

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL  
(PROGOA)**

**ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA DINÁMICA DE LAS  
CORRIENTES EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO**

**OSCAR ADEMIR CARTES ZURITA**

**2005**

Oscar Cartes Z.- 09-0015074  
[oscercartes@123mail.cl](mailto:oscercartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL  
(PROGOA)**

**ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA DINÁMICA DE LAS  
CORRIENTES EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO**

**TESIS PRESENTADA EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE MAGÍSTER EN MEDIO AMBIENTE  
CON MENCIÓN EN GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL**

**POFESOR GUÍA: FERNANDO CORVALAN QUIROZ**

**OSCAR ADEMIR CARTES ZURITA**

**2005**

Oscar Cartes Z.- 09-0015074  
[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

## **AGRADECIMIENTOS**

**A todos aquellos que participaron en el desarrollo de esta memoria, al Instituto Nacional de Hidráulica por las facilidades brindadas en información y la utilización de el software de modelación MIKE 21, a los profesores del PROGOA y en particular al profesor guía, por último en especial a mi familia por la paciencia y apoyo mostrado en este largo camino.**



## Resumen

Este trabajo pretende sentar las bases para el desarrollo sustentable del manejo integrado de la cuenca hidrográfica, utilizando información espacial y temporal de las corrientes marítimas reinantes en la bahía de Valparaíso, la cual integrada a la cartografía del sector, permite evaluar la dinámica de los procesos que se llevan a cabo y entre otras cosas visualizar la dinámica de los contaminantes presentes.

El medio para lograr lo anterior, se basa en integrar en un Sistema de Información Geográfica, los resultados obtenidos al realizar una modelación numérica de la hidrodinámica de la bahía de Valparaíso por medio de un software MIKE 21, desarrollado por el Instituto Danés de Hidráulica, el cual es actualmente utilizado por el Instituto Nacional de Hidráulica. El modelo Mike 21 es un grupo de submodelos que constituyen un ambiente de trabajo que permite la modelación bidimensional de flujos costeros y fenómenos de transporte de sedimentos marinos, este incluye una serie de subrutinas que permitieron digitalizar y modelar la batimetría de la bahía, permitiendo además un manejo eficiente de la entrada de datos y de las salidas gráficas de los resultados. Como esquema numérico el modelo utiliza la técnica de las diferencias finitas, con las cuales resuelve las ecuaciones de movimiento y conservación de la masa.

Para el manejo espacial y temporal de los datos se utilizó el conjunto de programas ARCGIS V 8.2, el cual debido a su estructura basada en objetos permite asegurar una flexibilidad que posibilita la extensión de los programas a futuras mejoras, ya que aprovecha las ventajas de la Programación Orientada a Objetos (OOP) por sobre los lenguajes no estructurados.

**INDICE**

<b>Glosario</b>	<b>IV</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>1-6</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1-6</b>
1.1    Objetivos	1-6
1.2    Alcance	1-6
<b>CAPITULO II</b>	<b>1-7</b>
<b>2. Cuencas Hidrograficas</b>	<b>2-7</b>
2.1    Introducción	2-7
2.2    La gestión del agua por cuencas hidrográficas y su efecto en las áreas costeras	2-7
2.3    Gestión del control de la contaminación del agua en las cuencas y áreas costeras adyacentes	2-8
2.3.1    Consideraciones para la gestión integrada de cuencas	2-10
2.4    Instrumentos para reducir el impacto de la contaminación terrestre sobre las áreas costeras	2-11
2.4.1    Política	2-12
2.4.2    Planificación	2-13
2.4.3    Gestión	2-14
<b>CAPITULO III</b>	<b>2-16</b>
<b>3. DINAMICA MARINA</b>	<b>3-16</b>
3.1    Introducción	3-16
3.2    Definición del área costera	3-16
3.2.1    Costa afuera	3-17
3.2.2    Playa	3-17
3.2.3    Costa	3-17
3.3    Oleaje	3-17
3.3.1    Generación	3-18
3.4    Tipos de olas	3-19
3.4.1    Olas marinas o de viento	3-20
3.4.2    Según su frecuencia	3-21
3.4.3    Según sus propiedades hidrodinámicas	3-21
3.5    Mareas	3-22
3.5.1    Mareas astronómicas	3-23
3.6    Corrientes de ribera, costeras o litorales	3-27
3.7    Tipos de corrientes	3-28
3.7.1    Debidas al oleaje	3-28
3.7.2    Normales a la costa	3-29
3.7.3    Resaca	3-29
3.7.4    De retorno	3-29
3.7.5    Paralela a la costa	3-30
3.7.6    Oceánicas	3-30
3.8    Principios básicos de hidráulica marítima e ingeniería de costas	3-32
3.8.1    Propagación del oleaje	3-32
3.9    Aguas profundas	3-33
3.10    Aguas bajas	3-33
3.11    Refracción	3-34

3.12	Difracción	3-35
3.13	Reflexión	3-37
3.14	Rompimiento	3-38
3.15	Esbeltez	3-38
3.16	Transporte en el ambiente marino	3-40
3.16.1	Transporte litoral	3-40
<b>CAPITULO IV</b>		<b>3-42</b>
<b>4.</b>	<b>Modelos de transporte y dispersión de contaminantes</b>	<b>4-42</b>
4.1	Introducción	4-42
4.2	Ecuación De Transporte	4-43
4.2.1	Análisis de términos	4-45
4.3	Difusión turbulenta	4-48
4.4	Planteamiento intermareal	4-50
4.5	Soluciones analíticas de la ecuación de transporte de masa	4-53
4.5.1	Difusión	4-53
4.5.2	Tridimensional	4-53
4.5.3	Con término de generación	4-54
4.6	Emisarios submarinos	4-56
4.6.1	Perfiles de temperatura y salinidad	4-58
4.6.2	Estudios de corrientes	4-58
4.6.3	Coeficientes de dispersión	4-60
4.6.4	Coeficientes de autodepuración	4-63
4.6.5	Biocenosis y contaminación de fondo	4-63
4.6.6	Batimetría, geofísica y geotecnia	4-64
4.6.7	Clima marítimo	4-64
4.6.8	Dinámica litoral	4-66
4.6.9	Cálculo de la dilución inicial	4-66
4.6.10	Comprobación de la estabilidad de la capa de mezcla	4-67
4.6.11	Comprobación de los objetivos de calidad	4-67
4.7	Modelos matemáticos	4-70
4.7.1	Mike 21	4-70
4.7.2	Mike 21 modulo PMS	4-72
4.7.3	Mike21 HD	4-77
<b>CAPITULO V</b>		<b>4-80</b>
<b>5.</b>	<b>Modelación Numérica bahía de Valparaíso</b>	<b>5-80</b>
5.1	Introducción	5-80
5.1.1	Antecedentes	5-81
5.1.2	Borde costero de la bahía de Valparaíso	5-82
5.1.3	Muestreo superficial	5-86
5.1.4	Morfología de los fondos marinos	5-89
5.2	Estudio de oleaje	5-91
5.2.1	Oleaje	5-91
5.2.2	Análisis del oleaje por Período (SMB)	5-93
5.3	Mareas	5-95
5.4	Generación de la batimetría	5-97
5.4.1	Consideraciones	5-100
5.5	Resultados de la modelación	5-101
5.5.1	Batimetría Regional	5-101
5.6	Modelación de oleaje (modelo PMS), condición invierno	5-103

5.6.1	Dirección NW $H_{so} = 6m$ , $T = 14s$	5-103
5.6.2	Dirección W $H_{so} = 2.5m$ , $T = 12s$	5-104
5.6.3	Dirección SW $H_{so} = 2.5m$ , $T = 14s$	5-104
5.7	modelación de oleaje (Modelo PMS), Condición Verano	5-107
5.7.1	Dirección SW $H_{so} = 1.5m$ , $T = 10s$	5-107
5.7.2	Dirección W $H_{so} = 1.0m$ , $T = 10s$	5-108
5.8	Modelación de corrientes (modulo HD), condición invierno	5-109
5.8.1	Dirección NW $H_{so} = 6m$ , $T = 14s$	5-109
5.8.2	Dirección W $H_{so} = 2.5m$ , $T = 12s$	5-110
5.8.3	Dirección SW $H_{so} = 2.5m$ , $T = 14s$	5-111
5.9	Modelación de corrientes (modulo HD), condición verano	5-112
5.9.1	Dirección SW $H_{so} = 1.5m$ , $T = 10s$	5-112
5.9.2	Dirección W $H_{so} = 1.0m$ , $T = 10s$	5-113
<b>CAPITULO VI</b>		<b>5-114</b>
<b>6.</b>	<b>Sistemas de información geográfica</b>	<b>6-114</b>
6.1	Introducción	6-114
6.2	Definición	6-115
6.3	Importancia de los SIG	6-115
6.4	Construcción de un SIG	6-116
6.5	Funcionamiento de los SIG	6-116
6.6	Componentes de un SIG	6-117
6.6.1	Hardware	6-117
6.6.2	Software	6-118
6.6.3	Información	6-118
6.6.4	Personal	6-119
6.6.5	Métodos	6-119
6.6.6	Aplicaciones de los SIG	6-120
6.6.7	Análisis Espacial de la bahía de Valparaíso	6-122
6.6.8	Resultados del SIG	6-123
<b>CAPITULO VII</b>		<b>6-133</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>7-133</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>8-136</b>

## GLOSARIO

INH	Instituto Nacional de Hidráulica
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada
SIG	Sistema de Información Geográfica
DOH	Dirección de Obras Hidráulicas
DIRECTEMAR	Dirección del Territorio Marítimo y Marina Mercante Nacional
POAL	Programa de Observación del Ambiente Litoral
IFOP	Instituto de Fomento Pesquero
DHI	Danish Hydraulic Institute
Tsunamis	Olas de maremoto
NRS	Nivel de reducción de sondas. Es el plano al que están referidas las profundidades de una localidad. En Chile el NRS adoptado corresponde al nivel alcanzado por la mayor bajamar de sicigias de la localidad, estando la luna en perigeo.
Bajamar	Distancia vertical entre el nivel más bajo alcanzado una marea y el NRS
Pleamar	Distancia vertical entre el nivel más alto alcanzado una marea y el NRS
Amplitud de la marea	La mitad de la diferencia en altura entre una pleamar y una bajamar consecutiva.
Apogeo	Punto de la órbita lunar más distante de la tierra.
Perigeo	Punto de la órbita lunar más cerca de la tierra.
$M_z$	Periodo lunar 12.42 hr.
$S_z$	Periodo solar 24 hr
Veril	Curva de terreno bajo el agua
Termoclina	Gradiente térmico, el cual impide la mezcla de las aguas profundas con las superficiales, por diferencia de densidades.
Picnoclina	Gradiente o fuerte discontinuidad de densidad de una masa de fluidos a otra.
ROM	Recomendaciones Obras Marítimas, Ministerio de Obras Publicas de España
A	Aceleración máxima debida al oleaje ( $m/s^2$ )
B	Ancho inicial de la pluma (m)
C	Concentración de contaminantes en un punto de coordenadas (X, Y, Z).
$C_0$	Concentración de contaminantes en el efluente de coordenadas (X, Y, Z).
C	Fracción de cielo cubierto por nubes
$C_a$	Coeficiente de fuerza de arrastre.
$C_d$	Coeficiente de descarga.
$C_e$	Coeficiente de fuerza de elevación.
$C_i$	Coeficiente de fuerza de inercia.
$D_i$	Diámetro interior de la boca de descarga (m.)
$D_e$	Diámetro exterior del emisario (m.)
E	Espesor de la capa de mezcla (m.)
F	Número de Froude: $F = U_a^3 / (g'q)$
$F_a$	Fuerza de arrastre.
$F_e$	Fuerza de elevación.
$F_i$	Fuerza de inercia.
$F_o$	Función que tiene en cuenta la auto depuración de la pluma.
$F_1, F_2$ y $F_3$	Funciones que tienen en cuenta la dispersión en la pluma.
g	Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
$g'$	Aceleración reducida: $g' = g (p_a - p_o) / p_o$ ( $m/s^2$ )
h	Carga hidráulica en la boca de descarga (m.)

H	Profundidad de la boca de descarga (m.)
H <sub>h</sub>	Profundidad en el punto donde el espesor de la pluma empieza a ocupar toda la capa de agua (m.)
K	Coeficiente de dispersión en general (m <sup>2</sup> / s)
K <sub>x</sub>	Coeficiente de dispersión horizontal en dirección longitudinal de la pluma (m <sup>2</sup> / s)
K <sub>y</sub>	Coeficiente de dispersión horizontal en dirección transversal (m <sup>2</sup> / s)
K <sub>z</sub>	Coeficiente de dispersión vertical (m <sup>2</sup> / s)
l <sub>fk</sub>	Distancia inicial entre la pareja de flotadores "k" (m.)
l <sub>fk</sub>	Distancia final (m.)
L <sub>T</sub>	Longitud total del difusor (m.)
N	Número de parejas de flotadores considerados para el cálculo de K <sub>x</sub> y K <sub>y</sub> .
q	Caudal unitario en el difusor $q = Q / L_T$ (m <sup>2</sup> / s)
Q	Caudal vertido por el emisario (m <sup>3</sup> / s <sup>1</sup> )
Q <sub>b</sub>	Caudal vertido por una boca de descarga (m <sup>3</sup> / s)
S	Dilución inicial en la capa de mezcla.
SS	Concentración de sólidos en suspensión en el agua del mar (mg/l)
S <sub>m</sub>	Dilución en el eje del chorro.
t	Tiempo que emplea una partícula de agua en recorrer la distancia "X" a lo largo del eje de la pluma (horas)
T <sub>a</sub>	Temperatura del agua del mar (°C)
T <sub>90</sub>	Tiempo necesario para que desaparezca el 90 % de una cierta cantidad de contaminante por efecto de la auto depuración (horas)
u <sub>o</sub>	Velocidad del efluente en la boca de descarga ( m / s)
U <sub>a</sub>	Velocidad horizontal del agua del mar (m / s)
W	Velocidad ascensional del chorro (m / s)
x	Variable de integración (m.)
X	Coordenada medida desde el punto de surgencia a lo largo del eje de la pluma (m.)
y	Elevación de un punto del chorro sobre la boca de descarga (m.)
y <sub>max</sub>	Elevación máxima de la capa de mezcla cuando se produce el atrapamiento (m.)
y	Coordenada vertical que mide la distancia a la superficie libre (o a la pycnoclina, en su caso) para su uso en F <sub>3</sub> .
Z	Coordenada vertical que mide la distancia a la superficie libre (o a la pycnoclina, en su caso) para uso en F <sub>3</sub> .
z	Ángulo del Sol sobre el horizonte (grados sexag.)
$\Gamma$	Coeficiente de estratificación (1/s <sup>2</sup> ) $\Gamma = - \frac{g \, dp_a}{\rho \, dy}$
$\beta$	Ángulo que forma la dirección de U <sub>a</sub> con el difusor (grados sexag.)
$\pi$	Número pí.
a	Densidad del agua del mar (Kg / m <sup>3</sup> )
o	Densidad del efluente (Kg / m <sup>3</sup> )
y	"Desviación típica" de la distribución horizontal de concentraciones en dirección transversal a la pluma (m.)
r	"Desviación típica" de la distribución vertical de concentraciones (m.)
	Variable de integración.

## **CAPITULO I**

### **1. Introducción**

El desarrollo del manejo sustentable de una cuenca hidrográfica es una tarea muy compleja y con múltiples actores. En este trabajo se pretende sustentar las bases para tal efecto, por medio del análisis de información temporal y espacial, aplicando tecnologías de última generación como es la modelación numérica para determinar patrones de corrientes marítimas bajo las condiciones imperantes en la bahía de Valparaíso. Si esta información se integra a un Sistema de Información Geográfica, entonces se dispondrá de una poderosa herramienta de gestión ambiental.

De esta forma es posible determinar los puntos de transporte y deriva de los contaminantes en una forma aproximada y confiable posibilitando a las autoridades tomar decisiones adecuadas en cuanto a temas tan variados como la remoción de contaminantes, la habilitación de playas para el turismo, etc. proporcionando la seguridad a las personas, la preservación de ecosistemas y el desarrollo socio económico de una determinada zona.

#### **1.1 Objetivos**

- Analizar las corrientes de la bahía de Valparaíso, por medio de software especializado como es MIKE 21 desarrollado por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI), que actualmente es utilizado por el Instituto Nacional de Hidráulica (INH).
- Integrar el Análisis de la hidráulica marítima, mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) a la problemática de la contaminación de la Bahía.

#### **1.2 Alcance**

Desarrollo inédito de una aplicación de SIG en el manejo de cuencas hidrográficas, utilizando la tecnología de avanzada disponible en el país, por medio de la integración de herramientas computacionales, con la finalidad sentar las bases de un sistema predictivo en ambientes marítimos costeros y al mismo tiempo generar una herramienta de gestión ambiental que permita tomar decisiones adecuadas en el manejo sustentable de la bahía de Valparaíso.

## **CAPITULO II**

### **2. CUENCAS HIDROGRAFICAS**

#### **2.1 Introducción**

El desarrollo sustentable es la resultante de un conjunto de decisiones y procesos que debe llevar acabo una generación tras otra de seres humanos con relación a sus intereses, demandas, conocimientos y organización tanto en los territorios que se ocupan como en otros con los cuales interactúan, por lo cual un sistema de gestión integrado del agua y de sus cuencas de captación se crea para evitar conflictos, prevenirlos y/o solucionarlos. El ser humano debe aprender a vivir con estos conflictos y enfrentarlos adecuadamente en el tiempo, todo ello producto del crecimiento económico, demandas sociales y cambios climáticos.

En cuencas donde se ubiquen centros urbanos o abastezcan a ellos, en particular las involucradas con grandes centros urbanos, mineros e industriales, estos conflictos se agudizan. Estas cuencas son por lo general mal designadas como cuencas urbanas. Para lograr conducir procesos de gestión integrada de cuencas y de agua, se deben realizar alianzas o concertaciones entre múltiples actores que normalmente actúan en forma sectorizada sobre territorios que no coinciden con los límites de las cuencas.

#### **2.2 La gestión del agua por cuencas hidrográficas y su efecto en las áreas costeras**

El concepto de manejo de cuencas ha evolucionado de formas simples a procesos de gestión más integrados, a la fecha sin que exista un criterio unificado sobre las definiciones que precisen los objetivos de las distintas formas de gestión de cuencas. A nivel del recurso agua, existen propuestas de cambios que apuntan hacia una gestión integral del agua, como es el manejo por aproximación a la cuenca. En este enfoque, la calidad del agua y la protección de los ecosistemas son vistos como elementos importantes en el manejo integrado de la cuenca o en el caso de que la orientación del manejo esté dirigida al control de la contaminación. Por lo tanto, se requiere que el manejo del suelo y del agua esté mejor integrado, e involucre a todos los interesados.

En el análisis del manejo de la contaminación de las aguas costeras, considerando la contaminación proveniente por cuencas hidrográficas, debería ser de interés especial la

gestión integral del agua, debido a que las partes bajas de las cuencas son las áreas más inmediatas a las costas y ejercen un efecto ambiental muy marcado sobre ellas. De manera especial ocurre en estas zonas de la cuenca, donde se ubican las planicies de inundación con una relación menos directa entre el área de drenaje y la zona intermedia, que es donde tiene lugar el transporte y almacenamiento temporal de contaminantes y sedimentos.

Estas zonas por lo general se consideran en forma insuficiente en la gestión de la contaminación de las cuencas hidrográficas y de las aguas costeras, cuando sucede, se le aplica criterios de calidad de agua dulce despreciando el carácter salobre que tienen algunos de sus cuerpos de aguas y de la consideración de las continuas y naturales fluctuaciones en su salinidad. Las medidas actuales de gestión del agua que se llevan a cabo dentro del marco de la cuenca, generalmente no se extienden a toda su longitud, por lo tanto, no consideran su efecto sobre la calidad y cantidad del agua en las partes bajas de las cuencas. En la teoría de la gestión integral del agua, estas áreas son realmente integradas al formar parte natural de su territorio. La principal razón para la gestión integral del agua en las cuencas es que las características físicas del agua provocan un grado extremadamente alto, pero en muchos casos imprevisibles, de interrelación e interdependencia entre los usos y usuarios del agua en una cuenca. Las aguas superficiales y subterráneas, así como las cuencas de captación, las zonas de recarga, los lugares de extracción de agua y evacuación de aguas servidas hacia el mar forman en una cuenca, un sistema integrado.

### **2.3 Gestión del control de la contaminación del agua en las cuencas y áreas costeras adyacentes**

En una cuenca considerada como marco territorial natural de gestión para el agua que encierra, concepto que por sí mismo le impone un límite a lo terrestre al no considerar el mar, la contaminación producida aguas arriba siempre tendrá un efecto sobre los usos y usuarios ubicados aguas abajo. Difícilmente la contaminación producida aguas abajo podrá ejercer efectos sobre los usuarios ubicados en las partes altas, salvo en los casos de que se afecten recursos pesqueros migratorios, existan pesquerías alrededor de la cuenca o especies que utilicen como ruta migratoria. Ello sucede con todas las especies cuya migración reproductiva está ligada a las variaciones hidrológicas de las cuencas. En la actualidad la mayoría de las decisiones sobre calidad y cantidad de agua, se toman en las partes altas de las cuencas, no consideran las necesidades y usos requeridos en las partes bajas. Como regla general a los usuarios ubicados aguas arriba poco les interesa los efectos de sus acciones y decisiones sobre los usos y usuarios del agua ubicados aguas abajo, además de

no considerar la tendencia de los contaminantes a acumularse en las partes bajas de las cuencas lo cual afecta a las zonas más vulnerables para el hábitat de muchas especies, directamente relacionados con las zonas donde interactúa el agua dulce y marina.

En general, en la parte baja siempre existe una contaminación acumulativa que tiene un carácter persistente sobre los usuarios potencialmente expuestos. Durante las inundaciones y crecidas, el canal principal transporta hacia el mar sedimentos depositados temporalmente en el plano, los cuales si están contaminados, afectan la calidad de las aguas costeras. También la construcción de represas reduce el aporte de sedimentos hacia el mar, así como los nutrientes. Esto también afecta el aporte de arena a las playas y de nutrientes a la fauna marina. Desde la perspectiva de considerar la contaminación de las cuencas en las áreas costeras, el interés se centra en las partes bajas de las cuencas debido a que estas zonas actúan como trampas naturales que concentran y sirven de sumideros de contaminantes, donde la influencia de la salinidad es obvia y el intercambio biológico mar-agua dulce es importante.

La gestión del agua a nivel de cuencas, consiste esencialmente en tomar decisiones de intervención teniendo en cuenta la dinámica de la cuenca, de los cauces y de las aguas captadas por la misma, así como sus efectos. Estas deben tomar en cuenta dos aspectos básicos con respecto a las áreas costeras. El primero, referido al control de la contaminación, orientadas básicamente a reducir la contaminación difusa y el flujo elevado de sedimentos y el segundo aspecto es la asignación del agua (derechos, permisos, autorizaciones de captación, mantención de los denominados caudales ecológicos, etc.) Estos elementos básicos de gestión son interdependientes y por lo tanto deben ser analizados en conjunto, considerando en el análisis los efectos sobre las áreas costeras.

Los cambios y modificaciones en la dinámica de la cuenca, los cauces y los cuerpos de agua, modifican su poder para absorber contaminantes alterando su capacidad de dilución. En periodos de lluvias intensas, la compactación y lavado de suelos genera más escorrentía y permite que algunos contaminantes presentes en el suelo pasen a las corrientes receptoras. En condiciones de inundación, la contaminación diluye pero también activa la captación de sedimentos, depósitos de basura y todo tipo de residuos, los cuales se depositan en las playas y fondos marinos adyacentes a la desembocadura. En periodos de aguas bajas, con un menor poder de dilución, la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas mantienen su identidad química y su capacidad reactiva con el medio ambiente, por ende,

Oscar Cartes Z.- 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

tienden a concentrarse. El control de caudales con estructuras hidráulicas y su captación para diferentes usos, tiene un efecto importante en la concentración y distribución de los contaminantes presentes en las aguas de las cuencas. El incremento de las competencias por el uso del agua y la mayor ocupación territorial ha motivado un interés creciente por una gestión integral de los recursos hídricos.

Chile se encuentra en una situación privilegiada desde el punto de vista hídrico, debido, entre otros aspectos, a los avances en saneamiento ambiental por parte de las empresas sanitarias; a los progresos en investigación científica asociada al tema; al rol cumplido por el Estado en el establecimiento de regulaciones ambientales para el control de los residuos líquidos y la elaboración de las futuras normas de calidad; al manejo de la información y al grado cada vez más creciente de la ciudadanía por opinar de estos temas, a lo anterior se agrega el hecho de que la gestión de los recursos naturales está tendiendo naturalmente hacia el manejo integrado de las cuencas, lo que indudablemente trae consigo beneficios ambientales, económicos y sociales superiores a los alcanzados por cualquier otro tipo de planificación en este aspecto.

### **2.3.1 Consideraciones para la gestión integrada de cuencas**

En Chile por sus condiciones, en términos normativo institucionales, es posible, una vez establecida la calidad y objetivo del agua en una determinada cuenca, estar en condiciones de iniciar una negociación conducente a formalizar un contrato o acuerdo público privado de gestión de la cuenca, en una forma muy similar a lo que serían los Acuerdos de Producción Limpia impulsados por la CORFO, donde se establecen compromisos voluntarios de cumplimientos de normas, ratificación y revisión de funciones y competencias, se definen las instancias de gestión, además se deben considerar planes de prevención o descontaminación.

En términos generales se hace necesaria la incorporación de la norma secundaria con la posterior gestión de los factores que determinan la calidad del agua. De este modo, se deben distinguir factores para la organización de un esquema de gestión adecuado, como son:

- Una función transitoria orientada al diagnóstico de calidades y de las relaciones de causalidad conducentes a determinadas calidades, así como a la determinación de metas de calidad o calidades objetivo.

- Una función permanente dirigida a la gestión de los factores que determinan la calidad del agua, y de sus externalidades derivadas de su aprovechamiento o destino a la gestión de la mitigación de impactos y de la restauración de daños y pasivos ambientales.
- Los intereses de los depositarios de derechos de aprovechamiento.
- Los intereses de los usuarios sin derechos de aprovechamiento o usuarios.
- Los intereses de la sociedad nacional y local representados por los gobiernos nacional y municipal.
- Los intereses difusos, representados por organizaciones no gubernamentales, aquellos intereses asociados con los diversos componentes del medio ambiente y con la preocupación social.
- Los intereses generados con los acuerdos de comercio internacionales, y por ende con la adopción de nuevas normas y formas de manejo ambiental que son incorporadas al medio nacional.

Hoy en día los primeros pasos los ha impulsado el Estado. Esta forma de trabajo conjunto de varios Ministerios ha desarrollado planes enmarcados en una etapa preliminar a este enfoque, es así que, el INH a petición de la Dirección Obras Hidráulicas (DOH), ha desarrollado varios modelos computacionales para el manejo más eficiente de los recursos hídricos principalmente en las cuencas donde existen embalses, estos son incorporados a las diferentes Juntas de Vigilancia o Administradoras de los recursos hídricos, por otro lado se han generado programas especiales de capacitación para los usuarios, como son los planes de fortalecimiento, mejoramientos de sistemas de riego por medio de riego tecnificado y lo más importante es la capacitación y creación de conciencia de los usuarios en el manejo sustentable de los recursos.

En forma similar, la tendencia cada vez más frecuente de ocupar los espacios costeros y la aparición de nuevos usos de las áreas costeras ha llevado a la comunidad internacional a adoptar enfoques integrados para el manejo de dichas áreas. Existen muchos aspectos a considerar en la gestión de cuencas y áreas costeras. En ambos medios se integran espacios, sectores, usuarios, recursos, instituciones, etc.

#### **2.4 Instrumentos para reducir el impacto de la contaminación terrestre sobre las áreas costeras**

Los principales factores son: la utilización de políticas nacionales ambientales, las políticas nacionales de salud y saneamiento, políticas sectoriales de ordenamiento de otros recursos de ordenamiento territorial, los cuales difieren en alcance y cobertura, conforme sean sus objetivos. Estos instrumentos son agrupados por lo general en dos grandes categorías:

- Instrumentos Directos, son aquellos que se orientan a un aspecto específico de la contaminación o a la contaminación del agua per se.
- Instrumentos Indirectos, son aquellos que van en apoyo a las medidas directas de gestión de la contaminación.

Estos se apoyan y refuerzan mutuamente, y son aplicados por una cantidad variada de instituciones de diferente jerarquía y propósito, con distintos mandatos y objetivos.

A nivel de cuenca, el otorgamiento del uso del agua es un instrumento básico de gestión y el derecho de uso del agua, operado mediante sistemas de permisos o derechos adquiridos. Por lo general están regulados a partir de normas, disposiciones y otros. A diferencia de las aguas costeras, el otorgamiento del uso del agua está inserto en la concesión de playas, sitios de la costa, ocupación de terrenos de bajamar o lugares del borde costero, salvo en el caso de la acuicultura costera y el turismo. El otorgamiento del derecho al agua en el ámbito de cuenca requiere disponer de información hidrológica básica, orientada a la cantidad de agua disponible, su calidad, la capacidad asimilativa de contaminantes, la demanda actual y proyectada, lo que generalmente se obtiene mediante la planificación (inventarios, encuestas, catastros), que proporcionan la información para fijar caudales mínimos de extracción, límites de contaminantes en las descargas y volumen de descargas.

En las áreas costeras es básico conocer además la cantidad, forma y concentración de los contaminantes, la presencia de corrientes costeras, la estratificación térmica, los recursos biológicos y el gradiente de salinidad.

#### **2.4.1 Política**

Las políticas sobre contaminación, generalmente expresan los principios generales que orientan las respuestas del Estado contra ésta y señalan las medidas, metas y objetivos que

se persiguen con esas respuestas. En general, no existen políticas específicas sobre la contaminación del agua, sino que ellas se encuentran formando parte de políticas más amplias y/o están asociadas a otros elementos de política. Estas se expresan a través de instrumentos de apoyo a las respuestas del estado contra la contaminación. Comúnmente, es un aspecto que acompaña a las políticas ambientales, a las políticas sectoriales, especialmente de manejo y ordenamiento de recursos y también se encuentra vinculada a las políticas nacionales de salud humana, donde forma parte de las políticas sanitarias nacionales. Las políticas nacionales sobre el agua, también se refieren a su calidad y en pocos casos a la contaminación de las aguas marinas.

En el caso de las políticas marítimas nacionales, de las pocas existentes, la contaminación de las aguas costeras se encuentra también inmersa en otras políticas generales, por lo general en las referidas al medio ambiente y aquellas orientadas a la conservación y protección de la pesca y la biodiversidad, en las políticas de desarrollo turístico y de parques nacionales marinos y costeros. No hay distinción entre las fuentes marinas y las terrestres de contaminación, y en este caso, se encuentran formando parte de políticas nacionales sobre "costas".

#### **2.4.2 Planificación**

Se aplican en actividades de ordenamiento territorial y de recursos, estos son programas orientados a la consecución de información básica para la gestión de la calidad del agua. Estos instrumentos corresponden a inventarios, catastros, perfiles, encuestas, levantamientos etc. Normalmente, la planificación es un proceso que utiliza estos instrumentos, para identificar las fuentes de contaminación, el tipo y naturaleza de los contaminantes, formas de entrada de contaminantes a los cuerpos de aguas receptoras, sus concentraciones, tendencias, los impactos actuales y potenciales, por lo tanto "la planificación puede ser realizada a través de una coordinación administrativa o por medio de un dialogo con las diferentes instituciones del estado, miembros de la sociedad civil, grupos o asociaciones formales de usuarios, puede realizarse a través de procesos consensuados, etc."

La mayor información catastrada se encuentra conectada con las fuentes industriales. La información que incluye a usuarios no formales del agua, que conforman una fuente muy difusa de contaminación que se extiende hasta las partes bajas de las cuencas y sus

áreas costeras asociadas no está catastrada. Chile cuenta con un catastro de fuentes de contaminación a nivel de cuencas, no vinculada con información sobre cargas de contaminantes. Los inventarios de fuentes de contaminación de las aguas costeras, generalmente ofrecen información sobre las fuentes que descargan directamente en el mar o en la costa, algunos de ellos están vinculados a programas internacionales como por ej. Programas de Prevención de Contaminación por Hidrocarburos Marpol (IMO), que incluyen las cuencas hidrográficas como una fuente de contaminación costera, pero en ellos la contribución por los ríos siempre ha sido referenciada y no medida, en general siempre subestimada.

### **2.4.3 Gestión**

La gestión se refieren generalmente a programas de vigilancia y monitoreo de la calidad del agua, inspecciones de fuentes de contaminación, de procesos contaminantes y productos contaminantes, sistemas de permisos y licencias ambientales condicionados a un número de factores con un mínimo de requerimientos para el control de la contaminación. En general, la vigilancia y monitoreo de la contaminación del agua, es efectuada por una nómina de instituciones del estado. El mayor énfasis se ha puesto en la vigilancia de los parámetros de calidad de agua para consumo humano. Los otros criterios de calidad como son protección de flora y fauna acuática, pesca, uso agrícola, etc., no son monitoreados regularmente en estos programas de vigilancia.

En la contaminación de las aguas costeras, el énfasis en la vigilancia de la contaminación recae en el monitoreo de los parámetros de calidad del agua para los criterios de protección de flora y fauna marina y contacto primario (recreación, baño). Se utilizan para el monitoreo valores límites, tanto en la calidad como en las emisiones, cuando existen. La mayoría de estos valores están reglamentados y derivan de guías de calidad de aguas dulces. En pocos casos se cuenta con guías de calidad de agua costera, y no existen guías de calidad para las aguas estuariales.

La mayoría de los valores límites utilizados en la reglamentación de la contaminación, tanto de aguas dulces, como en las pocas existentes de las aguas costeras, provienen de reglamentaciones de países desarrollados, aun con el inconveniente que ello representa, dado el efecto que tienen las diferencias de clima en el comportamiento químico de los contaminantes.

En el caso de Chile es aplicable, el reglamento para el control de la Contaminación Acuática (M) N° 106.01.92; el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEI) DS. N° 30, así como en la formulación del Programa de Observación del Ambiente Litoral en el marco de la Ley de Navegación, POAL. (DIRECTEMAR, s. f.), sin embargo la DIRECTEMAR, por lo general aplica el reglamento N° 1 art. 26 para todos aquellos casos de contaminación en zonas costeras, relacionado directamente con hidrocarburos, sin preocuparse del resto de contaminantes que puedan ser vertidos.

## CAPITULO III

### 3. DINAMICA MARINA

#### 3.1 Introducción

El tema principal de esta memoria es integrar el análisis de la hidráulica marítima por medio de la modelación numérica, de la propagación del oleaje y corrientes marinas, para condiciones normales imperantes la Bahía de Valparaíso, tomando en cuenta los períodos invierno y verano, asociando los resultados a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Para lo cual se deben introducir aspectos básicos de Hidráulica Marítima necesarios para comprender el desarrollo del tema, en los capítulos III y IV se utiliza como bibliografía principal el Coastal Engineering Manual, (CEM, Versión mayo 2004).

La dinámica marina estudia todos los fenómenos derivados de la confluencia de grandes masas de agua, como son los océanos, y las tierras emergidas. Dicha confluencia implica una zona de interrelación mutua, el litoral, y otras sub. zonas o dominios de interferencia que, dentro de aquélla, soportan y condicionan directa o indirectamente la intervención de las aguas. Los materiales presentes en la franja costera están sometidos a una serie de transformaciones, de las que son responsables las olas, las mareas y las corrientes.

#### 3.2 Definición del área costera

En una sección perpendicular a la costa (figura 3-1), se pueden distinguir diferentes zonas, las que se definen a continuación.

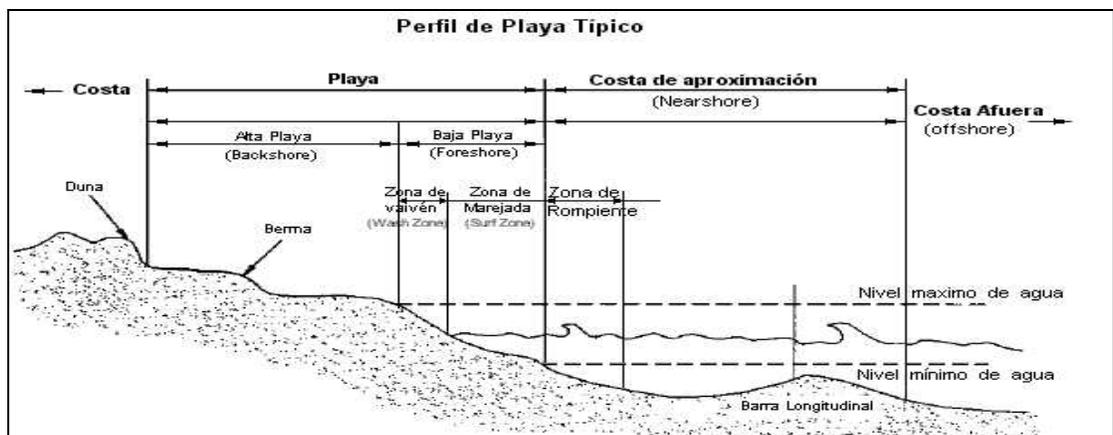


Figura 3-1 Perfil de playa (CEM)

Oscar Cartes Z.– 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

El **área costera** es la zona donde se produce la disipación de energía del mar, siendo el transporte de sedimentos el mecanismo que rige las migraciones de material no consolidado.

### **3.2.1 Costa afuera**

Es la zona donde el oleaje se propaga sin grandes transformaciones, no siendo afectado el oleaje por la morfología del fondo marino.

### **3.2.2 Playa**

Es la zona que experimenta directamente la acción erosiva del mar y forma parte del mecanismo de defensa de la costa.

### **3.2.3 Costa**

Es el límite no alcanzado por los fenómenos marítimos y la costa de aproximación, es la zona ubicada inmediatamente antes de la playa y que contribuye mediante alteraciones a la propagación del oleaje, es el principal mecanismo de disipación de energía del mar.

Teóricamente, considerando un oleaje de características constantes durante un tiempo bastante largo, el perfil de playa tendría que adaptarse a las condiciones reinantes y tender hacia un perfil de equilibrio. Sin embargo, en la naturaleza el oleaje cambia continuamente, impidiendo en la mayoría de los casos que se pueda observar un estado de equilibrio, pero sí una sucesión de estados transitorios.

## **3.3 Oleaje**

Son ondulaciones en el agua, que conllevan transporte de energía y formadas a partir de una perturbación; normalmente se propagan según la dirección del viento, principal generador del oleaje. Allí donde la onda estacionaria pasa a ser de traslación, hay transferencia energética desde la vertical a la horizontal; esto da lugar a tensiones (cizalles) entre el lecho y la base del agua, que provocan removilización y transporte de material.

Al alcanzar el oleaje aguas poco profundas, las olas sufren un proceso de atenuación y pasa desde órbitas circulares a elípticas; la relación en el eje vertical v/s el eje horizontal llega a ser tan grande, que acaban por transformarse en crestas de translación o arrastre apoyadas en el fondo. Así el oleaje estacionario pasa a otro de desplazamiento, con avance del agua

hacia la línea de costa y posterior retorno; su eficacia depende en gran medida de estas energías sobre la rompiente.

El oleaje incidente en la costa puede experimentar una serie de modificaciones, como son **refracción**, con retroceso o retardo del frente que oscila y se sitúa sensiblemente paralelo a la línea de costa; **reflexión**, que produce el reenvío del oleaje incidente hacia el mar cuando no llega a romper; **difracción**, con transferencia de la energía a sotavento respecto a un obstáculo, originando arcos en su entorno.

### 3.3.1 Generación

Se entiende por oleaje aquellas ondas con períodos de 3 a 20 s, generalmente generadas por vientos, el que actúa sobre el agua del mar poniéndola en movimiento, produciendo un movimiento ondulatorio en las capas superficiales

Con el objeto de familiarizar al lector con el tema, a continuación se dan las siguientes definiciones:

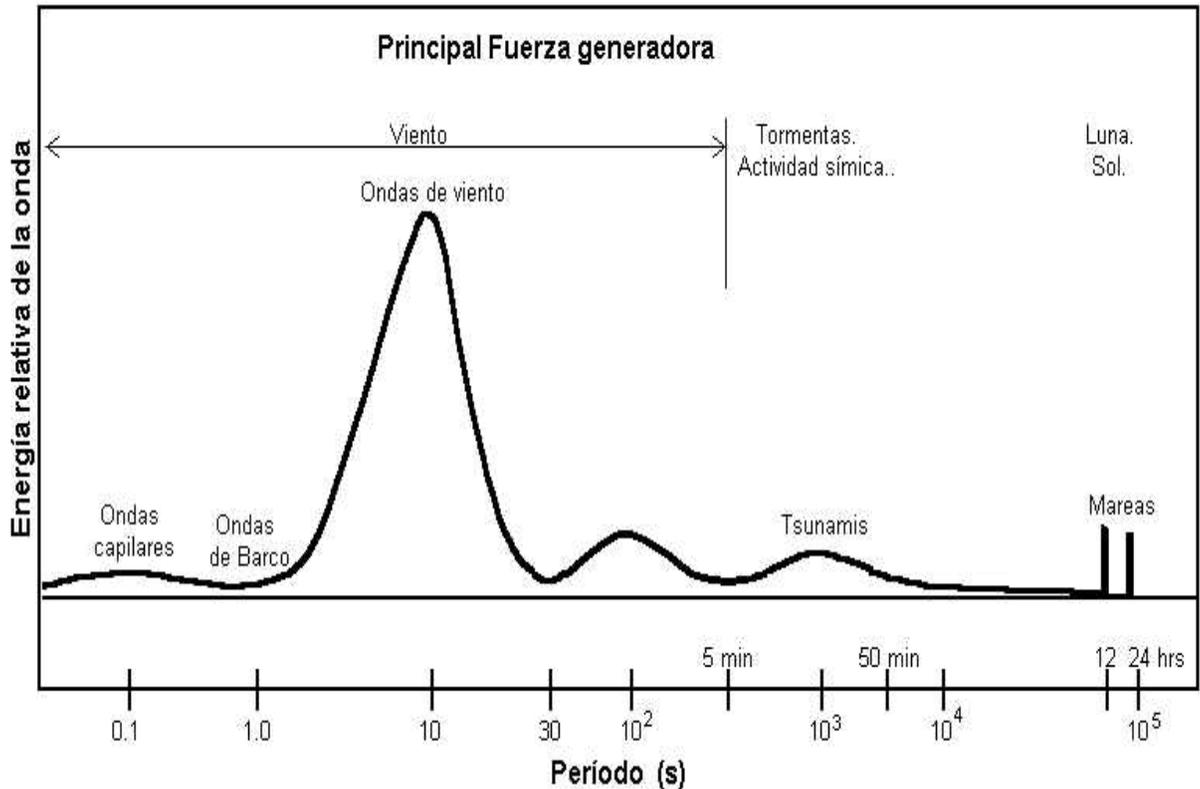
Longitud de onda (L)	: Distancia que separa dos crestas consecutivas.
Altura de ola (H)	: Distancia vertical entre la cresta y el valle o seno de una ola.
Período del oleaje (T)	: El tiempo que tarda en pasar por un punto fijo dos crestas consecutivas o dos valle consecutivos.
Celeridad de la onda (C)	: Velocidad con la cual se propaga la ola, es decir, $C=L/T$ .

