES E HIDROCARBUROS MEDIO ACUÁTICO PUERTO CASTILLA - BAHÍA CHASCOS</b>	Nº DOCUMENTO MODPC2/062010	EDICIÓN / REVISIÓN 4/3	55
		Fecha de emisión: 07/06/2010	Emitido por: Depto. Ambiental EcoTecnos Ltda.	

# ANEXO 1

## *ESPECIFICACIONES DIESEL A1*



## Petróleo Diesel 2D Tipo A1 (Nch 62. 2000) ( de uso restringido al Area Metropolitana)

Actualizado de acuerdo a las modificaciones incluidas en el decreto N° 58/2004 "Reformula y actualiza Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA) publicado en el Boletín Oficial de la República de Chile de fecha 29 de Enero de 2004.

- El petróleo Diesel 2D Tipo A1 podrá incorporar aditivos.
- No está permitido el uso de colorantes.

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo	Norma Chilena	ASTM*
Densidad @ 15°C	kg/m <sup>3</sup>	830	850	Nch 822	D-4052
Agua y sedimentos	% vol		0.10	Nch 1982	D-1796
Azufre	% m/m		0.0050	Nch 1947	D-4294
Residuo carbonoso sobre 10% del residuo <sup>(1)</sup>					
a) según Ramsbottom	% m/m		0.21	Nch 1985	D-524
b) según Conradson	% m/m		0.20	Nch 1986	
Cenizas	% m/m		0.01	Nch 1984	D-482
Corrosión sobre lámina de cobre			N°2	Nch 70	D-130
Destilación :					
Temperatura al 90 % de recuperado	°C (°F)	282 (540)	338 (640)	Nch 66	D-86
Número de cetano		50 <sup>(2)</sup>		Nch 1987	D-613
Nitrógeno	ppm		170		D-4629
Punto de Inflamación	°C (°F)	52 (126)		Nch 69	D-93
Punto de escurrimiento	°C (°F)		-1 (30)	Nch 1983	D-97
Punto de obturación de filtro en frío	°C		informar		D-6371
Aromáticos					
- Totales	% m/m		35	Nch 2037	D-5186
- Policíclicos			5	Nch 2037	D-5186
Viscosidad Cinemática @ 40°C	cSt	1.9	4.1	Nch 1950	D-445
Lubricidad	(3)			(3)	

\*Información adicional. Si bien en la mayor parte de los casos los métodos de análisis son equivalentes, la normativa de calidad se basa sólo en las Normas Chilenas de análisis acá mencionadas

1. En caso de arbitraje debe usarse el método Ramsbottom.
2. Como método práctico puede usarse el índice de cetano calculado (Nch 1988, ASTM D-976), pero en caso de desacuerdo o arbitraje el método de referencia es el número de cetano (Nch 1987)
3. El parámetro de Lubricidad y el método de ensayo deberán establecerse mediante decreto supremo del Ministerio de Economía antes de Marzo de 2004. (nota: A la fecha de confección de la presente la autoridad correspondiente aún no se ha expedido

Actualización: Mayo 2004  
Reemplaza. Enero 2003