



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

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.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Desde los orígenes de la vida en la tierra, la humanidad se ha establecido alrededor de cuerpos de agua para sobrevivir. Con el paso de los siglos y la constante evolución del hombre, un sinnúmero de actividades se han desarrollado en la costa, donde las obras de ingeniería son de gran importancia para diferentes tareas, tales como la protección de la costa ante temporales, creación de zonas aptas para recreación, estructuras con fines económicos y de transporte, obras para eliminar aguas residuales tanto industriales como domésticas, entre otras.

Específicamente, los emisarios submarinos se caracterizan por ser conductos cerrados, los cuales transportan aguas residuales desde una planta de tratamiento hasta su descarga en el mar. Dichas aguas se encuentran compuestas por los vertidos realizados tanto por el metabolismo humano como por las actividades domésticas, siendo definidas como aguas servidas (DIRECTEMAR, 2006).

La Armada de Chile (2007) cuantificó las fuentes de contaminación presentes en el medio marino chileno, de las cuales un 37% correspondía a descargas industriales y drenaje urbano, vertidas al mar a través de emisarios submarinos (Tabla 1-1).

Tabla 1-1: Principales fuentes de contaminación del medio marino chileno.

Descargas industriales y drenaje urbano	37 %
Operaciones de embarcaciones	33 %
Acciones de tanqueros	12 %
Atmósfera	9 %
Fuentes naturales	7 %
Exploración y producción	2 %

Fuente: Adaptado de Armada de Chile (2007).

Por su parte, Leppe & Gonzalez (1997) establecen que las descargas de aguas servidas a través de emisarios submarinos, bien diseñados y alejados de la costa, son sumamente eficientes y generan un bajo impacto en el medio ambiente marítimo.

La Organización de las Naciones Unidas ha dado, para la contaminación marina, la siguiente definición:

"Introducción, realizada por el hombre en el medio marino (incluyendo los estuarios), de sustancias o energías que puedan ocasionar consecuencias nefastas, tales como daños en los recursos biológicos y por consiguiente, en la salud humana; trabas a las actividades marítimas, incluyendo la pesca; disminución en la calidad del agua del mar desde el punto de vista de su utilización y reducción de las posibilidades ofrecidas para el ocio" (Teknimap Ambiental, 1993, p.25).

Además, la Ley N° 19.300 Sobre las Bases Generales del Medio Ambiente¹ establece la siguiente definición de contaminación para efectos legales:

"Presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente" (Ley N° 19.300, 1994, art. 2).

Por último, cabe considerar que la salud humana puede ser afectada al ser contaminadas las aguas donde son cosechados organismos bivalvos (*AMERB*), los cuales subsisten filtrando grandes cantidades de agua de mar en su proceso de alimentación. En particular, si su hábitat se encuentra alterado con la presencia de coliformes, pueden albergar y proliferar bacterias patógenas en su interior. Por tanto, las aguas que contengan bajas concentraciones de un contaminante orgánico, pueden generar mariscos con la capacidad de transmitir enfermedades luego de su consumo (Ludwig, 1988).

¹ Ley 19.300, Artículo 2° c.

1.2 MARCO CONTEXTUAL

1.2.1 DESECHOS LÍQUIDOS DE LAS CIUDADES VERTIDOS AL MAR

La distribución de la población en zonas costeras está basada generalmente en las actividades concebidas por los puertos, debido a la gran cantidad de puestos de trabajo que proveen (Cifuentes, Torres & Frías, 1991), generando un aumento demográfico considerable. De una manera u otra, se llega a un punto en que los desechos líquidos de origen doméstico (aguas servidas) son de tal magnitud que su tratamiento en tierra es sumamente costoso para las ciudades.

Considerando lo anterior y la capacidad depuradora natural que posee el océano, gracias a sus condiciones bioquímicas e hidrodinámicas, se considera que descargar las aguas servidas al mar, utilizando emisarios submarinos, es una buena solución a dicha problemática. Sin embargo, es posible generar situaciones de contaminación como la observada en la Figura 1-1, si los estudios necesarios no son realizados en forma adecuada.



Figura 1-1: Descarga de un emisario submarino con interacción en la costa.

Fuente: Adaptado del Manual de usuario CORMIX (2007).

