



Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**ESTUDIO DE LA PLUMA DE DESCARGA GENERADA
POR UN EMISARIO SUBMARINO BAJO CONDICIONES
MEDIAS Y EXTREMAS EN LA BAHÍA DE COQUIMBO,
IV REGIÓN, CHILE**

JAIME ROBERTO HERRERA BELTRÁN

Julio 2017

**ESTUDIO DE LA PLUMA DE DESCARGA GENERADA POR UN EMISARIO
SUBMARINO BAJO CONDICIONES MEDIAS Y EXTREMAS EN LA BAHÍA DE
COQUIMBO, IV REGIÓN, CHILE**

JAIME ROBERTO HERRERA BELTRÁN

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

PATRICIO WINCKLER GREZ
PROFESOR GUÍA

CATALINA AGUIRRE GALAZ
REVISOR 1

EUGENIA VALDEBENITO FLORES
REVISOR 2

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Patricio Winckler Grez
Profesor Guía

Jaime Herrera Beltrán
Alumno Memorista

... Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber...

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi gran familia, su apoyo ha sido fundamental en este proceso. Terminar mi carrera es un gran paso para mí y agradezco de todo corazón cada granito de arena que me han dado.

Les doy gracias a mis padres, Belarmino y Rosa, por su ejemplo de superación, su garra en los momentos difíciles y su amor. Sé que a veces soy arisco y algo ermitaño, pero eso no quiere decir que no los ame y no este profundamente orgulloso de ustedes. Gracias mamá por siempre cuidarnos, ahora siendo un adulto puedo dimensionar lo duro que debe haber sido cuidar de una niña de seis años y de un bebe, gracias por siempre luchar por nosotros. Papá tú llegaste luego, si bien te advirtieron con la chichita que te estabas curando (mamá soltera más dos hijos), decidiste entrar y formar parte de esta manada. Gracias por ser un papá genial, todos te ven muy serio o gruñón, lo cual es cierto jajaja, pero tienes un corazón cálido y justo.

Agradezco a mis hermanos Héctor, Pamela y Esteban, por las risas, peleas, discusiones y más risas. Las relaciones de hermanos son así y lo importante es que nunca se acaben las alegrías. Gracias a mis queridos sobrinos, Daniel (Gordo) y Sofía (Fofi), por sus locuras que siempre me hacen sonreír. Daniel, como pasa el tiempo, ya eres todo un adolescente risueño, loco y molesto jajaja sólo ayer dabas vueltas por la casa rayando las paredes y ahora es tu hermana quien anda haciendo travesuras por ahí... es lindo ver cómo te conviertes en un hombre con excelentes valores... estoy muy orgulloso de ti.

Mi amor, gracias por la infinita paciencia, lo sé... soy un cabeza dura y sigo trabajando en ello jajaja... Comprendo lo que este título representa para nosotros, un paso más cerca para comenzar nuestra propia familia... Mabalt's. Pero no todo es alegría, han sido tiempos difíciles para los tuyos, pero siempre siempre siempre después de la tormenta viene la calma, eres fuerte al igual que tu familia... saldrán adelante y yo estaré a tu lado cuando los extrañes, te secare tus lágrimas y nuevamente te hare sonreír... así soy yo... un pololo a todo dar jajaja... Te Amo <3...

Además, también quiero agradecer a todos mis tí@s, prim@s, abuel@s, somos muchos así que no los nombraré uno por uno jajaja. Gracias por su apoyo y ánimo, siempre preguntando "¿cómo va esa tesis?" y obteniendo la respuesta políticamente correcta "ahí va" jajaja... Al fin puedo responder lo que siempre soñé... ¡LA TERMINÉ!...

Gracias a mis amigos de universidad, ha sido un largo camino y he conocido grandes personas. Algunos no los veo de hace años... Pau, Coni, Eduardo, Ale, Dani y muchos más, los cuales conocí durante el año que curse Biología Marina... les mando un abrazo y gracias por inculcar en mí la protección del medio ambiente marino. Gracias a mis mejores amigos de Ingeniería Civil Oceánica, Héctor y Katherine... siempre recordaré las risas, los buenos café, la estufa en inviernos fríos, todo el estrés y las lluvias de ideas que por poco sueño a veces no tenían ni pies ni cabeza jajaja... ha sido un largo y duro camino... seamos ingenieros decíamos JA!... espero que seamos colegas muy pronto.