Para definir las características del perfil de una ola, se utiliza la relación de esbeltez o peralte  $\gamma=H/L$ .

El viento sopla sobre una superficie y se promueve un cambio de energía entre el mar y la atmósfera. Entonces, el viento ejerce una presión sobre la cara ascendente y una depresión sobre la descendente. El conjunto de estas dos fuerzas antagonistas da como resultado el aumento de altura de la ola; pero como el peralte no puede sobrepasar un valor límite, se produce rompimiento. Pero el movimiento una vez iniciado en la superficie, se propaga hacia el fondo, y la longitud de onda tiende a aumentar, lo que posibilita un aumento de su altura. De esta forma, si el viento sopla en sentido de propagación de la ola, la amplifica y produce

en su longitud de onda un aumento. Sin embargo, el crecimiento no es indefinido y tiende hacia una asíntota, reduciéndose su crecimiento de un modo constante.

Las ondas presentan variaciones anuales y están íntimamente relacionadas con las depresiones atmosféricas, además, poseen una amplia gama de períodos (figura 3-2).



**Figura 3-2: Clasificación de las ondas**

Las olas observadas en la superficie del mar suelen clasificarse en dos grandes grupos, dependiendo de la distancia a la zona de generación al lugar de interés:

### 3.4 Tipos de olas

El tipo de oleaje se puede establecer atendiendo a tres características:

- Generadas por el viento
- Según su frecuencia
- Según sus propiedades hidrodinámicas

### **3.4.1 Olas marinas o de viento**

Están sometidas a la influencia directa del viento que las produce, pudiendo llegar a anularse o reforzarse. Es el oleaje que está siendo generado por el viento en la zona de fetch. En este caso la superficie del mar presenta un aspecto irregular y caótico, las olas poseen una longitud de onda relativamente corta y un fuerte peralte. Su morfología muestra crestas puntiagudas y surcos redondeados que forman rizaduras superpuestas. Según la velocidad del viento y las características de cada masa de agua, presentan dimensiones que varían desde un oleaje con escasa magnitud (mar rizada o picada, de 0 a 0,25 m de altura) a mar gruesa y muy gruesa (de 2,5 a 6 m de altura).

#### **3.4.1.1 De fondo**

Corresponde al oleaje que ya ha abandonado su área de generación y se propaga por los océanos hacia las zonas costeras. En este recorrido las olas se dispersan radialmente y las crestas presentan longitudes de onda mayores que dentro del área de generación, estas son mucho más regulares y menos peraltadas que para un oleaje fondo. No están bajo la influencia directa del viento, a causa del cese de este, que pueden desplazarse decenas, o incluso centenas de kilómetros desde su zona de origen y según la dirección del viento sin ser mantenidas por éste. Son ondulaciones sinusoidales de gran simetría y circularidad crestas y senos redondeados, altura y espaciado uniformes.

#### **3.4.1.2 De temporal**

Tiene el mismo origen que las olas marinas, pero son transportadas y mantenidas por el viento de una zona tormentosa. La energía y rapidez del avance en los trenes de olas sobre los rompientes, interrumpe transitoriamente el flujo de retorno provocando un apilamiento del agua y una invasión de zonas más alejadas tierra dentro. Puede llegar a ser un oleaje muy destructivo, máximo si a los efectos del temporal se suman otros como mareas de tormenta u ondulaciones debidas a diferencias en las presiones atmosféricas. Son olas con longitud de onda y periodo largos, de gran altura: desde arboladas (6 a 9m) a enormes (mayores de 14m).

#### **3.4.1.3 Tsunamis**

Oleaje asociado a la actividad submarina (tectónica, volcánica, deslizamiento), que desplaza masas de agua a gran profundidad y origina olas en superficie con amplitud pequeña

(alrededor de 1 m) y gran longitud de onda (50 a 200 Km.); Pueden transportarse a largas distancias (centenas de Km.) y velocidades (hasta 800 Km./h). En alta mar apenas es perceptible, sin embargo, al llegar a la costa sufre una notable transformación cuando disminuye la profundidad, esa energía acumulada debe concentrarse en un volumen de agua mucho menor, lo cual implica mayor altura, pasando de 60 - 100 cm. a 15 – 30 m, formando olas muy destructivas.

### **3.4.2 Según su frecuencia**

#### **3.4.2.1 Capilares**

Se deben al roce entre laminas de aire y agua en la misma fuente del viento; estando controladas por la tensión superficial del líquido. Son pequeñas rizaduras con morfología en V, cuya longitud de onda es inferior a 1,73 cm. y su altura aproximada unos milímetros.

#### **3.4.2.2 De gravedad**

Son olas generadas por la transferencia de energía desde el viento al agua y controladas por la masa movilizada. Su longitud de onda es superior a 1,73 cm. Incluyen a las olas marinas, de fondo y traslación.

#### **3.4.2.3 Infragravitatorias**

Formadas mediante interacción entre olas. Tienen amplitud baja y periodos largos.

#### **3.4.2.4 De periodo largo**

Producidas por movimientos periódicos de baja frecuencia (mareas) y eventos sin periodicidad (maremotos y tormentas).

### **3.4.3 Según sus propiedades hidrodinámicas**

Considera la transferencia energética desde la oscilación al desplazamiento o translación, con la consiguiente removilización de material. A veces lo denominan oleaje de translación, rompiente, surf, etc., y puede ser:

#### **3.4.3.1 De Derrame**

Movimiento progresivo de atenuación en una onda y paso a la traslación; llegan a presentar rupturas encadenadas.

#### **3.4.3.2 De vuelco**

Adelanto en cada cresta respecto a su base, pérdida de sustentación y enroque, ocasionando un vacío o voluta, con desintegración posterior y fuertes turbulencias.

#### **3.4.3.3 Ondulada**

Formación de una cresta que no llega al vuelco y se diluye, al tiempo que es adelantada por su base en avance hacia la zona de rompiente.

#### **3.4.3.4 De colapso**

Caso mixto entre vuelco y ondulada.

### **3.5 Mareas**

El primero en dar una explicación satisfactoria al fenómeno de las mareas, que incluyera una explicación de las oscilaciones de periodo semi diurno, fue Newton. Según su teoría, las mareas se originan por la diferencia existente en cada punto de la tierra entre dos fuerzas, la atracción de la Luna o el Sol sobre dicho punto y la fuerza centrífuga que sufre al girar en torno al centro de gravedad del sistema Tierra-Luna. La composición de la fuerza centrífuga de rotación en torno al centro de masas del sistema Tierra - Luna con la atracción gravitatoria de la Luna produce una resultante, responsable de la aparición de mareas.

Si suponemos una Tierra sin continentes, esta diferencia de fuerzas deformaría la masa de agua, dándole forma de elipsoide alineado con el eje del sistema Tierra-Luna. Al girar nuestro planeta sobre sí mismo, un observador situado sobre su superficie pasaría por dos máximos, asociados a los extremos del elipsoide, y por dos mínimos, de forma que observaría una marea semi diurna. Esta oscilación de un océano sin límite se denomina marea de equilibrio. La combinación de los elipsoides generados por la Luna y el Sol es responsable del ciclo de mareas vivas y muertas.

Las mareas son oscilaciones periódicas del nivel del mar (figura 3.3), de período largo, y su origen es producto de la interacción de los astros, principalmente El Sol y la Luna. Cuando la

marea alcanza su máxima altura se la llama pleamar y la altura mínima equivale a la bajamar.



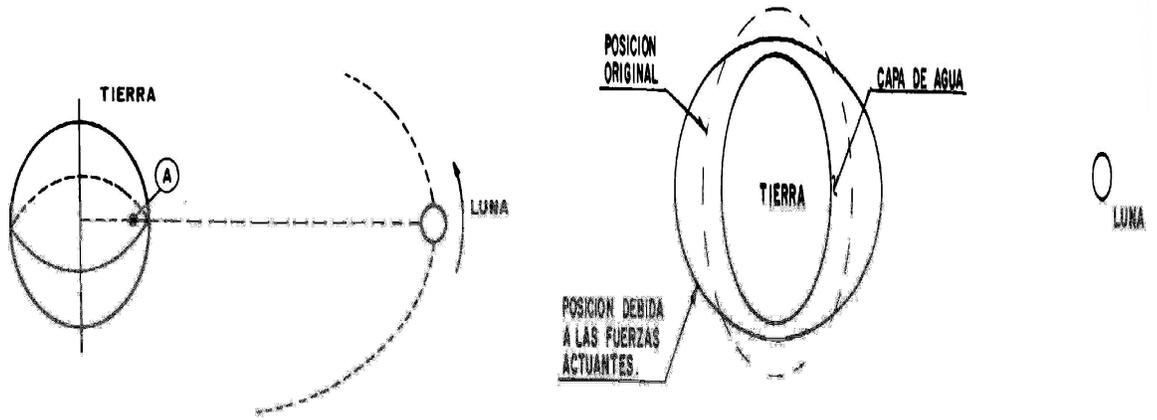
**Figura 3-3: Onda de Marea**

### 3.5.1 Mareas astronómicas

Los principales agentes que participan en la generación de las mareas son:

- La atracción gravitacional de la Luna y del Sol (ley de Newton).
- La fuerza centrífuga generada por la rotación de la Tierra sobre El Sol.
- La fuerza gravitacional varía en razón directa a la masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia las separa, por lo tanto, la fuerza ejercida por El Sol es poco menos de la mitad de la fuerza ejercida por la Luna.

El sistema combinado Tierra-Luna gira en torno a un eje que pasa por el punto A de la figura 3-4. Mientras los dos cuerpos giran ejercen fuerzas gravitacionales entre ellos y por equilibrio, estas fuerzas deben ser contrarrestados por las fuerzas centrífugas, deformando la capa de agua que cubre la tierra.



3-4: Sistema Tierra-Luna

3-5: Atracción de las moléculas líquidas

Lo anterior se esquematiza de la siguiente manera:

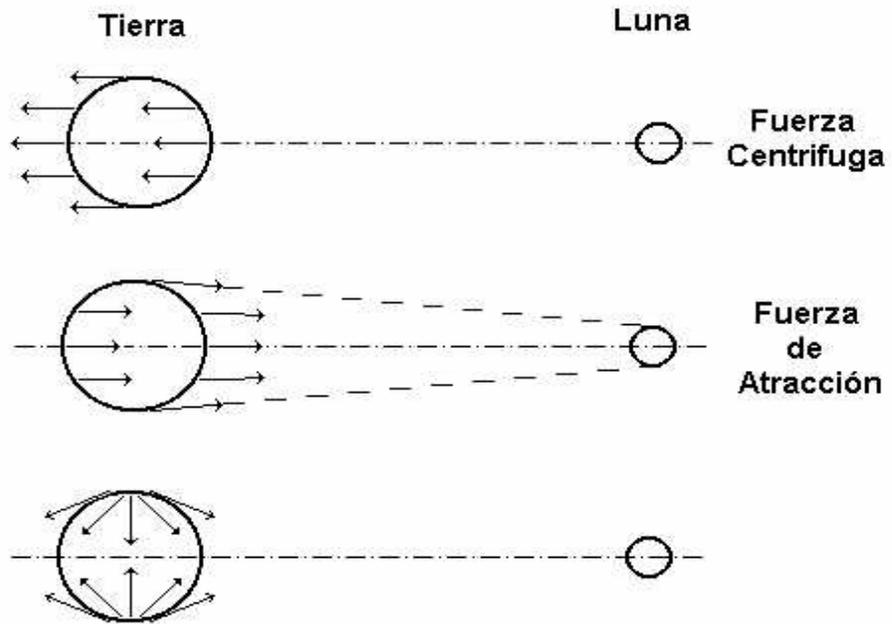


Figura 3-6: Esquema de Fuerzas

### 3.5.1.1 Período de la marea

El periodo de la marea está determinado por los movimientos de la Tierra y de la Luna. Como la rotación lunar es de  $1/29,5$  (el mes lunar es de 29,5 días), el periodo lunar es 12,42 hr ( $M_2=12(1+1/29,5)$ ). Esta condición se denomina semi-diurna.

Como la componente lunar predomina, las mareas se desplazan 0,84 hr (50 minutos) diariamente. Además, se define el periodo solar como  $S_2=24$  hr. Como las órbitas del Sol y la Luna están inclinadas con respecto al plano del ecuador, las fuerzas generadoras de mareas tienen componentes diurnas y semi-diurna.

Los diferentes tipos de mareas se explican en la figura 3-7.

#### 3.5.1.1.1 Semi-diurna

Existen dos pleamar y dos bajamar en un periodo de aproximadamente 25 horas.

#### 3.5.1.1.2 Diurnas

Son de amplitudes no muy grandes y tienen una pleamar y una bajamar por día.

#### 3.5.1.1.3 Mixtas

Mareas de amplitudes habitualmente pequeñas, aunque ocasionalmente fuertes y presentan dos pleamares y dos bajamares por día. Este tipo de mareas presenta una pequeña desigualdad diaria.

#### 3.5.1.1.4 Vivas

Que se presentan cuando los efectos del Sol y la Luna se suman.

#### 3.5.1.1.5 Muertas

Que ocurren cuando los efectos del Sol y la Luna se restan.

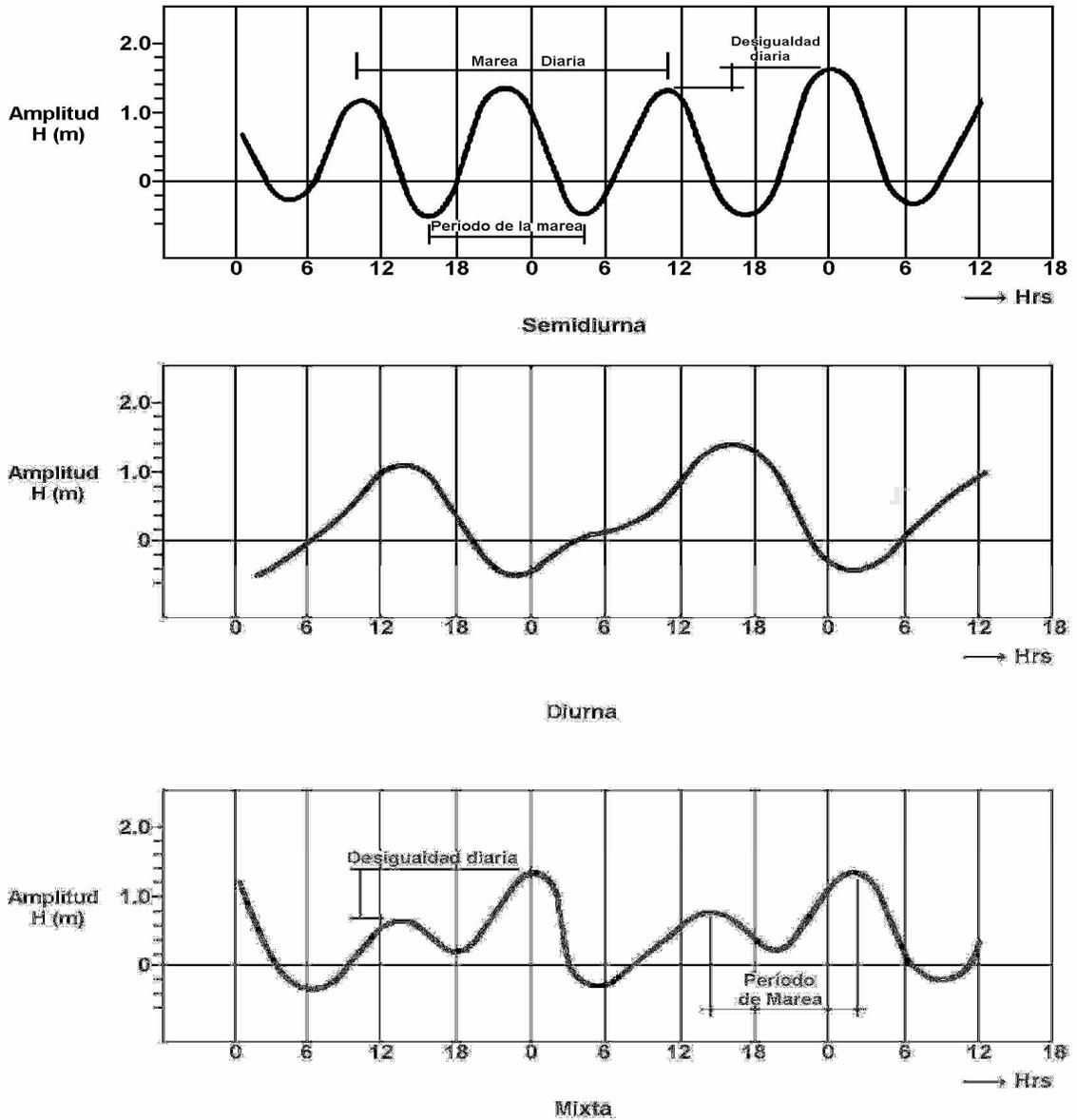
#### 3.5.1.1.6 De perigeo

Se producen cuando la luna se encuentra en el perigeo. La amplitud aumenta a medida que disminuye la distancia Tierra-Luna y su máximo valor se registra 1 a 3 días después que la

luna ha pasado por el perigeo, la amplitud de esta marea es un 20% mayor que la amplitud media del lugar.

**3.5.1.1.7 De sicigias**

Marea que se produce durante luna llena o nueva, la amplitud de la marea aumenta en esta época y es por lo general de un 10 a un 30% mayor que la amplitud media del lugar.



**Figura 3-7: Tipos de mareas**

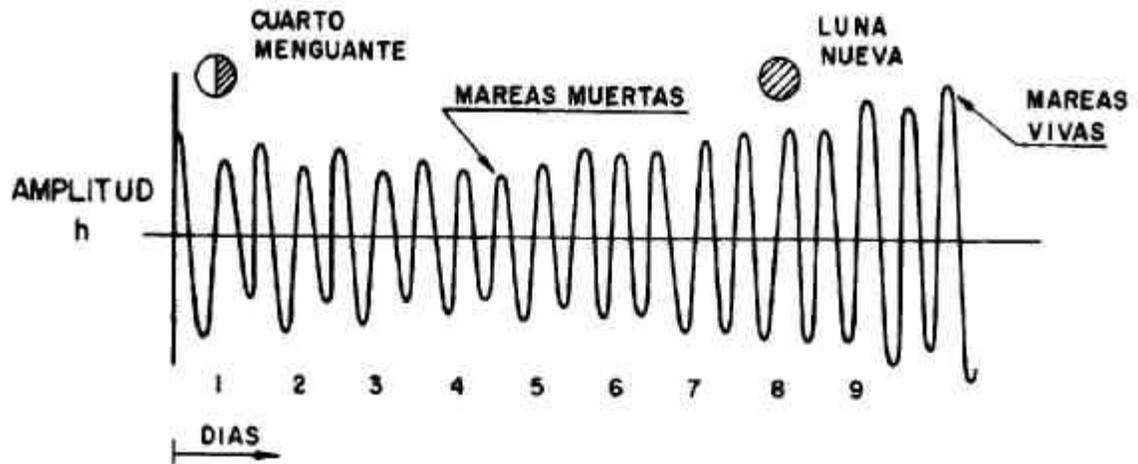


Figura 3-8: Mareas vivas y mareas muertas

### 3.6 Corrientes de ribera, costeras o litorales

Las corrientes oceánicas son flujos persistentes de agua, en la cual la componente predominantemente es horizontal y su importancia radica en su papel como regulador térmico en la superficie terrestre, ya que estos vastos sistemas de corrientes ayudan al intercambio de calor entre las altas y bajas latitudes.

En el dominio de la ribera litoral las corrientes están asociadas a las mareas y el oleaje, generando la deriva y la resaca.

- Resaca es una corriente de reflujos que arrastra consigo una serie de materiales, una vez que la ola rompe en la costa. Los materiales arrastrados se van colocando según su volumen, cuanto más grandes más cerca de la costa y los más finos serán arrastrados al interior. Aparte de este efecto erosivo, se debe tener en cuenta el efecto disolvente sobre las rocas, en el cual el aspecto erosivo, es más intenso cuanto más fuerte sea el oleaje.
- Deriva es una forma de transporte de materiales que se produce a lo largo de la línea de costa. En una situación idealizada en la que las olas se aproximasen a una línea de costa recta, con sus crestas paralelas a esta línea, una determinada ola romperá en el mismo instante en todos los puntos, y la aproximación y el retroceso formaran ángulo recto con la línea de costa. Sin embargo, en la mayoría de las costas, las olas se aproximan en ángulo oblicuo, de esta forma, el avance del agua se desplaza

Oscar Cartes Z.- 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

oblicuamente por la antecosta, arrastrando guijarros y cantos. Cuando el avance del agua ha perdido su energía, ésta fluye hacia abajo siguiendo la ladera de la playa y siendo controlada por la fuerza de la gravedad, que la obliga a seguir la dirección de la máxima pendiente. Por lo tanto, las partículas son arrastradas directamente hacia el mar y van a parar a una posición lateral con respecto a la que se encontraban con anterioridad. Este fenómeno se repite gran número de veces, lo que le convierte en uno de los más importantes que tienen lugar en la evolución de una línea de costa.

Las grandes corrientes oceánicas, causadas por variaciones de composición y temperatura en las aguas o por los vientos dominantes, tienen un papel fundamental para la distribución de corales, hielos marinos y masas de agua con termicidad, salinidad y carga de sedimentos diferenciales; sin embargo, todos ellos son fenómenos que, salvo ambientes específicos, influyen indirectamente sobre la dinámica costera y lo hacen según las aguas propias en cada región, es decir, en función de su latitud, posición y fisonomía del litoral.

### **3.7 Tipos de corrientes**

Las corrientes de marea afectan predominantemente a los estuarios y zonas semi confinadas en la costa; allí donde la morfología resulta propicia, el ascenso-descenso llega a alcanzar velocidades de hasta 4 m/s. En situaciones específicas, como ocurre en ciertos estuarios, el avance de la marea provoca corrientes de ascenso reflejadas por unas ondas de crecida con gran energía, que llegan a afectar al fondo originando roqueríos.

#### **3.7.1 Debidas al oleaje**

Proceden del retorno del agua hacia el mar. Olas que inciden paralelas a la costa dan lugar a corrientes divergentes, con desplazamiento a lo largo de la ribera, junto a otras de retorno formando canales que arrastran el material hacia el dominio marino. Con oleajes en resonancia, interferencia del incidente y reflejado, aparecen modelos más complejos de circulación, aunque similares a los anteriores en su conjunto, éstas son corrientes muy dispersas y divergentes en toda la línea de ribera, por lo cual llegan a constituir un sistema casi permanente de removilización. Finalmente, un oleaje incidente oblicuo consolida unos sistemas de circulación en sentido único predominante el resultado queda de manifiesto por los notables desplazamientos o deriva en los materiales desde una zona a otra de la ribera, donde acaban estabilizándose y desarrollan morfologías características.

Las corrientes provocadas por el oleaje son las siguientes:

- Corrientes normal a la costa
- Corrientes paralela a la costa.

### 3.7.2 Normales a la costa

Este tipo de corrientes se generan por la necesidad de evacuar el volumen de agua sobrante que ha sido empujado y acumulado contra la playa (figura 3-9), este volumen se manifiesta como una sobre elevación del nivel del mar en la zona de rompientes.

### 3.7.3 Resaca

Es el oleaje en resonancia, desfasado  $180^\circ$  del incidente, lo que genera verdaderos ríos encauzados, derrames, y transformación en la zona de rompiente. Son asociadas a un oleaje oblicuo, que ocasionan el desplazamiento unidireccional del flujo y los materiales. Flujo difuso que arranca del estrán, desplazándose próximo al fondo hacia mar adentro a lo largo de prácticamente toda la playa y desaparece a la altura de la línea de rompientes.

### 3.7.4 De retorno

Chorro concentrado que atraviesa la línea de rompientes para luego expandirse.

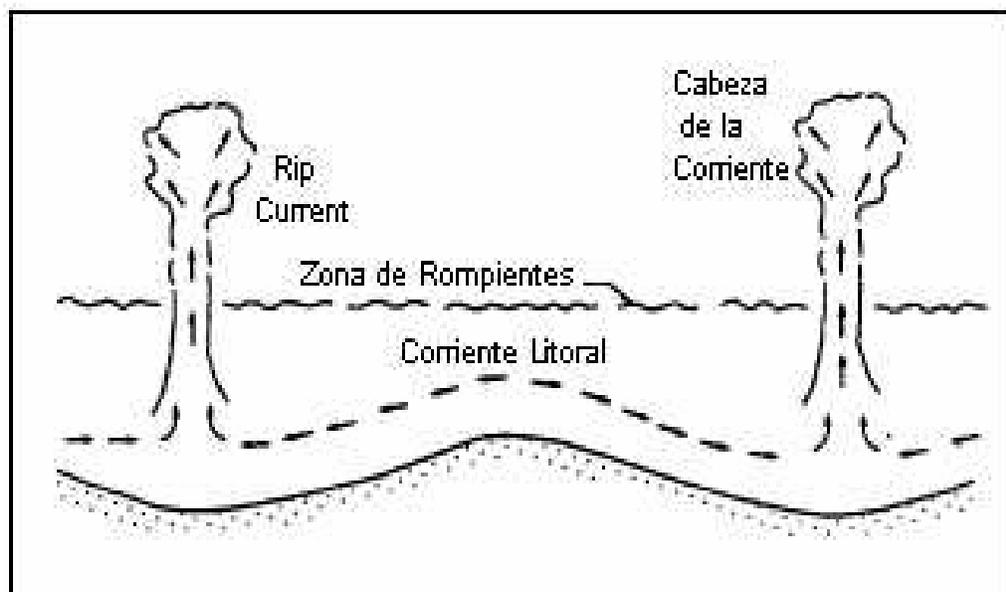


Figura 3-9 Corriente normal a la costa

### 3.7.5 Paralela a la costa

Si el oleaje llega a las costas formando un ángulo significativo ( $\alpha_b$ ) con respecto a la línea de playa, ya sea por la refracción o por la dirección con que viaja, se genera una corriente paralela a la costa ubicada entre la línea de rompientes y la línea de costa (figura 3-10), esta corriente recibe el nombre de corriente litoral.

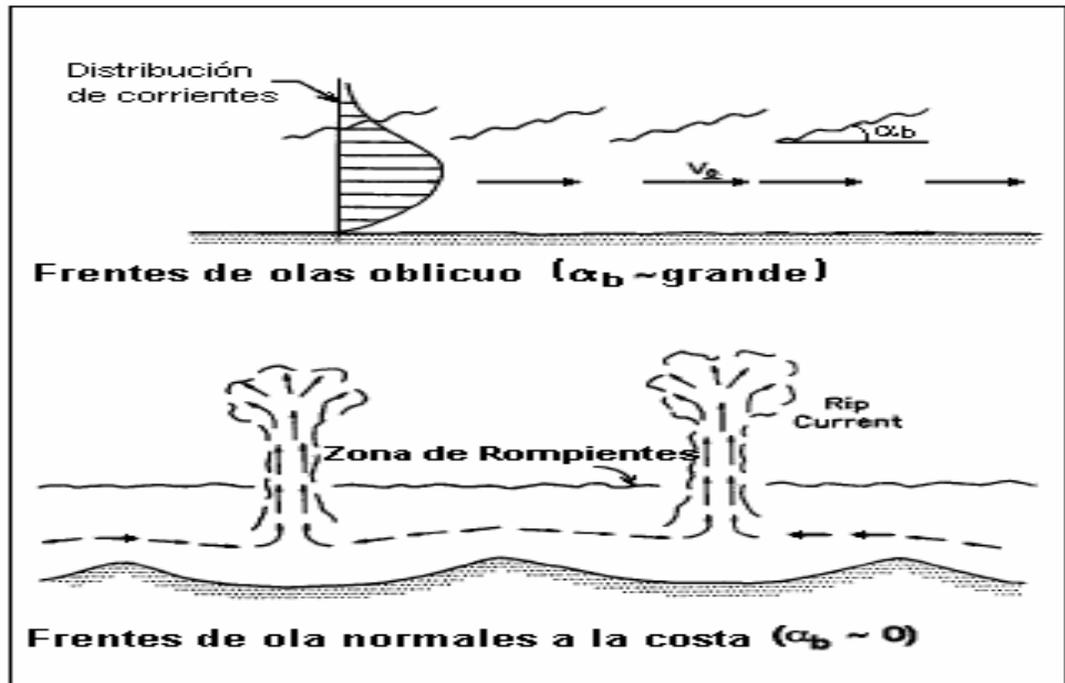


Figura 3-10 Corriente paralela a la costa

Lo más común es que los frentes de olas llegan formando un ángulo pequeño con la línea de costa, en este caso, las corrientes inducidas por el oleaje son una combinación de las anteriores (figura 3-10). Esta corriente es la principal responsable del transporte de sedimentos a lo largo de la playa.

### 3.7.6 Oceánicas

Cercanas a la superficie afectan a los barcos, y la mayoría de la información sobre ellos proviene de los informes de los marinos sobre su deriva con respecto al rumbo deseado. Pese a las diferentes formas que tienen los océanos, poseen estructuras de corrientes similares dominadas por una circulación o giro en el sentido de las agujas del reloj de amplitud oceánica, siendo las corrientes mucho más fuertes en las estrechas regiones cercanas a las fronteras occidentales. La corriente del Golfo en el Atlántico norte y la de Kuro

- Shivo en el Pacífico son las más conocidas. Cerca del Ecuador en todos los océanos hay dos corrientes con dirección Oeste, en los océanos Pacífico, Índico y en parte del Atlántico, están separadas por una contracorriente ecuatorial con dirección Este. En el Océano Antártico no hay una barrera continental continua aunque el estrecho pasaje de Drake puede causar un efecto parecido y la corriente superficial principal fluye en círculo alrededor de la Tierra en la corriente circumpolar antártica, con dirección Este. Los mapas publicados de las corrientes oceánicas superficiales se basan en situaciones promedio, en un caso particular, la corriente puede ser muy distinta, en especial en corrientes como la del Golfo con meandros y vertientes anulares que se arremolinan de forma complicada. Las grandes corrientes superficiales varían con el viento y el tiempo atmosférico, pero pueden considerarse semipermanentes.

Hay algunas corrientes Subsuperficiales de carácter semipermanente. Quizá las más interesantes sean las corrientes inferiores ecuatoriales encontradas en los océanos Atlántico y Pacífico, y de modo esporádico en el Índico, que fluyen desde el Oeste a velocidades superiores a un metro por segundo, a una profundidad de unos 100 m, en el Ecuador. Existen otras corrientes Subsuperficiales semipermanentes donde se forma agua densa en cuencas con umbral poco profundo el agua densa supera este umbral creando una corriente hacia la cuenca oceánica exterior.

Aparte de esto, los conocimientos sobre las corrientes Subsuperficiales son difíciles de comprender porque son muy variables. Por ejemplo, el agua fría originada en el extremo norte del Atlántico o en el mar de Weddell ocupa todas las cuencas profundas del océano, por lo tanto debe de existir una corriente profunda dirigida hacia el Ecuador, pero la ruta que sigue no está bien establecida. Se piensa que en el Atlántico Norte hay una cavidad profunda vertical - meridional con agua que fluye hacia el Sur con temperaturas bajas. No hay una fuente de agua profunda en el Océano Pacífico, y la circulación relativamente lenta tiene lugar, en general, encima de los 800 m, el agua cálida fluye hacia el Norte en Kuro - Shivo y vuelve en el Pacífico Central y Oriental a temperaturas menores. El Océano Índico tampoco tiene formaciones de agua profunda. Se ha observado algo de flujo hacia el polo en forma de corrientes Subsuperficiales en las fronteras occidentales, como contracorrientes bajo la corriente del Golfo a profundidades mayores de 2.000 m. En el resto del Océano las corrientes promedio quedan ocultas por la variabilidad introducida por los remolinos oceánicos de tamaño medio. Se parecen a depresiones y anticiclones meteorológicos, pero son menores y por lo general de unos 100 m, y presentan corrientes del orden de 10 cm./s.

Estas circulaciones suelen durar unos 100 días y sus corrientes variables asociadas ocultan las corrientes medias más pequeñas. Aunque la velocidad media de las corrientes oceánicas profundas es pequeña, éstas transportan grandes cantidades de calor y de agua dulce, siendo por tanto importantes para el mantenimiento del clima.

**Otros tipos e corrientes son:**

- **Corrientes inducidas por el viento**

Se entiende a este tipo de corrientes las generadas por vientos locales.

- **Corrientes por marea**

Corrientes generadas por las desnivelaciones del mar, estas tiene gran importancia en bahías cerradas.

- **Corrientes en la costa producidas por el oleaje**

Estas corrientes son de gran importancia ya que son las que controlan la dinámica litoral, por esto a continuación se explican más detalladamente.

### **3.8 Principios básicos de hidráulica marítima e ingeniería de costas**

El objetivo es describir, analizar y discutir en forma general, los principios básicos de la física natural presente en la hidráulica marítima, para ello es fundamental describir lo siguiente:

#### **3.8.1 Propagación del oleaje**

Un tren de olas que viaja desde aguas profundas hacia la costa, experimenta alteraciones debido a:

- Refracción.
- Difracción.
- Reflexión.
- Rompimiento.

La transformación de las olas en aguas someras comienza cuando éstas, al propagarse hacia la costa, sienten el fondo, es decir, el oleaje modifica sus características debido a la

disminución de profundidad, lo que se puede ver fácilmente con la ecuación de la longitud de onda.

$$L = \frac{gT^2}{2p} * \text{Tangh}\left(\frac{2ph}{L}\right) \quad (3.1)$$

Donde

- g: aceleración de gravedad (m/s)
- T: período del oleaje (s)
- h: profundidad (m)
- L: longitud de onda (m)

### 3.9 Aguas profundas

La condición de contorno para determinar la condición de aguas profundas, aguas bajas o someras, se basa en la relación (h/L), sí este parámetro tiende a infinito se esta en condición de aguas profundas, entonces la tangente hiperbólica de (2πh/L) tomará el valor uno y por lo tanto la longitud de onda sólo depende del periodo de la ola.

$$L = \frac{gT^2}{2p} \quad (3.2)$$

Además, la ecuación de la celeridad es

$$C = \left(\frac{L}{T}\right) \Rightarrow C = \frac{gT}{2p} \quad (3.3)$$

### 3.10 Aguas bajas

Para la condición de aguas bajas o someras, también se basa en la relación (h/L), ahora sí este parámetro tiende a cero se esta en condición de aguas bajas, entonces la tangente hiperbólica de (2πh/L) tomará el valor del ángulo.

Donde la longitud de onda será igual a:

$$L = T\sqrt{gh} \quad (3.4)$$

Además, la ecuación de la celeridad es

$$C = \sqrt{gh} \quad (3.5)$$

En este caso la longitud de onda depende del período y de la profundidad, la celeridad presenta una disminución con respecto a la que tiene en aguas profundas al igual que la longitud de onda.

### 3.11 Refracción

En el cambio que experimenta un frente de olas al propagarse en aguas intermedias debido a la disminución de la celeridad de la onda causada por menores profundidades. El resultado de este proceso es que los frentes de olas se orientan según los veriles de fondo.

Para obtener la altura de ola en un punto, se supone que la energía entre dos ortogonales permanece constante, además, se desprecian los efectos asociados al viento, la turbulencia, las corrientes, reflexión y difracción. Por lo tanto entre las secciones  $B_1$  y  $B_2$  (mostradas en la figura 3-11) se establece la igualdad siguiente:

$$E_{f2}B_2 = E_{f1}B_1 \quad (3.6)$$

Donde  $E_{fi}$  es el flujo de energía asociado a la sección  $i$ .

De la teoría lineal del oleaje el flujo de energía esta dado por la siguiente expresión:

$$E_f = Ec_g = \frac{1}{16} \rho g H^2 \underbrace{c(1 + G)}_{c_g} \quad (3.7)$$

Donde

$$G = \frac{2kh}{\sinh 2kh} \quad (3.8)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.9)$$

$C_g$  = celeridad de grupo (m/s)

$h$  = profundidad (m)

$H$  = altura de la ola (m)

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = aceleración de gravedad ( $m/s^2$ )

De la ecuación 3.2 se obtiene:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \sqrt{\frac{c_1(1+G_1)}{c_2(1+G_2)}} \quad (3.10)$$

Se define el coeficiente de Shoaling como:

$$k_s = \sqrt{\frac{c_1(1+G_1)}{c_2(1+G_2)}} = \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} \quad (3.11)$$

Y el coeficiente de refracción parcial como:

$$k_r = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad (3.12)$$

Por lo tanto

$$H_2 = k_s k_r H_1 \quad (3.13)$$

Además de la refracción causada por el fondo, las olas pueden refractarse por corrientes las que provocan que una parte de la ola se desplace más rápidamente o lentamente.

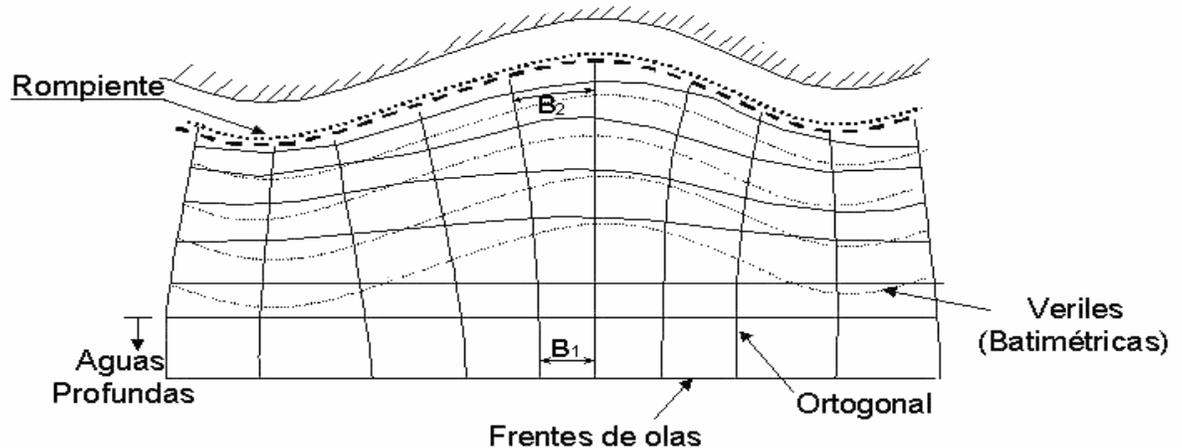


Figura 3-11: Representación idealizada de un diagrama de refracción

### 3.12 Difracción

Es causada por la interrupción parcial del avance de un frente de olas por un obstáculo. Esta interrupción causa un gradiente de energía que es compensado con una disminución del oleaje en la zona de propagación, por lo tanto la altura de ola en un punto es superior a los valores adyacentes, dentro de la misma cresta.

Oscar Cartes Z. – 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

La interrupción parcial se debe a algún obstáculo los que pueden ser naturales (islas) o artificial (Rompeolas).

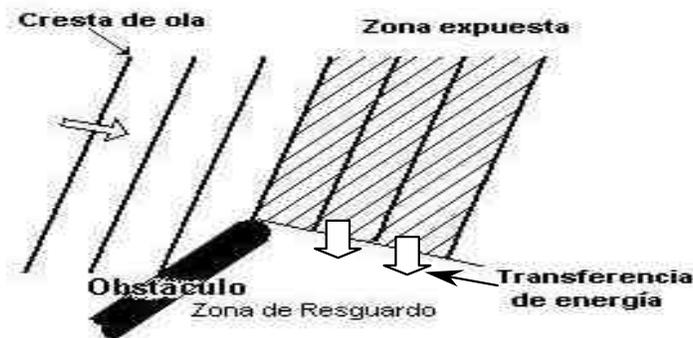
La difracción es un fenómeno similar al de difracción de la luz, si tenemos crestas de oleaje paralelas a una obra, en la zona de sombra creada por la obra aparece un oleaje difractado. Sin embargo, el cálculo es distinto de los cálculos de difracción con luz, porque las longitudes de onda son del mismo orden que las bocas de los puertos.

La relación que existe entre la altura difractada  $H_d$  (m) y la altura de ola incidente  $H_i$  (m) se denomina coeficiente de difracción y está dada por la siguiente relación.

$$K_d = \frac{H_d}{H_i} \quad (3.14)$$

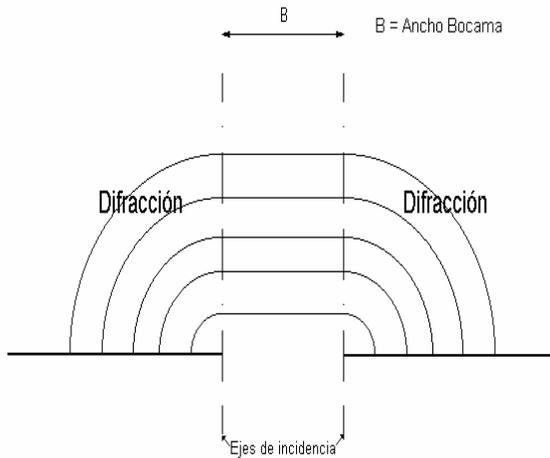
El  $K_d$  puede calcularse teóricamente aunque en la práctica se recurre a gráficos

Las figuras siguientes muestran el fenómeno de difracción para diques y aberturas o accesos a canales o puertos (bocana).

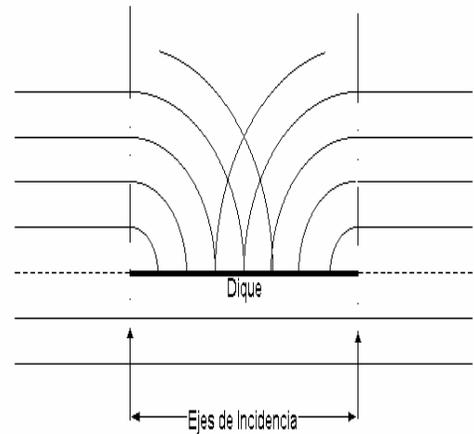


**Figura 3-12: Difracción del oleaje**

En general las olas se curvan alrededor del obstáculo penetrando en la zona protegida (expansión lateral).