Gracias a todos los profesores que he tenido hasta el momento, de cada uno he aprendido demasiado. Estoy muy agradecido desde mis tías del jardín que con su ingenio nos mantenían entretenidos en días de lluvia, pasando por mi profesora jefe de enseñanza básica que me guió para entrar a Lastarria y mi profesor jefe de enseñanza media de quien aprendí lo complicada y fascinante que puede ser la Física. Agradezco a cada uno de mis profesores de universidad, de quienes aprendí y sigo aprendiendo. Gracias en especial a mi profesor guía Patricio Winckler por su apoyo, críticas constructivas y sus múltiples dudas que desarmaban casi todo mi avance jajaja. Muchas gracias por todo su apoyo y conocimiento transferido, es una gran persona y profesor.

Por último, agradezco a DHI (software Mike21), a MixZon Inc (software Cormix) y al SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile) por apoyar mi proyecto de título a través de licencias académicas y datos, respectivamente.

Muchas gracias a todos, un abrazo.

Jaime Herrera Beltrán, Ingeniero Civil Oceánico.

Dedicado a mis Padres, Belarmino y Rosa; a mis hermanos Héctor, Pamela y Esteban;
a mis queridos sobrinos, Daniel y Sofía; y en especial a mi novia Romina, Mabalt's.
Gracias a todos por su constante apoyo en
el transcurso del presente Proyecto...

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	MARCO CONTEXTUAL	3
1.2.1	DESECHOS LÍQUIDOS DE LAS CIUDADES VERTIDOS AL MAR	3
1.2.2	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
1.3	ALCANCE Y ESTRUCTURA	7
2	OBJETIVOS	8
2.1	OBJETIVO GENERAL	8
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3	MARCO TEÓRICO	9
3.1	MODELACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS	9
3.2	MODELACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA DEL MAR	9
3.3	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	10
3.3.1	CORRIENTES GENERADAS POR MAREA	10
3.3.2	CORRIENTES GENERADAS POR VIENTO	10
3.3.3	CORRIENTES GENERADAS POR OLEAJE	10
3.4	EMISARIOS SUBMARINOS: GENERALIDADES Y CONCEPTOS	12
3.4.1	CAMPO CERCAÑO	13
3.4.1.1	DILUCIÓN INICIAL	14
3.4.1.2	ZONA DE MEZCLA	14
3.4.2	CAMPO LEJANO	15
3.4.2.1	PROCESOS DE ADVECCIÓN Y DIFUSIÓN	15
3.4.2.2	DECAIMIENTO BACTERIAL	16
3.5	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS	17
3.5.1	CORMIX 2: DESCARGAS SUMERGIDAS A TRAVÉS DE UN DIFUSOR	17
3.5.2	MIKE 21 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO	18
3.5.3	MIKE 21 FLOW MODEL FM: MÓDULO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES	19
3.5.4	MIKE 21 SPECTRAL WAVE: MÓDULO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE	19
4	INFORMACIÓN RECOPIADA	22
4.1	INFORMACIÓN OCEANOGRÁFICA Y METEOROLÓGICA	22
4.1.1	MAREA	22
4.1.2	OLEAJE	23
4.1.3	CORRIENTES	23
4.1.4	TEMPERATURA Y SALINIDAD	25
4.1.5	VIENTOS	25
4.2	INFORMACIÓN BATIMÉTRICA	25

4.3	ZONIFICACIÓN AMBIENTAL DE LA BAHÍA DE COQUIMBO.....	26
4.4	CARACTERÍSTICAS DEL EMISARIO SUBMARINO Y DE SU VERTIDO	27
5	METODOLOGÍA GENERAL	28
5.1	SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA.....	28
5.1.1	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	28
5.1.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS FORZANTES.....	30
5.1.2.1	CASOS DE MAREA.....	30
5.1.2.2	CASOS DE VIENTO	32
5.1.2.3	CASOS DE OLEAJE.....	34
5.1.3	MODELACIÓN NUMÉRICA.....	36
5.1.3.1	SIMULACIÓN INDIVIDUAL Y ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA	36
5.1.3.2	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN: MODELO HIDRODINÁMICO	39
5.2	SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE MEZCLA.....	44
5.2.1	CAMPO CERCANO.....	45
5.2.1.1	PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESCARGA DEL EMISARIO.....	45
5.2.1.2	RESULTADOS PREVIOS DEL CAMPO CERCANO	46
5.2.2	TRANSICIÓN: FASE DE AJUSTE.....	48
5.2.2.1	PROCESO DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN	49
5.2.2.2	RESULTADOS DE LA TRANSICIÓN.....	50
5.2.3	CAMPO LEJANO	52
5.2.3.1	COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA DE DESCARGA	52
5.3	PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA MODELACIÓN DEL CAMPO LEJANO Y CERCANO.....	53
5.4	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA	55
6	COMPORTAMIENTO DEL CONTAMINANTE SOBRE LA BAHÍA DE COQUIMBO	56
6.1	MODELOS FORZADOS BAJO CONDICIONES MEDIAS.....	56
6.1.1	RESULTADOS DEL CAMPO HIDRODINÁMICO	56
6.1.2	RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA.....	58
6.1.2.1	ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CF EN LA ZPL Y LAS AMERB.....	59
6.2	MODELOS FORZADOS BAJO CONDICIONES EXTREMAS HISTÓRICAS	63
6.2.1	RESULTADOS DEL CAMPO HIDRODINÁMICO	63
6.2.2	RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA.....	65
6.2.2.1	ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CF LA ZPL Y LAS AMERB.....	67
7	RECOMENDACIONES.....	70
8	CONCLUSIONES.....	73
	GLOSARIO	75
	SIMBOLOGÍA.....	78
	GENERAL	78
	ASOCIADA A MIKE 21.....	78

ASOCIADA A CORMIX 2	80
SIGLAS	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
9 ANEXOS	87
ANEXO A.....	87
A.1 EXTRACTO D.S. N° 90/2000	87
A.2 EXTRACTO NCH1333 OF. 78.....	88
A.3 FUENTES DE DESCARGA EN LA COSTA CHILENA	90
ANEXO B.....	91
B.1 GENERACIÓN DE LA MAREA.....	91
B.2 GENERACIÓN DEL VIENTO	94
B.3 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	95
ANEXO C	96
C.1 ESTRUCTURA DEL MODELO CORMIX	96
C.2 BASE TEÓRICA DEL MODELO CORMIX	98
C.3 VISCOSIDAD DE REMOLINO O TURBULENTO - MIKE 21	102
C.4 FRICCIÓN PRODUCIDA POR INTERACCIÓN CON EL FONDO - MIKE 21	103
C.5 FRICCIÓN PRODUCIDA POR EL VIENTO - MIKE 21.....	104
ANEXO D	105
D.1 DISPERSIÓN DIRECCIONAL DEL OLEAJE	105
D.2 RESUMEN DEL REGISTRO REALIZADO POR LOS CORRENTÓMETROS	107
D.3 UBICACIÓN DE LA ZPL Y AMERB PARA LA BAHÍA DE COQUIMBO	107
D.4 ANÁLISIS NO ARMÓNICO	109
ANEXO E.....	110
E.1 GENERACIÓN DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL Y PARÁMETROS SELECCIONADOS	110
E.2 CASOS MODELADOS	112
ANEXO F.....	118
F.1 SIMULACIÓN INDIVIDUAL - RESPUESTA HIDRODINÁMICA.....	118
F.2 SIMULACIÓN INDIVIDUAL - ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA	121
F.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - CASOS DE OLEAJE	126
F.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - VISCOSIDAD TURBULENTO	128
F.5 TRANSFORMACIÓN DEL REGISTRO DE CORRIENTE	130
F.6 INFLUENCIA DEL VIENTO Y OLEAJE SOBRE EL NIVEL MEDIO DEL MAR.....	132
ANEXO G	133
G.1 RESULTADOS DEL PROCESO DE AJUSTE ENTRE CORMIX Y MIKE 21 AD	133
ANEXO H	135
H.1 ANÁLISIS DEL CAMPO HIDRODINÁMICO Y DE LA PLUMA DE DESCARGA	135
H.2 ANÁLISIS DE CF EN LA ZPL Y LAS AMERB	138