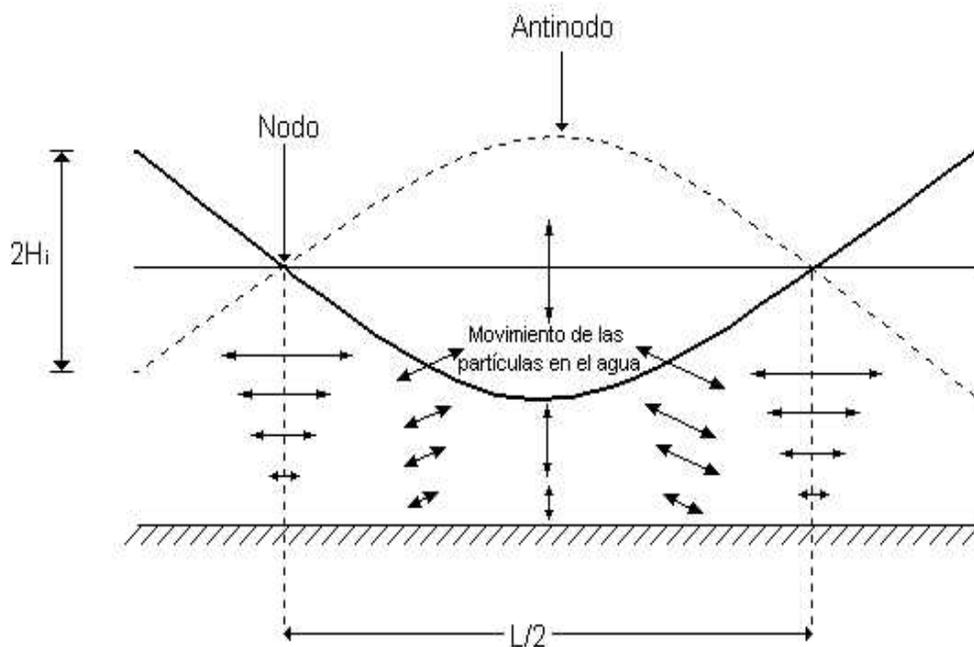
**Figura 3-13: Difracción a través de una bocana**



**Figura 3-14: Difracción detrás de un dique aislado**

### 3.13 Reflexión

Cuando un tren de olas enfrenta un obstáculo, parte de la energía se refleja, si el obstáculo está paralelo al obstáculo y este es vertical, sin fricción (liso) y rígido (inelástico) la ola puede reflejarse completamente, resultando un oleaje estacionario con un antinodo igual al doble de la altura de la ola.



**Figura 3-15: Reflexión**

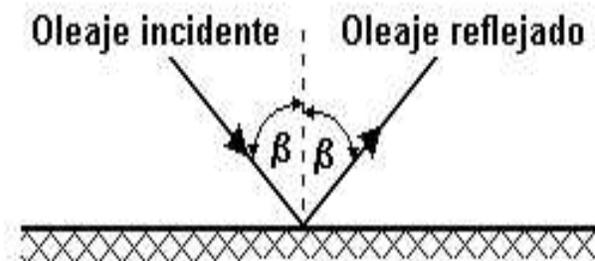
El clapotis se forma por la sobreposición de dos ondas progresivas de igual altura y período que avanza en sentido contrario, esta onda estacionaria tiene la característica de que duplica la altura de ola incidente. En este tipo de reflexión, el período se mantiene constante y los desfases son pequeños, pero la altura si puede cambiar. La cantidad de energía que es reflejada por un obstáculo está dada por el coeficiente de reflexión  $K_r$ .

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (3.15)$$

Donde  $H_r$ : Altura de ola reflejada (m)

$H_i$ : Altura de ola incidente (m)

Si el oleaje no incide normalmente sobre un obstáculo, este será reflejado con un ángulo igual al de incidencia.



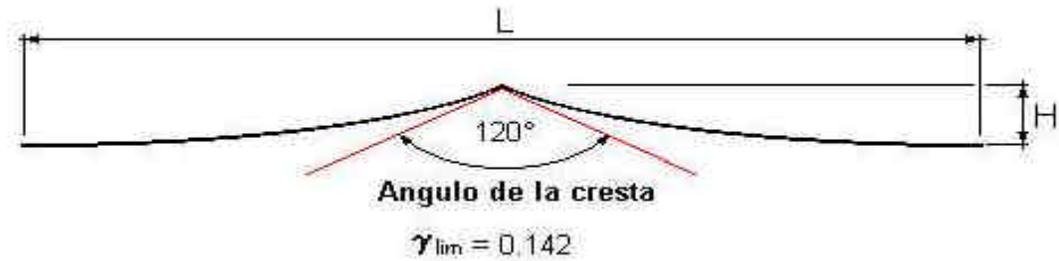
**Figura 3-16: Reflexión del oleaje**

### 3.14 Rompimiento

Este fenómeno es de gran importancia en la hidrodinámica en la zona cercana a la costa y en el transporte de sedimentos que opera dentro de ella. La rotura de una ola puede ser causada por un aumento de la esbeltez o a la disminución de la profundidad.

### 3.15 Esbeltez

Cuando la ola alcanza un valor máximo en su esbeltez ( $\gamma_{lim}=0.142$ ), la ola empezará el proceso de rompimiento, disipando parte de su energía. Esto se debe a que la velocidad de las partículas en la cresta se iguala con la celeridad de la ola y un aumento de la esbeltez aumenta la velocidad de las partículas provocando la inestabilidad de la ola.



**Figura 3-17: límite de esbeltez de la ola**

Para la condición de aguas intermedias la relación de esbeltez se determina por ecuaciones semi-empíricas.

$$\frac{H_b}{L_b} \cong 0,142 \operatorname{tgh} \left( \frac{2pd_b}{L_b} \right) \quad (3.16)$$

Donde  $H_b$ : altura de ola en la rompiente (m)  
 $L_b$ : longitud de onda en la rompiente (m)  
 $d_b$ : Profundidad en la rompiente (m)

Para el caso de aguas pocos profundas y con pendiente suave se tiene que

$$\frac{H_b}{L_b} \cong 0,142 \left( \frac{2pd_b}{L_b} \right) \quad (3.17)$$

$$\frac{H_b}{d_b} = 0,898 \quad (3.18)$$

Lo anterior implica que la altura de la rompiente es aproximadamente 90% de la profundidad en ese punto.

En general la ola rompe por efecto de la profundidad del fondo. Cuando el oleaje llega a la costa, sus características varían, a medida que la profundidad disminuye. Las órbitas descritas por las partículas fluidas se transforman en elipses, cuyo eje menor disminuye progresivamente; luego, estas elipses se aplanan cada vez más y tienden a convertirse en rectilíneas. Como el fondo actúa de freno para los movimientos de las partículas fluidas, al ponerse éstas en contacto con él, la parte superior de la ola se propaga a una velocidad mayor que la parte inferior. De este modo, las crestas se hacen agudas, y la curvatura

aumenta; pero como no puede rebasar un valor máximo, la cresta vuelca sobre sí misma, rompiendo la ola.

### **3.16 Transporte en el ambiente marino**

Desgraciadamente, el agua en la mayoría de los sistemas marinos no es ideal ni inmóvil. Los resultados de los modelos varían de un ambiente a otro. En estuarios, dominan las corrientes generadas por mareas unidireccionales en cualquier momento, estas corrientes se invierten con cada cambio de la marea. El transporte neto en un sistema mareal, el cual refleja las fuerzas relativas del mar v/s las corrientes de tierra. Una vez que se desplaza fuera la protección del estuario, al movimiento de la ola se suma el efecto de corrientes de la marea y el transporte neto es el resultado de varias combinaciones de flujo unidireccional y oscilatorio.

El movimiento orbital de olas da paso a un flujo oscilatorio que disminuye exponencialmente en su magnitud de la superficie de agua hacia el fondo. A una profundidad de agua igual a la mitad de la longitud de la ola, las órbitas empiezan a actuar recíprocamente con el fondo. El movimiento orbital aumenta, generando una trayectoria elíptica hacia el fondo hasta que el movimiento se transforma en oscilaciones cada vez más energéticas la cual es transferida a la cama de sedimentos a baja profundidad de agua.

La profundidad de agua a la que el sedimento será movido por las olas es una función de tamaño de la partícula y el régimen de la ola. Estudios indican que la cantidad total de transporte del sedimento durante una sola tormenta puede ser mucho mayor que el total para el resto del año.

El régimen de transporte de un ambiente particular es una función de los procesos físicos, biológicos y gravitatorios que operan en esa área. En muchos casos, el transporte del sedimento es controlado por una combinación de estos factores.

#### **3.16.1 Transporte litoral**

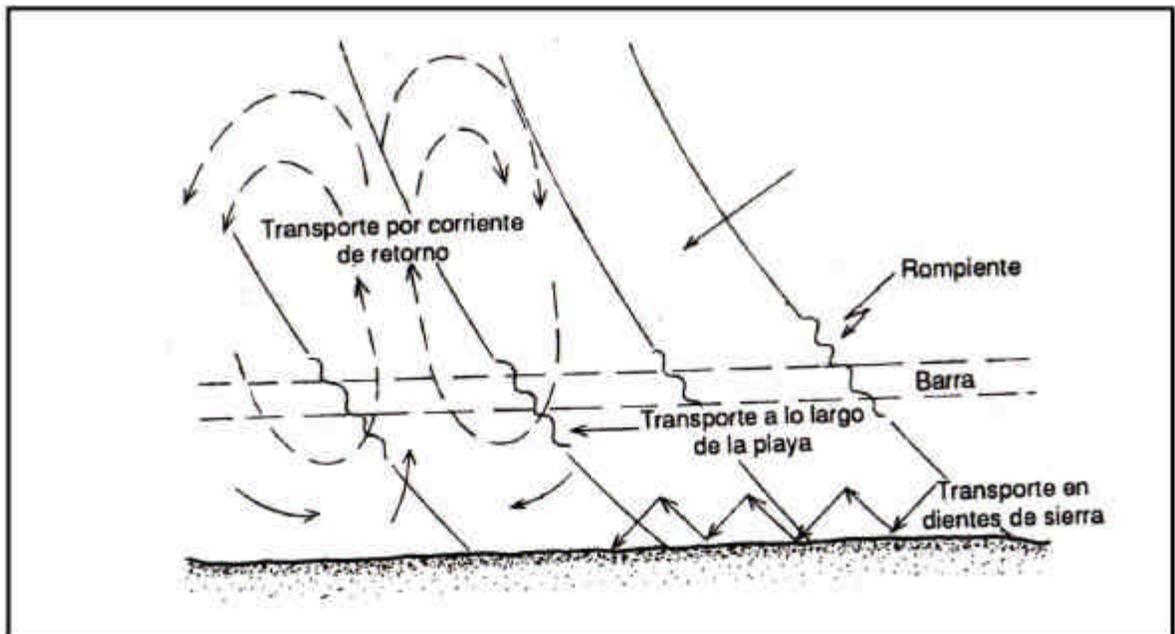
Cuando el oleaje se acerca a la costa y rompe, genera corrientes en la zona litoral que combinada con la acción directa del oleaje transporta sedimentos, es decir, el transporte litoral, es el movimiento de material sedimentario producido esencialmente por el efecto de las olas y corrientes, en la zona litoral que se extiende desde la línea de costa hasta poco

más allá de la línea rompiente, el transporte de sedimentos se mueve a lo largo del lecho rodando por el fondo y siendo levantado por la columna de agua y movido por el fluido como carga suspendida.

Lo anterior quiere decir que las corrientes en la zona cercana a la costa dan la dirección del movimiento de los sedimentos y transforman el perfil transversal de la playa.

El transporte de sedimentos se clasifica en (ver figura 3-18).

- Transporte transversal causado por las corrientes normales a la costa
- Transporte longitudinal causado por las corrientes paralelas a la costa



**Figura 3-18: Transporte de sedimentos por oleaje a lo largo de una playa**

## CAPITULO IV

### 4. MODELOS DE TRANSPORTE Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

#### 4.1 Introducción

El análisis del transporte y la dispersión de contaminantes se enfocará desde **dos puntos** de vistas, **el primero** se llevará a cabo por medio del **supuesto de un dragado de una bahía para cumplir con normas de navegación o seguridad de buques** en la ruta de aproximación al puerto, en este tipo de supuesto nos encontraremos con sedimentos cohesivos y no cohesivos (fondo marino), prevaleciendo lo no cohesivos y en el **segundo caso** se analizará por medio de la **presencia de emisarios submarinos o descargas de aguas residuales de superficie**, en el caso particular de la bahía de Valparaíso antes de la descarga del emisario ubicado en el sector de Loma Larga, existe una planta de pretratamiento la cual cuenta con desarenadores, lo que permite retirar gran parte del material no cohesivo prevaleciendo los sedimentos cohesivos (más finos).

En el caso de la extracción de arenas para su aprovechamiento, al utilizar cualquier método de dragado, es práctica habitual provocar el rebalse del agua que se bombea junto con el sedimento. Si el yacimiento de arenas se encuentra próximo a alguna zona de especial valor pesquero o ecológico, la sedimentación masiva de estos sólidos en suspensión puede resultar muy perjudicial, lo mismo ocurre con las descargas de residuos líquidos al mar o descargas de emisarios submarinos. La determinación de la distancia de resguardo que debe mantenerse para proteger estas zonas puede hacerse mediante la aplicación de modelos de transporte y dispersión que tengan en cuenta las condiciones hidrográficas e hidrodinámicas de la zona además de las propiedades de los propios sedimentos que se están descargando o extrayendo. Aunque tradicionalmente se ha considerado que las aguas de un puerto son de pésima calidad y susceptibles de recibir directamente aguas residuales sin tratar, a veces incluso ajenas al puerto, durante las últimas décadas está cambiando la percepción del problema.

Por otra parte, la normativa ambiental de muchos países prohíbe el vertido al mar de aguas residuales si no se cumplen ciertas condiciones de calidad del efluente y de dilución inicial, lo que obliga al empleo de emisarios submarinos.

Cuando se produce un vertido contaminante en una zona semi cerrada como una dársena portuaria, una laguna conectada con el mar o un estuario, la evolución de la contaminación depende mucho del grado de renovación de aguas que se produzca a través del ancho de la boca de entrada de las aguas. En muchos casos, las concentraciones en el interior de la zona semi encerrada son bastante homogéneas de forma que el problema puede estudiarse como si se tratara de una celda de mezcla completa.

Si el episodio de contaminación es transitorio como en el caso de un derrame accidental de petróleo durante una operación de carga o descarga de un buque, el problema que suele plantearse es calcular cómo irá desapareciendo la contaminación con el paso del tiempo. Si el vertido es más o menos permanente como sucede a veces en dársenas pesqueras donde se arrojan al agua restos de pescado y se limpian las cubiertas en el propio atraque, las concentraciones de contaminantes alcanzarán unos valores casi permanentes que dependerán del grado de renovación de las aguas por la bocana. El problema es entonces calcular estas concentraciones.

Los modelos de transporte y dispersión sirven también para calcular la distribución de salinidad en estuarios. Las distribuciones de salinidad influyen sobre la explotación de los puertos situados en estuarios, no solo porque afecta a la flotabilidad de los buques, sino porque determinan en muchos casos los patrones de ingreso del flujo salino tierra adentro o aterramiento. Por ejemplo, en estuarios de cuña salina se produce una acumulación de sedimentos donde corta al fondo la interfase entre aguas dulces y saladas. Cuando existe un canal de acceso, la cuña salina puede ocupar la zona más profunda del canal, con lo que el aterramiento puede alcanzar distancias importantes hacia aguas arriba.

## 4.2 Ecuación De Transporte

La ecuación de balance de una sustancia cualquiera transportada por el agua (nutrientes, bacterias, oxígeno disuelto, calor, especies químicas, etc.) suele llamarse ecuación del transporte y puede escribirse en la forma

$$\frac{D}{Dt} \int_V P dv = - \oint_j p^* n dA + \int_V \Pi dv \quad (4.1)$$

Siendo:

$\psi$ , el volumen encerrado por una superficie fluida cerrada ideal  $\phi$ .

$\frac{D}{Dt}$ , la derivada total

$P$ , la densidad volumétrica de la sustancia o propiedad  $\pi$  considerada

$p$ , la densidad de flujo no convectivo de la sustancia  $\pi$

$\Pi$ , la velocidad o tasa de cambio de una propiedad de una sustancia  $\pi$  en una unidad de volumen de control.

Esta ecuación expresa que la velocidad de aumento de la cantidad total de sustancia que se encuentra dentro de la superficie fluida  $\phi$ , es igual en cada momento al flujo másico neto no convectivo de dicha sustancia que entra a través de esta superficie más la cantidad de sustancia que se genera por unidad de tiempo en su interior.

Desarrollando la derivada total, tras hacer algunas transformaciones, se obtiene la ecuación integral euleriana para densidades volumétricas.

$$\int_y \frac{\partial P}{\partial t} = - \oint_j PV^* ndA - \oint_j p^* ndA + \int_j \Pi dv \quad (4.2)$$

Teniendo en cuenta la ley de conservación de la masa:

$$\frac{D}{Dt} \int_y P dv = \frac{D}{Dt} \int_y \mathbf{r} P dv = \frac{D}{Dt} \int_y P dm = \int_y \frac{DP}{Dt} + P \frac{D(dm)}{Dt} = \int_y \frac{DP}{Dt} dm = \int_y \mathbf{r} \frac{DP}{Dt} dv \quad (4.3)$$

Sí se analizan las consecuencias en una dársena pesquera, estas serían, la producción de eutroficación de las aguas, un crecimiento desmesurado de algas que enturbiarían el agua, produciéndose malos olores, y además provocaría adherencias en los cascos de las embarcaciones de crustáceos, lo cual debe ser considerado en los modelos numéricos.

De la ecuación 4.3, se desprende la ecuación integral lagrangiana para densidades másicas:

$$\int_y \mathbf{r} \frac{DP}{Dt} dv = - \oint_j p^* ndA + \int_y \Pi dv \quad (4.4)$$

Siendo  $P$  la densidad másica de sustancia y  $\Pi$ , la tasa de cambio con respecto al tiempo por unidad de masa. Las integrales de superficie que aparecen en las expresiones anteriores representan flujos de los campos vectoriales  $p$  y  $PV$  respectivamente.

El teorema de la divergencia establece que es posible sustituir dichas integrales de superficie por integrales de volumen de la divergencia de estos campos vectoriales.

Por lo tanto, las dos ecuaciones anteriores sólo contienen integrales de volumen. A partir de ellas, por simple igualación de sus integrandos obtenemos la ecuación diferencial euleriana para densidades volumétricas:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\text{div}(PV) - \text{div}(p) + \Pi \quad (4.5)$$

y la ecuación diferencial lagrangiana para densidades másicas:

$$\mathbf{r} \frac{DP}{Dt} = -\text{div}p + \mathbf{r} \Pi \quad (4.6)$$

#### 4.2.1 Análisis de términos

En sus aplicaciones, los problemas de transporte y dispersión suelen plantearse de forma que el objetivo es calcular la variación de la densidad volumétrica  $P$  (o la densidad másica  $\rho$ ) en el espacio y en el tiempo. Para ello deben integrarse las ecuaciones anteriores complementadas con las correspondientes condiciones iniciales y de contorno. Pero para ello es necesario conocer las restantes variables que aparecen en las ecuaciones.

El campo de velocidades ( $\mathbf{v}$ ) puede determinarse de diferentes formas

- Medición directa de las velocidades en una serie de puntos del dominio de estudio en interpolación para los restantes.
- Uso de alguna expresión analítica que reproduzca de forma aceptable la distribución real de velocidades. Con mucha frecuencia se adopta una velocidad constante y

uniforme para ríos y corrientes marinas, o uniforme y de variación senoidal con el tiempo para corrientes de marea.

- Resolución analítica del sistema de ecuaciones formado por la ecuación de continuidad y la de balance de la cantidad de movimiento con condiciones iniciales y de contorno muy simplificadas.
- Resolución numérica de dicho sistema de ecuaciones antes de la integración de la ecuación del transporte.
- Resolución numérica de dicho sistema de ecuaciones integrando simultáneamente la ecuación del transporte. Lo anterior es indispensable cuando lo que se transporta modifica significativamente la densidad del medio, influyendo de esta forma en su movimiento.

Para la densidad de flujo no convectivo, prácticamente siempre se adopta la suposición de validez la ley de Fick de la difusión:

$$p = -\mathbf{r} * D * \text{grad}P \quad (4.7)$$

Siendo D el coeficiente de difusión luego, la ecuación diferencial lagrangiana se convierte en:

$$\mathbf{r} \frac{DP}{Dt} = \text{div}(\mathbf{r} * D * \text{grad}P) + \mathbf{r} \Pi \quad (4.8)$$

Para el típico caso en que el fluido pueda considerarse homogéneo, tanto D como p son constantes, con lo que la ecuación anterior arroja como resultado:

$$\frac{DP}{Dt} = D \nabla^2 P + \Pi \quad (4.9)$$

o bien, multiplicando toda la ecuación por  $\rho$  y desarrollando la derivada total:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V * grad(P) = D \nabla^2 P + \Pi \quad (4.10)$$

En este caso, la ecuación diferencial euleriana se escribe:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -div(PV) + D \nabla^2 P + \Pi \quad (4.11)$$

**Ambas ecuaciones son matemáticamente equivalentes debido a que, la ecuación de continuidad, al suponer que la densidad es constante, resulta  $\text{div } \mathbf{V} = 0$ .** Sin embargo, desde el punto de vista de su integración numérica existe una diferencia esencial entre ambas:

Cuando se discretizan, la ecuación euleriana satisface exactamente la condición de conservación de la masa mientras que la ecuación lagrangiana da lugar a un pequeño residuo que puede ser importante sí el número de operaciones aritméticas del algoritmo de cálculo es muy elevado.

Si el fluido no se mueve y no existe generación de sustancia, las ecuaciones anteriores se simplifican, obteniéndose en ambos casos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \nabla^2 P \quad (4.12)$$

Esta ecuación se conoce en las Ciencias Exactas como ecuación de la difusión.

El término  $\Pi$  da cuenta de las fuentes y sumideros de la sustancia o propiedad  $\pi$ . Puede ser una función del tiempo y/o del espacio, por ejemplo, cuando representa vertidos artificiales de caudal y concentración conocidos, puntuales o distribuidos, pero lo más frecuente es que sea una función sencilla de la variable dependiente  $P$ . Por ejemplo, cuando se estudia una contaminación bacteriológica se supone que las condiciones adversas del medio producen una tasa de inactivación proporcional al número de individuos que hay en un volumen dado, lo que equivale a suponer:

$$\Pi = -IP \quad (4.13)$$

Siendo  $p$  la concentración de bacterias por unidad de volumen. Una expresión similar se ajusta con asombrosa precisión al proceso de desintegración de isótopos radiactivos. También se usa para representar la velocidad de neutralización de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o la velocidad de conversión del amonio en nitrito y de nitrito en nitrato.

A veces se emplea una expresión ligeramente diferente:

$$\Pi = I * (P_0 - P) \quad (4.14)$$

Un ejemplo lo constituye el estudio del oxígeno disuelto, en el que  $P_0$  representaría la concentración de saturación y  $\Pi$  sería el paso de oxígeno del aire al agua. Otro ejemplo es el transporte de calor, en el que  $P_0$  representaría la temperatura de equilibrio para las condiciones existentes en cada momento.

Otras funciones más complejas que se emplean en determinados casos de reacciones químicas o procesos biológicos son:

$$\Pi = I * P^2 \quad (4.15)$$

$$\Pi = \frac{I * P}{(k + P)} \quad (4.16)$$

$$\Pi = I * P_0 * P_b \quad (4.17)$$

Donde  $P_0$  y  $P_b$  son concentraciones de dos sustancias cuya evolución se supone que se está estudiando simultáneamente con una ecuación de transporte para cada una de ellas.

### 4.3 Difusión turbulenta

Si en un flujo turbulento, se descompone la velocidad  $V$  y la concentración  $P$  como suma de su valor medio durante un periodo representativo de las oscilaciones turbulentas (unos cinco minutos en geohidrodinámica) y de la desviación respecto a dicho valor medio

$$V = \bar{V} + V' \quad (4.18)$$

$$P = \bar{P} + P' \quad (4.19)$$

Al sustituir en la ecuación euleriana del transporte y tomar valores medios se obtiene

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} = -div(\bar{P}\bar{V}) - div(\bar{P}'\bar{V}') + div p \quad (4.20)$$

Esta ecuación es formalmente idéntica a la anterior salvo por el segundo término del lado derecho, que representa el transporte turbulento. Dado que éste es siempre mucho más intenso que el transporte por difusión molecular, suele despreciarse el tercer sumando. Además, para poder calcular la distribución de concentraciones medias  $P$  es necesario expresar la densidad de flujo turbulento  $P'V'$  en función de las variables medias de forma que el planteamiento del problema quede cerrado. El procedimiento más común consiste en adoptar una hipótesis similar a la Ley de Fick, y suponer que existe una proporcionalidad entre la densidad de flujo turbulento y el gradiente de concentraciones medias. Sin embargo, mientras que el proceso de difusión molecular era isótropo, la difusión turbulenta puede no serlo ya que depende de las características del campo de turbulencia. Como compensación, la difusión turbulenta no depende del tipo de sustancia que se está considerando ya que, al tratarse de un flujo convectivo, todas ellas son igualmente transportadas por el flujo. Por ello, en un caso general deberemos suponer una relación del tipo.

$$\bar{P}'\bar{V}' = \epsilon * grad(P) \quad (4.21)$$

Siendo  $\epsilon$  un tensor simétrico de segundo orden, que al multiplicarlo por el vector  $grad(P)$ , da como resultado el vector densidad de flujo turbulento, que generalmente tendrá una dirección distinta de la del  $grad(P)$ . Las componentes del tensor  $\epsilon$  se denominan

Oscar Cartes Z. – 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

coeficientes de difusión turbulenta. Al ser simétrico  $\varepsilon$ , posee tres direcciones ortogonales respecto a las cuales el tensor viene expresado mediante una matriz diagonal. Para flujos en ríos y estuarios, dado que la estructura del flujo tiene como dirección preferente la del eje  $x$  y que los gradientes de velocidad respecto a la dirección vertical son muy intensos, parece razonable suponer que sean estas direcciones más la perpendicular a ellas (la horizontal transversal a la corriente) las direcciones principales del tensor. Para flujos en el mar litoral, las corrientes suelen ir en dirección paralela a la costa, por lo que ésta se toma como eje  $x$ . Tomando estos como ejes  $x, y, z$  la ecuación del balance puede expresarse como.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}P)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}P)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}P)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathbf{e}_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathbf{e}_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mathbf{e}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (4.22)$$

Siendo  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ , los coeficientes de difusión turbulenta en cada una de esas direcciones.

#### 4.4 Planteamiento intermareal

Por ser las mareas un fenómeno cuasi - periódico, los desplazamientos netos producidos por éstas son muy pequeños (especialmente para periodos de 2, 28 o 56 ciclos) comparados con los producidos por otras causas como por ejemplo, el caudal de agua dulce en un estuario o las corrientes de densidad o de viento en el mar litoral. Para sustancias muy conservativas, como por ejemplo, la sal o los contaminantes más peligrosos, el interés se centra sobre todo en la evolución de períodos de tiempo mucho mayores que la duración de un ciclo de marea. Por ello se suele suponer en estos casos que la acción de las mareas se reduce a un reforzamiento de la dispersión horizontal y a una traslación periódica de las concentraciones, el cual es fácilmente calculable mediante consideraciones de volúmenes almacenados en el caso de un estuario o conociendo las elipses de marea en el caso del mar litoral. El problema transitorio intermareal para un estuario se plantea entonces de forma análoga al de un río, pero con secciones transversales y coeficientes de dispersión mucho mayor de lo normal.

Para obtener una ecuación aplicable al régimen intermareal de un estuario existen varios procedimientos que llevan a resultados similares pero no idénticos. Unos se basan en considerar sólo situaciones de bajamar o sólo situaciones de pleamar, preferentemente, cada dos ciclos de marea. Otros emplean un sistema de coordenadas auxiliar  $x'$  que está relacionado con  $x$  por la condición de que aguas arriba de  $x'$  existe siempre el mismo

volumen almacenado, de esta forma, cada valor de  $x'$  representa una sección transversal que se traslada hacia arriba y hacia abajo de acuerdo con las oscilaciones de la marea. Finalmente, otros se basan en la integración con respecto al tiempo de la ecuación durante un período de tiempo  $T$  igual a la duración de un ciclo de marea.

Siguiendo, por ejemplo, este último procedimiento, se llega a:

$$\frac{\partial(A_T C_T)}{\partial t} + \frac{\partial(A_T C_T U_e)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_T E_{xT} \frac{\partial C_T}{\partial x} \right) \quad (4.23)$$

$$U_e = U_T + \frac{[A_T' U_T']}{A_T} \quad (4.24)$$

$$E_{xT} \frac{\partial C_T}{\partial x} = \left[ E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] - [C_T' U_T'] \quad (4.25)$$

y donde  $A_T$ ,  $C_T$ ,  $U_T$  y  $A_T'$ ,  $C_T'$ ,  $U_T'$  son promedios y desviaciones respectivamente. El corchete representa el promedio. Por ejemplo:

$$U_T = [U] = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U dt \quad (4.26)$$

El coeficiente  $E_{xT}$  suele ser al menos un orden de magnitud mayor que  $E_x$ , porque tiene en cuenta además la dispersión debida a la correlación entre las desviaciones de la concentración y de la velocidad con respecto a los valores medios intermareales.

En el caso del mar litoral se llega a una ecuación análoga:

$$\frac{\partial(h_T C_T)}{\partial t} + \frac{\partial(h_T C_T U_T)}{\partial x} + \frac{\partial(h_T C_T V_T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h_T E_{xT} \frac{\partial C_T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h_T E_{yT} \frac{\partial C_T}{\partial y} \right) \quad (4.27)$$

Lo donde el subíndice  $T$  significa ahora promedio respecto a la vertical.

Es fácil comprobar que si pueden suponerse constantes los valores de las variables geométricas ( $h$ ,  $A$ ,  $h_T$ ) e hidrodinámicas ( $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, U, V, U_e, V_e)$ ) así como los parámetros de

difusión turbulenta  $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$  y de dispersión  $(E_x, E_y, E_{xT}, E_{yT})$ , todas estas ecuaciones son matemáticamente idénticas a la ecuación del transporte:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + VgradP = D\nabla^2 P + \Pi \quad (4.28)$$

o a su equivalente euleriana

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -div(PV) + D\nabla^2 P + \Pi \quad (4.29)$$

Donde los operadores gradiente, divergencia y laplaciano deben expresarse en una, dos o tres dimensiones según el caso.

Si los coeficientes de difusión turbulenta o de dispersión son diferentes para cada coordenada, un sencillo cambio de variables independientes convierte la ecuación en otra con iguales coeficientes que ya responde a este tipo. Por ejemplo, si se tiene

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mathbf{e}_x \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathbf{e}_y \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mathbf{e}_z \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \right) \quad (4.30)$$

El cambio  $x' = x \sqrt{\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{e}_x}}$ ,  $y' = y \sqrt{\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{e}_y}}$ ,  $z' = z \sqrt{\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{e}_z}}$  la convierte en

$$\mathbf{e} \left( \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial z'^2} \right) = \mathbf{e} \nabla'^2 \bar{P} \quad (4.31)$$

Es posible obtener familias de soluciones analíticas de estas ecuaciones para determinados tipos de condiciones iniciales y de contorno. Además, si éstas son sencillas, las soluciones son muy manejables y fáciles de programar en una calculadora de manual o en una planilla de cálculo.

La ventaja de poder disponer rápidamente de soluciones aproximadas, incluso de familias de éstas para distintos valores de los parámetros, hace muy aconsejable que se intente siempre como paso previo a la resolución de cualquier problema concreto, simplificar las condiciones para poder obtener alguna solución analítica. De esta forma se consigue además tener una

solución que, aunque aproximada, es muy confiable, lo que permitirá detectar posibles resultados erróneos suministrados por modelos numéricos inapropiados o incorrectamente utilizados, caso que, por desgracia resulta bastante frecuente.

## 4.5 Soluciones analíticas de la ecuación de transporte de masa

### 4.5.1 Difusión

La ecuación de la difusión es  $\frac{\partial P}{\partial t} = D\nabla^2 P$ , cuya expresión desarrollada en una, dos y tres dimensiones es, respectivamente:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (4.34)$$

Las situaciones reales en las que son de aplicación directa estas ecuaciones son escasas, ya que se supone que no existe transporte convectivo, es decir que el campo de velocidades es nulo. Son aplicables cuando se considera que representan condiciones medias para largos intervalos de tiempo, como por ejemplo, en el estudio de vertidos de sustancias muy persistentes en medios sujetos a corrientes de marea con transporte neto despreciable cuando se hace un planteamiento intermareal.

### 4.5.2 Tridimensional

El tratamiento de la ecuación del transporte tridimensional

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (4.35)$$

Es completamente análogo a la correspondiente ecuación bidimensional. Los cambios de variables  $x' = x - \int u(t)dt$ ,  $y' = y - \int v(t)dt$ ,  $z' = z - \int w(t)dt$  la convierten en la ecuación

de la difusión y pueden utilizarse todas las soluciones de ésta sin más que deshacer después el cambio.

El caso de vertido constante  $\dot{M}$  en el origen de coordenadas con velocidad constante en la dirección del eje x ( $v=0$ ) y con los tres coeficientes de difusión iguales a D tiene como solución en régimen permanente la expresión.

$$P(x, y, z) = \frac{\dot{M}}{4\rho Dx} \exp\left\{-\frac{u}{2D}(y-x)\right\} \quad (4.36)$$

Siendo  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

Para grandes valores de r las concentraciones son despreciables excepto cerca del eje x. Entonces se obtiene

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x \sqrt{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2 + \left(\frac{z}{x}\right)^2} \approx x \left(1 + \frac{y^2 + z^2}{2x^2}\right) \quad (4.37)$$

que sustituido en la expresión anterior lleva a

$$P(x, y, z) = \frac{\dot{M}}{4\rho Dx} \exp\left\{-\frac{(y^2 + z^2)u}{4Dx}\right\} \quad (4.38)$$

Siendo este resultado solución de la ecuación

$$u \frac{\partial P}{\partial x} = D \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (4.39)$$

Ecuación que se obtiene de despejar la difusión en el sentido del movimiento. También en este caso es válida la interpretación de las bandas transversales, sólo que ahora la difusión dentro de cada banda es bidimensional. Sí los coeficientes de dispersión son diferentes, la solución es:

$$P(x, y, z) = \frac{\dot{M}}{4\rho x \sqrt{D_y D_z}} \exp\left\{-\frac{u}{4x} \left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right)\right\} \quad (4.40)$$

### 4.5.3 Con término de generación

En la inmensa mayoría de los casos de sustancias degradables se supone que el término de generación responde a lo que en la Física - Química se define como cinética de primer orden y que consiste en suponer que la sustancia problema va desapareciendo del sistema con una velocidad proporcional a la cantidad que hay presente en cada momento. La ecuación del transporte se escribe entonces.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V_{grad}P = D\nabla^2 P - IP \quad (4.41)$$

Este modelo de degradabilidad de sustancias presenta muchas ventajas entre las que se encuentran que la ecuación sigue siendo lineal, permitiendo la superposición de soluciones numéricas y que mediante el cambio de función.

$$C = P \exp\{-It\} \quad (4.42)$$

La ecuación se convierte en

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_{grad}C = D\nabla^2 C \quad (4.43)$$

Es decir, en la ecuación del transporte sin término de generación. Por lo tanto, todas las soluciones que se han presentado siguen siendo válidas en este caso sin más que hacer el cambio de función, cambio que por lo demás se limita sólo a multiplicar la solución de la ecuación del transporte por  $\exp\{-\lambda t\}$ .

Por ejemplo, la solución para vertido puntual e instantáneo en el origen en un medio bidimensional infinito que se mueve con velocidad homogénea  $u$  es:

$$P(x, y, t) = \frac{\dot{M}}{H 2\pi s_x s_y} \exp \left\{ - \frac{\left( x - \int_0^t u(t) dt \right)^2}{2s_x^2} - \frac{\left( y - \int_0^t v(t) dt \right)^2}{2s_y^2} - It \right\} \quad (4.44)$$

Este procedimiento es aplicable a todos los problemas en régimen transitorio en los que no se produzcan vertidos después del instante inicial.

En efecto, los problemas en régimen permanente no presentan derivada respecto al tiempo y como consecuencia, no puede aplicarse el cambio de variable. Por otra parte, si se producen vertidos después del instante inicial, eso significa que hay un término de generación adicional que no desaparece con el cambio de variable. No obstante, estos casos se pueden tratar por superposición de vertidos instantáneos sin más que multiplicar cada uno del factor de degradación que le corresponda en función del tiempo que haya transcurrido desde su introducción en el sistema hasta el momento actual.

Por ejemplo, el caso de vertido continuo en medio bidimensional tendrá como solución:

$$P(x, y, t) = \int_0^t \frac{\dot{M}(t')}{H4p(t-t)\sqrt{D_x D_y}} \exp \left[ - \frac{\left( x - \int_{t'}^t u(t'') dt'' \right)^2}{4D_x(t-t)} - \frac{\left( y - \int_{t'}^t v(t'') dt'' \right)^2}{4D_y(t-t)} - I(t-t) \right] dt' \quad (4.45)$$

y la solución en régimen permanente suponiendo  $\dot{M}$  y  $u$  constantes,  $v = 0$  y  $D_x = D_y = D$ , que se obtiene integrando entre cero e infinito, es:

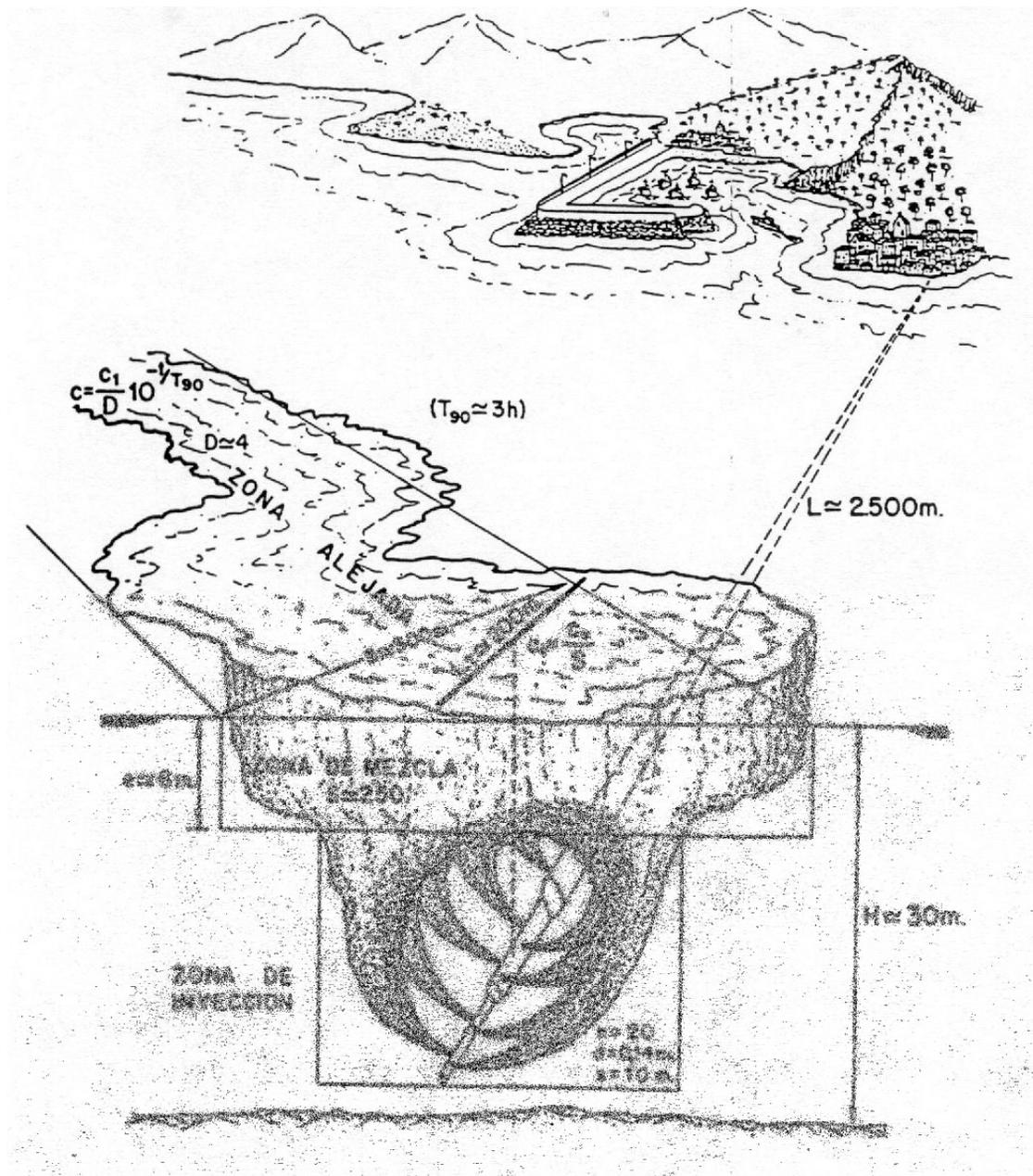
$$P(x, y) = \frac{\dot{M}}{H2pD} \exp \left\{ \frac{xu}{2D} \right\} K_0 \left\{ \frac{\sqrt{(x^2 + y^2)(u^2 - 4DI)}}{2D} \right\} \quad (4.46)$$

Finalmente, haciendo las aproximaciones para grandes distancias, esta expresión se convierte en:

$$P(x, y) = \frac{\dot{M}}{Hu\sqrt{\frac{4pDx}{u}}} \exp \left\{ - \frac{y^2 u}{4Dx} - I \frac{x}{u} \right\} \quad (4.47)$$

#### 4.6 Emisarios submarinos

Un emisario submarino es una obra que consiste esencialmente en una conducción cerrada que transporta las aguas residuales tratadas desde la estación depuradora primaria hasta la zona del mar cuidadosamente elegida de manera que se respeten los objetivos de calidad de los diferentes usos del mar en toda el área de influencia del vertido.



**Fig. 4-1 Esquema Típico de Emisario Submarino**

El proyecto de este además debe contemplar los aspectos de ingeniería que son habituales en cualquier obra que se construye, con el fin de asegurar que se produzca una fuerte dilución inicial en la zona de descarga y que la mezcla, si se dirige al ser transportada por las corrientes costeras hacia alguna zona protegida sufra una reducción adicional de concentraciones de contaminantes por difusión turbulenta, dispersión y auto depuración, que las haga inferiores a los valores límite establecidos por los estándares de calidad del cuerpo de agua receptor.

#### **4.6.1 Perfiles de temperatura y salinidad**

Uno de los elementos básicos del diseño de un emisario submarino es el conocimiento de los perfiles de temperatura y salinidad en el punto de vertido. A partir de estos dos parámetros se determina el perfil de densidades, la estratificación de las aguas y el posible atrapamiento del penacho antes de llegar a la superficie.