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1: Descarga de un emisario submarino con interacción en la costa.</i>	3
<i>Figura 1-2: Emisario submarino de la bahía de Coquimbo. Diferentes capturas del proceso de vertido.</i>	4
<i>Figura 1-3: Área de estudio, bahía de Coquimbo.</i>	5
<i>Figura 3-1: Representación gráfica del setback y setup.</i>	11
<i>Figura 3-2: Corrientes litorales generadas por la incidencia oblicua del oleaje.</i>	11
<i>Figura 3-3: Conceptos generales asociados a emisarios submarinos.</i>	12
<i>Figura 3-4: Comportamiento de un vertido con boyantes positiva bajo diferentes perfiles de densidad.</i>	13
<i>Figura 3-5: Comportamiento de un chorro ascendente, bajo la acción de corrientes.</i>	14
<i>Figura 3-6: Distribución horizontal de un contaminante vertido en la superficie del mar.</i>	15
<i>Figura 3-7: Distribución horizontal del contaminante durante la difusión ambiental.</i>	17
<i>Figura 3-8: Flujo de energía en un espectro JONSWAP.</i>	20
<i>Figura 4-1: Distribución de los puntos de registro de información.</i>	22
<i>Figura 4-2: Mediciones de la corriente superficial con un ADCP remolcado a lo largo de la bahía.</i>	24
<i>Figura 4-3: Resumen de las mediciones de corrientes, efectuadas por los correntómetros.</i>	24
<i>Figura 4-4: Mediciones de la estación DC.</i>	25
<i>Figura 4-5: Alcance de las cartas náuticas utilizadas.</i>	26
<i>Figura 5-1: Resumen de la metodología utilizada.</i>	28
<i>Figura 5-2: Modelo de elevación digital.</i>	29
<i>Figura 5-3: Condición de borde impuesta en la frontera abierta del modelo hidrodinámico.</i>	31
<i>Figura 5-4: Condición de borde validada a través del registro mareal.</i>	31
<i>Figura 5-5: Rosa de los vientos, Punta Tortuga.</i>	32
<i>Figura 5-6: Probabilidad de no excedencia del viento, bahía de Coquimbo.</i>	33
<i>Figura 5-7: Rosa de oleaje, bahía de Coquimbo.</i>	34
<i>Figura 5-8: Probabilidad de no excedencia del oleaje.</i>	35
<i>Figura 5-9: Gráfico de dispersión oleaje, bahía de Coquimbo.</i>	36
<i>Figura 5-10: Simulación individual de las forzantes.</i>	37
<i>Figura 5-11: Puntos utilizados para evaluar la estabilidad del modelo.</i>	38
<i>Figura 5-12: Ejemplo de la estabilización del oleaje.</i>	38
<i>Figura 5-13: Ubicación de los instrumentos de medición.</i>	40
<i>Figura 5-14: Resultado del proceso de calibración y validación - Nivel del mar.</i>	41
<i>Figura 5-15: Diagrama del ajuste entre las corrientes medidas y simuladas.</i>	42
<i>Figura 5-16: Escenarios medios considerando Modelos MVO.</i>	43
<i>Figura 5-17: Estratificación de un vertido con boyantes positiva.</i>	44
<i>Figura 5-18: Simplificación asociada al difusor.</i>	45
<i>Figura 5-19: Simplificación realizada por CORMIX 2 asociada las toberas del difusor.</i>	45
<i>Figura 5-20: Representación 3D del difusor utilizado.</i>	46

<i>Figura 5-21: Resultados de CORMIX 2, graficados a través de un código programado en MATLAB.</i>	47
<i>Figura 5-22: Procesos físicos, escalas de espacio y tiempo.</i>	48
<i>Figura 5-23: Transecto para realizar el proceso de ajuste entre campos.</i>	49
<i>Figura 5-24: Concentración línea central de la pluma. Fase de ajuste entre CORMIX 2 y MIKE 21 AD.</i>	51
<i>Figura 5-25: Estructura de la metodología utilizada en la presente Memoria.</i>	55
<i>Figura 6-1: Respuesta hidrodinámica de simulaciones MVO.</i>	57
<i>Figura 6-2: Comportamiento de la pluma con un caudal medio de vertido.</i>	59
<i>Figura 6-3: Concentración de los CF en la ZPL.</i>	60
<i>Figura 6-4: Discontinuidad entre el Sector A y B del AMERB Peñuelas.</i>	60
<i>Figura 6-5: Concentración de los CF en el AMERB Coquimbo.</i>	61
<i>Figura 6-6: Concentración de los CF en el AMERB Peñuelas.</i>	62
<i>Figura 6-7: Respuesta hidrodinámica bajo condiciones extremas históricas.</i>	64
<i>Figura 6-8: Comportamiento de la pluma de descarga bajo condiciones extremas históricas.</i>	66
<i>Figura 6-9: Concentración de los CF en la ZPL bajo casos extremos históricos.</i>	68
<i>Figura 6-10: Concentración de los CF en las AMERB bajo casos extremos históricos.</i>	69
<i>Figura 7-1: Representación de distribución de las estaciones de muestreo.</i>	72
<i>Figura 9-1: Total de fuentes de vertido en la costa chilena establecida por la DIRECTEMAR.</i>	90
<i>Figura 9-2: Efectos de la atracción gravitacional entre la Tierra y la Luna, sobre el océano.</i>	91
<i>Figura 9-3: Principales planos de marea.</i>	93
<i>Figura 9-4: Circulación del aire a partir de los centros de presión.</i>	94
<i>Figura 9-5: Fenómenos océano - atmosféricos.</i>	94
<i>Figura 9-6: Fenómenos de propagación del oleaje.</i>	95
<i>Figura 9-7: Menú principal de la interfaz de usuario del software CORMIX.</i>	96
<i>Figura 9-8: Representación de la estratificación del medio receptor mediante CORMIX.</i>	97
<i>Figura 9-9: Parámetros esquematizados y definidos por CORMIX 2.</i>	98
<i>Figura 9-10: Dispersión direccional del oleaje para la bahía de Coquimbo, año 2013.</i>	105
<i>Figura 9-11: Zonificación ambiental de la bahía de Coquimbo.</i>	108
<i>Figura 9-12: Diagrama de flujo. Generación de la malla batimétrica.</i>	110
<i>Figura 9-13: Comparación entre las corrientes promedio y las simuladas.</i>	113
<i>Figura 9-14: Escenarios medios considerando Modelos MV.</i>	114
<i>Figura 9-15: Condición estival - Ajuste logrado considerando modelos MVO y MV.</i>	115
<i>Figura 9-16: Condición invernal - Ajuste logrado considerando modelos MVO y MV.</i>	116
<i>Figura 9-17: Escenarios extremos históricos considerando Modelos MVO.</i>	117
<i>Figura 9-18: Respuesta hidrodinámica a partir del forzamiento con marea media.</i>	118
<i>Figura 9-19: Respuesta hidrodinámica a partir del forzamiento con viento extremo.</i>	119
<i>Figura 9-20: Respuesta hidrodinámica a partir del forzamiento con oleaje extremo.</i>	120
<i>Figura 9-21: Puntos utilizados para evaluar la estabilidad del modelo (repetición).</i>	121
<i>Figura 9-22: Estabilización de la marea - Condición media.</i>	122

<i>Figura 9-23: Estabilización del Viento - Eventos extremos históricos.</i>	123
<i>Figura 9-24: Estabilización del Oleaje - Eventos extremos históricos.</i>	124
<i>Figura 9-25: Estabilización de modelos globales combinando Marea - Viento - Oleaje.</i>	125
<i>Figura 9-26: Análisis de sensibilidad de los casos de oleaje.</i>	127
<i>Figura 9-27: Análisis de sensibilidad - Viscosidad Turbulenta.</i>	129
<i>Figura 9-28: Perfil vertical de velocidades - Canal Laucayec.</i>	130
<i>Figura 9-29: Análisis de la influencia del viento y oleaje sobre el nivel medio del mar.</i>	132
<i>Figura 9-30: Concentración línea central de la pluma. Fase de ajuste entre CORMIX 2 y MIKE 21 AD.</i>	134
<i>Figura 9-31: Respuesta hidrodinámica de simulaciones MVO.</i>	136
<i>Figura 9-32: Comportamiento de la pluma con un caudal medio de vertido.</i>	137
<i>Figura 9-33: Concentración de los CF en la ZPL.</i>	139
<i>Figura 9-34: Concentración de los CF en el AMERB Coquimbo.</i>	139
<i>Figura 9-35: Concentración de los CF en el AMERB Coquimbo (continuación).</i>	140
<i>Figura 9-36: Concentración de los CF en el AMERB Peñuelas.</i>	141