Las medidas de perfiles de temperatura y salinidad deben realizarse bajo distintas condiciones meteorológicas e hidráulicas con el fin de disponer de una estadística representativa, la determinación de los perfiles puede realizarse mediante el empleo de medidores portátiles, algunos de los cuales permiten la medida simultánea de ambos parámetros. La precisión con que se obtengan los datos deberá ser como mínimo una décima de grado para la temperatura y la centena de microsiemes/cm para la salinidad (expresada como conductividad eléctrica), con esto se asegura una correcta determinación de la estratificación y el atrapamiento.

Si se opta por modelar la estratificación de las aguas receptoras, es necesario contar con datos de las temperaturas medias mensuales del aire en la zona.

#### **4.6.2 Estudios de corrientes**

La finalidad de estos tiene un doble objetivo:

- Determinar las acciones mecánicas sobre el emisario producido por las corrientes debidas a causas distintas del oleaje.
- Evaluar la dilución, transporte, dispersión y auto depuración del efluente en la zona afectada por éste.

**Previamente se debe realizar una estimación de la posición y características del difusor (longitud y orientación de la conducción son suficientes en esta fase) con el fin de concentrar las medidas en la zona de interés.**

Respecto al primero de los fines mencionados se pueden utilizar estándares internacionales como ser las Recomendaciones Generales del programa ROM (Recomendaciones para

Obras Marítimas) publicadas por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España, se considerarán las siguientes acciones debidas a las corrientes.

### Fuerza de arrastre

$$F_a = C_a * \rho * U_a^2 * \frac{D}{2} \quad (4.48)$$

### Fuerza de elevación

$$F_e = C_e * \rho * U_a^2 * \frac{D}{2} \quad (4.49)$$

Se toman como velocidad de cálculo  $U_a$  la que corresponde al 95 % de no excedencia. Como valores de los coeficientes, se adoptan  $C_a = 0,9$  y  $C_e = 0,5$  aunque este último disminuye casi hasta 0, **cuando el emisario está enterrado hasta la mitad o separado del fondo más de un diámetro**  $D$  es el diámetro del emisario y  $\rho$  la densidad del agua del mar.

Para la determinación de las corrientes, a diferentes profundidades, se emplean flotadores cuya vela de arrastre se encuentra a la profundidad de interés; medidores continuos, situados a diferentes alturas de una misma vertical y medidas puntuales con correntómetros manuales que permitan la medición casi simultánea de la corriente a lo largo del perfil, para el empleo de estos últimos, la embarcación debe estar anclada. En el caso de emplear medidores continuos resultará conveniente el empleo simultáneo de flotadores o trazadores coloreados que permiten completar las medidas en el espacio, necesariamente reducidas a escasos puntos por el coste del instrumental, que aportan aquellos.

Para vertidos urbanos de localidades de menos de 10.000 habitantes, se podrá suponer la existencia de una corriente superficial de 0,20 m/s, cuya dirección sea la que va desde el punto de vertido hasta el punto más cercano a éste de cada una de las zonas de impacto (baños, cultivos marinos, etc.).

En aquellos casos en que sea posible el atrapamiento del efluente por debajo de la termoclina, el estudio de corrientes ha de incluir la descripción del campo por debajo de la misma. En los vertidos importantes será necesario emplear modelos de simulación, que requieren de campañas de medidas continuas y puntuales para su calibración. En la mayor

parte de los casos será, no obstante, suficiente con el desarrollo de medidas puntuales mediante el empleo intensivo de flotadores con vela de arrastre sumergida.

#### 4.6.3 Coeficientes de dispersión

En general, al dispersarse la pluma por efecto de las corrientes marinas, las concentraciones se dividen por un factor que es muy inferior al valor de la dilución inicial y, en el caso de los coliformes, también muy inferior al que se consigue por auto depuración. Por ello, la intensidad del estudio de los coeficientes de dispersión puede ser menor, en beneficio de otros estudios complementarios, por ejemplo las corrientes.

Lo anterior no es válido cuando se trate de un emplazamiento en el que las especiales condiciones topográficas e hidrográficas hagan prever una capacidad de dispersión excepcional o una gran variabilidad espacial de dicha capacidad, que pueda ser tomada en cuenta en los modelos de cálculo a utilizar, podrán emplearse las siguientes expresiones para estimar los valores de los coeficientes de dispersión.

##### 4.6.3.1 Dispersión horizontal en dirección transversal a la pluma

$$K_y = 3 * 10^{-5} * B^{-5} B^{4/3} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (4.50)$$

Siendo B el ancho inicial de la pluma expresado en metros. Para tanteos puede tomarse  $K_y = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ .

##### 4.6.3.2 Dispersión vertical

En ausencia de estratificación, puede usarse la expresión:

$$K_y = 4 * 10^{-3} * U_a * e \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (4.51)$$

Siendo  $U_a$  la velocidad del medio receptor y e el espesor inicial de la capa de mezcla. Para tanteos puede tomarse  $K_z = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$

En medios estratificados, el coeficiente de dispersión disminuye al aumentar el gradiente de densidad por lo que el transporte a través de la pycnoclina es muy escaso.

#### 4.6.3.3 Dispersión horizontal en dirección longitudinal

El transporte dispersivo en dirección longitudinal ( $K_x$ ) es muy pequeño, en comparación con el transporte consecutivo, por lo que la mayoría de los modelos no lo tienen en cuenta. Si desea utilizarlo, puede tomarse como valor para tanteos  $K_x = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ .

No obstante, resulta poco más barato considerar medir experimentalmente los coeficientes de dispersión horizontal si se hacen coincidir con las medidas de corrientes. El procedimiento que se recomienda se basa en el empleo de flotadores con vela sumergida a una profundidad igual a la del centro de la capa de mezcla esperada. Se colocan flotadores en el centro y en los vértices de un cuadrado (o mejor aún, de un hexágono) con el centro sobre el punto de surgencia y con una de cuyas diagonales paralela a la dirección del difusor. La longitud de la diagonal debe ser aproximadamente la mitad de la del difusor.

Llamando  $l_{ik}$  a la distancia inicial entre cada pareja de flotadores y  $l_{fk}$  a la distancia final entre éstos después de transcurrir un tiempo  $t$ , los coeficientes de dispersión se pueden estimar sabiendo que:

$$K_x + K_y = \frac{\sum_{k=1}^N (l_{fk} - l_{ik})^2}{2Nt} \quad (4.52)$$

y suponiendo que  $K_x = 10 K_y$ . En la fórmula anterior  $N$  representa el número de parejas de flotadores consideradas y preferiblemente debe incluir los resultados de varias experiencias realizadas en condiciones similares.

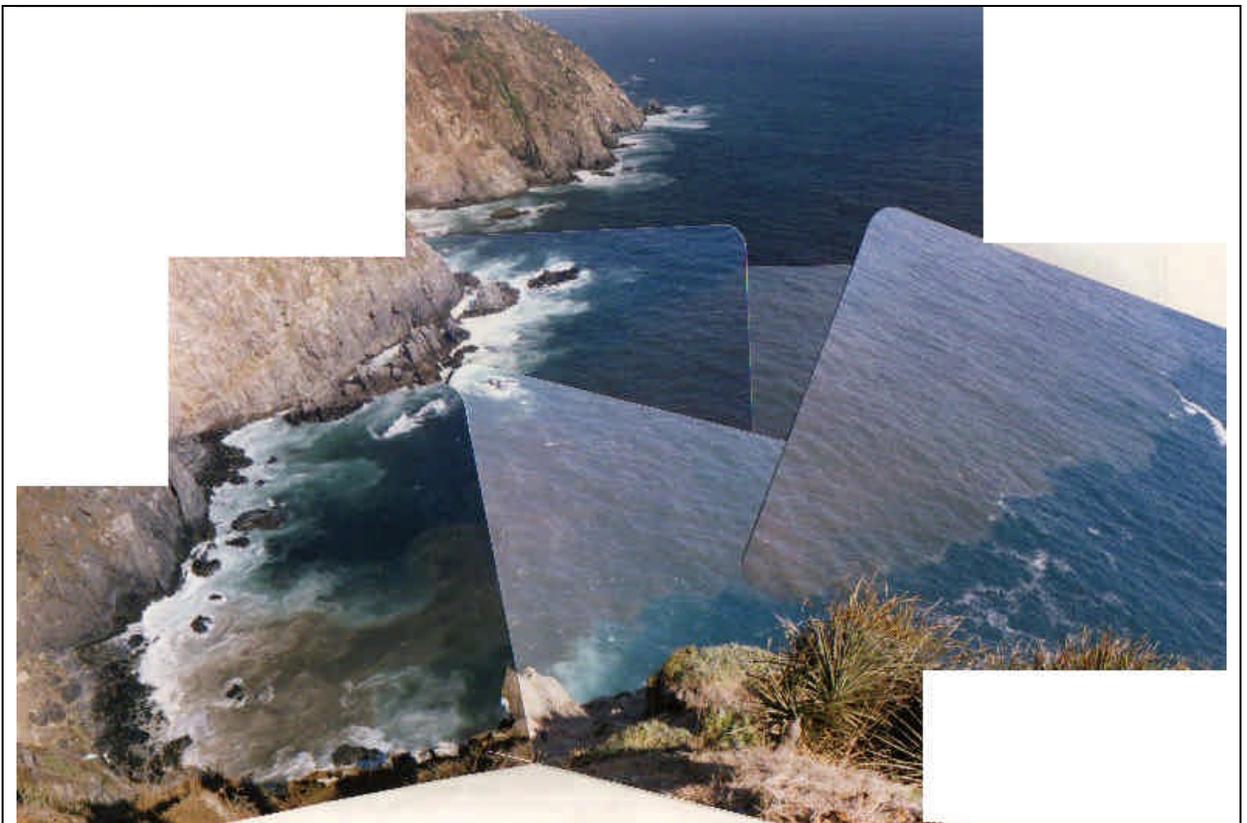
**También pueden emplearse trazadores químicos o radiactivos para la determinación de los coeficientes de dispersión, siendo los trazadores fluorescentes (fluorescencia o rodamina B) los más utilizados, el INH en el año 1987 utilizó esta metodología para la determinación de corrientes marinas, la dispersión de contaminantes y el decaimiento bacteriano en las aguas de la bahía de Valparaíso (ver Fotos N° 1, 2 y 3).**



**Foto N° 1 Mancha de Rodamina B, sector  
Túnel Bustamante**



**Foto N° 2 Mancha de Rodamina B, diez  
minutos después de la Foto N° 1,  
desplazamiento de la mancha en  
dirección norte**



**Foto N° 3 Mancha de Rodamina B en la Descarga del Túnel Bustamante**

#### 4.6.4 Coeficientes de autodepuración

En el cálculo de este coeficiente, se determina el tiempo necesario para que desaparezca el 90% de una cierta cantidad de contaminante por efecto de la auto depuración ( $T_{90}$ ), si toma por ejemplo los coliformes fecales, debe tener en cuenta el carácter marcadamente estadístico de estos parámetros, así como los factores que influyen en ellos (insolación, temperatura, salinidad, etc.)

Uno de los métodos más comúnmente utilizados para la determinación de este coeficiente consiste en marcar un volumen de agua mediante un flotador, el cual se sigue con una embarcación desde la que se realizan muestreos en instantes sucesivos, que son posteriormente analizados en el laboratorio. Para el análisis estadístico de estas determinaciones microbiológicas, se deben replicar los muestreos al menos cinco veces para cada tiempo de toma, ajustando los resultados a una distribución logarítmica normal, que podrá usarse posteriormente para calcular el valor esperado de la reducción de concentraciones utilizando métodos estadísticos clásicos.

Para coliformes fecales en aguas con salinidad superior a 30 g/l pueden servir de orientación los valores obtenidos mediante la siguiente expresión.

$$T_{90} = \left[ \frac{a}{60} (1 - 0.65C^2) * \left( 1 - \frac{SS}{800} \right) + 0.02 * 10^{\frac{(T_a - 20)}{35}} \right]^{-1} \quad (4.53)$$

Donde  $T_{90}$  está expresado en horas y las restantes variables son:

$\alpha$  = Ángulo del sol sobre el horizonte en grados sexagesimales. (Valor mínimo  $\alpha = 0$ )

C = Fracción del cielo cubierto por nubes.

SS = Concentración de sólidos en suspensión en mg/l. (Valor máximo: SS = 800).

$T_a$  = Temperatura del agua en °C.

#### 4.6.5 Biocenosis y contaminación de fondo

Para la caracterización del estado ambiental, se debe proceder a un reconocimiento de las comunidades bentónicas, principalmente mediante el estudio de las comunidades de moluscos, poliquetos y de la cobertura de algas y otras plantas marinas. Los resultados de

este reconocimiento se representarán gráficamente, mediante un mapa de las poblaciones bentónicas, este reconocimiento biológico deberá completarse con el muestreo y análisis de sedimentos superficiales y organismos acumuladores (por ejemplo, mejillones) en un número y distribución suficientemente representativo para el tipo y tamaño de emisario que se va a controlar. Sobre estas muestras se determinarán, prioritariamente, los microcontaminantes orgánicos e inorgánicos que figuran en los objetivos de calidad establecidos en la normativa vigente con la finalidad de que sirvan como referencia de la situación antes de la construcción del emisario.

Asimismo, se debe proceder a la determinación de las concentraciones de microorganismos indicadores de contaminación fecal en las áreas de impacto identificadas.

Existen varios estudios desarrolladas principalmente por las Universidades de Valparaíso, Universidad de Chile, Universidad de Playa Ancha, etc. que se han desarrollado en la bahía desde hace bastante tiempo, en las cuales se han analizado los sedimentos, peces, aguas y moluscos de la zona. De la misma forma organismos gubernamentales como Servicio de Salud, Directemar, IFOP, INH, etc. Han desarrollado otras investigaciones, puesto que al ser entidades del estado pasan a ser parte de los organismos fiscalizadores en diferentes ámbitos de temas relacionados con el parámetro ambiental.

#### **4.6.6 Batimetría, geofísica y geotecnia**

Se debe realizar un reconocimiento y descripción de los fondos a lo largo del perfil longitudinal, analizando los materiales que lo forman y sus propiedades mecánicas hasta la profundidad necesaria para el estudio de una cimentación adecuada. Asimismo, se identificarán los elementos singulares, como barras, bajos o depresiones, que puedan influir en el funcionamiento y mantenimiento de la obra. Todos estos datos se reflejarán en un plano detallado del emplazamiento y alrededores del emisario.

#### **4.6.7 Clima marítimo**

Se debe llevar a cabo un estudio del clima marítimo de la zona, con objeto de determinar las sollicitaciones mecánicas a que se verán sometidos los distintos tramos del emisario por efecto del oleaje y la influencia que éste puede tener sobre el comportamiento mecánico de los materiales del fondo.

Para ello se podrán utilizar las Recomendaciones Generales del Programa ROM. Con carácter complementario, se entregan a continuación **expresiones para calcular las acciones debidas al oleaje sobre emisarios no enterrados:**

#### Fuerza de arrastre

$$F_a = \frac{C_a \rho_a U_a^2 D}{2} \quad (4.54)$$

#### Fuerza de inercia

$$F_i = \frac{C_i \rho_a a p D^2}{4} \quad (4.55)$$

#### Fuerza de elevación

$$F_e = \frac{C_e \rho_a U_a^2 D}{2} \quad (4.56)$$

Donde:

- $C_a$  = Coeficiente de fuerza de arrastre
- $C_i$  = Coeficiente de fuerza de inercia
- $C_e$  = Coeficiente de fuerza de elevación
- $\rho_a$  = Densidad del agua de mar ( $\text{kg/m}^3$ )
- $U_a$  = Velocidad horizontal del agua de mar (m/s)
- $a$  = Aceleración máxima debido al oleaje ( $\text{m/s}^2$ )
- $D$  = Diámetro exterior del emisario (m)

Así  $U_a$  y  $a$  representan las componentes normales al emisario de la velocidad y aceleración máxima, calculadas de acuerdo con la teoría lineal de ondas para la altura de ola significativa correspondiente al temporal de cálculo, entendiéndose por tal el de período de retorno de cien años para la fase de servicio y el de período de retorno de un año para la fase de construcción. Como valores de los coeficientes se tomarán  $C_a = 1.10$ ,  $C_i = 3.3$  y  $C_e = 1.25$

Debe tenerse en cuenta que las fuerzas de inercia y de arrastre están desfasadas  $90^\circ$  y que normalmente la situación más desfavorable para la estabilidad corresponde a velocidad máxima y aceleración nula.

#### **4.6.8 Dinámica litoral**

Un estudio básico de la dinámica litoral se debe realizar, con el fin de evaluar tanto el efecto que ésta pueda tener sobre el funcionamiento y mantenimiento del emisario como, a la inversa. El que la presencia del emisario pudiera tener sobre aquélla, en el cual se debe poner especial atención a las variaciones del perfil de playa y a la posible inestabilidad de la línea de costa, estudios teóricos utilizando modelos matemáticos como Litpak modelo numérico de evolución de costa (Software creado por el DHI) logran predecir con cierta precisión la variación del perfil de playa, este modelo ha sido utilizado por el INH en la modelación del perfil de playa de la bahía de Valparaíso, en estudios con el objetivo principal de observar el comportamiento de los esteros Reñaca y Marga Marga, modelando crecidas y su influencia de las descargas a la bahía.

#### **4.6.9 Cálculo de la dilución inicial**

Las aguas residuales que se vierten al mar a través de emisarios submarinos, debido a su menor densidad, experimentan una fuerza convectiva que provoca la formación de chorros ascendentes. Durante la ascensión, los chorros se alimentan de agua limpia del medio receptor que va diluyendo el efluente. En la superficie se crea una capa de mezcla con concentraciones bastante homogéneas donde los chorros, aunque siguen alimentándose, lo hacen ya con agua contaminada y, por lo tanto, no aumenta su dilución.

Es muy frecuente que, para diferencia de temperaturas (sobre todo en verano) y/o salinidades (proximidad de una desembocadura), el medio receptor se encuentre estratificado, pudiéndose distinguir casi siempre la presencia de dos capas relativamente homogéneas separadas por una superficie denominada pycnoclina, donde el gradiente de densidad es muy usado. En estos casos suele suceder que, al mezclarse el efluente con grandes proporciones del agua más densa del fondo, la mezcla tenga una densidad mayor que la de la capa superficial, quedando entonces atrapada sin llegar a la superficie.

Por otra parte, si el medio receptor está en movimiento (lo que ocurre casi siempre) influirá en el espesor de la capa de mezcla y el ancho inicial de la pluma que se forma en planta. A velocidades bajas, la dilución inicial no se ve afectada, pero cuando ésta sobrepasa un cierto

valor, la dilución aumenta, si bien a costa de que el punto donde el chorro alcanza la superficie (o en su caso la pycnoclina) de forma importante en el sentido de la corriente, disminuyendo así la distancia disponible hasta las zonas a proteger, para que actúen los fenómenos de dispersión (horizontal y vertical) y de auto depuración.

En general, las condiciones más negativas respecto a la dilución inicial mínima se dan cuando la velocidad del medio receptor es muy pequeña. Sin embargo, para la comprobación de los objetivos de calidad las condiciones negativas se dan con velocidades altas.

#### 4.6.10 Comprobación de la estabilidad de la capa de mezcla

Si la profundidad en el punto de vertido es escasa y el caudal vertido es importante, puede alcanzarse la inestabilidad de la capa de mezcla, produciéndose una recirculación desde ésta hacia los chorros en toda la profundidad. Esta situación es típica en los vertidos de agua de refrigeración de las centrales térmicas y nucleares, pero no suele darse en vertidos de aguas residuales urbanas, El criterio para asegurar que no se produce dicha situación es:

$$\frac{u_0^2 B + U_a^2 H}{(u_0 B g)^{\frac{2}{3}} H} < 0.54 \quad (4.57)$$

#### 4.6.11 Comprobación de los objetivos de calidad

Los objetivos de calidad suelen ser expresados como concentraciones de contaminantes que no deben ser sobrepasadas en determinadas áreas, según sus usos, situadas generalmente entre uno y varios kilómetros de la zona de vertido.

Para comprobar si se cumplen dichos objetivos es necesario calcular las distribuciones de concentración de los contaminantes significativos que se producirán en las condiciones pésimas. Estas consistirán, así siempre, en unas situaciones de corriente que, acercan la mezcla desde la zona de vertido hasta las áreas a proteger, siguiendo unas trayectorias rectas o con curvatura poco pronunciada.

Alrededor de dichas trayectorias, el contaminante traza una pluma con concentraciones más elevadas en el eje y en superficie (o la pycnoclina, si la mezcla quedó atrapada), y más

Oscar Cartes Z.- 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

reducidas en los bordes laterales e inferior, donde se está produciendo un intercambio turbulento con agua limpia del medio receptor. Además, a medida que el observador se aleja de la zona de descarga, las concentraciones en el eje van disminuyendo a costa de un ensanchamiento de la pluma como consecuencia del transporte dispersivo. A ello hay que añadir una disminución del contenido total de cada sección transversal, a causa de los fenómenos de auto depuración en el agua del mar.

El cálculo preciso de la distribución de concentraciones es bastante difícil, lo cual se explica por las siguientes razones:

- Los coeficientes de dispersión ( $K$ ) y de auto depuración ( $T_{90}$ ) son muy variables. Además, influyendo éste último fuertemente en los resultados.
- El medio receptor presenta a menudo una acusada estratificación, lo cual se traduce en un cierto impedimento para la transferencia vertical de contaminantes y corrientes. Además, el perfil de densidades puede variar al acercarse a la costa.
- La intensidad y dirección de las corrientes varían mucho en el tiempo y en el espacio. Resulta especialmente difícil estudiar el efecto de la variabilidad vertical de las corrientes horizontales, que suele ser muy marcada, sobre todo en la capa situada por encima de la pycnoclina. Sin embargo, dicho efecto es importante porque aumenta considerablemente la dispersión horizontal.
- Los límites del sistema (batimetría, línea de costa, etcétera) pueden ser muy complicados. Como consecuencia, cuanto mayor sea la importancia del emisario como obra física, más sofisticados deberán ser los métodos de cálculo utilizados y, consecuentemente, más completos deberán ser los estudios complementarios para la determinación de los parámetros oceanográficos, que deben orientarse a la obtención de los datos que necesite el método de cálculo elegido.
- Existen diversas formas de enfocar el cálculo de dichas concentraciones: Soluciones analíticas de la ecuación de difusión para vertido continuo, superposición numérica de soluciones analíticas para vertidos instantáneos, celdas de mezcla, integración numérica de las ecuaciones, modelos físicos a escala reducida, etc.

- Para elegir el método de cálculo debe tenerse presente que puede ser preferible uno poco preciso, que tenga en cuenta todos los fenómenos implicados, que uno de mayor precisión, que ignore ciertos aspectos importantes. Además, dada la variabilidad de los parámetros, puede ser necesario aplicarlo a un gran número de situaciones.

En cualquier caso, cuanto más escasos sean los datos de campo y más simple los procedimientos de cálculo, más seguridad se debe adoptar al seleccionar las situaciones pésimas.

A continuación se entregan expresiones que pueden servir para comprobar los objetivos de calidad, en el caso de emisarios poco importantes, se debe tener en cuenta que estas expresiones se pueden aplicar cuando el vertido alcanza la superficie y se ve sometido a una corriente rectilínea de velocidad constante.

No obstante, bajo ciertas limitaciones también puede aplicarse en los siguientes casos:

- Cuando el vertido queda atrapado por la pycnoclina, si se supone que ésta actúa como superficie libre ficticia y que sólo se produce dispersión en la capa inferior.
- Cuando la trayectoria no sea rectilínea, siempre que su radio de curvatura sea bastante mayor que el semi ancho de la pluma. Entonces X representa la distancia al origen (punto de surgencia) medida a lo largo del eje, e Y la mínima distancia de un punto cualquiera a la superficie proyectante vertical de dicho eje.
- Cuando la velocidad varíe a lo largo de la trayectoria, siempre que lo haga lentamente. Basta sustituir la variable auxiliar t por la expresión:

$$t = \int_0^x \frac{dx}{U_a(x)} \quad (4.58)$$

En cambio, no es aplicable cuando existen variaciones importantes de profundidad, en sentido transversal a la pluma o en las proximidades de los contornos cerrados. Desgraciadamente, ambas circunstancias se dan cuando la pluma se acerca a la costa que

suele ser, además, un elemento del conjunto de situaciones pésimas de cálculo. No obstante, para emisarios poco importantes se podrán calcular las concentraciones utilizando las expresiones siguientes, aplicadas sin tener en cuenta la presencia de la línea de costa. Esto se justifica por el hecho de que el aumento de concentraciones que se produce al estar impedida la dispersión hacia tierra, se compensa por la escasa probabilidad de que una trayectoria real termine impactando directamente sobre la costa, ya que tienden a hacerse paralela a ésta a una cierta distancia de ella.

La concentración en cualquier punto de la pluma determinado por sus coordenadas (X, Y, Z) viene dada por la expresión:

$$C(X, Y, Z) = \left( \frac{C_0}{S} \right) F_0(t) F_2(Y, t) F_3(Z, t) \quad (4.59)$$

Siendo t una variable auxiliar que se calcula mediante:

$$t = \frac{X}{U_a} \quad (4.60)$$

La función  $F_0(t)$  tiene en cuenta los fenómenos de auto depuración de los parámetros no consecutivos, y tiene la siguiente expresión.

$$F_0(t) = \frac{1}{10^{\frac{t}{T_{90}}}} \quad (4.61)$$

## 4.7 Modelos matemáticos

### 4.7.1 Mike 21

El software MIKE21 es un grupo de subprogramas que en conjunto constituyen un ambiente de trabajo que permite el modelado bidimensional de flujos costeros y fenómenos de transporte de sedimentos. Este software es un desarrollo del “Danish Hydraulic Institute” (DHI, Dinamarca) y gracias a un convenio de colaboración con el INH, ha sido incorporado como la herramienta de trabajo para la modelación numérica del ambiente costero.

MIKE21 incluye una serie de subrutinas que permiten digitalizar y modelar batimetrías irregulares así como un eficiente manejo de entrada de datos y salidas gráficas de los resultados. Como esquema numérico el software utiliza la técnica de las diferencias finitas, con las cuales resuelve las ecuaciones de movimiento y conservación de masa.

La figura 4-2, corresponde a un esquema del MIKE21, donde se puede apreciar en forma global como es la interrelación de los distintos módulos.

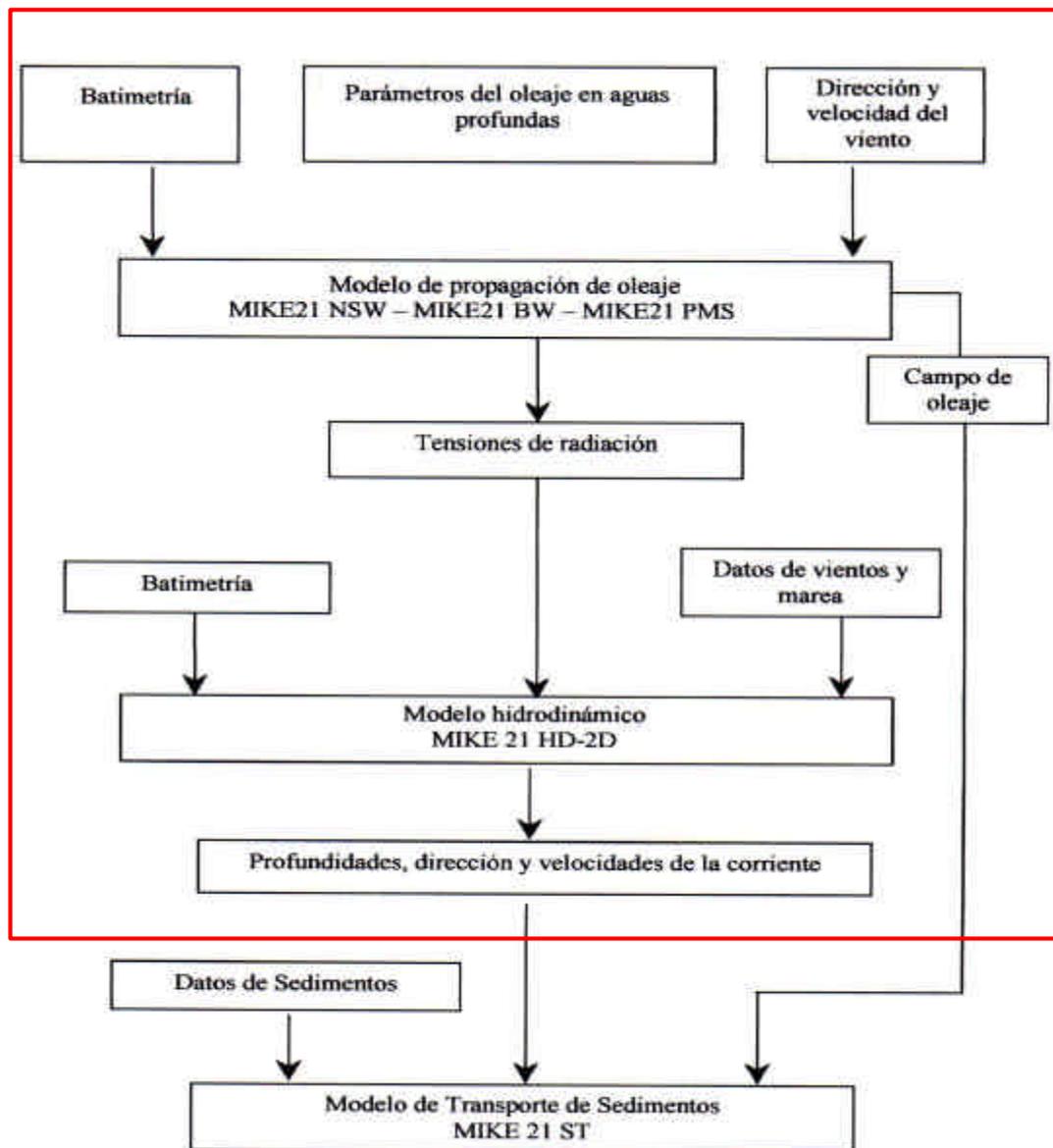


Fig. 4 – 2, Diagrama de flujo software de modelación Numérica Mike 21

- **MIKE21 PMS:** Utiliza el modelo parabólico de refracción-difracción del oleaje.
- **MIKE21 HD-2D:** Utiliza el modelo hidrodinámico de flujo bidimensional.
- **MIKE21 ST:** Utiliza el modelo para transporte de sedimentos, y tendencia de evolución del fondo marino, para oleaje y corrientes.

El objetivo de modelar numéricamente la bahía de Valparaíso, por oleaje y corrientes, es integrar las graficas de oleaje y corrientes, mediciones, levantamientos topobatimétricos, fotografías aéreas e imágenes satelitales y monitoreos de calidad de aguas en una herramienta de gestión como es un Sistema de Información Geográfica.

A modo de ejemplo y de disponibilidad de uso del software con fines académicos como es esta tesis de titulación, se utilizó el software de modelación numérica Mike 21 con sus módulos PMS (propagación de oleaje) y Hidrodinámico HD (circulación de corrientes), todo lo anterior tomando en cuenta las limitaciones propias de cada modelo y situación en particular.

#### **4.7.2 Mike 21 modulo PMS**

Este modelo permite calcular la propagación del oleaje, desde aguas profundas hasta aguas someras, considerando principalmente los efectos de refracción y difracción. Para este objetivo utiliza un modelo matemático cuya variable dependiente es la función potencial del oleaje.

Los fenómenos físicos asociados a la propagación del oleaje, que en general interesa estudiar, son los siguientes:

- Refracción
- Difracción
- Reflexión
- Rotura del oleaje
- Disipación de energía
- Fricción de fondo
- Dispersión en frecuencia y dirección
- No-linealidades

Una de las ecuaciones utilizada por el modelo es la de pendiente suave de tipo elíptica (Berkhoff, 1972) conocida por las siglas MSE (del inglés Mild Slope Equation). Esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\nabla(CC_g \nabla f) + \left( k^2 CC_g + i \omega W \right) f = 0 \quad (4.62)$$

Con:

$\nabla$  : Operador gradiente en dos dimensiones  $\left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$

$C(x, y)$  : Celeridad de fase

$C_g(x, y)$  : Celeridad del grupo de ondas

$\phi(x, y)$  : Potencial de velocidad de superficie libre, relacionado al potencial de velocidad  $\phi$

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} f(x, y) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \quad (4.63)$$

$Z$  : Altura del nivel del agua medida desde el nivel medio (m)

$k$  : Número de onda  $\frac{2\pi}{L}$

$d$  : Profundidad (m)

$\omega$  : Frecuencia angular  $\frac{2\pi}{f}$  (rad)

$L$  : Longitud de onda (m)

$W$  :  $\frac{E_{dis}}{E}$  (Cuociente entre la energía disipada y la energía de la ola)

$E_{dis}$  : Energía de disipación de la onda  $\left( \frac{t}{m^2} \right)$

$E$  :  $\frac{\rho g H_{RMS}^2}{8}$  Energía de la onda por unidad de área

$H_{rms}$  : Altura media cuadrática del oleaje

C : Celeridad de la onda  $\left(\frac{w}{k}\right)$

F : Frecuencia

**Para facilitar la solución numérica se introduce la hipótesis adicional de onda progresiva, sólo válida para modelar áreas costeras con presencia de estructuras con bajos índices de reflexión (Manuales Software Mike 21),** lo que permite describir eficientemente la evolución de propiedades independientes de la fase de las olas, tales como la altura de la ola y el vector número de ondas.

Tal es el caso del módulo PMS de MIKE 21, utilizado en este trabajo para la modelación de los parámetros del oleaje y las respectivas tensiones de radiación.

Si, como es el caso del módulo PMS, se supone que:

$$f = A^*(x, y) e^{iY} \quad (4.64)$$

$$y = \int^x k dx \quad (4.65)$$

Si adicionalmente se supone la existencia de una dirección preferente (dada por la dirección  $x$ ), se encuentra la aproximación parabólica de la ecuación de pendiente suave (Kirby, 1986):

$$A_x^* - \frac{i}{2w C_g} (C C_g A_y^*)_y + \frac{A^*}{2C_g} (C_g)_x + \frac{A^*}{2C_g} W = 0 \quad (4.66)$$

Con:

$$C : \text{Celeridad de la ola} = \frac{w}{k}$$

$C_g$  : Velocidad de grupo

Un esquema de diferencias finitas tipo Crack - Nicholson es usado por el módulo PMS para resolver la ecuación parabólica. Cuando se activa en el software la opción de oleaje

direccional, las diferentes componentes del oleaje son adicionalmente combinadas mediante superposición lineal.

**Complementariamente, un modelo de propagación como PMS utiliza las siguientes ecuaciones:**

**Relación de dispersión, que relaciona la frecuencia con el número de onda.**

$$w^2 = g * k * \tanh(kh) \quad (4.67)$$

**Efecto Doppler, que relaciona las frecuencias absoluta y relativa.**

$$w = w_0 + \vec{K} \cdot \vec{U}_H \quad (4.68)$$

**Criterios de rotura, que considera simultáneamente los efectos del calado y del peralte.**

$$H_{\max} = g_1 k^{-1} \tanh(g_2 k h / g_1) \quad (4.69)$$

**Ecuación para la fracción de olas rotas, para el caso de oleaje irregular.**

$$\left( \frac{H_{\text{rms}}}{H_{\max}} \right)^2 = \frac{(1 - Q)}{\ln Q} \quad (4.70)$$

Donde:

$k$  : Número de onda  $\frac{2\pi}{L}$

$h$  : Profundidad

$w_0$  : Frecuencia absoluta de la onda

$\vec{k}$  : Vector numero de onda

$\vec{U}_H$  : Vector Velocidad Horizontal

$H_{\max}$  : Altura Máxima de rompiente de la onda

$H_{\text{rms}}$  : Altura media cuadrática del oleaje

$g$  : Factor de rotura de la ola

$Q$  : fracción de olas rotas

Donde,  $H_{max}$ ,  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  son los factores que controlan los valores máximos de la altura de ola, del peralte y  $H/d$  respectivamente, que la ola puede presentar antes de la rotura.

El término  $E_{diss}$  (Energía de Disipación) presente en la definición de  $W$ , es calculado mediante los aportes asociados de la disipación de energía debida a la fricción contra el fondo y la rotura. Para el caso de un oleaje tipo aleatorio, estos términos tienen las siguientes expresiones:

#### Energía de Disipación a la Fricción Contra el Fondo.

$$\left( E_{Diss} \right)_f = g \frac{-1}{8 \sqrt{p}} \frac{c}{g} \frac{f_w}{g} \left( \frac{H_{rms}}{\sinh kd} \right)^3 \quad (4.71)$$

#### Energía de Disipación de rotura.

$$\left( E_{Diss} \right)_b = - r g \frac{a}{8 p} Q_b \frac{2}{T_m} H_{max}^2 \quad (4.72)$$

Para el caso de **Oleaje Regular**, sólo el primer término es requerido, dado por la siguiente expresión.

$$\left( E_{Diss} \right)_f = r g \frac{-1}{6 \sqrt{p}} \frac{c}{g} \frac{f_w}{g} \left( \frac{w * H}{\sinh kd} \right)^3 \quad (4.73)$$

Con:

$a$  : Factor que controla la tasa de disipación de energía

$C_{fw}$  : Coeficiente de fricción de olas,

$T_m$  : Periodo medio de la densidad de energía

$Q$  : Fracción de olas rotas.

Las condiciones fronteras con las que debe alimentarse la malla computacional son los parámetros estadísticos típicos del oleaje en aguas profundas o valores equivalentes obtenidos a partir de observaciones u otro modelo. Alternativamente, si el oleaje considerado es tipo aleatorio, también puede ser especificado el espectro direccional.

#### **4.7.3 Mike21 HD**

Los fenómenos hidrodinámicos asociados con el presente estudio tienen relación con las corrientes generadas por el oleaje en el sector de la rompiente del mismo. Estas corrientes son inducidas por los gradientes de las tensiones de radiación que se generan como producto de la rompiente oblicua del oleaje, que son un orden de magnitud mayores a las corrientes oceanográficas o de bahía generadas por gradientes de presión atmosférica, mareas, vientos u otros. La existencia de las corrientes litorales sumada a la alta turbulencia que se genera en el sector de la rompiente hace que la actividad sedimentológica que se desarrolla en este sector sea la de mayor relevancia para la evolución o equilibrio morfológico de la línea de playa.

Las ecuaciones utilizadas por el módulo hidrodinámico de MIKE 21 son las ecuaciones de conservación de masa y momentum para el flujo medio verticalmente integradas y temporalmente promediadas a escala de la turbulencia y de las olas. Por lo tanto, sólo se podrán estudiar sectores costeros caracterizados por patrones de circulación de corrientes esencialmente horizontales, para los cuales el supuesto de una estructura vertical de forma constante sea aceptable.

Para el modelado de la turbulencia se utiliza la hipótesis de Boussinesq para la viscosidad de remolino. Ésta se utiliza mediante un submodelo de tipo algebraico, permitiendo el uso de una viscosidad constante o bien el de una viscosidad dependiente de los gradientes del campo de velocidades de corriente.

El principal propósito del módulo hidrodinámico HD, presentado a continuación, es resolver las ecuaciones de continuidad y momentum para el flujo medio.

Estas son:

**Continuidad**

$$\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (4.74)$$

**Momentum en dirección x**

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \quad (4.75)$$

$$-\frac{1}{r_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (ht_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (ht_{xy}) \right] - \Omega q - f(V) v_x + \frac{h}{r_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

**Momentum en dirección y**

$$-\frac{1}{r_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (ht_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (ht_{xy}) \right] + \Omega p - f(V) v_y + \frac{h}{r_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (4.76)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial x}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \quad (4.77)$$

**Donde:**

- H (x, y, t) : Profundidad del agua  
 ξ (x, y, t) : Nivel medio del mar con oscilaciones debido a mareas  
 p, q (x, y, z) : Densidad de flujo en x e y  
 C(x, y) : Coeficiente de Chézy  
 G : Aceleración de gravedad

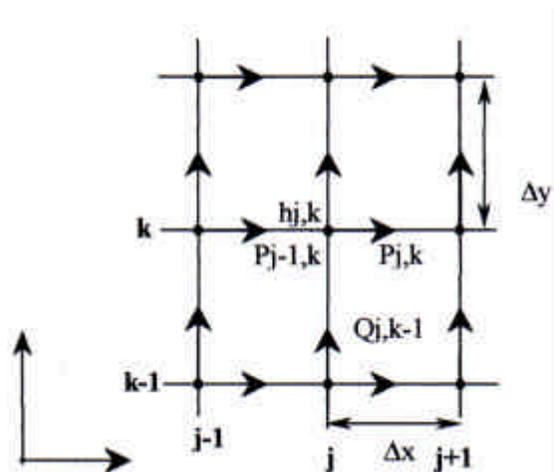
$f(V)$	: Factor de fricción de viento
$V, V_x, V_y (x, y)$	: Velocidad del viento y componentes
$\Omega (x, y)$	: parámetro de Coriolis, dependiente de la latitud
$p_a (x, y, t)$	: Presión atmosférica
$\rho_w$	: Densidad del agua
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	: Componentes del tensor de tensiones

El coeficiente de resistencia de Chézy ( $C$ ), presente en el término de fricción contra el fondo, es calculado en función del coeficiente de rugosidad de Manning, desde la expresión.

$$C = M \cdot h^{1/6} \quad (4.78)$$

El módulo HD hace uso del método implícito de las direcciones alternantes (ADI), que integra las ecuaciones en el dominio del espacio-tiempo. Las ecuaciones matriciales que resultan para cada dirección y cada línea de la malla son resueltas por un algoritmo de doble barrido. El algoritmo provee de una solución precisa, confiable y fácil de obtener, estando el método numérico caracterizado, en términos prácticos, por una falsificación despreciable de la masa, del momentum y de la energía.

La malla computacional usada por el módulo HD, y el posicionamiento de las variables sobre la malla es presentada en la siguiente figura:



**Fig. 4 – 3, Diagrama de malla computacional Módulo HD**

Para aplicar el modelo HD, se requiere de la siguiente información para cada nodo de la grilla numérica:

- Batimetría
- Resistencia del fondo
- Adicionalmente, para especificar las condiciones de frontera se puede escoger, para cada tramo.

## **CAPITULO V**

### **5. MODELACIÓN NUMÉRICA BAHÍA DE VALPARAÍSO**

#### **5.1 Introducción**

La modelación numérica de oleaje y corrientes de la bahía de Valparaíso pretende poner en discusión que la correcta utilización de tecnologías de última generación aplicadas a problemas puntuales puede ser una herramienta muy importante en los avances en la gestión del medio ambiente.