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1-1: Principales fuentes de contaminación del medio marino chileno.</i>	1
<i>Tabla 1-2: Etapas del tratamiento de aguas servidas vertidas al mar.</i>	4
<i>Tabla 4-1: Características estructurales del emisario submarino.</i>	27
<i>Tabla 4-2: Principales características del vertido de aguas servidas.</i>	27
<i>Tabla 5-1: Caracterización de los fragmentos de marea utilizados como condición de borde.</i>	31
<i>Tabla 5-2: Casos medios de viento seleccionados.</i>	33
<i>Tabla 5-3: Casos históricos de viento extremo.</i>	33
<i>Tabla 5-4: Casos medios de oleaje seleccionados.</i>	35
<i>Tabla 5-5: Casos históricos de oleaje extremo.</i>	35
<i>Tabla 5-6: Casos utilizados en el proceso de calibración y validación de la marea.</i>	39
<i>Tabla 5-7: Casos utilizados en el proceso de calibración y comparación de las corrientes.</i>	40
<i>Tabla 5-8: Parámetros utilizados en la simulación del campo lejano.</i>	53
<i>Tabla 5-9: Parámetros utilizados en las simulaciones realizadas en CORMIX 2.</i>	54
<i>Tabla 9-1: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la ZPL.</i>	87
<i>Tabla 9-2: Requisitos del agua para recreación con contacto directo.</i>	89
<i>Tabla 9-3: Tabla de transformación entre parámetros de Dispersión direccional.</i>	106
<i>Tabla 9-4: Corrientes superficiales registradas por correntómetros anclados.</i>	107
<i>Tabla 9-5: Ancho de la ZPL para la bahía de Coquimbo.</i>	107
<i>Tabla 9-6: Características de las AMERB presentes en la bahía de Coquimbo.</i>	108
<i>Tabla 9-7: Resumen de los planos mareales generados a partir de un análisis no armónico.</i>	109
<i>Tabla 9-8: Parámetros seleccionados luego del análisis de sensibilidad batimétrico.</i>	111
<i>Tabla 9-9: Combinación de las forzantes para generar la condición estival e invernal.</i>	112
<i>Tabla 9-10: Preselección - Casos medios de oleaje.</i>	126
<i>Tabla 9-11: Selección - Casos medios de oleaje.</i>	126
<i>Tabla 9-12: Casos seleccionado para realizar el análisis de sensibilidad de la viscosidad turbulenta.</i>	128
<i>Tabla 9-13: Registro de la transformación desde corrientes in-situ a promediadas en la vertical.</i>	131
<i>Tabla 9-14: Casos utilizados para cuantificar la influencia del viento y oleaje sobre el NMM.</i>	132
<i>Tabla 9-15: Parámetros utilizados en los diferentes casos simulados.</i>	133

RESUMEN

El transporte de un contaminante descargado en el mar se encuentra sujeto a las propiedades físico-químicas del mismo y al efecto de las forzantes dinámicas, las cuales generan corrientes a lo largo de la columna de agua con diferentes intensidades y direcciones.

Las bahías no se encuentran exentas de este fenómeno, donde el conocimiento de las forzantes es fundamental en la caracterización del campo de corrientes.

El objetivo de la presente Memoria es realizar una evaluación cuantitativa de la eficiencia en la reducción de coliformes fecales (CF) generada por un emisario submarino, sobre la bahía de Coquimbo (IV región de Chile). La marea, viento y oleaje serán empleados como forzantes de un modelo bidimensional, el cual utiliza un esquema numérico de volúmenes finitos para mallas no estructuradas, con el fin de simular la hidrodinámica de la zona de interés. El indicador bacteriológico utilizado para evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental corresponde a la concentración de coliformes fecales. Cabe destacar que no se consideraron los efectos de la estratificación vertical del cuerpo de agua, debido a su ausencia a lo largo del año.

En general, los estudios sobre dispersión de aguas servidas se efectúan utilizando sólo las forzantes de marea y viento (*Modelos MV*), sin conocer los efectos que podría generar el oleaje en el transporte del contaminante. En la presente Memoria se analizó adicionalmente la influencia del oleaje (*Modelos MVO*) sobre el patrón hidrodinámico en zonas cercanas al punto de vertido y cómo dicho patrón repercute en el comportamiento de la pluma de aguas servidas.

La hidrodinámica de la bahía fue simulada utilizando como forzantes la marea y viento a través del módulo hidrodinámico de *MIKE 21 Flow Model FM*, mientras el modelo *MIKE 21 Spectral Waves* fue acoplado al anterior para considerar el efecto del oleaje sobre las corrientes. Los procesos advectivos y difusivos (*AD*) que experimenta la pluma de aguas servidas, fueron simulados utilizando el módulo de transporte de *MIKE 21 Flow Model FM*. Cabe destacar que la suite de *MIKE 21* fue facilitada por la empresa *DHI*.

La simulación de los procesos de mezcla en el campo cercano (cálculo de la dilución inicial del contaminante) se realizó a través del programa *CORMIX*, facilitado por la empresa *MixZon Inc*.

Los resultados permitieron establecer la influencia de la pluma de aguas servidas sobre la zona de protección litoral (*ZPL*) y las áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (*AMERB*), considerando como base de evaluación la concentración de coliformes fecales establecidas en las normas ambientales.