Los modelos numéricos son empleados en gran parte de estos temas, lo que hoy en día en el ámbito marítimo nacional no es tan frecuente dado que la sola obtención de datos históricos es muy complicada y de reciente data.

Hoy en día se cuenta con muy poca información y mucho menos una buena cantidad de información en tiempo real en lo referido a registros de olas y corrientes. El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada cuenta con boyas oceánicas que indican dirección, periodo y altura de ola, ubicadas estratégicamente a lo largo de la costa, principalmente en los programas referidos a Sistemas de Alerta Temprana de Tsunamis. Esto constituye una ayuda al momento de recopilar antecedentes, pero el tiempo empleado en la toma de datos no es muy prolongado (12 años). Por otro lado la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) posee sistemas similares en el ámbito fluvial con sus estaciones de mediciones en cauces naturales, de los cuales algunos entregan información en tiempo real y otros datos tomados a lo largo de los años, siendo en este caso el tiempo de mediciones más prolongado aproximadamente unos 25 años. Además el problema que se presenta es la falta de un registro de todos los cauces naturales del país.

### 5.1.1 Antecedentes

La información disponible incluye informes locales realizados por el Instituto Nacional de Hidráulica en el área de estudio, cartas náuticas, cartas geográficas, levantamientos batimétricos, mediciones de oleaje, fotografías aéreas de la zona, muestreo sedimentológico de playas y fondo marino.

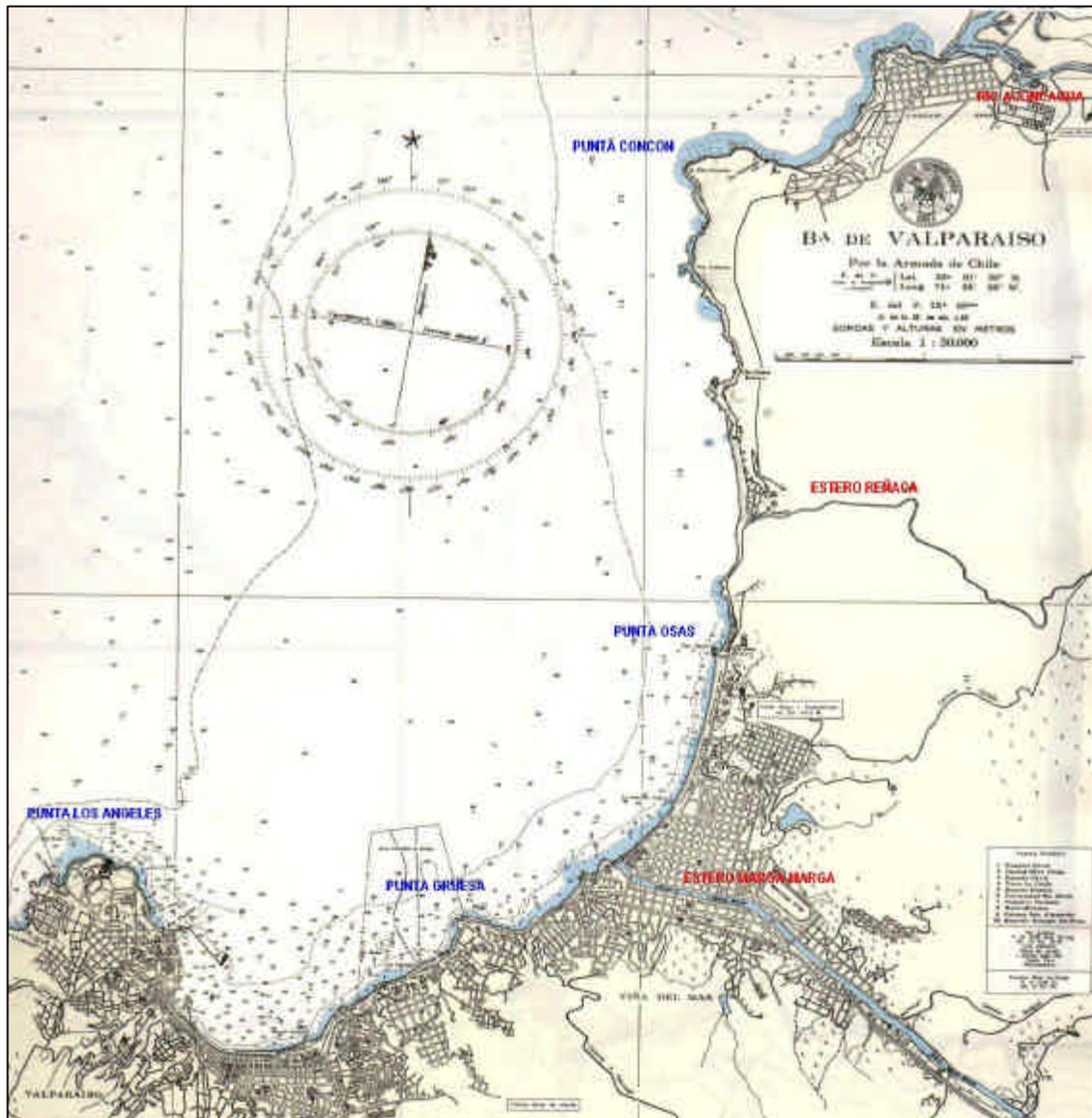
- Carta hidrográfica “Bahía de Valparaíso a Golfo de Arauco”. SHOA, Escala 1: 500.000
- Carta hidrográfica “Punta Pite a Punta Topocalma y Puertos Adyacentes”. SHOA, Escala 1: 200.000
- Carta hidrográfica “Punta Ángeles a Rada de Quintay”. SHOA, Escala 1: 25.000
- Carta hidrográfica “Bahía y Puerto de Valparaíso”. SHOA, Escala 1: 10.000
- Carta hidrográfica “Bahía de Con Con”. SHOA, Escala 1: 10.000
- Carta hidrográfica “Bahía de Quintero a Bahía de Valparaíso”. SHOA, Escala 1: 50.000
- Batimetría multihaz de la bahía de Valparaíso, Desmar Ltda., 2001
- Estudio de terreno, Reconocimiento del suelo marino en zonas de posible ubicación del dique flotante Sociber, 1983
- Estudio de terreno, Estudio de corrientes marinas del gran Valparaíso y estimación de características de dispersión del medio marino, 1987
- Modelo reducido, Estudio de oleaje sobre estructura Sector Costanera Puerto de Valparaíso, 1997
- Modelo reducido, Estudio mejoramiento de las desembocaduras del estero Marga Marga y de los ríos Mataquito, Carampangue y Queule, 1997
- Modelo numérico, Proyecto de innovación tecnológica, Modelación Numérica de Propagación y Agitación de Oleaje en Puertos, 2002
- Modelo reducido, Estudio sedimentológico y de agitación en modelo físico tridimensional de una dársena en Caleta Portales – Puerto de Valparaíso, 2002
- Memoria de título Universidad de Chile, sede Valparaíso, Características físicas y químicas de sedimentos costeros de la bahía de Valparaíso, 1971
- Memoria de Título Universidad de Playa Ancha, Calidad medio ambiental del Agua del Litoral del Gran Valparaíso. Realidad actual y sugerencias destinadas a minimizar impactos, 2003

### **5.1.2 Borde costero de la bahía de Valparaíso**

El curso inferior del estero Marga-Marga se desarrolla por la ciudad de Viña del Mar, en la V Región del país y desemboca en el Océano Pacífico, específicamente en la bahía de Valparaíso, aproximadamente en 33° Latitud Sur con 71°5' Longitud Oeste.

La figura 5-1 presenta este litoral donde se aprecia que la bahía de Valparaíso está comprendida entre la Punta Ángeles por el Sur y la Punta Con-Con por el Norte.





**Fig. 5-2 Bahía de Valparaíso**

Se observa además, que tanto Punta Ángeles como Punta Curaumilla constituyen un abrigo natural de la bahía frente al oleaje incidente del tercer cuadrante, con dirección general SW. Frente al oleaje incidente del tercer cuadrante, dirección general W, y del cuarto cuadrante la bahía, en el sector del estero Marga-Marga, se encuentra muy expuesta careciendo de un abrigo natural efectivo.

La figura 5-2 presenta con mayor detalle la bahía de Valparaíso. Esta extensa bahía orientada al noroeste y con forma semicircular, presenta un desarrollo costero de aproximadamente 22,5km entre Punta Ángeles y Punta Con-Con. La abertura o boca de esta

Oscar Cartes Z.– 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

bahía es de aproximadamente 13,0km con una profundidad máxima de 5,0km. La bahía de Valparaíso es bastante profunda, con valores que van desde los –100m a la altura de Punta Ángeles hasta profundidades de –50m a aproximadamente 1.000m de la costa.

En la figura anterior se aprecia que el principal curso de agua que desemboca en este litoral es el estero Marga-Marga. También es relevante, un poco más al norte, la desembocadura del estero Reñaca. Es claro que ambos esteros tienen asociadas las principales formaciones de playas en la bahía de Valparaíso. En efecto, hacia el Norte de la desembocadura del estero Marga-Marga se desarrolla una extensa formación de playa que se extienden hasta Punta Osas, y hacia el Norte de la desembocadura del estero Reñaca también se desarrolla una formación de playa de relativa extensión. Ambas playas están constituidas por arenas rubias, características del drenaje de cuencas costeras de la Cordillera de la Costa.

Además de las playas mencionadas, el borde costero es escarpado y rocoso, destacándose singularidades naturales, de sur a norte, Puntas Duprat, Gruesa, Osas y Cabras. Algunas formaciones de playas menores son generadas por los aportes locales de pequeños esteros o quebradas, entre las cuales se puede mencionar, de sur a norte también, las caletas Membrillo, Portales, Abarca, Salinas y Cochoa.

Además la bahía da abrigo a obras marítimas de importancia como, el puerto de Valparaíso con su molo de abrigo, espigón de atraque y dique flotante, Los muelles Barón y Vergara, y marinas deportivas.

En la bahía de Valparaíso no se observan evidencias de sedimentos andinos más finos y grisáceos como es el caso de las playas en Con-Con por el Norte y Llo - Lleo por el Sur. Esta evidencia demuestra que las playas de la bahía de Valparaíso reciben solamente aportes de la Cordillera de la Costa a diferencia de las dos playas recién mencionadas que drenan cuencas andinas como son los casos de los ríos Maípo por el Sur y Aconcagua por el Norte.

El principal aporte de sedimentos que dan origen a formaciones de playas en la bahía, proviene del Estero Marga Marga y de la red de drenaje de aguas lluvias provenientes de las quebradas de la zona. Éstos suministran las arenas rubias que caracterizan las playas vecinas a las cuencas costeras de la cordillera de costa.

Estas cuencas, son de régimen hidrológico pluvial, por lo que presentan sus mayores crecidas en los meses de invierno y períodos de estiaje durante los meses de verano. Este aspecto es relevante en el análisis de la dinámica costera del sector ya que la hidrología del estero Marga-Marga guarda una estrecha relación con el régimen de oleaje de este borde costero. En efecto, el período de estiaje de los meses de verano está asociado a la presencia permanente del centro de altas presiones del Pacífico Sur, que inhibe las precipitaciones y en general propicia condiciones de estabilidad y buen tiempo. Por su condición anticiclónica, el oleaje generado por el centro de altas presiones produce frentes de oleaje que en la zona central del país inciden desde el tercer cuadrante y constituyen la condición reinante del clima de oleaje. De esta manera, el período de estiaje de la cuenca del estero coincide con un oleaje de baja energía y un transporte litoral de sedimentos que en general debería tener una componente neta de Sur a Norte.

En los meses de invierno la situación puede cambiar debido a la incursión de centros de bajas presiones que se desplazan desde el Sur y generan frentes de mal tiempo con precipitaciones y vientos ciclónicos que pueden generar intensos temporales de oleaje. De esta manera, es muy probable que las mayores crecidas del estero se presenten junto con temporales de oleaje extremos que incidan desde el cuarto cuadrante con dirección general NW. El transporte litoral de sedimentos asociado a estos temporales debería tener una componente neta de Norte a Sur.

### **5.1.3 Muestreo superficial**

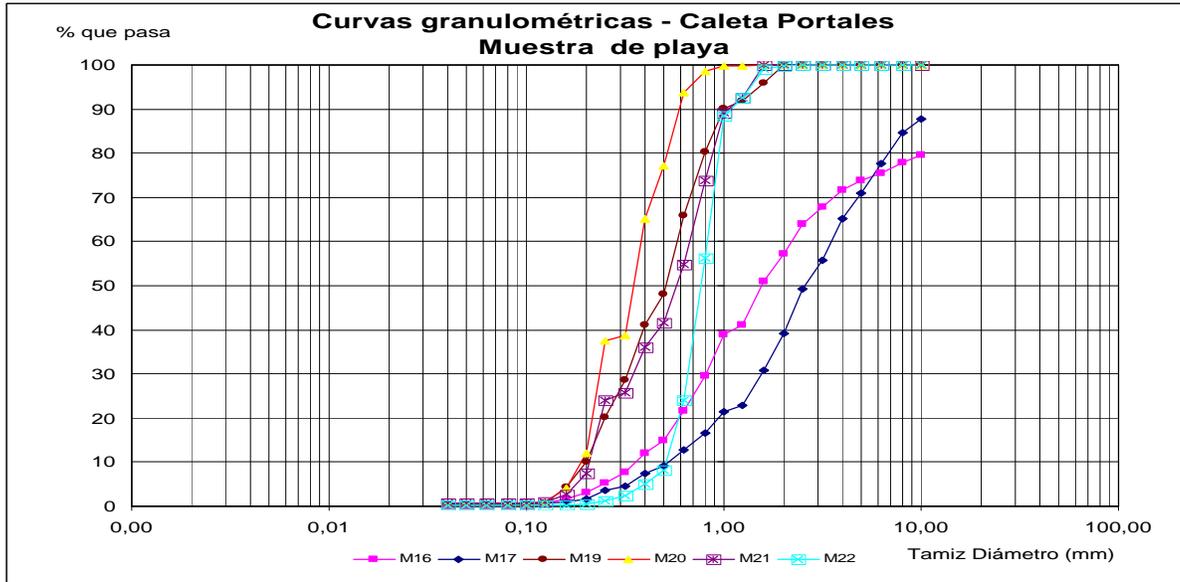
En la bahía de Valparaíso, el Instituto Nacional de Hidráulica ha realizado varias campañas de terreno con la finalidad de darle solución a problemas puntuales existentes en la zona (el mejoramiento de la infraestructura portuaria de las caletas de pescadores artesanales), de esta forma se han obtenido muestras sedimentológicas de fondo marino y de algunas playas. Estas campañas comprenden Caleta el Membrillo, Caleta Portales, sector desembocadura estero Marga Marga, desembocadura estero Reñaca. Con estos antecedentes se puede configurar un perfil sedimentológico de la bahía.

#### **5.1.3.1 Granulometría de la zona Caleta Portales**

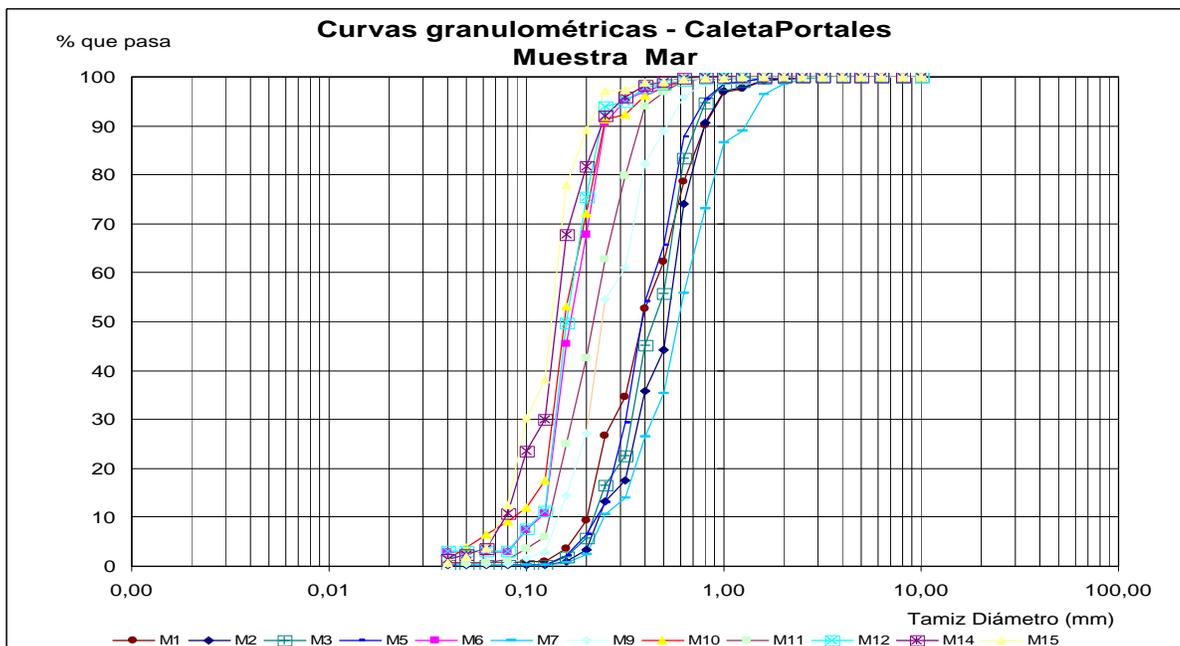
Para representar los sedimentos existentes en la bahía, se debe realizar un análisis granulométrico, el que consiste en representar estadísticamente la distribución de granos de material existentes en la muestra obtenida en terreno, para lo cual se procede a tamizar en

un juego de tamices (juego de mallas micrométricas) normalizadas, ordenados de mayor a menor diámetro, los cuales van atrapando los granos separando el material de suelo que compone la muestra, obteniendo de esta forma la curva representativa del suelo.

En los gráficos 1 y 2 se presentan las curvas granulométricas correspondientes a la zona emergida y sumergida, respectivamente.



**Gráfico 1: Curvas granulométricas correspondientes al perfil emergido. Graficadas las muestras Nº 16, 17, 19, 20, 21 y 22**



**Gráfico 2: Curvas granulométricas correspondientes al perfil sumergido. Graficadas las muestras Nº 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14 y 15**

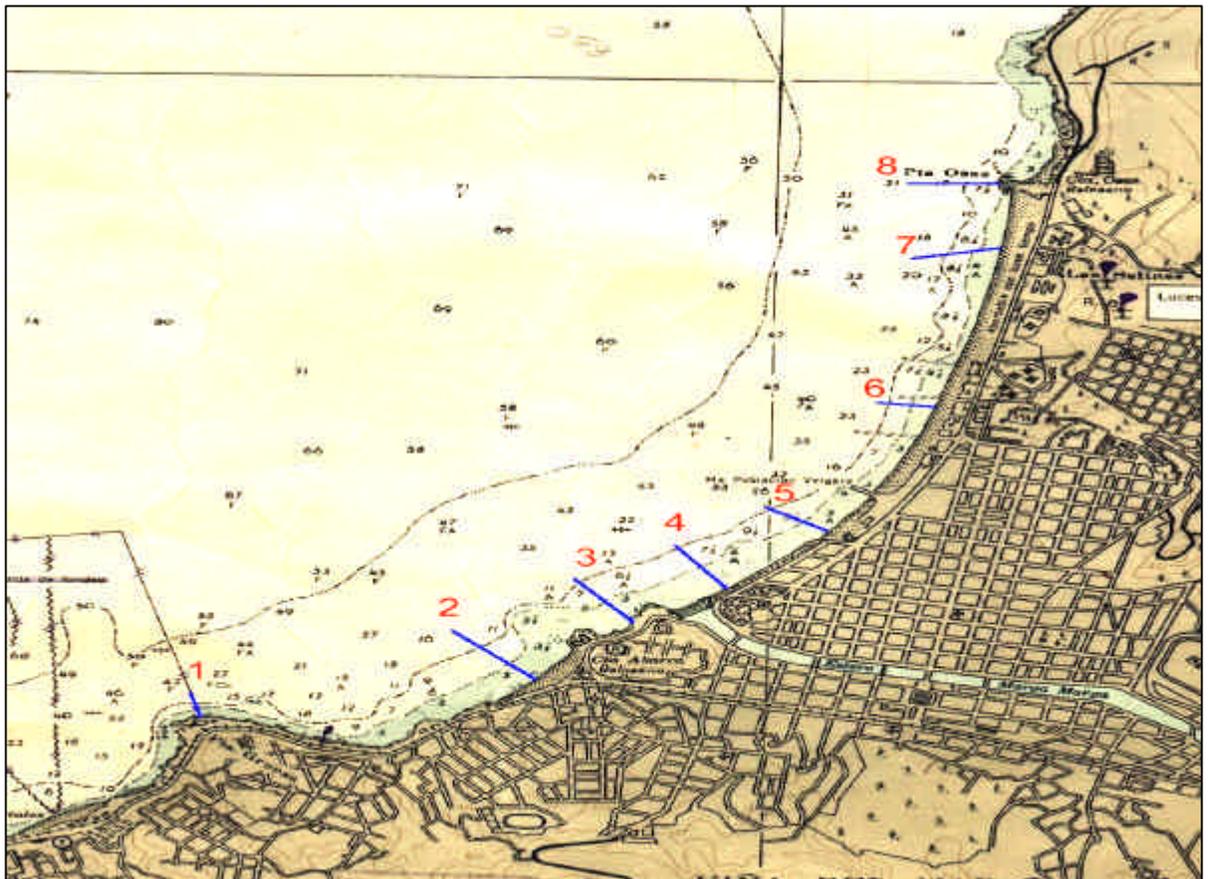
Oscar Cartes Z. – 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

El  $d_{50}$  (Diámetro medio correspondiente al 50% de la muestra) para las muestras correspondientes a la zona emergida (playa), varía aproximadamente entre los 0.4 y 3.15mm, el  $d_{50}$  de las muestras de la zona sumergida varía entre 0.16 y 0.63mm. Las muestras de la parte emergida poseen un  $d_{50}$  mayor a las sumergidas y por consiguiente se observa una pendiente mayor en el estrán alto del perfil, a su vez, la parte sumergida posee un material más uniforme que en la parte emergida.

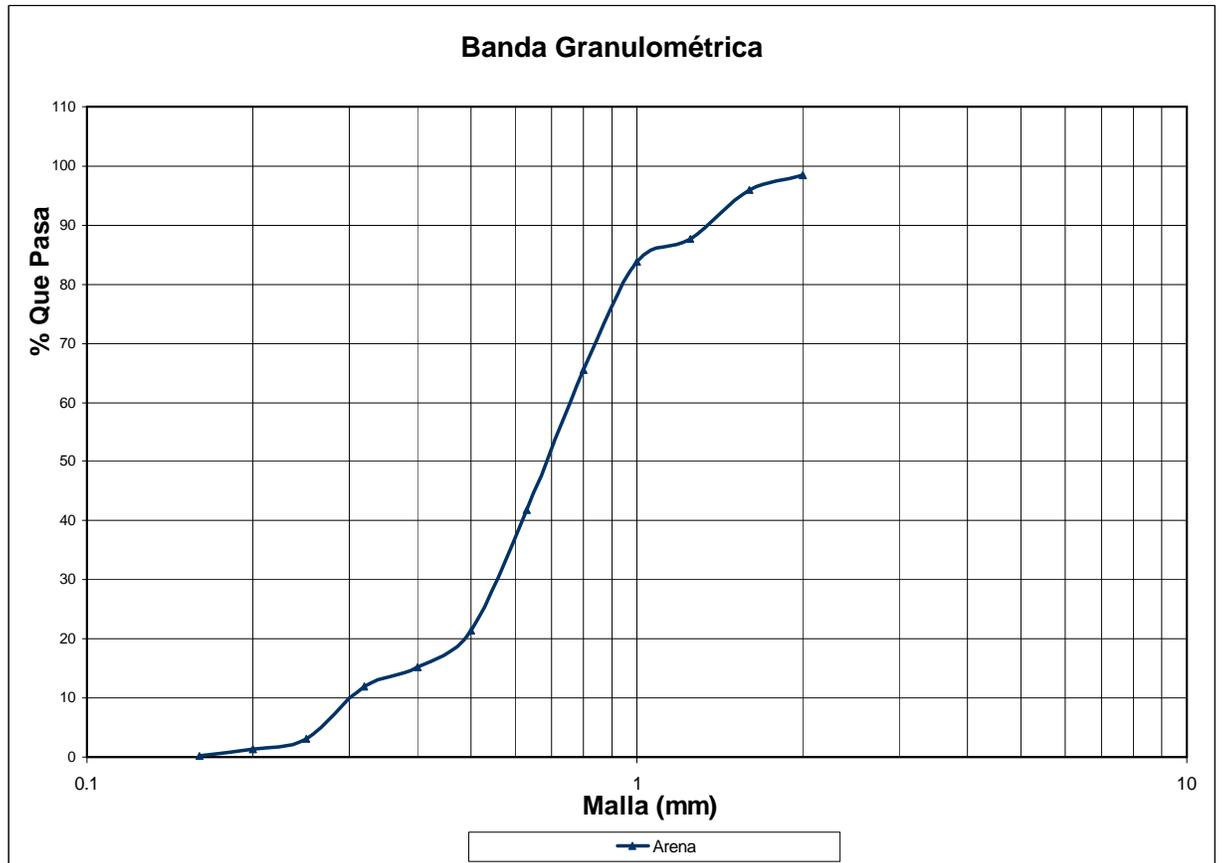
### 5.1.3.2 Granulometría del sector desembocadura estero Marga Marga

La caracterización sedimentológica del borde costero se llevó a cabo sobre la base de la determinación y análisis del diámetro medio del material. Para esto se utilizaron 24 muestras a lo largo de la línea de playa 4 muestras al Sur de la desembocadura y 20 hacia el Norte entre la desembocadura del estero Marga-Marga y Punta Osas. Además, se tomaron muestras sedimentológicas de mar (hasta el veril -20m), a lo largo de 8 perfiles, cuya disposición se muestra en la siguiente figura.



**Fig. 5-3 Disposición de perfiles de muestreo**

Luego del análisis de las muestras se obtuvo como resultado la curva granulométrica presentada en el gráfico 3 corresponde a la curva representativa del sector.



**Gráfico 3: Curva granulométrica representativa**

Siguiendo la clasificación dada por la ASTM, se determinó que el tamaño del sedimento analizado se encuentra en el rango de 0,16mm a 2,0mm, lo que corresponde a arenas finas a medias.

#### 5.1.4 Morfología de los fondos marinos

La descripción del fondo marino se realizó entre la costa y el veril 20m y norte a sur. En el sector de Punta Osas el veril -20m se ubica a más de 400m de la costa, disminuyendo hacia el norte, encontrándose ubicado a la altura de Playa Blanca a 350m. Hacia el sur, la distancia entre el veril -20m y la línea de costa se conserva hasta el inicio de la Avenida Perú (comienzo de la escollera), aumentando hasta unos 500m a la altura de la desembocadura del estero. Siguiendo hacia el sur de la desembocadura, se observa que en la zona de Punta Marga-Marga y Miramar la distancia entre la línea de costa y el veril de referencia, es algo

más que 400m. Luego, en el sector de Caleta Abarca la distancia desde la línea de costa al veril es de aproximadamente unos 570m, disminuyendo hacia el sur, llegando a 150m en el sector de Punta Gruesa. Las pendientes de fondo de mar, en la zona norte del tramo en estudio, son aproximadamente: 5% en el sector de Punta Osas, aumenta al 6% en Playa Blanca y vuelve al 5% en Playa Acapulco. En la desembocadura misma del estero la pendiente es de aproximadamente un 3,5%. Mientras que hacia el sur, son aproximadamente: 5% en el sector de las dos Puntas (Punta Marga-Marga y Miramar) y 3% en Playa Caleta Abarca. Desde el sector del club de Yates Recreo las pendientes comienzan a aumentar bruscamente, llegando a valores del 13% en Punta Gruesa.

A lo largo de la línea de costa presentan algunos rasgos singulares, como playas, roqueríos, etc. Estas singularidades, expresadas en % de longitud respecto de la longitud total de la zona descrita, muestran lo siguiente:

- Sector playa 54%
- Otros sectores: escollera, sector rocoso y roquerío natural 46%
- Escollera 11,5%
- Sector rocoso 11,5%
- Roquerío natural 23%

Los rasgos fisiográficos más notables son:

- Sector de la Avenida Perú, entre Playa Acapulco y Playa Casino. En esta zona se observa una escollera de defensa costera con una extensión aproximada de 700m.
- Sector rocoso desde el club de Yates Recreo hasta Punta Gruesa con una extensión aproximada de 700m.
- Sector de roquerío natural entre Punta Marga-Marga y Punta Miramar, de 500m de extensión
- Sector de roquerío natural al sur del Balneario Caleta Abarca de 700m de extensión.
- Las playas con bermas más amplias se encuentran en el sector entre Playa Los Marineros, Playa Blanca y Playa Caleta Abarca.
- Las menores pendientes se presentan en la Playa Caleta Abarca y son del orden del 3%, mientras que las más fuertes se presentan en Punta Gruesa y son del orden del 13%.

## 5.2 Estudio de oleaje

La modelación numérica de la propagación de oleaje se realiza con el objeto de determinar las características del oleaje incidente desde aguas profundas hasta la bahía, de esta forma se determinan dirección y la altura del oleaje en las cercanías de la costa.

### 5.2.1 Oleaje

Se cuenta con registros escalares de mediciones de olas realizadas por el SHOA y que además no cubren un período de tiempo estadísticamente representativo, lo que no permite caracterizar adecuadamente el clima de oleaje incidente (alturas, período y dirección del frente de olas). Para suplir esta deficiencia se utilizó un modelo de pronóstico de oleaje desarrollado por Estellé y Muñoz en 1979, basado en el método de Sverdrup, Munk y Bretschneider (SMB). Este método permite crear una estadística del oleaje en la zona de generación a partir del estudio de cartas sinópticas de superficie del tiempo atmosférico.

Durante 1991 el Instituto Nacional de Hidráulica, utilizó el modelo SMB para elaborar una estadística del régimen de oleaje para el Puerto de Valparaíso con la cual, se creó una base de datos representativa del régimen de oleaje, a partir del procesamiento de tres cartas sinópticas diarias (8, 14 y 20 horas.), para los años 1973, 1974, 1977, 1987 y 1988, sumando un total de 4.016 cartas analizadas.

Para la calibración del modelo SMB, se utilizaron cartas sinópticas confeccionadas por la Dirección Meteorológica de Chile, correspondientes al período comprendido entre los días 10/05/81 al 25/05/81 y desde el 23/07/81 al 09/08/81. En cuanto al oleaje, se empleó el registro del SHOA, durante el período comprendido entre el 10/05/81 al 25/05/81 y desde el 23/07/81 al 09/08/81.

La interpretación de la información meteorológica de las cartas sinópticas se basa principalmente en el análisis del régimen de vientos asociado a los centros de baja presión, lugar en que se genera el frente de olas, para esto se debe tener presente el paralelismo y radio de curvatura de las isobaras. De esta forma se obtienen la latitud del centro de la tormenta, el "Fetch" (Longitud, medida en forma paralela al frente de olas, del área que comprende la zona de generación), distancia de decaimiento, rumbo, y dirección del frente de olas.

Con los resultados SMB, se elaboraron tablas de incidencia de alturas de olas para cada uno de los años analizados. Posteriormente se efectuó un análisis por dirección y período del oleaje para cada uno de los años estudiados.

Los estados de mar para los años 1973, 1974, 1977, 1987 y 1988 se caracterizaron con 8.992, 9.340, 9.772, 8.863 y 8.935 datos de olas. La siguiente tabla muestra el número de eventos agrupados por dirección.

**Tabla 5-1. Análisis de Datos de Olas por Direcciones**

Año	Nº Datos	Nº de olas			Total por año	
		SW	W	NW	Olas	Calmas
<b>1973</b>	8992	2131	2501	253	4885	4107
<b>1974</b>	9340	1291	2624	59	3974	5366
<b>1977</b>	9772	1683	3919	57	5659	4113
<b>1987</b>	8863	2538	2389	18	4945	3918
<b>1988</b>	8935	2165	1676	7	3848	5087
<b>Total</b>	45902	9808	13109	394	23311	22591
<b>% del Total de Datos</b>		21,37	28,56	0,85	50,78	49,22

Recientemente el INH realizó un proyecto (2002), el cual se basó en análisis espectral de olas en el interior de la poza de puerto de Valparaíso, la información de oleaje referida a la Boya Triaxis que pertenece al SHOA

De este trabajo se desprendió que el método SMB no es muy exacto, existiendo un error de la aproximación en el método teórico del 20 %.

Sin embargo para ambos casos, SMB y mediciones de la boya, se observa que la dirección W, tiene el mayor porcentaje de incidencia, y constituye la dirección reinante. A su vez, se puede concluir que las direcciones SW y NW se pueden considerar como las direcciones dominantes.

### 5.2.2 Análisis del oleaje por Período (SMB)

Con el objeto de conocer la distribución de las olas generadas para los períodos de interés, esto es T= 8, 10, 12 y 14s y direcciones SW, W y NW, se efectuó un análisis de incidencia para cada una de estas condiciones que considera los tres años de información. Los resultados se presentan en la tabla 5-2, donde se observa que el 31,64 % de los casos corresponden a olas con período 8 s, en tanto que las olas de período 10 s representan el 13,62 % de los datos, las de 12 s llegan al 3,90 %, y por ultimo las de 14 s de período alcanzan al 1,62%.

**Tabla 5-2. Análisis de Datos de Olas por Períodos método SMB**

Dirección	T = 8 s	T = 10 s	T = 12 s	T = 14 s
SW	6225	2663	709	211
W	8087	3467	1052	503
NW	210	124	32	28
<b>Total</b>	14552	6524	1793	742
<b>% del Total</b>	31,64	13,62	3,9	1,62

Con el objeto de caracterizar el clima extremo de olas a la cuadra de la bahía, a los datos entregados por el Modelo SMB, se les ajustó una curva de probabilidades tipo Weibull. A partir de este ajuste, se procedió al cálculo de las alturas de olas significativas en aguas profundas para distintas direcciones y períodos de ola, en función del período de retorno. Los períodos de retorno se calcularon según la siguiente expresión.

$$T_r = \frac{1}{N \times (1 - P(H_s))} \quad (5.06)$$

Donde:

- Tr = Período de retorno (años)
- P (Hs) = Probabilidad de No - Excedencia
- N = N° de estados de mar considerados por año

En la tabla siguiente se presentan los valores de la altura de ola para distintos períodos de retorno de acuerdo a la distribución de probabilidades de Weibull, para cada uno de los tres años analizados y para el conjunto de los tres años analizados.

**Tabla 5-3. Análisis de Datos de Ola por Direcciones método SMB**

CASO	H <sub>so</sub> ( m )					
	Tr=100	Tr=50	Tr=25	Tr=10	Tr=5	Tr=1
<b>SW T = 10 s</b>	6,67	6,34	6,00	5,55	5,20	4,35
<b>SW T = 12 s</b>	4,76	4,61	4,46	4,25	4,08	3,63
<b>SW T = 14 s</b>	5,45	5,31	5,15	4,93	4,75	4,25
<b>W T = 10 s</b>	9,11	8,69	8,27	7,69	7,25	6,18
<b>W T = 12 s</b>	7,70	7,39	7,07	6,63	6,28	5,41
<b>W T = 14 s</b>	6,51	6,36	6,20	5,97	5,78	5,29
<b>NW T = 10 s</b>	7,75	7,38	6,99	6,45	6,01	4,85
<b>NW T = 12 s</b>	5,87	5,53	5,17	4,66	4,23	3,05
<b>NW T = 14 s</b>	10,63	9,77	8,89	7,67	6,70	4,17
<b>SW GENERAL</b>	8,37	7,88	7,39	6,74	6,25	5,12
<b>W GENERAL</b>	10,15	9,59	9,04	8,31	7,75	6,46
<b>NW GENERAL</b>	9,12	8,59	8,05	7,32	6,75	5,35

Nota: Tr en años

Para nuestro caso después de un análisis de la información recopilada. Si esta información se contrasta con los datos de la boya Triaxis del SHOA (por ser de carácter reservado no son expuestos en este texto), se encontraran diferencias notables, por lo cual se utilizarán condiciones intermedias respaldadas con las mediciones y modelaciones que ha realizado el INH en los diferentes estudios de la bahía de Valparaíso. Las cuales son representativas de los períodos normales que se pretenden representar.

En resumen para la modelación se considerarán las siguientes condiciones de oleaje:

- **Condición Reinante prevaleciendo la dirección Weste.**
- **Altura de ola promedio 1m condiciones de verano y temporal 2,5m.**
- **Condición dominante Nor- Weste.**
- **Altura de ola promedio 1 – 1,5m en verano e invierno 6m promedio.**
- **Condición de interés Sur Weste puesto que se presenta en primavera y verano junto con el Weste con alturas de 1,5m y en invierno de 2,5m.**

**Tabla 5-4. Resumen Condiciones Modelación Periodo de Invierno**

Dirección		H <sub>so</sub>	Periodo
<b>SW</b>	225°	2.5m	14s
<b>W</b>	270°	2.5m	12s
<b>NW</b>	315°	6m	14s

**Tabla 5-5. Resumen Condiciones Modelación Periodo de Verano**

Dirección		H <sub>so</sub>	Periodo
<b>SW</b>	225°	1.5m	10s
<b>W</b>	270°	1.0m	10s

### 5.3 Mareas

La oscilación mareal característica de este litoral es de origen astronómico y principalmente debido a la acción gravitacional y rotacional del sistema Tierra, Luna y Sol. Por su mayor cercanía a la Tierra, la Luna es la que ejerce una acción más preponderante, y es la razón por la cual el período típico de la marea es de aproximadamente 12,42 h.

En la costa central de Chile, impera un régimen de mareas mixto semidiurno. Esto significa que existen dos bajamares y dos pleamares durante el día y con distinta amplitud.

Para establecer las condiciones de marea en la bahía, se consideró la información de las "Tablas de Marea de la Costa de Chile", publicadas anualmente por el SHOA.

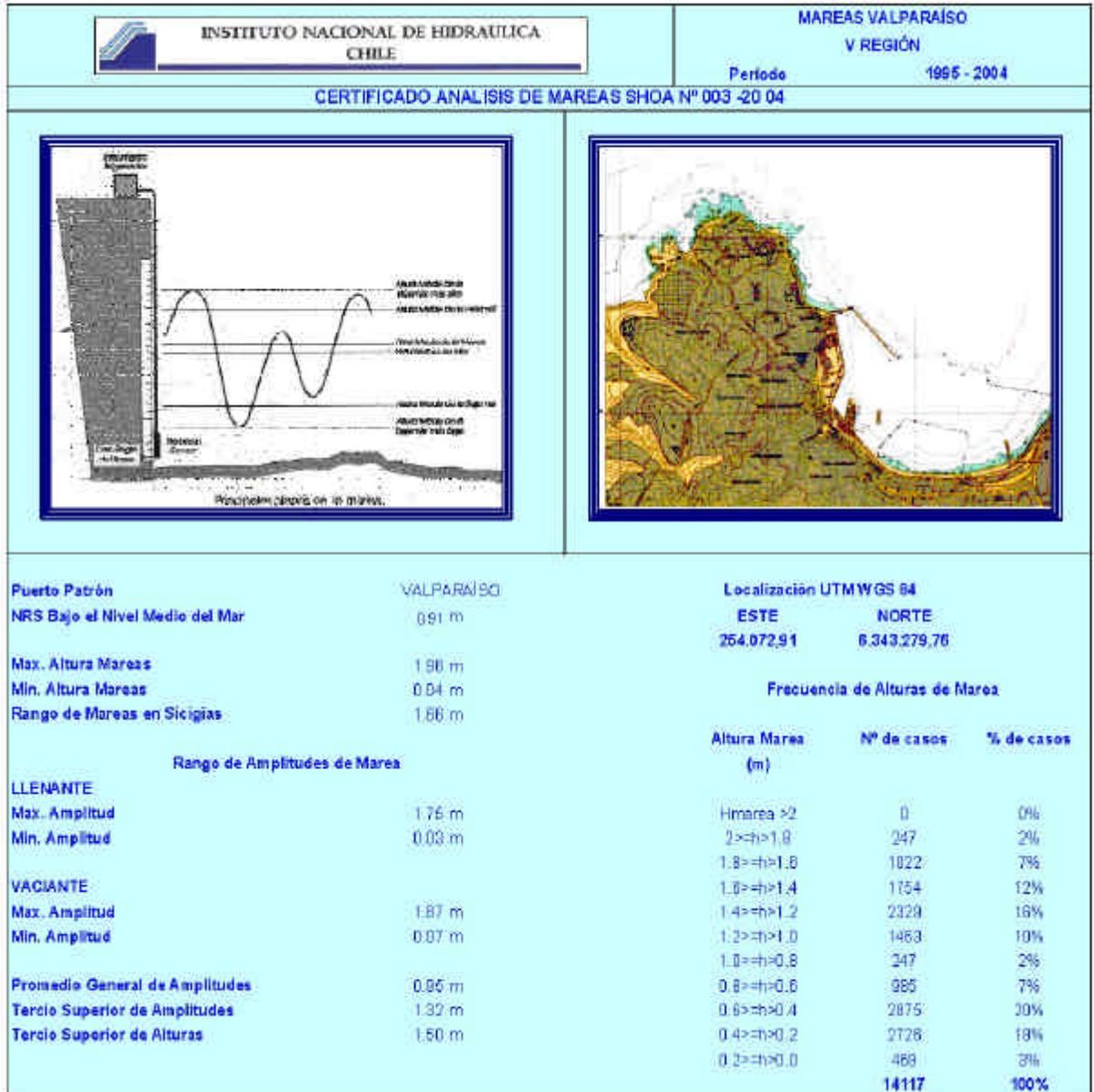
Los registros correspondientes al Puerto de Valparaíso (puerto patrón) indican que se establece que el Nivel Medio del Mar corresponde a +0,91m NRS.

El NRS (Nivel de Reducción de Sondas) es el plano al cual están referidas las profundidades de una localidad. En Chile, corresponde al nivel alcanzado por la mayor bajamar de sicigias de la localidad, estando la luna en el perigeo. En otras palabras es el nivel de referencia, obtenido con la mayor bajamar histórica.

A continuación se presenta una caracterización de la oscilación mareal para el Puerto de Valparaíso, que se ha asumido como válida para la Bahía de Valparaíso, para lo cual se

recurrió a los registros de marea de las “Tablas de Marea de la Costa de Chile” para los años 1995 - 2004

**Tabla 5-6. Análisis de mareas periodo 1995 – 2004 para el puerto de Valparaíso**



Lo mismo ocurre con los rangos máximos y mínimos de las llenantes y vaciantes. Éstos se definen como la diferencia de cota entre la bajamar y la pleamar y viceversa, respectivamente. En el caso de la máxima llenante es de 1,75m y máxima vaciante es de 1,87m.

#### 5.4 Generación de la batimetría

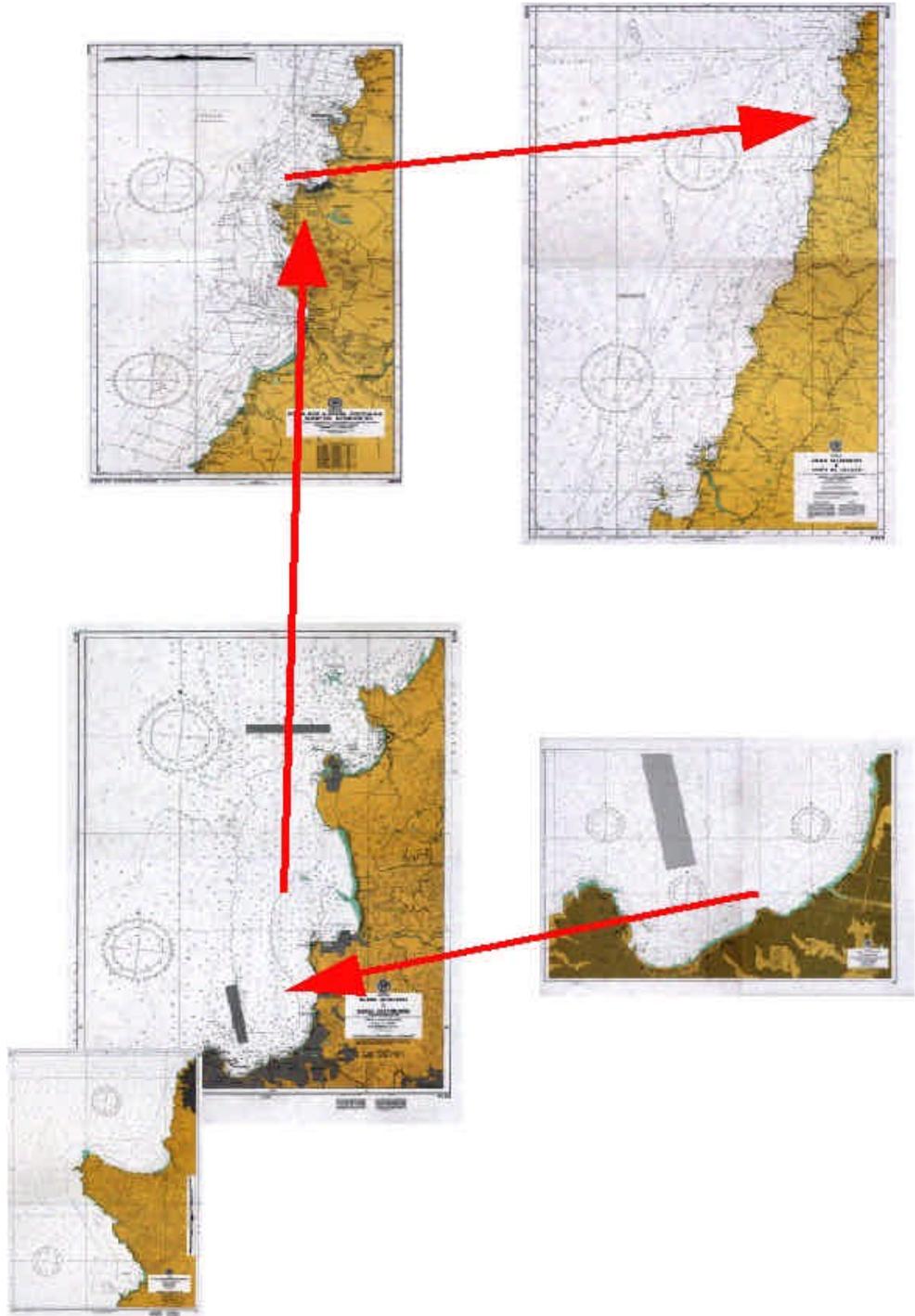
La generación de la batimetría de la zona de modelación se obtiene al unir en un solo plano cartas náuticas, planos de sondajes y taquimetrías de las campañas de terreno realizadas por el Instituto Nacional de Hidráulica, referenciadas y escaladas a la misma posición geográfica y referida al sistema geodésico WGS84 zona 19 sur.

El área de trabajo para la extracción de los datos es de 80 x 80 Km., llegando hasta profundidades de -2500m. Para restringir posteriormente el área de trabajo del modelo numérico de propagación de oleaje, se debe tener en cuenta que el efecto que produce el fondo sobre la ola es función del periodo (T) y la altura de ola oceánica (Hso)

Se obtiene una grilla tridimensional de puntos en coordenadas norte, este y cota, con puntos separados en el par ordenado X, Y cada 20m, estos datos serán ingresados al software de modelación numérica Mike 21 V-2003.

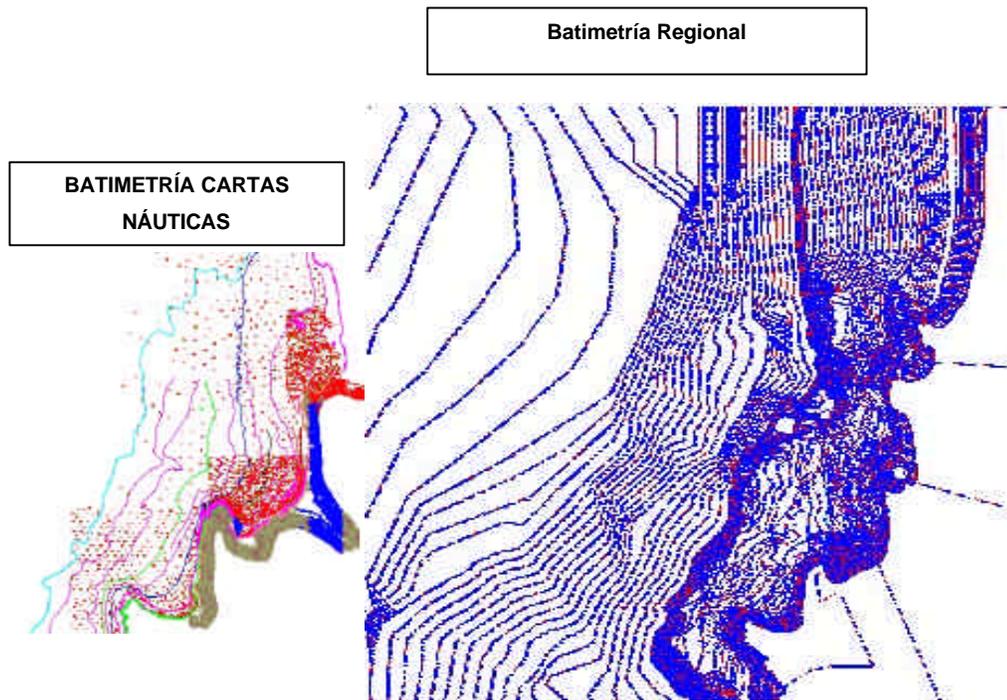
##### **Cartas náuticas**

- Quintero a Valparaíso N° 4230
- Bahía de Valparaíso a Golfo de Arauco N° 5000
- Punta Pite A Punta Topocalma N° 5100
- Bahía y Puerto de Valparaíso N° 5111
- Punta Ángeles a Rada de Quintay N° 5112



**Fig. 5-4 Disposición de Cartas Náuticas SHOA**

A estas cartas se le agrego la información obtenida por el INH, obteniéndose la siguiente batimetría:



**Fig. 5-5 Batimetría Final**

Es muy importante obtener una modelación tridimensional realista de los accidentes geográficos tanto costeros como submarinos, los cuales deben estar perfectamente modelados en 3D, de esta forma se determinarán zonas de protección natural a la influencia del oleaje y corrientes marinas.

De esta forma se pueden obtener resultados aceptables, que permitan predecir trayectorias de contaminantes derramados accidentalmente, descargados al mar por los centros urbanos, arrastrados por los cauces naturales y quebradas.

Otro factor cuantificable, es el efecto secundarios que trae consigo la contaminación de las bahías, es lo referido a los efectos sobre el turismo ya que no se debe olvidar que todos los contaminantes arrastrados hacia el mar tarde o temprano son devueltos por este, sobre todo en lo referido a la zona cercana a la costa, en primer momento por la zona de rompientes de las olas y en segundo lugar por patrones de circulación posterior a esta zona (entre la rompiente y el borde costero), los que circulan en forma paralela a la costa siendo impedidos de abandonar este paralelismo por las olas.

Uno de los puntos importantes a considerar es la presencia de dos emisarios submarinos en la bahía, el primero ubicado en el Sector de Loma Larga con una longitud total aproximada de 470m, con una profundidad aproximada de -60m en su punto más alejado de la costa y el segundo se encuentra en las cercanías de la desembocadura del estero Marga Marga con una longitud aproximada de 1400m y una profundidad aproximada de -52m en su punto de descarga más alejado de la costa.

#### **5.4.1 Consideraciones**

Para abordar la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona de estudio, se determinó el área de influencia del oleaje que afecta a la bahía en un Dominio Regional y Local a la vez. Propagando el oleaje - regional - con grillas de mayor tamaño hasta profundidades intermedias y obtener las condiciones de borde para la zona local, la cual esta generada a un tamaño de grilla menor que la anterior y por ende con mayor información batimétrica.

Para la modelación del oleaje regional se despreciaron los efectos disipativos de la rotura y de la fricción contra el fondo. Se consideró oleaje irregular y unidireccional.

Se realizó un total de 5 pases correspondientes a 3 direcciones NW, W, y SW, y 3 períodos 10, 12 y 14s para alturas de ola en aguas profundas  $H_{rms} = 1, 1.5, 2.5$  y 6m.

Para el caso de la modelación de corrientes se restringió la zona de modelación puesto que el modelo resuelve sus ecuaciones haciendo el supuesto de pendiente suave y por lo general se considera su utilización para pequeñas zonas de trabajo, los resultados obtenidos al utilizar una zona mucho más amplia se muestran en el punto 5.8 de este texto, los que al ser contrastados con las salidas graficas para las mismas condiciones de oleaje, realizados en los estudios de la bahía de Valparaíso que el INH ha llevado a cabo en sus investigaciones se asemejan perfectamente, con la salvedad que se utilizaron zonas de modelación muy pequeñas.

## 5.5 Resultados de la modelación

### 5.5.1 Batimetría Regional

A continuación se presenta la batimetría regional generada en el modelo, que constituye la base para la simulación y para una correcta utilización de los recursos informáticos disponibles.

La simulación inicial para las direcciones SW y W se modeló en PMS con toda la batimetría, para las direcciones el modelo debe considerar que tres fronteras, dos pertenecen al ámbito marítimo y una al terrestre, la batimetría original debe ser rotada para obtener esta condición de borde para la dirección NW.

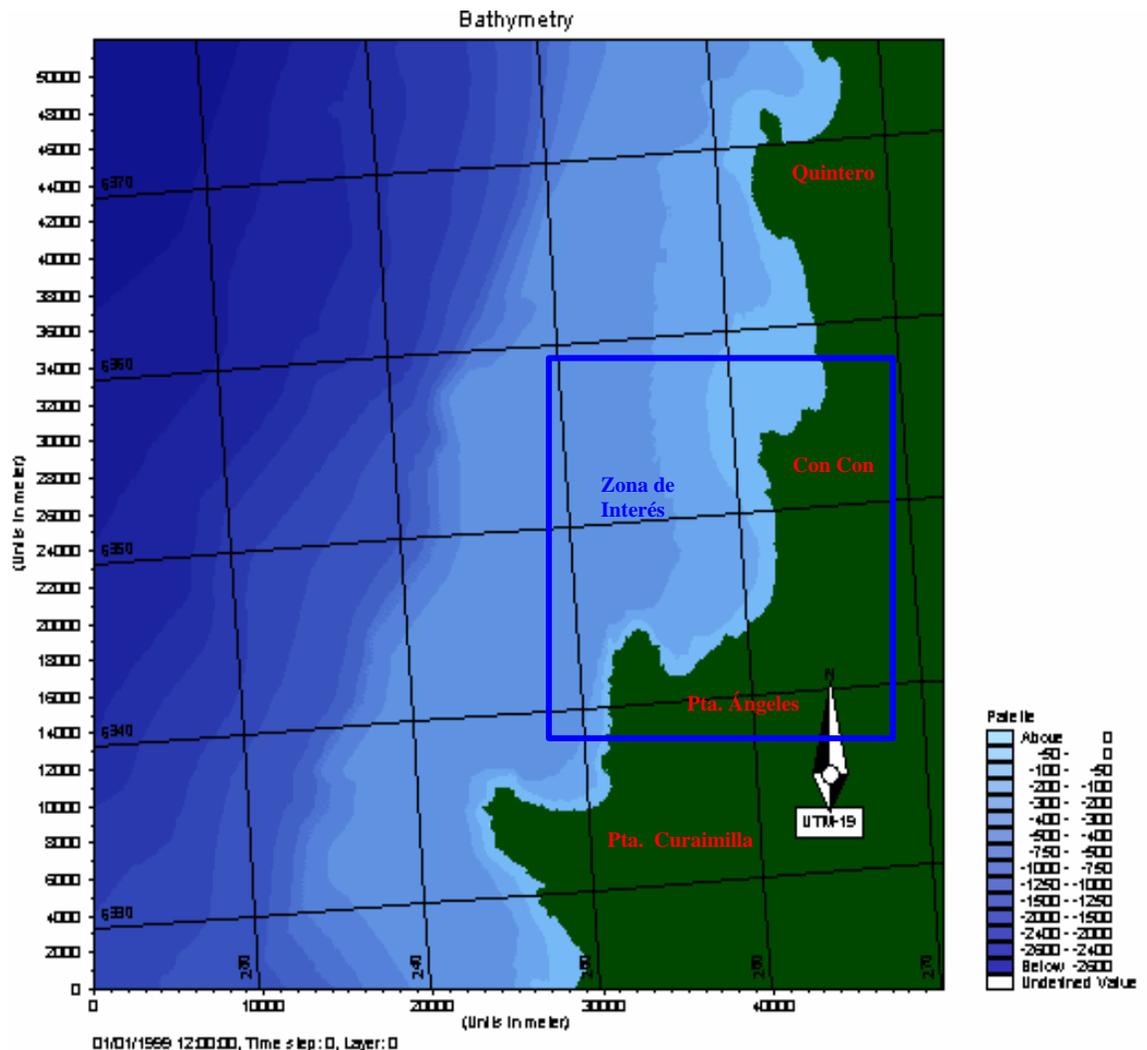


Fig. 5-6. Batimetría Regional Dirección SW y W

Oscar Cartes Z.- 09-0015074

[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

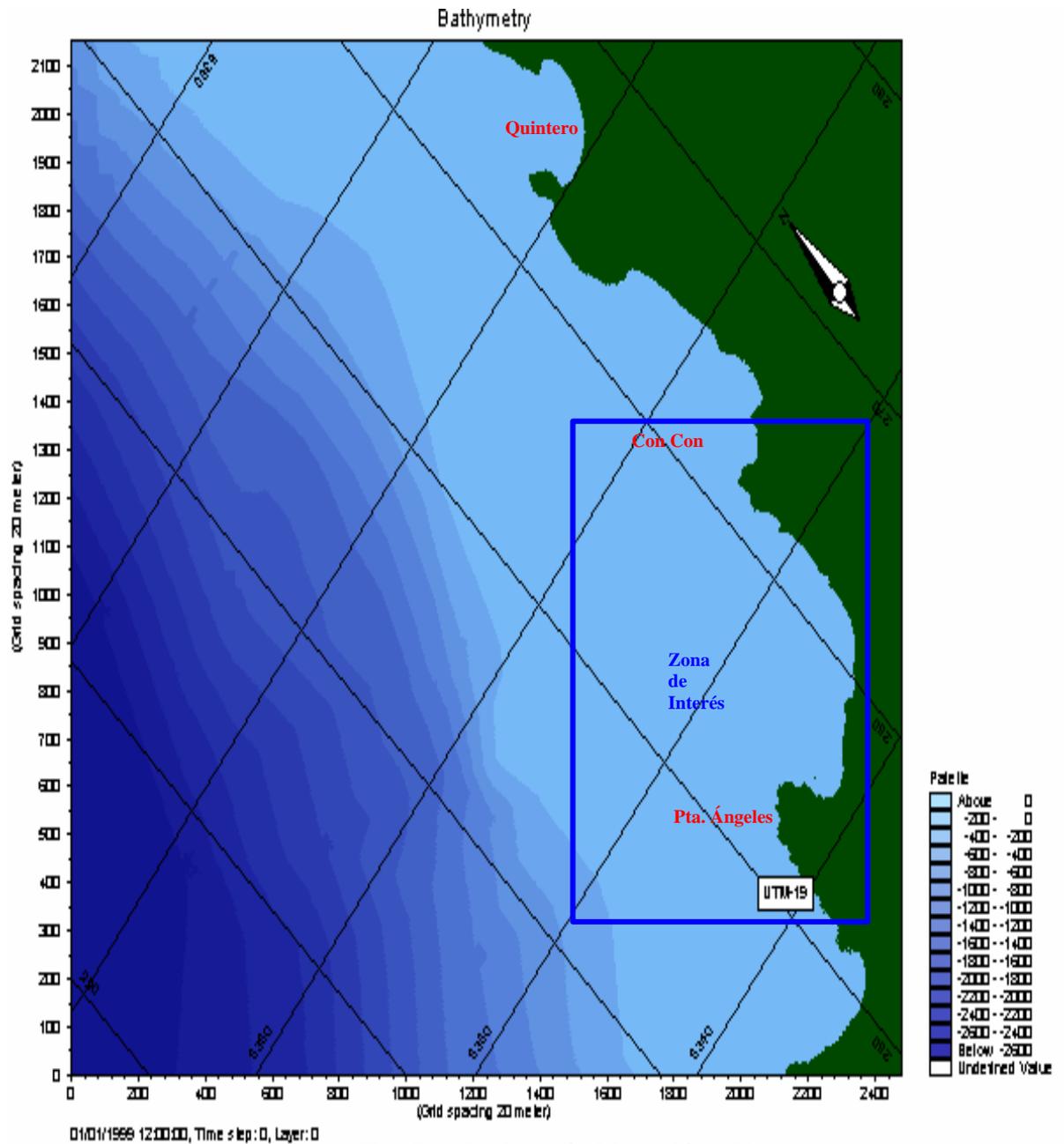
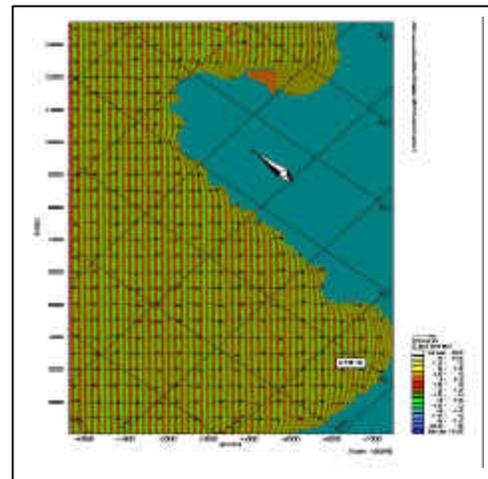
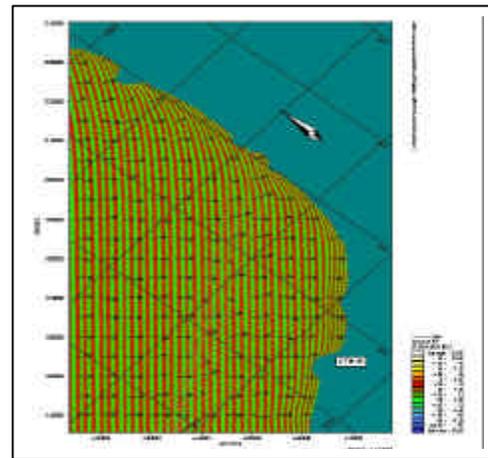
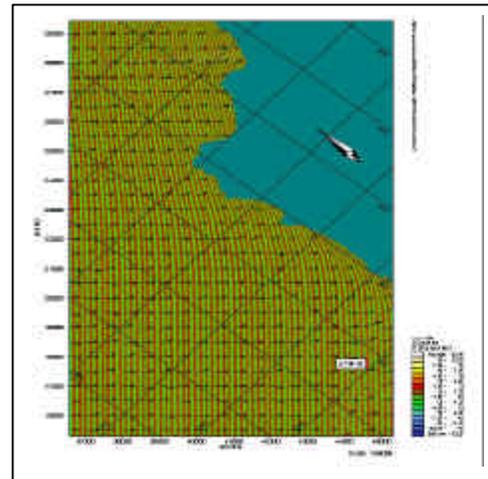
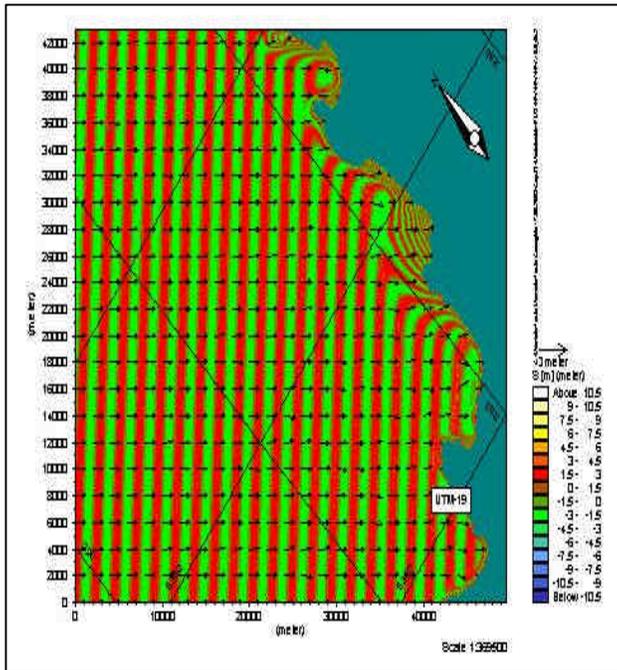


Fig. 5-7. Batimetría Dirección NW

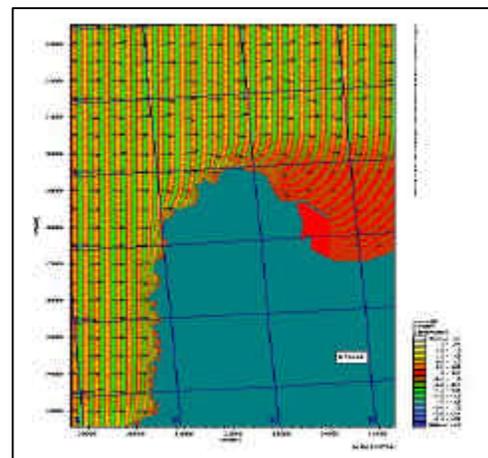
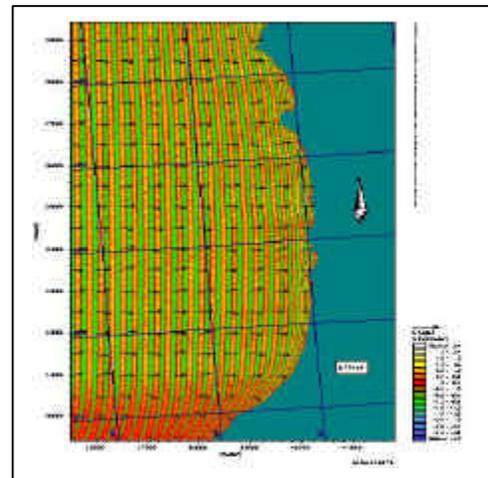
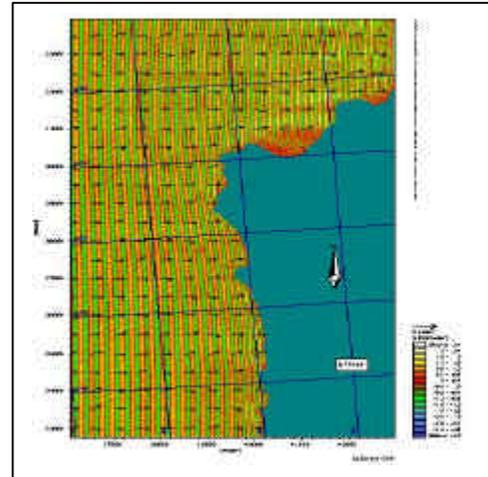
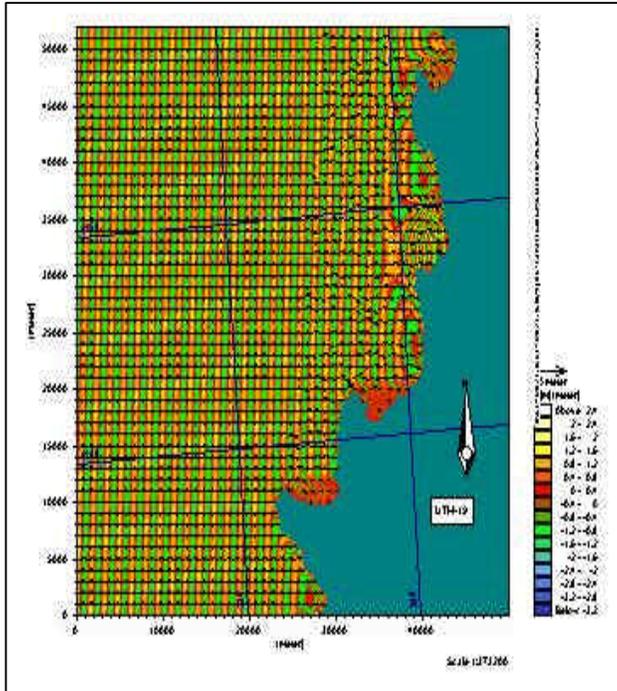
## 5.6 Modelación de oleaje (modelo PMS), condición invierno

### 5.6.1 Dirección NW $H_{s0} = 6m$ , $T = 14s$



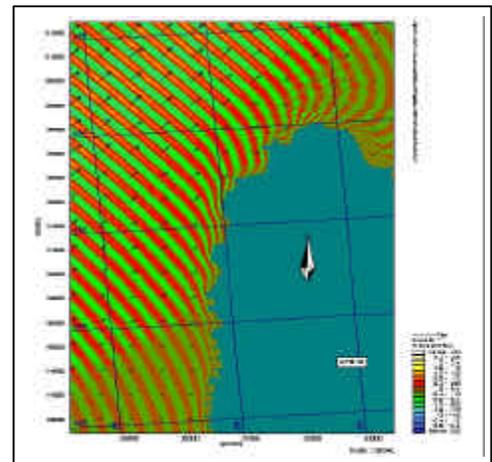
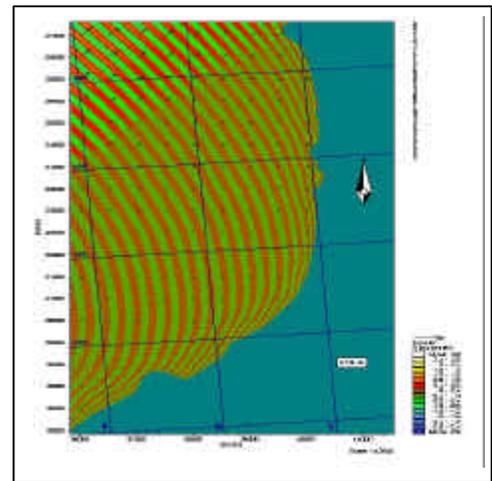
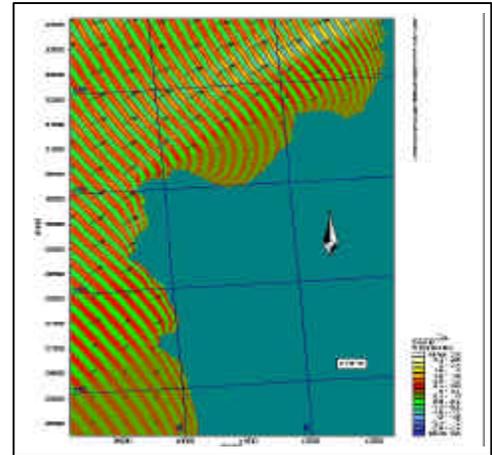
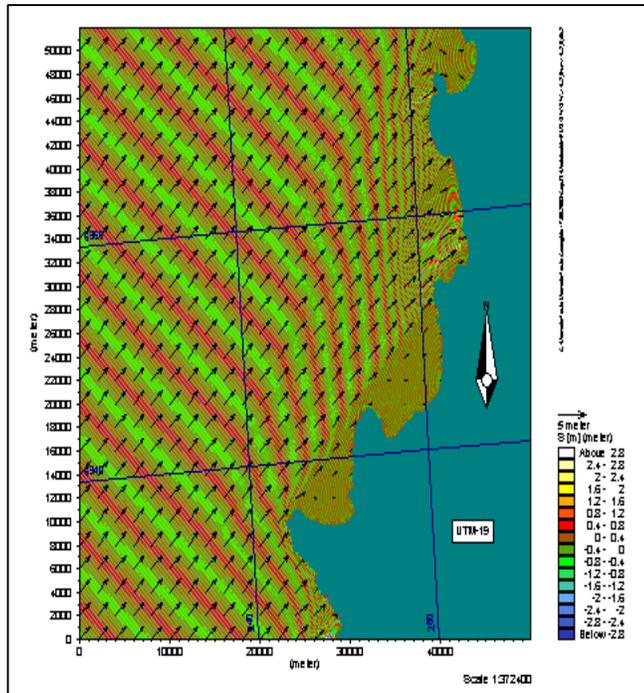
Se observa una propagación frontal a la bahía, la zona portuaria se encuentra sometida a difracción pequeña por efecto de Pta. Ángeles, su influencia llega hasta el sector de Caleta Portales, no logra apreciarse el efecto de difracción que produce Pta. Curaimilla, este efecto hace que el frente de oleaje ingrese frontal a la costa, y por lo tanto los emisarios no son capaces de evacuar hacia aguas profundas los contaminantes, además para cualquier descarga de contaminantes en la superficie estos serán arrastrados hacia el puerto de Valparaíso

### 5.6.2 Dirección W $H_{so} = 2.5m$ , $T = 12s$



En esta dirección se observa una propagación frontal en toda la extensión de la bahía, presentándose un efecto de difracción producido por Pta. Ángeles, el cual se extiende hasta el sector de punta gruesa al norte de Caleta Portales, el ángulo menor que en caso anterior para los frentes de propagación lleva consigo una mayor energía en la rompiente de la ola, lo que a su vez hace presagiar una mayor tasa de transporte de materiales en la totalidad el sector de litoral.

### 5.6.3 Dirección SW $H_{so} = 2.5m$ , $T = 14s$

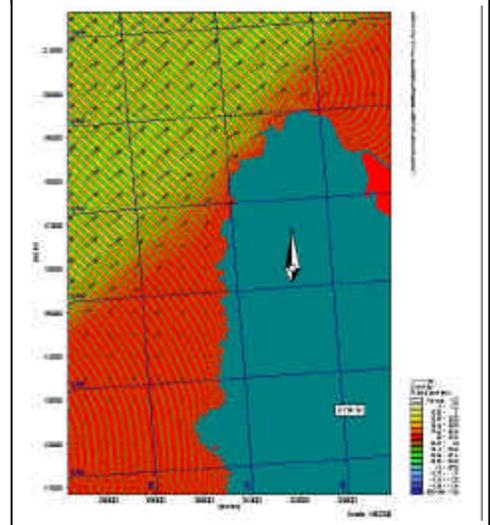
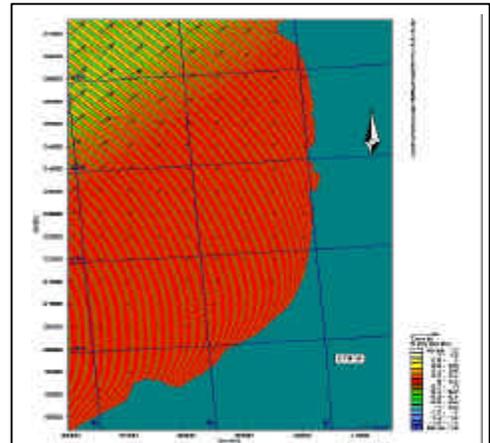
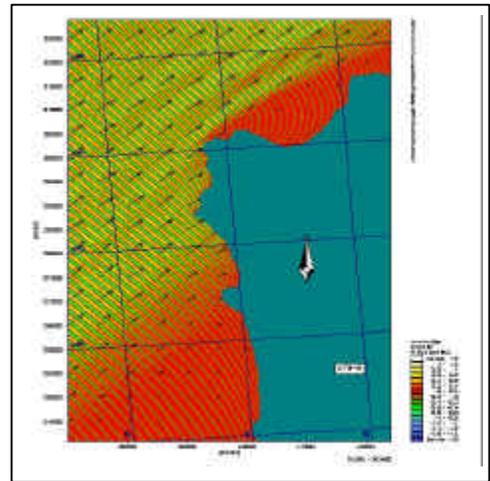
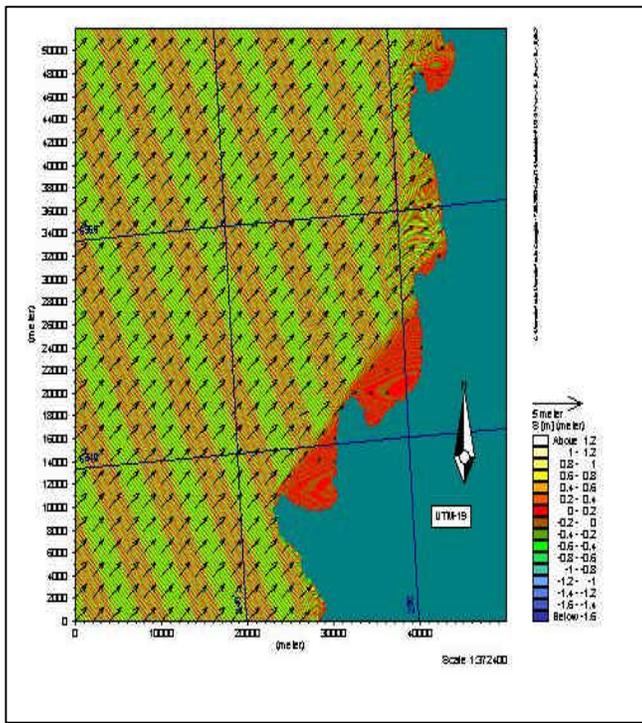


En esta dirección se observa una propagación en ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la costa, lo cual produce que la difracción generada por Pta. Curaimilla genere una zona de baja energía en toda su extensión hasta Pta. Ángeles, provocando una disminución considerable en la tasa de transporte y renovación de las masas de agua en el sector de Loma Larga, lo mismo ocurre con Pta. Ángeles, lo que provoca una difracción que afecta a toda la bahía de Valparaíso llegando al norte de Pta. Ossa (Norte del Estero Marga Marga), produciendo una protección natural al oleaje disminuyendo la energía y la tasa de transporte de litoral

Por último para frentes mal tiempo de invierno, generados por vientos anticiclónicos de centros de baja presión, el sector de interés se encuentra totalmente expuesto y por lo tanto las alturas de olas que llegarían al bordé costero podrían ser aun mayores en su altura a las generadas en aguas profundas.

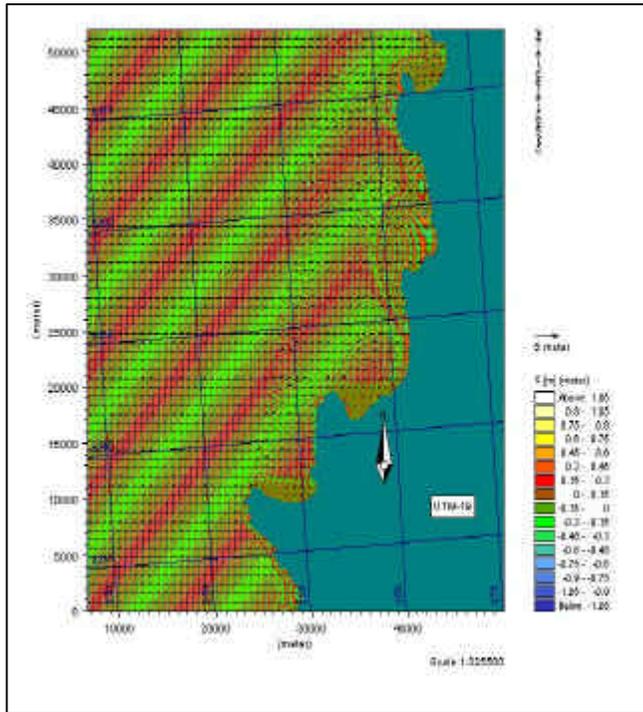
## 5.7 MODELACIÓN DE OLEAJE (MODELO PMS), CONDICIÓN VERANO

### 5.7.1 Dirección SW $H_{so} = 1.5m$ , $T = 10s$

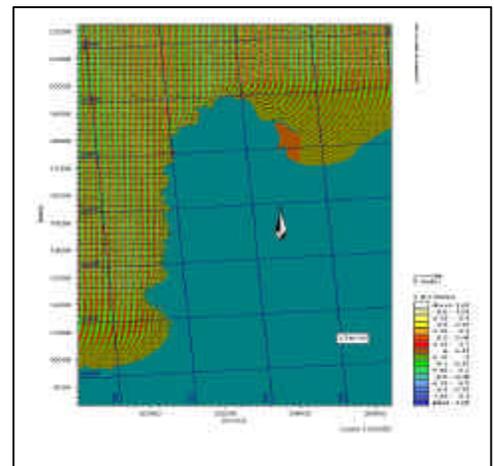
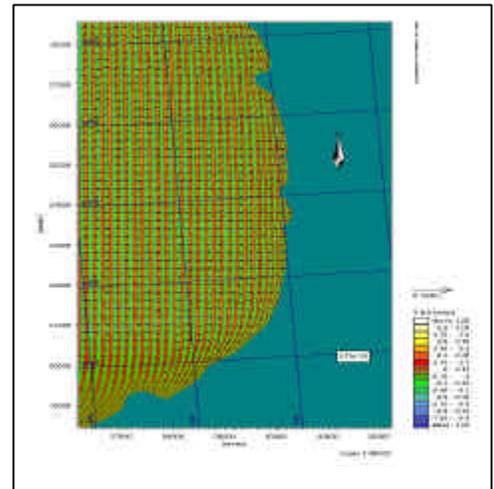
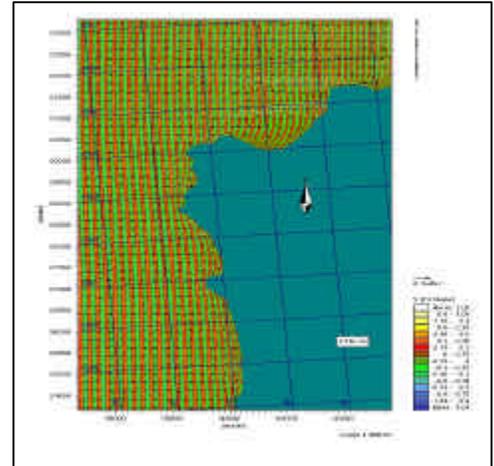


Idéntico al caso para la condición de invierno para la misma dirección y período pero con menor energía.

### 5.7.2 Dirección W $H_{so} = 1.0m$ , $T = 10s$

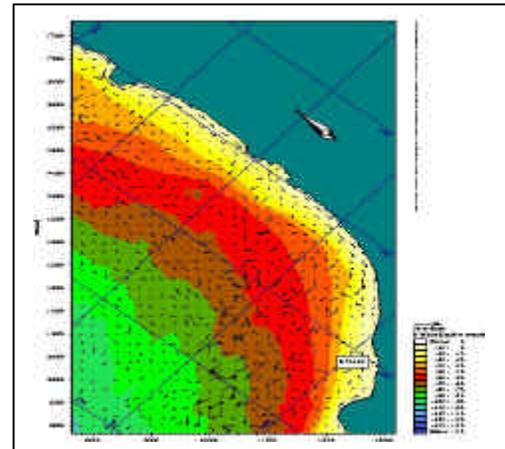
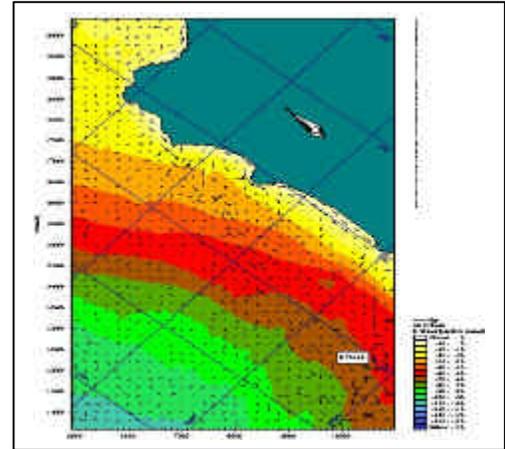
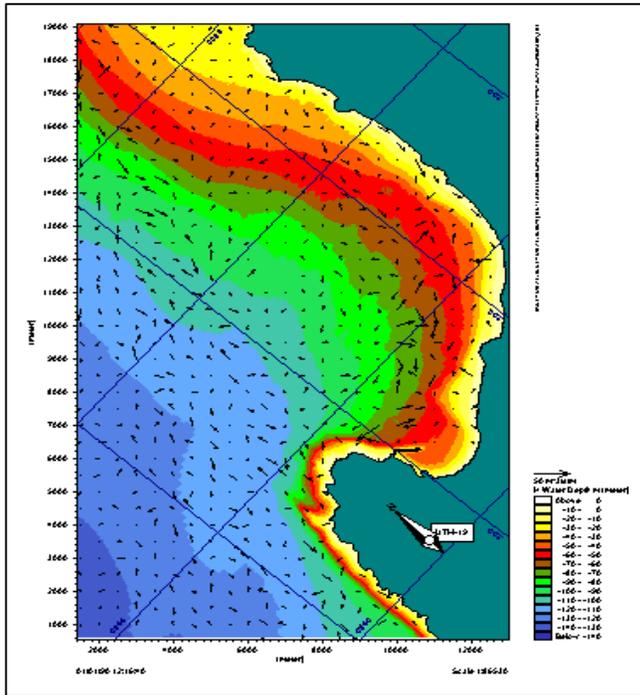


Idéntico al caso para la condición de invierno para la misma dirección y período pero con menor energía.

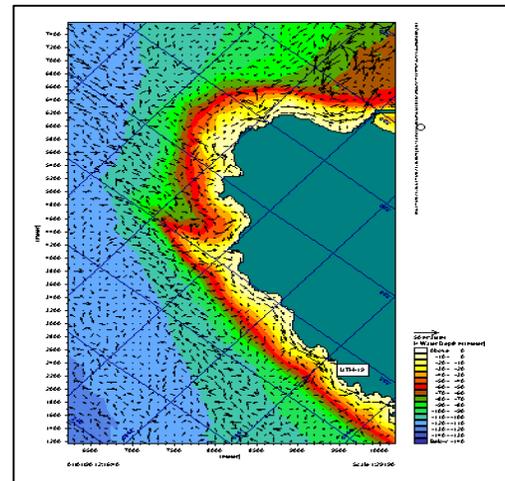


## 5.8 Modelación de corrientes (modulo HD), condición invierno

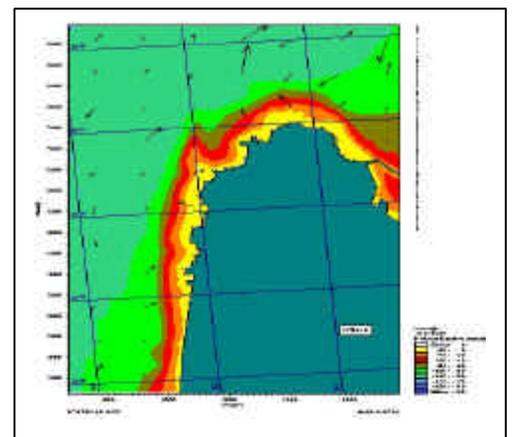
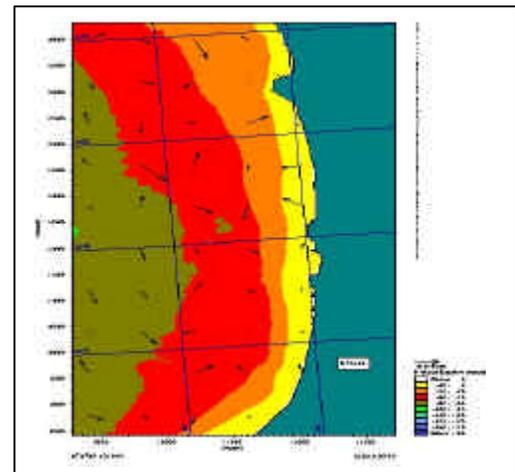
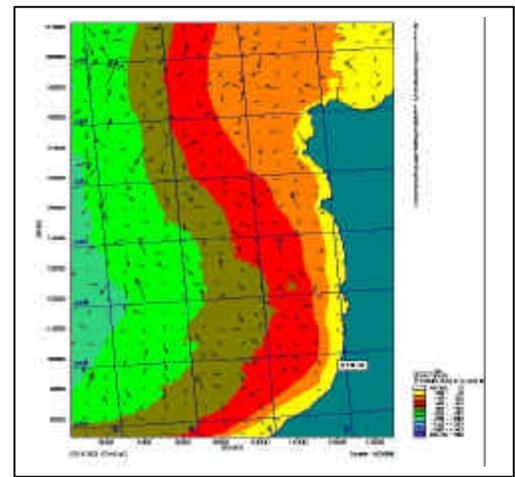
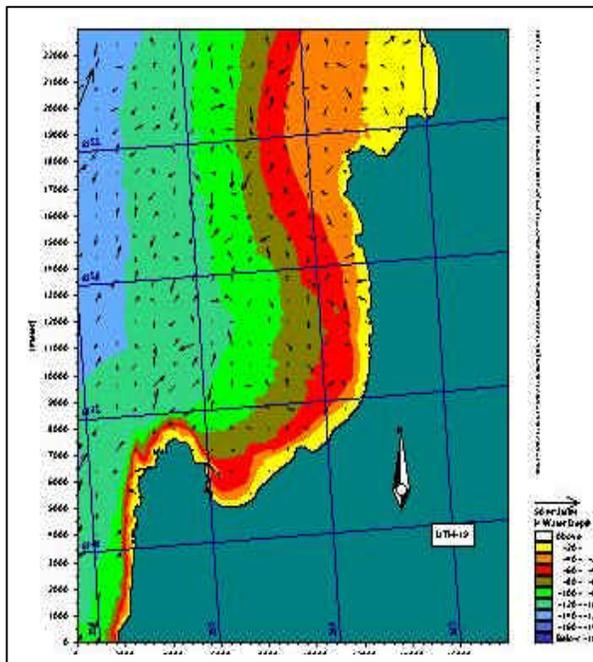
### 5.8.1 rección NW $H_{s0} = 6m$ , $T = 14s$



Patrones de circulación se presentan bastante desordenados, hacen presagiar una tendencia al transporte hacia la costa y paralelo a ella, los mayores grados de desorganización se pueden observar en las trayectorias de las difracciones generadas por Pta. Curaimilla y Pta. Ángeles, en los sectores de las descargas de los emisarios encontramos corrientes de retorno, en el sector del Estero Marga Marga, al norte, patrones de circulación desplazándose de norte a sur, al sur desplazamientos de sur a norte y en la desembocadura nos encontramos con encuentro de corrientes lo cual provoca una gran turbulencia, si a esto agregamos los aportes del estero la situación se complica no existiendo un desplazamiento hacia aguas profundas.

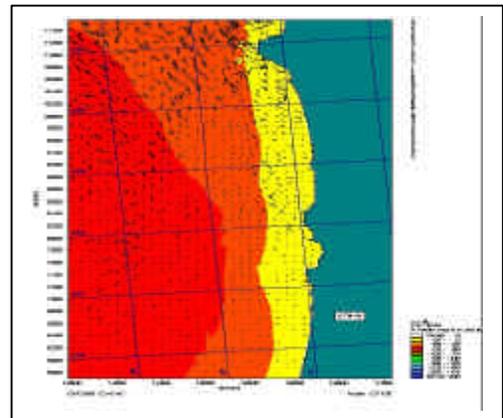
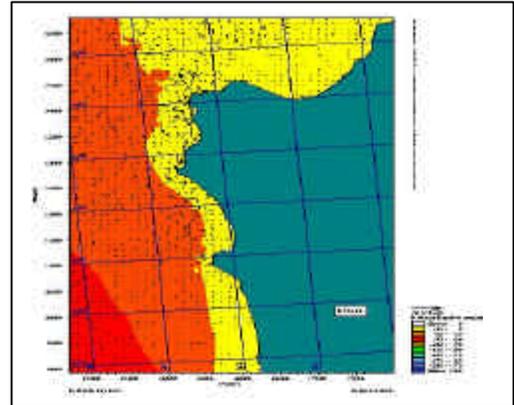
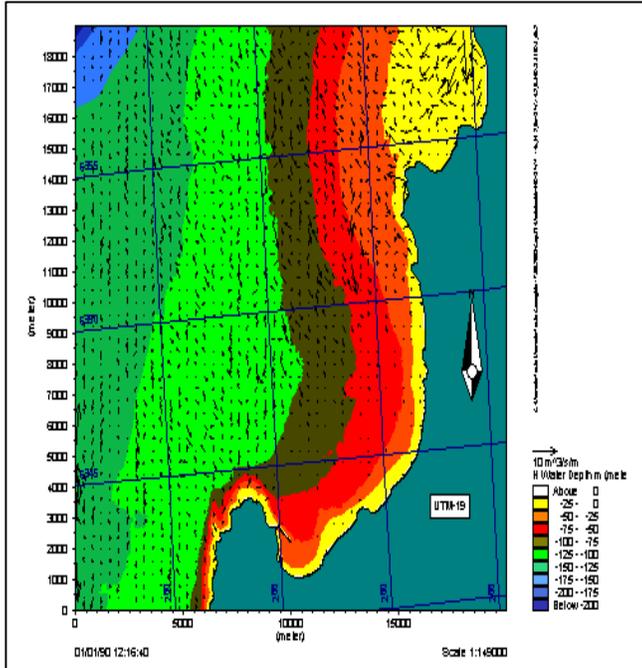


### 5.8.2 Dirección W $H_{s0} = 2.5m$ , $T = 12s$

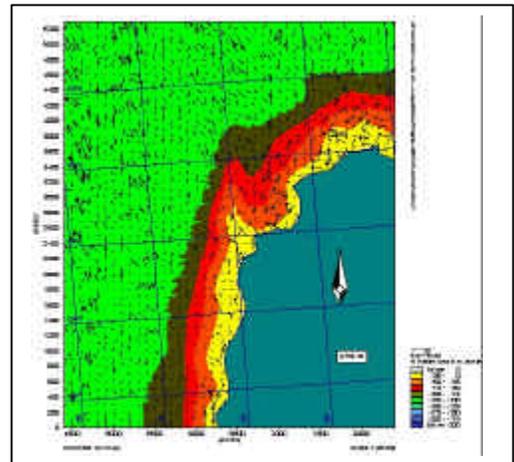


Un caso similar al anterior, puesto que la incidencia del oleaje es frontal al borde costero nos encontramos con patrones de circulación afectados por la difracción de Pta. Curaimilla y Pta. Ángeles y además por las corrientes de retorno que son producidas por la rompiente, de esta forma se puede observar que existen corrientes de litoral que son transportadas hacia el norte llegando a las cercanías de Con Con.

5.8.3 Dirección SW  $H_{so} = 2.5m$ ,  $T = 14s$

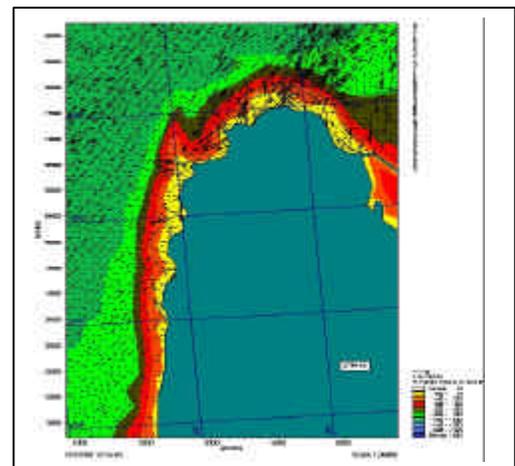
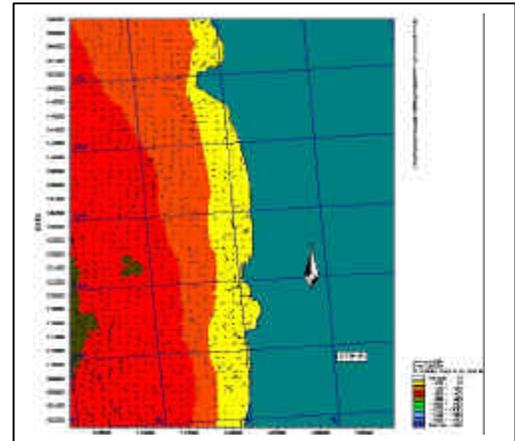
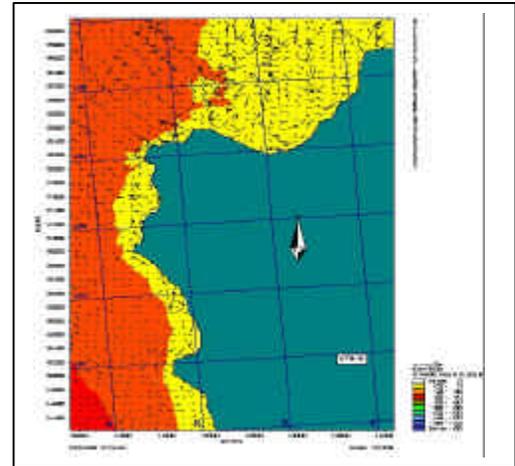
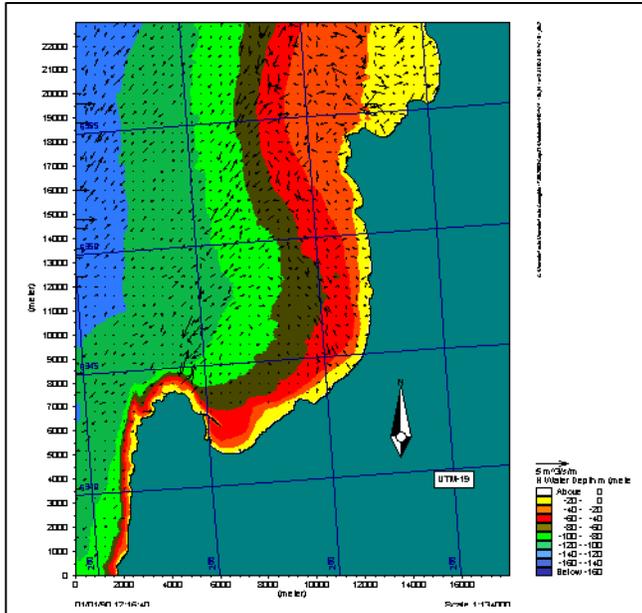


La protección natural que presentan Pta. Curaimilla y Pta. Ángeles generan zonas de bajas velocidades de flujo y transporte, dirigiéndose estas hacia el norte a la zona de Con Con, para ambas zonas de descarga se presentan patrones ordenados de circulación de sur weste a nor weste, cabe destacar que las tasa de transporte son mucho menores puesto que son zonas totalmente protegidas.



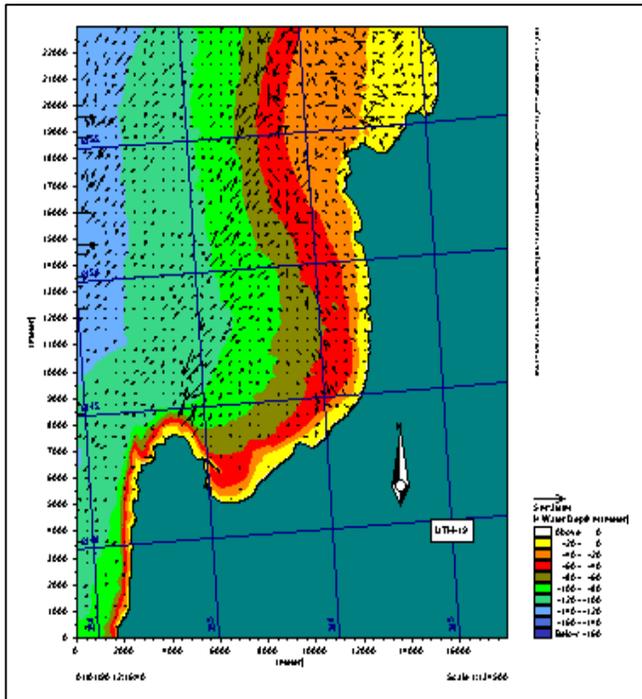
## 5.9 Modelación de corrientes (modulo HD), condición verano

### 5.9.1 Dirección SW $H_{so} = 1.5m$ , $T = 10s$

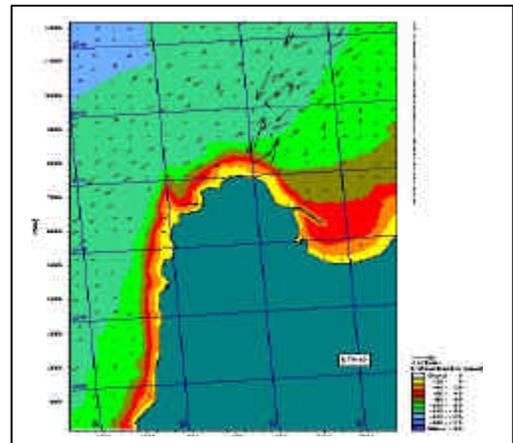
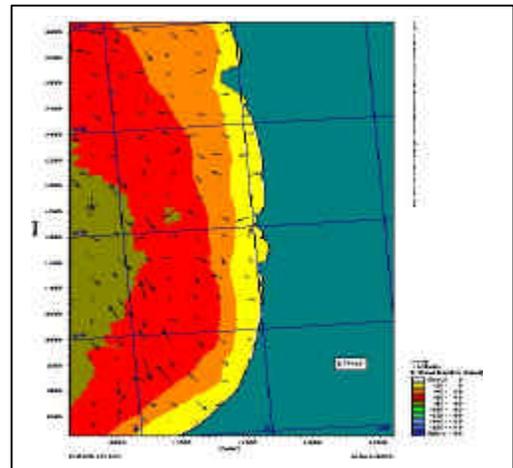
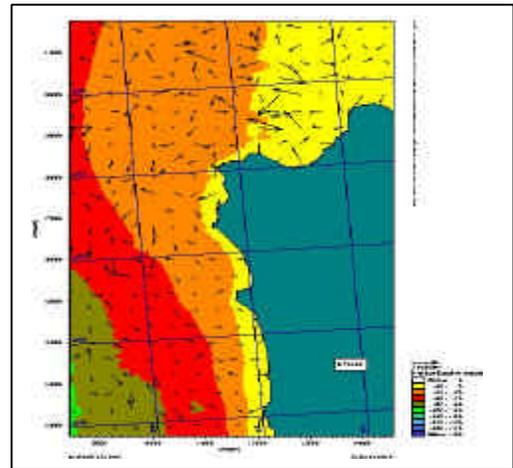


Idéntico al caso para la condición de invierno para la misma dirección y período pero con menor energía.

5.9.2 Dirección W  $H_{s0} = 1.0\text{m}$ ,  $T = 10\text{s}$



Idéntico al caso para la condición de invierno para la misma dirección y período pero con menor energía.



## CAPITULO VI

### 6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

#### 6.1 Introducción

En las décadas de 1960 y 1970 emergieron nuevas tendencias en la forma de utilizar los mapas para la valoración de recursos y planificación. Partiendo de la base de que las diferentes coberturas sobre la superficie de la tierra no son independientes entre sí, se hizo latente la necesidad de evaluarlos de una forma integrada y multidisciplinaria. Una manera sencilla consistió en superponer copias transparentes de mapas de coberturas sobre mesas iluminadas y encontrar puntos de coincidencia en los distintos mapas de los diferentes datos descriptivos.

Luego, esta técnica se aplicó a la emergente tecnología de la informática con el procedimiento de trazar mapas sencillos sobre una cuadrícula de papel ordinario, superponiendo los valores de esa cuadrícula y utilizando la sobreimpresión de los caracteres de la impresora por renglones para producir tonalidades de grises adecuadas a la representación de valores estadísticos, en lo que se conocía como sistema de cuadrícula (trama). Pero, estos métodos no se encontraban desarrollados lo suficiente y no eran aceptados por profesionales que manejaban, producían o usaban información cartográfica.

A finales de la década de los setentas la tecnología del uso de computadoras progresó rápidamente en el manejo de información cartográfica, y se afinaron muchos los sistemas informáticos para distintas aplicaciones cartográficas. De forma análoga se avanza en una serie de sectores afines, entre ellos la Edafología, la Topografía, la Fotogrametría y la Percepción Remota. En un principio, este rápido ritmo de desarrollo provoca una gran duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas relacionadas con la cartografía, pero a medida que se aumentaban los sistemas y se adquiría experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de información espacial, reuniéndolos en verdaderos Sistemas de Información Geográfica (SIG), para fines generales.

A principios de la década de los ochentas, el SIG se había convertido en un sistema plenamente operativo, a medida que la tecnología de los ordenadores se perfeccionaba, se

hacía menos costosa y gozaba de una mayor aceptación. En nuestro país, actualmente se están instalando rápidamente estos sistemas en los organismos públicos, los laboratorios de investigación, las instituciones académicas, la industria privada y las instalaciones .

Los SIG se han constituido durante los últimos diez años en una de las más importantes herramientas de trabajo para investigadores, analistas y planificadores, etc., en todas sus actividades que tienen como insumo el Manejo de la Información (Bases de Datos) relacionada con diversos niveles de análisis espacial o territorial y temporal, lo cual esta creando la necesidad de que estos usuarios de información espacial conozcan acerca de esta tecnología.

Aunque los SIG tienen gran capacidad de análisis, estos no pueden existir por si mismos, deben tener una organización, personal y equipamiento responsable para la implementación y mantenimiento del SIG, adicionalmente tiene que estar cumpliendo un objetivo y se debe garantizar recursos para su mantenimiento.

## **6.2 Definición**

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. El SIG es una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

## **6.3 Importancia de los SIG**

Las soluciones para muchos problemas frecuentemente requieren acceso a varios tipos de información que sólo pueden ser relacionadas por geografía o distribución espacial. Sólo la tecnología SIG permite almacenar y manipular información usando datos espaciales para analizar patrones, relaciones y tendencias en la información, todo tendiente a contribuir a tomar mejores decisiones.

Entre las ventajas que tienen estos sistemas se encuentra la productividad espacial, ya que permiten representar claramente un espacio y generar información nueva a partir de la ya

existente. Además, da mayor agilidad a la gestión de la información y a la integración de nuevos datos.

Tomando en cuenta estos beneficios y el aporte que significa en la toma de decisiones, ya sean estas económicas, sociales, culturales o políticas el gobierno a impulsado la utilización de estos sistemas, es más aun, el Ministerio de Obras Publicas a llevado a cabo en los últimos años una política de integración de los SIG existentes en las diferentes reparticiones para disponer de una sola plataforma integrada de datos a la cual estas reparticiones acceden a través de la Intranet del MOPTT, que se extiende de Arica a Punta Arenas.

#### **6.4 Construcción de un SIG**

La construcción e implementación de un SIG en cualquier organización es una tarea siempre progresiva, compleja, laboriosa y continúa. Los análisis y estudios anteriores a la implementación de un SIG son similares a los que se deben realizar para establecer cualquier otro Sistema de Información. Pero en los SIG, además, hay que considerar las especiales características de los datos que utiliza y sus correspondientes procesos de actualización. Es indiscutible que los datos son el principal activo de cualquier Sistema de Información. Por ello el éxito y la eficacia de un SIG se miden por el tipo, la calidad y vigencia de los datos con los que opera.

#### **6.5 Funcionamiento de los SIG**

La información geográfica contiene una referencia geográfica explícita como latitud y longitud o una referencia implícita como domicilio o código postal. Las referencias implícitas pueden ser derivadas de referencias explícitas mediante geocodificación.

El SIG funciona con dos tipos diferentes de información geográfica: el modelo vector y el modelo raster.

- El modelo raster por píxel ha evolucionado para modelar tales características continuas. Una imagen raster comprende una colección de celdas (píxel) de una grilla más como un mapa o una figura escaneada. Ambos modelos para almacenar datos geográficos tienen ventajas y desventajas únicas y los SIG modernos pueden manejar varios tipos.

- En el modelo vectorial, la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas x, y. La ubicación de una característica puntual, pueden describirse con un sólo punto x, y. Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas x, y. Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas. El modelo vector es extremadamente útil para describir características discretas, pero menos útil para describir características de variación continua.

### **Potencialidades de los SIG:**

- Realizar un gran número de manipulaciones, sobresaliendo las superposiciones de mapas, transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos.
- Consultar rápidamente las bases de datos, tanto espacial como alfanumérica, almacenadas en el sistema.
- Realizar pruebas analíticas rápidas y repetir modelos conceptuales en despliegue espacial.
- Comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal).
- Efectuar algunos análisis, de forma rápida, los que realizados manualmente resultarían largos y molestos.
- Integrar en el futuro, otro tipo de información complementaria que se considere relevante y que este relacionada con la base de datos nativa o original.

## **6.6 Componentes de un SIG**

- Hardware
- Software
- Información
- Personal
- Métodos

### **6.6.1 Hardware**

Los SIG trabajan en un amplio rango de tipos de computadores desde equipos centralizados hasta configuraciones individuales o de red, una organización requiere de hardware suficientemente específico para cumplir con las necesidades de aplicación.

En la selección de un determinado computador para que en el trabaje un SIG, se debe tener en cuenta que se trabajará con grandes volúmenes de información digital, para lo cual es recomendable que la configuración básica del equipo que procesará los datos este dotado de discos duros rápidos y de gran capacidad, memorias de acceso rápido, como mínimo recomendable la experiencia indica 500 Mb y tarjetas de video no integradas con un cantidad de memoria apropiada para manejar múltiples archivos en ejecución simultáneamente como mínimo 128 Mb, en lo referido a los procesadores se recomienda Athlon XP 2000 o Pentium IV como base, la tarjeta madre debe ser de doble bus de velocidad para aprovechar todas las ventajas de estas configuraciones y por último la plataforma de trabajo puede ser Windows 2000 o XP indistintamente, el costo de estos computadores puede variar entre los US\$ 1000 y US\$ 1500 dependiendo del proveedor y la configuración final adoptada.

### **6.6.2 Software**

Los programas SIG proveen las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica, los costos de estos softwares varían según el proveedor, como ser el caso de ArcView con un costo aproximado de US\$ 4000 o Autocad Map US\$ 2500.

#### **Los componentes principales del software SIG son:**

- Sistema de manejo de base de datos.
- Una interfase grafica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas.
- Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
- Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software SIG distribuyen productos fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos.

### **6.6.3 Información**

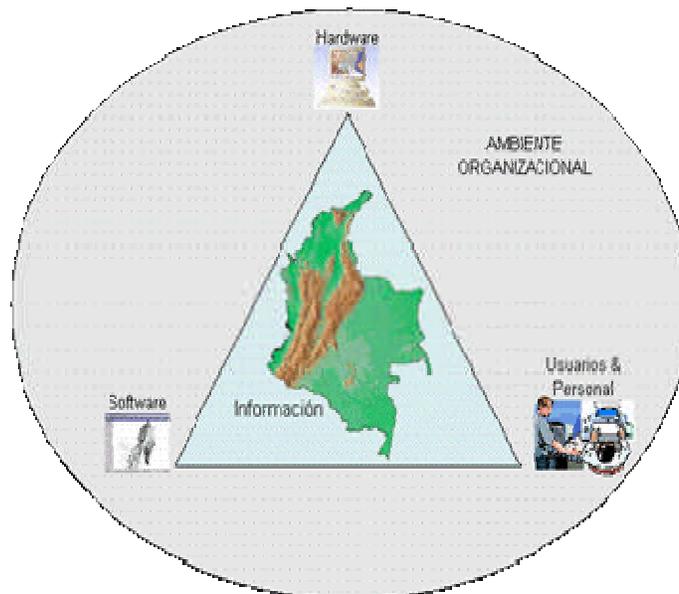
El componente más importante para un SIG es la información. Se requieren de buenos datos de soporte para que el SIG pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma mas acertada posible. La consecución de buenos datos generalmente absorbe entre un 60 y 80 % del presupuesto de implementación del SIG, y la recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios u obtenerse a través de proveedores de datos. Mantener organizar y manejar los datos debe ser política de la organización.

#### 6.6.4 Personal

Las tecnologías SIG son de valor limitado sin los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información no se actualiza y se maneja erróneamente. El hardware y el software no se manipula en todo su potencial.

#### 6.6.5 Métodos

Para que un SIG tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y practicas operativas exclusivas en cada organización.



**Fig.: 6 – 1: Esquema de componentes básicos de un Sistema de Información Geográfica**

## **6.6.6 Aplicaciones de los SIG**

En la mayoría de los sectores el SIG puede ser utilizado como una herramienta de ayuda a la gestión y toma de decisiones, algunos de ellos son:

### **6.6.6.1 Cartografía Automatizada**

Las entidades públicas han implementado este componente del SIG en la construcción y mantenimiento de planos digitales de cartografía. Dichos planos son luego puestos a disposición de las empresas a las que puedan resultar de utilidad estos productos. Las propias entidades se encargan posteriormente de proveer versiones actualizadas periódicamente.

### **6.6.6.2 Infraestructura**

A algunos de los primeros sistemas SIG fueron utilizados por las empresas encargadas del desarrollo, mantenimiento y gestión de redes de electricidad, gas, agua, teléfonos, alcantarillados, etc., en estas los sistemas SIG almacenan información alfanumérica de servicios, que se encuentra relacionada a las distintas representaciones gráficas de los mismos. Estos sistemas almacenan información relativa a la conectividad de los elementos representados gráficamente, con el fin de permitir realizar análisis de redes.

La elaboración de mapas, así como la posibilidad de elaborar otro diferente tipo de consulta, ya sea gráfica o alfanumérica, son las funciones más comunes para estos sistemas, también son utilizados en trabajos de ingeniería, inventarios, planificación de redes, gestión de mantenimiento, etc.

### **6.6.6.3 Gestión Territorial**

Son aplicaciones SIG dirigidas a la gestión de entidades territoriales. Estas aplicaciones permiten un rápido acceso a la información gráfica y alfanumérica, y suministran herramientas para el análisis espacial de la información. Facilitan labores de mantenimiento de infraestructuras, mobiliario urbano, etc., y permiten realizar una optimización en los trabajos de mantenimiento de empresas de servicios. Tienen la facilidad de generar, documentos con información gráfica y alfanumérica.

### **6.6.6.4 Medio Ambiente**

Son aplicaciones implementadas por instituciones de medioambiente, que facilitan la evaluación del impacto medioambiental en la ejecución de proyectos. Integrados con sistemas de adquisición de datos permiten el análisis en tiempo real de la concentración de contaminantes, a fin de tomar las precauciones y medidas del caso. Facilitan una ayuda fundamental en trabajos tales como repoblaciones forestales, planificación de explotaciones agrícolas, estudios de representatividad caracterización de ecosistemas, estudios de fragmentación, estudios de especies, etc.

#### **6.6.6.5 Equipamiento Social**

Son implementación de aplicaciones SIG dirigidas a la gestión de servicios de impacto social, tales como servicios sanitarios, centros escolares, hospitales, etc., suministran información sobre los centros ya existentes en una determinada zona y ayudan en la planificación en cuanto a la localización de nuevos centros. Un buen diseño y una buena implementación de estos SIG aumentan la productividad al optimizar recursos, ya que permiten asignar de forma adecuada y precisa los centros a los usuarios y cubrir de forma eficiente la totalidad de la zona de influencia.

#### **6.6.6.6 Recursos Mineros**

El diseño de estos SIG facilita el manejo de un gran volumen de información generado de varios años de explotación intensiva, suministrando funciones para la realización de análisis de elementos puntuales (sondeos o puntos topográficos), lineales (perfiles, tendido de electricidad), superficies (áreas de explotación) y volúmenes (capas geológicas). Facilitan herramientas de modelización de las capas o formaciones geológicas.

#### **6.6.6.7 Tráfico**

SIG utilizados para modelizar la conducta del tráfico determinando modelos de circulación por una vía en función de las condiciones de tráfico y longitud. Asignando un coste a los nodos (o puntos) en los que puede existir un semáforo, se puede obtener información muy útil relacionada con análisis de redes.

#### **6.6.6.8 Demografía**

Se evidencian en este tipo de SIG un conjunto diverso de aplicaciones cuyo vínculo es la utilización de las variadas características demográficas, y en concreto su distribución

espacial, para la toma de decisiones. Algunas de estas aplicaciones pueden ser: el análisis para la implantación de negocios o servicios públicos, zonificación electoral, etc.

El origen de los datos suele ser los censos poblacionales elaborados por alguna entidad, este grupo de aplicaciones nos obligan a una elevada precisión, y en general, manejan escalas pequeñas.

En el ámbito privado deberían tener más incidencia los SIG, aunque aún no es de este modo, ya que por el coste o la falta de información no es posible tener acceso a estas herramientas.

#### **6.6.6.9 Geomarketing**

La base de datos empalmada a la información geográfica resulta indispensable para planificar una adecuada campaña de marketing o el envío de correo promocional, se podrían diseñar rutas óptimas a seguir por comerciales, etc.

#### **6.6.6.10 Banca**

Los bancos y cajas son unos buenos usuarios de SIG, en el momento requieren ubicar a sus clientes y planificar tanto sus campañas como la apertura de nuevas oficinas, incluyendo información sobre las sucursales de la competencia.

#### **6.6.7 Análisis Espacial de la bahía de Valparaíso**

Para realizar el análisis espacial de la bahía se procedió a generar un Sistema de Información Geográfica, por intermedio del Software ArcMap V 8.2, Este Sistema cuenta con información de trazado de calles, nombres de calles, curvas de nivel, cotas topográficas, edificaciones, obras de arte, áreas verdes, zonas de desmoramiento de tierras, fotografías aéreas, imágenes satelitales, etc. al que se le agregó la información obtenida de la modelación numérica de oleaje y corrientes en la bahía.

A lo anterior se agrega las bases de datos consistentes en diez años de monitoreos de contaminantes realizados por el Servicio de Salud Valparaíso San Antonio en bahía, a distintas profundidades y distancias del borde costero, monitoreos Coliformes Fecales de las principales playas de la zona y los monitoreos de la descarga del emisario de Loma Larga.

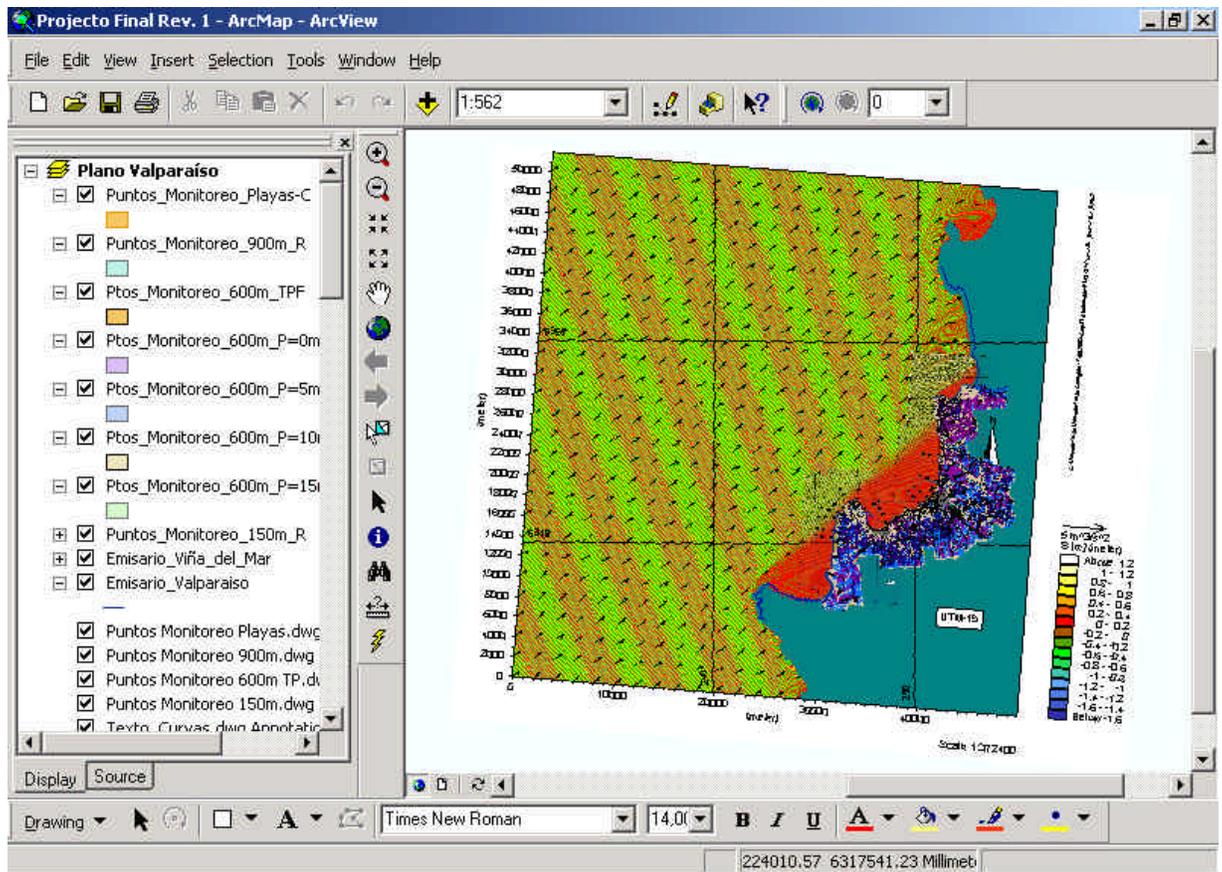
Los contaminantes monitoreados en bahía son Sólidos Suspendidos, Coliformes Fecales, Coliformes Totales, Grasas y Aceites, Detergentes, DBO5, Oxígeno Disuelto, Nitrato, Nitrito y Nitrógeno Amónico, a 150m, 600m y 900m de la costa y a 0m, 5m, 10m y 15m de profundidad, conformando un total de 13 transectas de monitoreo distribuidas espacialmente en toda la bahía. En total el sistema maneja, cruza y entrega información ya sea tanto de zonas terrestres como marítimas entre los años 1992 al 2001, conformando una base de datos de 600 Mb.

De esta forma es posible determinar el estado de la bahía en términos de la eficacia de o los emisarios instalados en ella versus las condiciones de oleaje y corrientes imperantes en ella, con los datos obtenidos.

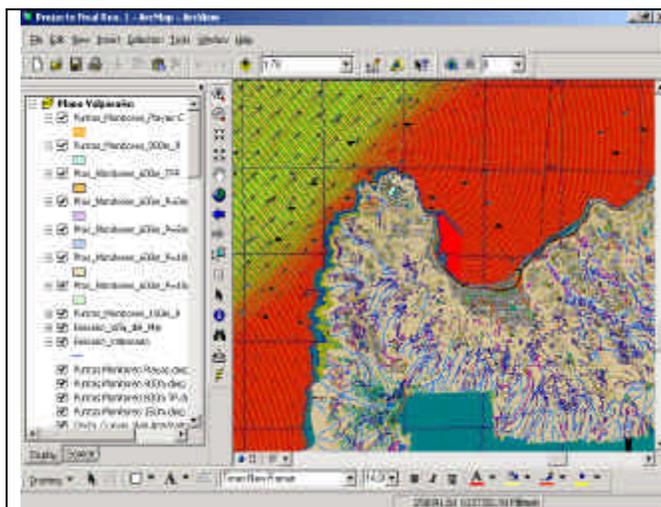
Esta metodología para el análisis de información existente es la más apropiada puesto que el personal que debe tomar una decisión es capaz de manejar una gran cantidad de información en pocos minutos.

Lo más importante aun es que se convierte en un modelo predictivo al estar integrada la componente marítima, como se ha mencionado anteriormente. Esta componente cuenta con los casos de ocurrencia de mayor frecuencia en la zona, en lo referido a direcciones e intensidades del oleaje, de esta forma es posible obtener información de posibles zonas para contención y limpieza de contaminantes derramados accidentalmente en la bahía.

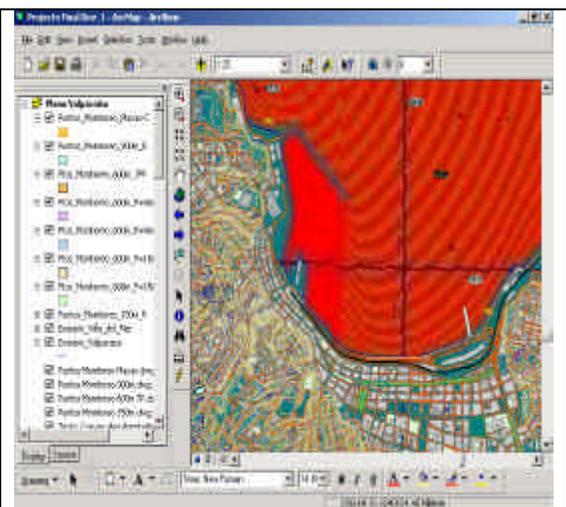
#### **6.6.8 Resultados del SIG**



**Fig 6-2: Vista general salida SIG con frente de oleaje Sw**



**Fig 6-3: Zoom Vista general salida SIG con frente de oleaje Sw, sector puerto**



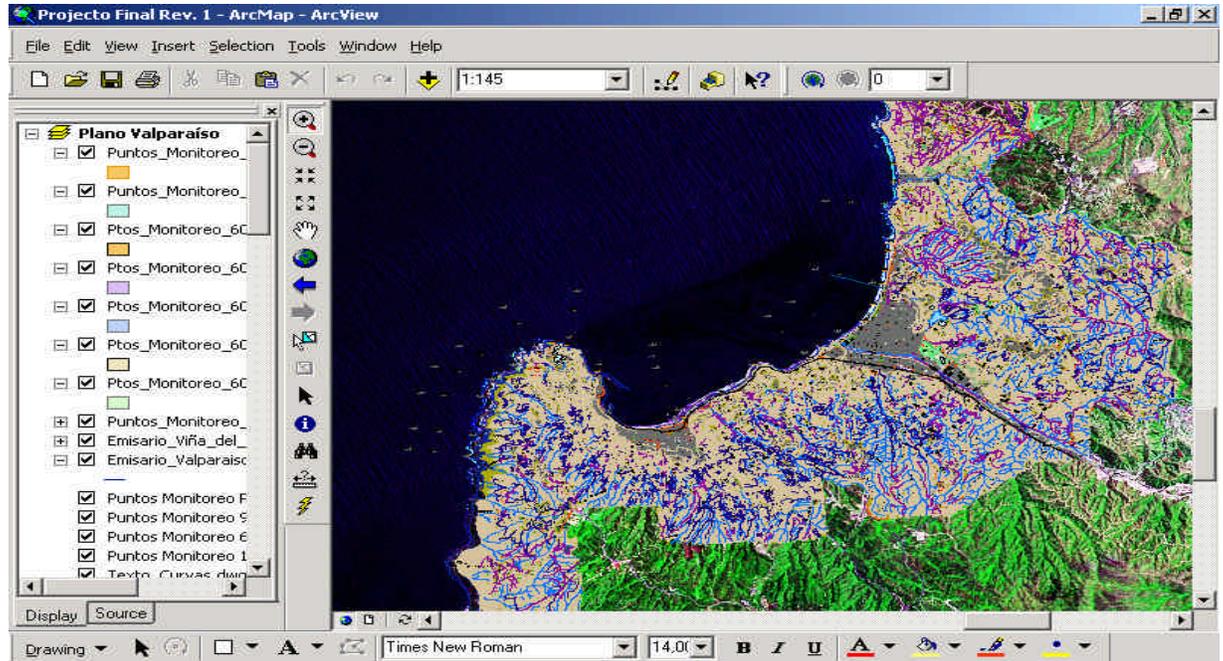
**Fig 6-4: Zoom figura 6-3 salida SIG con frente de oleaje Sw, sector puerto**

En las figuras anteriores se puede apreciar el nivel de detalles logrado en el Sistema de Información generado, siendo perfectamente perceptible a simple vista las sombras

Oscar Cartes Z.– 09-0015074

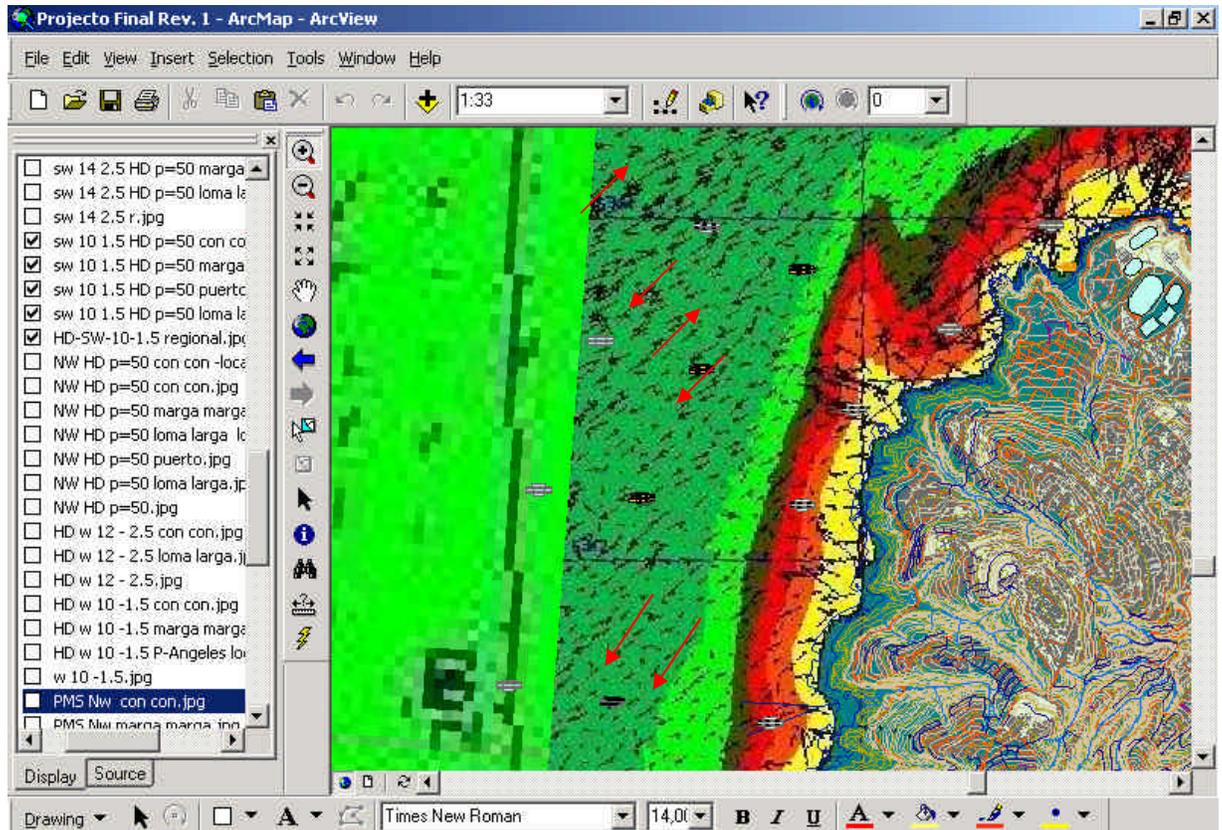
[oscardartes@123mail.cl](mailto:oscardartes@123mail.cl) - [ocartes@inh.cl](mailto:ocartes@inh.cl)

generadas por Punta Cuaraimilla y Punta Ángeles debido a la difracción originada por esta última en el sector puerto (ver Fig. 6-4), además se puede apreciar algunos de los puntos de monitoreo de contaminantes y playas.



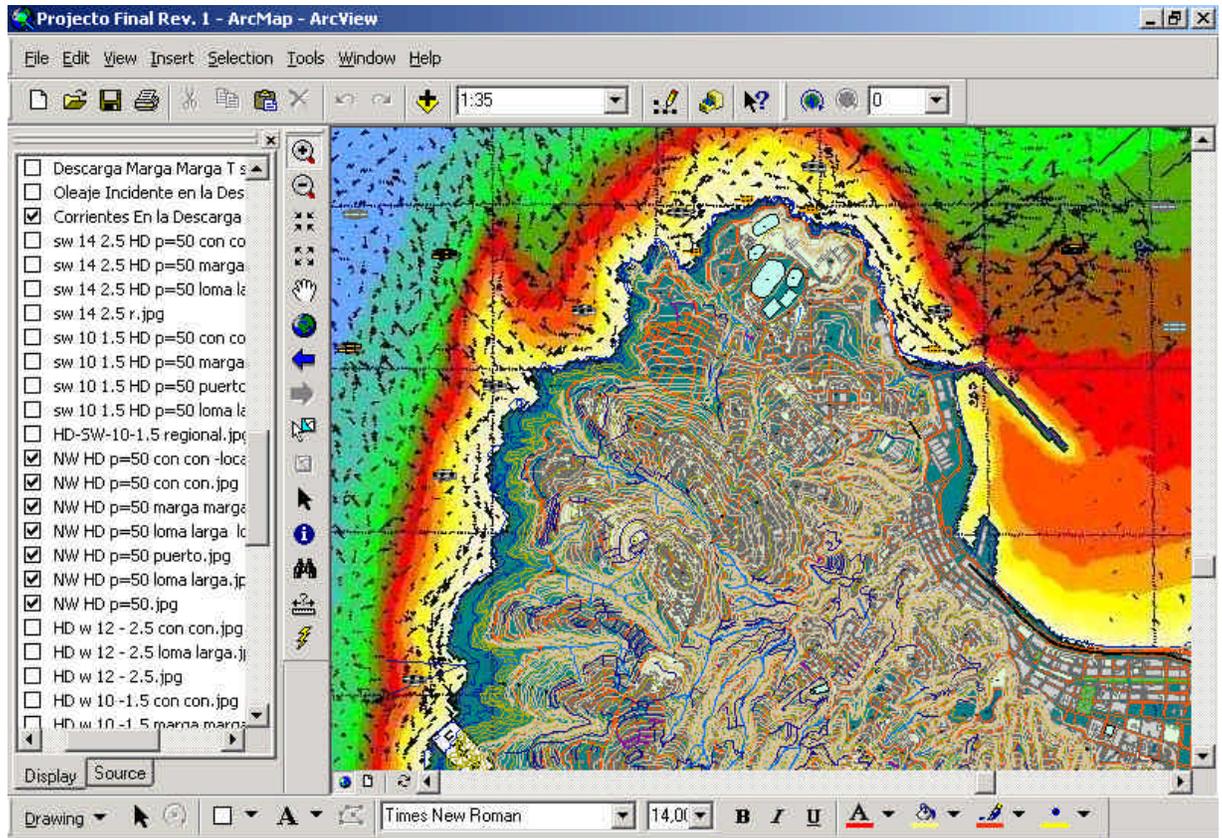
**Fig 6-5: Salida de imagen satelital NAVSTAR 2000, con oleaje incidente de la dirección Sw.**

Al contrastar la Fig. 6-2 (salida modelo matemático) con la Fig. 6-5 (salida Sistema de Información Geográfica), se observa perfectamente que el modelo matemático de propagación de oleaje representa fielmente lo que esta ocurriendo en la naturaleza.



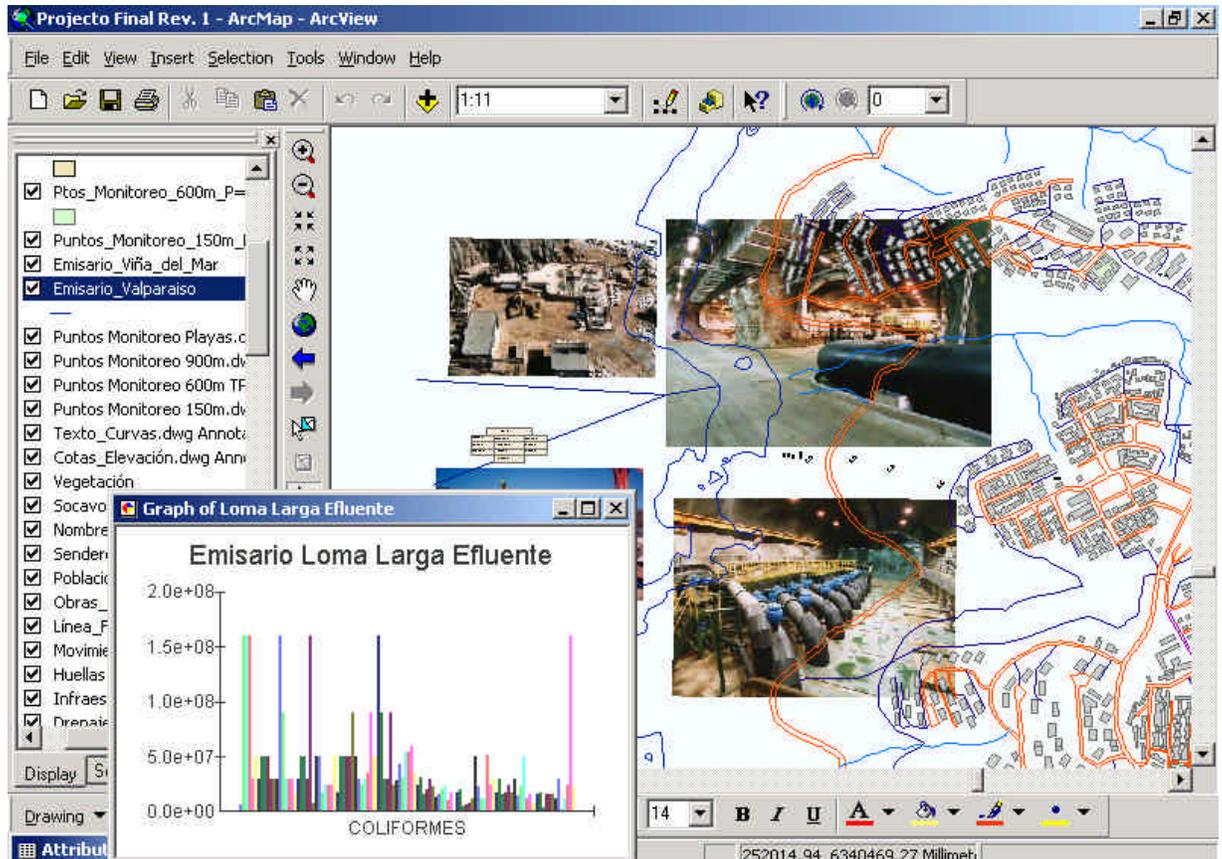
**Fig. 6-6: Muestra salida de corrientes en el sector de Loma Larga para la dirección SW para una condición de verano**

La figura anterior muestra patrones de circulación totalmente contrarios a los que se deberían esperar, estos es, que al incidir el oleaje desde el SW se deberían propagar las corrientes hacia el Nor Este, pero se muestra que la propagación es de Norte a Sur debido a la difracción que produce Punta Curaimilla, indicando que la dispersión de contaminantes esta restringida seriamente por este accidente geográfico costero, en las zona muy próximas de la costa los patrones son totalmente desordenados debido a la influencia de la zona rompiente.



**Fig. 6-7: Muestra salida de corrientes en el sector Puerto para la dirección NW y una condición de invierno**

Los patrones circulación de corrientes, observados en la figura anterior muestran la recirculación que se produce en el sector de la Playa San Mateo, al incidir un oleaje de la dirección NW en Punta Ángeles genera patrones de circulación en dirección al sector puerto, en la zona cercana a Loma Larga se pueden apreciar perfectamente los patrones de corrientes paralelos a la costa en dirección del emisario, en la zona de descarga de este se logran apreciar patrones de reingreso hacia la zona costera.



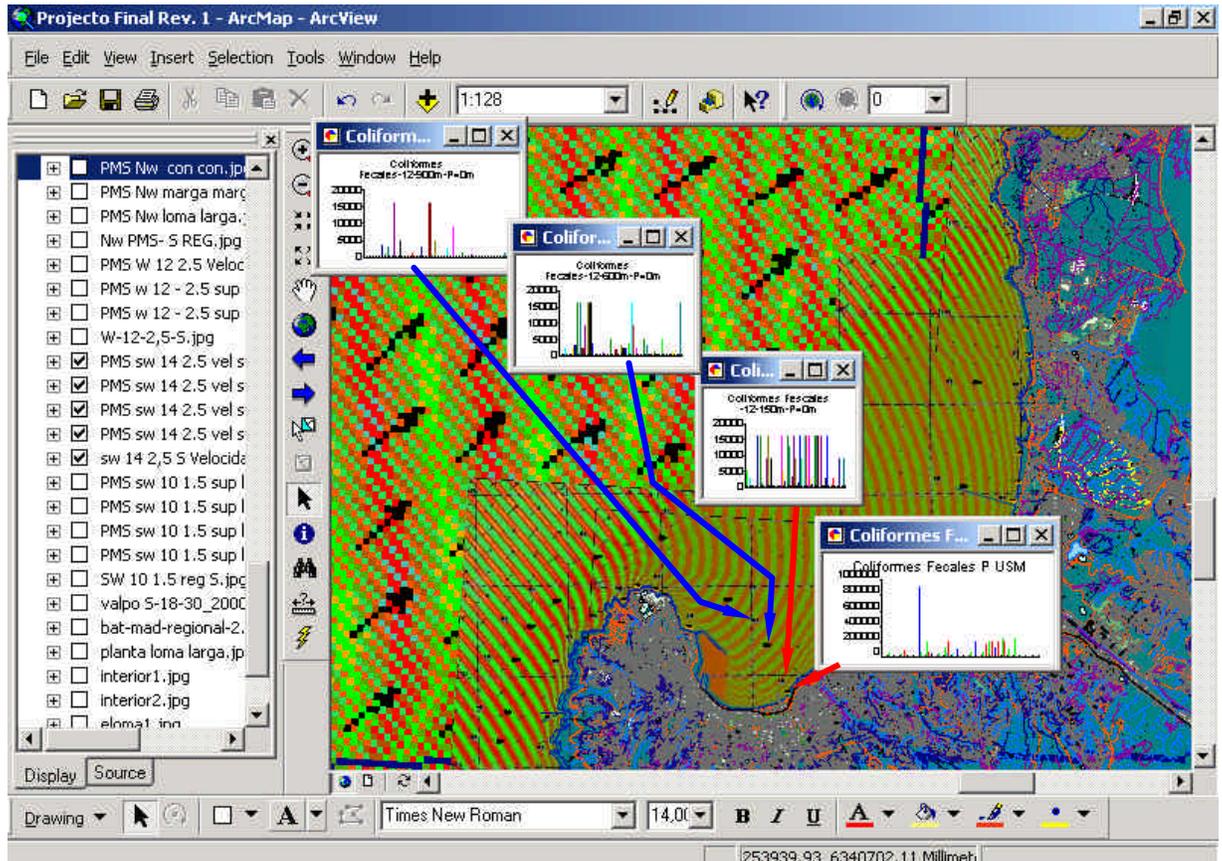
**Fig. 6-8: Muestra salida de información del emisario de Loma Larga**

En la figura anterior se observa el potencial de la utilización de Sistemas de Información Geográfica, en la cual se aprecian fotografías de la planta de tratamiento primaria, el interior de los túneles, la planta de bombeo y la información de la base de datos que se entrega contenida en el emisario de Loma Larga, en el caso particular estos datos están constituidos por los siguientes contaminantes:

- Aceites y Grasas
- Coliformes Fecales
- DBO5
- Sólidos Suspendidos

Estos contaminantes fueron monitoreados cuatro veces al mes, entre los años 1999 al 2001, llama la atención en el caso de la figura 6-8 en que se muestra el monitoreo de Coliformes Fecales que en la gran mayoría de las ocasiones los valores alcanzados superan

exageradamente la Norma de Calidad de Aguas Marinas, en la que el Límite Máximo Permitido es de 1000 CF por cada 100 ml. de efluente muestreado.



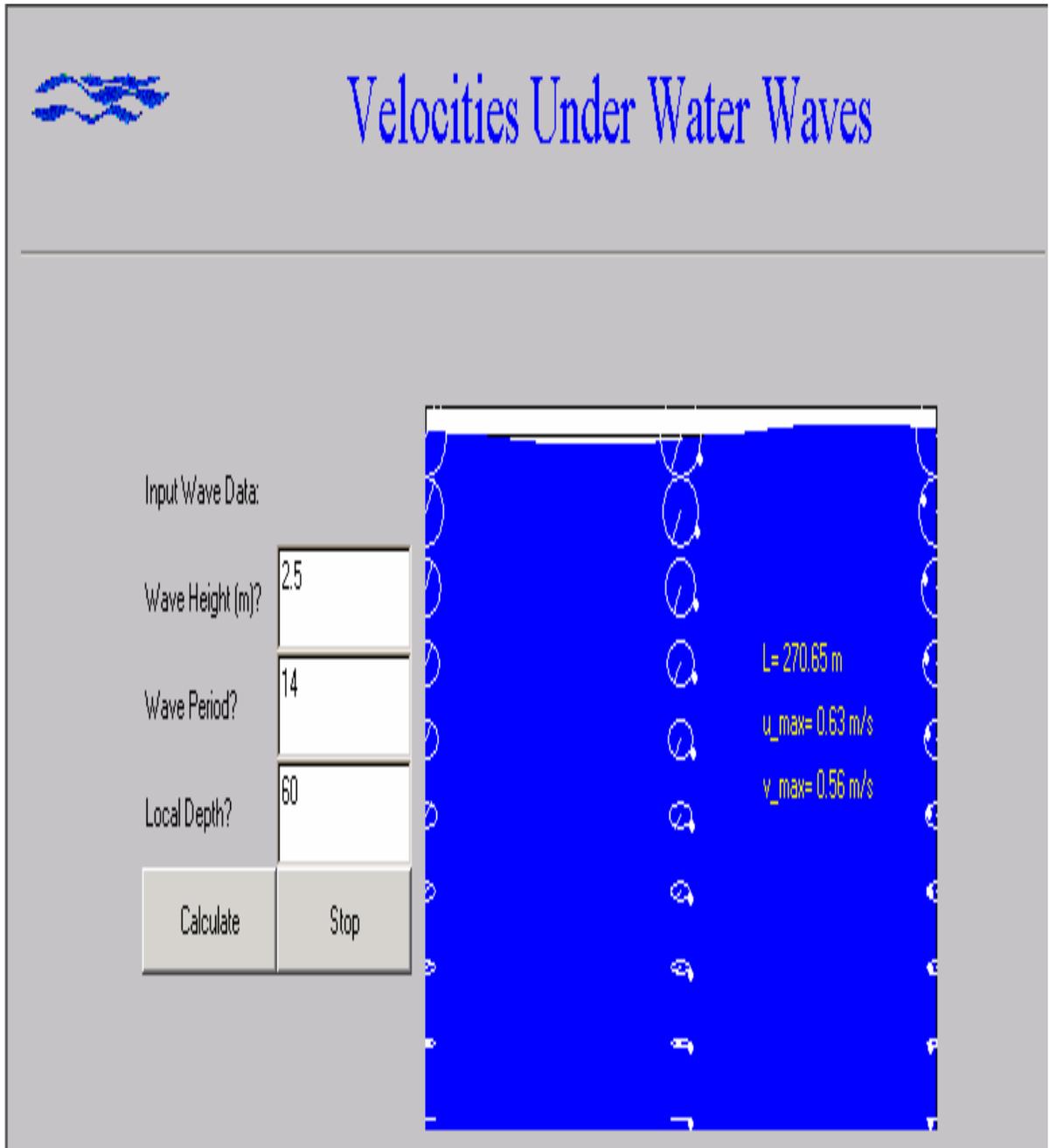
**Fig. 6-9: Muestra salida de información los puntos de monitoreo a diferentes distancias de la costa**

En la figura 6-9, se muestra una salida del SIG, en la cual se representa una condición de oleaje SW con un periodo de 14s y una altura de ola de 2,5m, además las graficas de los monitoreos de Coliformes Fecales para la Transecta N° 12 y el monitoreo en la playa ubicada Frente a la Universidad Santa Maria.

Estos monitoreos están realizados para el caso de la playa a 20m de la línea de costa y 0,5m de profundidad, para el caso de la Transecta, a 150m, 600m y 900m de la línea de costa en superficie.

Al realizar un análisis en la longitud de la transecta situada en forma perpendicular a la costa, de los gráficos de la Fig. 6-9 se puede apreciar que las mayores concentraciones para un

rango mayor de fechas de toma de muestras, ocurre en las zonas más próximas a la costa, situación que se justifica con la difracción que se produce en Punta Ángeles.

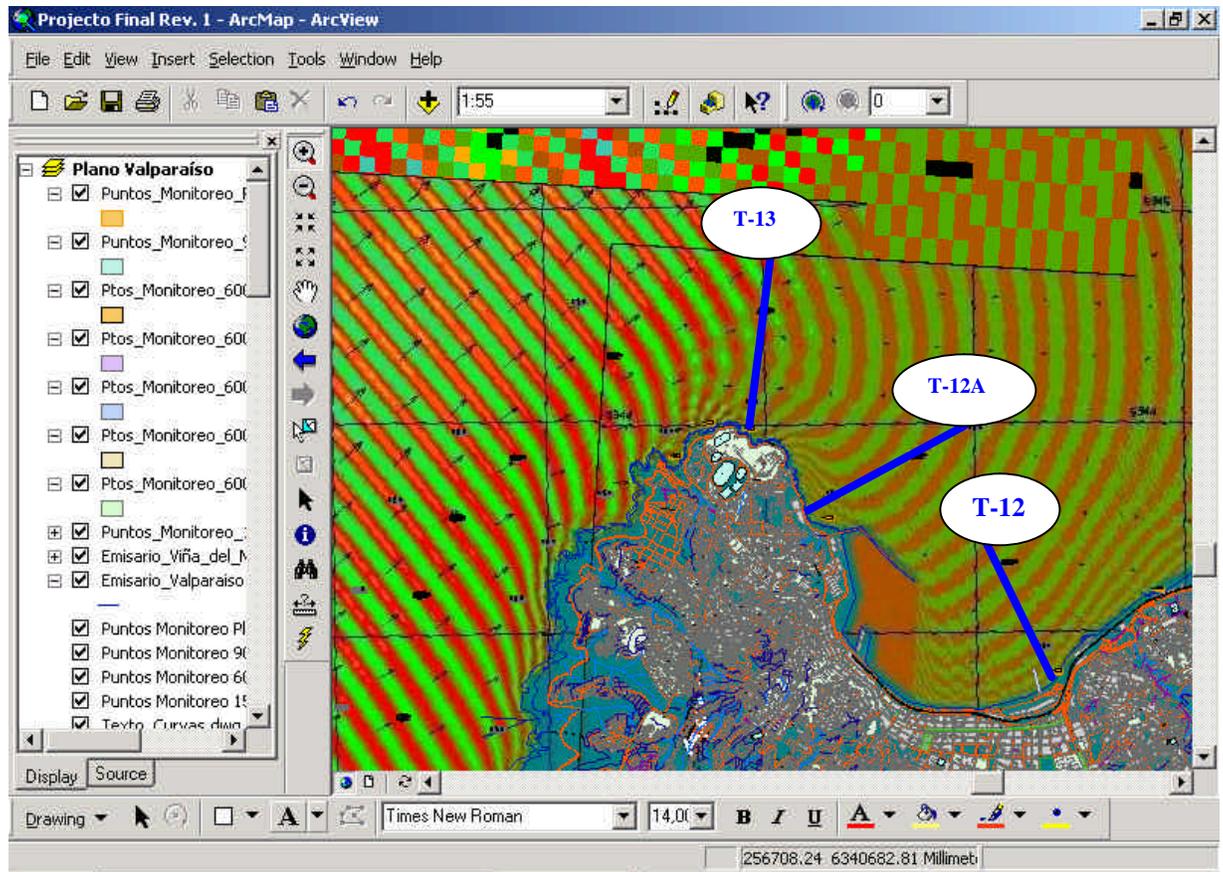


**Fig. 6-10: La figura muestra el efecto producido por una ola de superficie en vertical.**

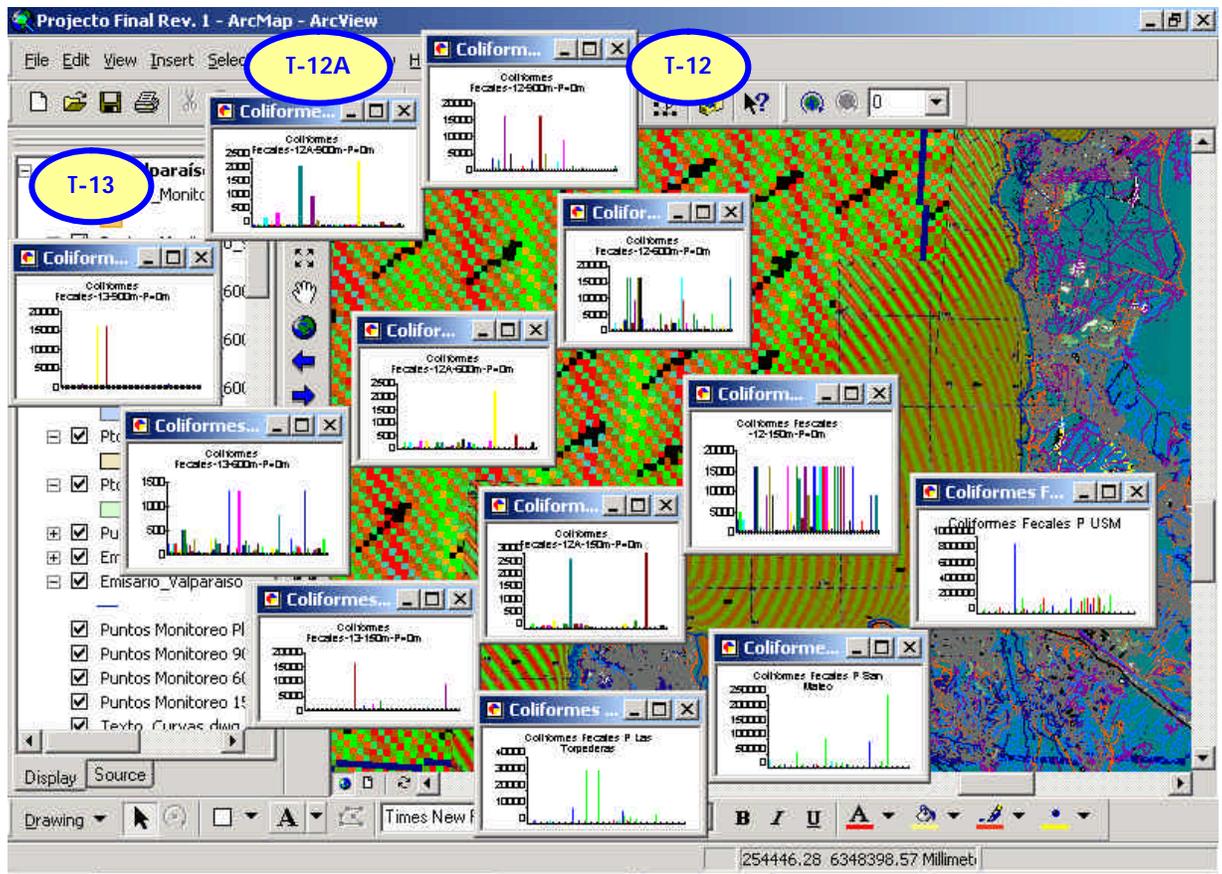
La figura 6-10 representa el efecto de una ola superficial en la columna de agua, donde se puede apreciar que en la superficie las velocidades generadas en la masa de agua son mucho mayores que en el fondo de la columna. Esta representación fue realizada para una

altura de ola de 2,5m, un periodo de 14s y una profundidad o columna de agua de -60m, que es la profundidad de descarga de los emisarios instalados en la bahía.

Si se superponen la Fig. 6-9 y Fig. 6-10, se puede pensar que los accidentes geográficos costeros de Punta Curaimilla y Punta Ángeles tienen un efecto negativo en el transporte y dilución de contaminantes en la bahía hacia aguas profundas.



**Fig. 6-11: La figura muestra la posición de las transectas 13, 12A y 12**



**Fig. 6-12: La figura muestra los gráficos de Coliformes Fecales de las transectas 13, 12A y 12**

Para realizar un análisis espacial en mayor profundidad de los fenómenos de transporte que se producen para las condiciones de oleaje de mayor incidencia en la bahía, se posicionan las graficas de Coliformes Fecales en una distribución horizontal desde la costa hacia aguas profundas, para las transectas 13 (Punta Ángeles), 12A (Playa San Mateo) y 12 (Cercano al Muelle Barón), de lo cual se observa que el transporte es hacia el interior de la bahía y hacia la línea de costa, debido a los fenómenos marítimos existentes en la Bahía de Valparaíso.

## CAPITULO VII

### 7. CONCLUSIONES

#### a) Generales

Del trabajo desarrollado en la presente memoria, se ha verificado que la gestión y planificación del medio ambiente requiere de instrumentos de apoyo que permitan modelar el ordenamiento territorial en función de los problemas ambientales y las variables que en ellos intervienen. Esto es especialmente relevante en el caso estudiado de la bahía de Valparaíso, dada su complejidad hidrodinámica y ambiental.

#### b) Modelos Matemáticos Utilizados y Sistema de Información Geográfica

El modelo Mike 21, comprende varios módulos, que constituyen un ambiente de trabajo que permite la modelación bidimensional de flujos costeros y fenómenos de transporte de sedimentos marinos. Este modelo incluye una serie de subrutinas que permitieron digitalizar y modelar la batimetría de la bahía, logrando además, un manejo eficiente de la entrada de datos y de las salidas gráficas de los resultados. Como esquema numérico, el modelo utiliza la técnica de las diferencias finitas, con las cuales resuelve las ecuaciones de movimiento de conservación de masa.

Con la utilización de herramientas computacionales utilizadas en lo referido a software y hardware, es posible construir un sistema predictivo para el manejo sustentable de ambientes marítimos costeros.

Para el manejo espacial y temporal de los datos, se utilizó el conjunto de programas ARCGIS V 8.2, el cual debido a su estructura basada en objetos permite asegurar una flexibilidad que posibilita la extensión de los programas a futuras mejoras, ya que aprovecha las ventajas de la Programación Orientada a Objetos (OOP) por sobre los lenguajes no estructurados.

La herramienta básica de Gestión Ambiental que permiten tomar decisiones adecuadas en el combate de la contaminación de la bahía de Valparaíso, es el conjunto de integración de la información disponible es una plataforma SIG.

Lo más importante para el uso y manejo de un SIG, son los mecanismos de recolección e ingreso de información, almacenamiento de ella, su manipulación, recuperación y despliegue y salida de los datos generados. Estas tareas deben ser efectuadas por personal altamente capacitado, que sea capaz de interpretar la información que se le está solicitando al sistema.

El SIG es capaz de manejar, cruzar y entregar para su análisis un volumen considerable de información en poco tiempo, lo que hace que esta herramienta computacional se posicione muy fuertemente en la Gestión Ambiental actual.

### **c) Aplicación del Modelo y Resultados**

De los datos utilizados para el desarrollo de este trabajo, llama la atención en la descarga del emisario submarino de Loma Larga la tasa máxima de 5500 CF/S, demostrando que han existido eventos puntuales que podrían haber estado fuera de la norma de descargas.

Los resultados obtenidos marcan un precedente del estado de la bahía de Valparaíso. Si bien es cierto que los datos utilizados corresponden a información disponible en la Universidad de Playa Ancha, aportados por el Servicio de Salud Valparaíso San Antonio de la Quinta Región y La Empresa de Obras Sanitarias Esval S.A., se hace necesario, en forma independiente de los resultados obtenidos, efectuar un análisis en mayor detalle de la situación actual de la bahía por medio de monitoreos más representativos y continuos en el tiempo.

Los patrones de circulación resultantes de la modelación numérica son totalmente contrarios a los que se deberían esperar para las direcciones de oleaje estudiadas. En efecto, al incidir el oleaje desde el SW se deberían propagar las corrientes hacia el Nor Este, pero ocurre que la propagación es de Norte a Sur, debido a la difracción que produce Punta Curaimilla. Por lo anterior, se podría deducir que la dispersión de contaminantes estaría restringida seriamente por este accidente geográfico costero. Además, en las zonas muy próximas de la costa los patrones son totalmente aleatorios debido a la influencia de la zona rompiente.

Para realizar un análisis espacial con mayor profundidad de los fenómenos de transporte que se producen para las condiciones de oleaje de mayor incidencia en la bahía, se utilizó las gráficas de Coliformes Fecales, desplegadas en una distribución horizontal desde la costa hacia aguas profundas, para las transectas ubicadas a la cuadra de Punta Ángeles, Playa

San Mateo y Cercano al Muelle Barón. De lo anterior se obtuvo que la dirección del transporte es hacia el interior de la bahía y hacia la línea de costa, debido a los fenómenos marítimos existentes en la Bahía de Valparaíso.

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos en esta memoria, se podría establecer la hipótesis que los emisarios submarinos no están siendo efectivos o estarían mal emplazados. Para poder determinar fehacientemente la veracidad de dicha hipótesis, se hace necesario realizar un estudio hidráulico marítimo ambiental con mayor profundidad, utilizando tecnología de punta existente en el país, lo cual está fuera de los alcances de la presente memoria.

### **c) Recomendaciones**

El manejo sustentable de la cuenca de Valparaíso no sólo debe considerar en la gestión ambiental desde la costa hacia el interior. Además, se debe integrar el espacio terrestre con el marítimo, puesto que lo que incide en la parte terrestre afectará sin lugar a dudas el ambiente marítimo.

Las políticas de desarrollo de la ciudad de Valparaíso y Viña del Mar deben ser enfocadas de tal manera que se minimicen los efectos no deseados del progreso y se preserve el medio ambiente para las generaciones futuras.

Por último, se deben implementar políticas para generar un sistema de información que permita la integración de las investigaciones en un banco de datos, de la información recopilada a través de los años por la diferentes empresas públicas o privadas, que esté a disposición de las Autoridades de Gobierno, pues son ellas quienes toman las decisiones en lo referido a inversiones con un enfoque de desarrollo sustentable.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Bryant D, E. Rodenburg, T, Cox. y D, Nielsen, 1995. Coastlines at Risk A Index of Potential Development - Related Threads to Coastal Ecosystems WRI Indicator Brief. World Resources Institute WRI, Washington, USA, 1995
2. Camera R J, 2002, Protección Ambiental del Río de La Plata y su Frente Marítimo y Control de la Contaminación y Restauración de Habitats, Comisión Administradora del Río de La Plata Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo, Montevideo Uruguay, 2002.
3. Cincin - Sain B., Knetch W. Integrated Coastal and Ocean Management - Concepts and Practices, Center for the Study of Marine Policy- University of Delaware with support from the Intergovernmental Oceanographic Commission IOC/UNESCO, Island Press, Washington DC, USA, 1998.
4. Comisión Asesora Ambiental de la Presidencia de la Republica del Ecuador CAAM, 1990. Desarrollo y Problemática Ambiental del Área del Golfo de Guayaquil, Estudio del Proyecto PATRA, Guayaquil, 1990.
5. CPPS-PNUMA, Diagnostico Regional sobre Actividades Realizadas en Tierra que afectan los Ambientes Marino, Costero Asociados al Pacifico Sudeste Borrador de Informe – Plan de Acción para la Protección del Medio Marino y Áreas Costeras del Pacifico Sudeste, Comisión Permanente del Pacifico Sur CPPS, Lima, Perú, 1997
6. Constanza, R et al, The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 1997.
7. Clark, J. R., Integrated Management of Coastal Zone, FAO Fisheries Technical Paper 327, FAO Rome, 1992.
8. Cifuentes. L, Juan L., Rodríguez C R y Zarur M, A., Panorama General de la Contaminación de las Aguas en México, La contaminación marina hoy Contaminación del mar y los recursos vivos, Mario Ruivo (Ed), Dirección de Recursos Pesqueros de la FAO, Fishing News (Books) Ltd. England, 1972.
9. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante de la Armada de Chile DIRECTEMAR, s. f. Panfleto sin titulo de la Dirección de Intereses Marítimos y de Medio Ambiente Acuático Servicio de Preservación del Medio Ambiente Acuático, Valparaíso, Chile, 1999
10. Dourojeanni A y A Jouravlev, Borrador del documento sobre el Manejo Integral del Agua, Unidad de Recursos Naturales e Infraestructura, Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, Santiago Chile, 2002.

11. Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, Water Management at the river basin level, Changes in Latin American., Serie Recursos Naturales e Infraestructura, Agosto, 2001.
12. Jouravlev, Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua (Desafíos que enfrenta la implementación de las recomendaciones contenidas en el capítulo 18 del Programa 21) Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL, Serie Recursos Naturales e Infraestructura, diciembre 2001.
13. Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, Gestión de Cuencas y Ríos Vinculados con Centros Urbanos, 1999.
14. CEPAL, Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable: La gestión Integrada de Cuencas, 1994.
15. U. Barg, La Contaminación de las Aguas Continentales de Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panamá, Perú y Venezuela, COPESCAL Documento Técnico. FAO Roma, 1990.
16. GESAMP Reports and Studies, The Contribution of the Science to Coastal Zone Management, 1990.
17. GESAMP Reports and Studies, Anthropogenic Influences on Sediment Discharge to the Coastal Zone and Environmental Consequences, 1990.
18. OMI Londres, Marine Pollution. Informe de la 17 a Reunion, 23-24 abril 1974
19. Gobierno Federal de Alemania, 2001. El Agua una de las claves del desarrollo sostenible - Las Claves de Bonn, Documento Sinóptico de la Conferencia Internacional sobre el Agua Dulce: Bonn 3-7 de diciembre del 2001.
20. Helming S y J Kuylenstierna, 2001. Water Resources in: Water - a Key to Sustainable Development. Issue Paper for the International Conference on Freshwater, Bonn, 3-7 December 2001.
21. Intergovernmental Oceanographic Commission IOC, 2001. Ensuring the Sustainable Development of Oceans and Coast: A Call to Action; Co-chairs report from The Global Conference on Oceans and Coast at Rio+10, UNESCO/COI, Paris. December 3-7 2001,
22. IUCN, 2000. Vision for Water and Nature: A World Strategy for Conservation and Sustainable Management of Water Resources in the 21 Century. IUCN, Gland Switzerland.
23. Kraemer A. R, Choudhury K. y E. Kampa, 2001. Protecting Water Resources: Pollution Prevention, Thematic Background Paper - International Conference on Freshwater Bonn 2001, Secretariat of the International Conference on Freshwater Bonn 2001 (Ed) Bonn, 2001,

24. Leon Coto, S, Cuencas Hidrográficas, Flujos de materiales y Gofos de Nicoya, Ponencia Taller Latinoamericano sobre Manejo de Aguas Residuales Municipales, Ciudad de México 10-13 de septiembre 2001. PNUMA Oficina Regional para América Latina y el Caribe ORPALC y Oficina de Coordinación del Programa de Acción Mundial para la Protección del Medio Marino frente a las Actividades Realizadas en Tierra, PNUMA-PAM. 2001.
25. Lemay M, Estrategia para el Manejo de los Recursos Costeros y Marinos en América Latina y el Caribe, Banco Interamericano de Desarrollo BID, Washington DC, 1998
26. Lerman A, Controls on River Water Composition and the Mass Balance of River Systems, In: Sesión I of River Inputs to Ocean Systems- Taller de Trabajo UNESCO-COI/PNUMA, Naciones Unidas, Nueva York. 1981.
27. Mackenzie T. F. and L May B. Veer, Boundary exchanges in the Global Coastal Margin, in: COASTAL GODS, University of Hawaii at Minoa, Department of Oceanography Contribution to GOOS, Minoa, Hawaii, 2001.
28. Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, "Político Nacional de Ordenamiento Integrado y Desarrollo Sostenible de las Zonas Costeras" Grupo de Zonas Costeras y Humedales, Mayo 2000.
29. Motta S., Ruitenbeck, J. y Hubber, R., Applying economic instruments for environmental management in the context of institutional fragility: The Case of Latin American and the Caribbean, In: Finance for Sustainable Development: The Road Ahead, proceeding of the Fourth Group Meeting on Financial Issues of Agenda 21, held in Santiago, Chile, 1997, Washington. U.S.A.
30. Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España, Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar , 1993.
31. CSANADY G.T, Turbulent diffusion in the environment. D. Rcidel Publishing Company, 1973.
32. Usace Army Mil, Coastal Engineering Manual, mayo 2004
33. HARRIS, C.J., Mathematical modelling of turbulent diffusion in the environment, 1979.
34. LEVICII V.G. Physicochemical Hydrodynamics. Prentice - Hall, Inc. 1962
35. LYKOV AV MIKI-IAILOV, Y.A "Theory of heat and mass transfer". Israel
36. Program for Scientific Translation, 1965.
37. OZMIDOV, R.V. (1990) "Diffusion of contaminants in the ocean". Academic Publishers.
38. RUIZ-MATEO, A. "Proyecto, construcción y vigilancia de emisarios submarinos". Jornadas celebradas en el CEDEX (Madrid) en junio de 1995.

39. RUIZ-MATEO, A. "Ecuaciones fundamentales de la Hidrodinámica". 1 Master en Ingeniería de Puertos y Costas, celebrado en el CEDEX (Madrid). Sección I, volumen 1, 2000.
40. RUIZ-MATEO, A. "Flujo y dispersión en océanos y estuarios". 1 Master en Ingeniería de Puertos y Costas, celebrado en el CEDEX (Madrid). Sección 1, volumen 2, 2000.
41. Manuales Autocad Land R-3
42. Manuales Mike 21, DHI, Módulos PMS, HD, ST
43. BALAGUER PUIG, M. Sistemas de información geográfica. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, 1997.
44. BARREDO CANO, J. I. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, 1996.
45. BORDERIAS URIBEONDO, M. P. Introducción al tratamiento de la información geográfica y resolución de problemas medioambientales y territoriales. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1998.
46. BOSQUE SENDRA, J., Sistemas de Información Geográfica. Madrid, 1992.
47. CALVO MELERO, M. Sistemas de información geográfica digitales: sistemas geomáticos. IVAP, 1993.
48. CEBRIAN, J. A., Información geográfica y Sistemas de Información Geográfica. Santander, Universidad de Cantabria, 1992.
49. COMAS, D. y RUIZ, E. Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica. Barcelona, Ariel, 1993.
50. DOMINGUEZ BRAVO, J., Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG). Ciemat, Informes técnicos, 2000.
51. FELICISIMO PEREZ, A. M., Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las Ciencias Ambientales. Pentalfa Ediciones, (1993)..
52. GARCIA ASENSIO, L., Algunos aspectos relevantes en proyectos de información geográfica. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 1997.
53. GOODCHILD, M. F., PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T., Gis and Environmental Modeling: progress and research issues. Cambridge, Geoinformation International, 1996.
54. LABRANDERO, J. L. y MARTINEZ VEGA, J., Sistemas de información geográfica en la planificación ambiental de áreas de montañas. Colección. Estudios Ambientales. Madrid, Instituto de Economía y Geografía (CSIC), 1998.
55. SANTOS PRECIADO, J. M. y BORDERÍA URIBEONDO, M. P., Introducción al análisis medioambiental del territorio. Madrid, Uned., 2002.

56. SEGUINOT BARBOSA, J. Los SIG en las ciencias ambientales y de la salud. Puerto Rico, Publicaciones, 2001
57. TORO, M., GARCÍA-CONSUEGRA, J. y PIATTINI, M. Sistemas de información GEOGRÁFICOS: una aproximación desde la ingeniería del software y las bases de datos. Madrid, Fundación DINTEL, 2001.
58. CONESA GARCIA, C., "Área de aplicación medio ambiental de los SIG. Modelización y avances recientes". Papeles de Geografía, 1996.