Según la propuesta de OCEANA (2007), Chile tiene contaminadas sus costas en diferentes grados, debido a la sobre explotación de la capacidad depuradora que posee el mar. Un diagrama de lo mencionado es presentado en el Anexo A.3, junto a la cuantificación de emisarios submarinos presentes en el país en el año 2005. Dicha ilustración manifiesta una gran contaminación del cuerpo de agua frente a las costas de Talcahuano, Antofagasta y Valparaíso alcanzando un nivel de "muy alto", mientras que la contaminación frente a la costa de Coquimbo llega a los niveles de "alto".

Según los estudios realizados por Leppe & González (1997), el tratamiento de aguas servidas es una forma de acondicionar los desechos líquidos domésticos para su posterior descarga al mar, permitiendo que la naturaleza recoja los nutrientes útiles sin deterioro del medio ambiente. También establece que un emisario submarino (bien diseñado y ubicado) es más que una descarga alejada de la costa, sino más bien, un sistema de tratamiento que a grandes rasgos está constituido por las tres etapas descritas en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Etapas del tratamiento de aguas servidas vertidas al mar.

Etapa	Descripción
Tratamiento físico	Total eliminación de las partículas sedimentables y flotantes. Disminución del tamaño de los sólidos suspendidos para facilitar las siguientes etapas.
Transporte por ducto	Traslado de las aguas servidas desde la planta a un punto en el mar en donde existan las condiciones ideales para la dilución, advección y difusión del contaminante vertido.
Tratamiento submarino	Reducción de la contaminación orgánica y bacteriológica mediante los procesos de mezcla generados a partir del difusor y de las condiciones propias del medio receptor como la hidrodinámica, temperatura, salinidad, procesos bioquímicos, entre otras.

Fuente: Leppe & González (1997).

Bajo este contexto, existe un documental que registró imágenes del funcionamiento del emisario ubicado en la bahía de Coquimbo (Nuño, 2008). Sus principales conclusiones establecen que el tratamiento físico resulta ser insuficiente debido a la presencia de elementos inorgánicos, los cuales propician la presencia de contaminantes por acumulación tanto en el lecho marino como en la columna de agua. También es posible apreciar el afloramiento de la pluma sobre la superficie, la cual genera un deterioro visual de la bahía y la presencia de un fuerte hedor (Figura 1-2). Este último, perturba la costa en momentos que el viento circula en dirección Oeste - Este, afectando la calidad de vida de los habitantes y turistas de la región.

De acuerdo a lo expuesto en el documental, se puede inferir una transgresión de la NCh 1333 Of. 78 (Anexo A.2) específicamente en los puntos asociados tanto a sólidos flotantes visibles como sustancias que produzcan olor o sabor indeseables. Además, a través de análisis realizados en la presente Memoria, será evaluado el cumplimiento del D.S. 90/2000 (Anexo A.1).



Figura 1-2: Emisario submarino de la bahía de Coquimbo. Diferentes capturas del proceso de vertido. a) Tratamiento físico, b) sólidos en el fondo, c) pluma de descarga desde el aire y d) aves atraídas hacia la pluma de descarga.

Fuente: Adaptado de Nuño (2008).

1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Coquimbo se ubica en la IV región de Chile, entre las latitudes 29° 48' S - 29° 59' S y las longitudes 71° 15' W - 71° 24' W (Figura 1-3, izquierda). Posee una extensión de 14.5 kilómetros aproximadamente y una boca orientada hacia el Oeste, dejándola expuesta a las forzantes provenientes del tercer y cuarto cuadrante. Limita al Norte con Punta Teatinos y al Sur con Punta Tortuga, cuya presencia repercute sobre la hidrodinámica de la misma, modificando los patrones de corrientes y alterando la dirección de propagación del oleaje.

De acuerdo a estudios realizados en la zona (Universidad de Valparaíso, 2009) y considerando los fenómenos que sufre el oleaje (asomeramiento, refracción y difracción), la bahía de Coquimbo puede ser segmentada en tres áreas caracterizadas por los colores verde, amarillo y rojo para describir un oleaje que llega a la costa con baja, media y alta energía, respectivamente (Figura 1-3, central). Por otro lado, debido a la densidad del contaminante y a las características físicas presentes en el medio receptor, el vertido emerge a la superficie durante todo el año, generando una pluma de aguas servidas, la cual es visible incluso desde el aire (Figura 1-3, derecha).

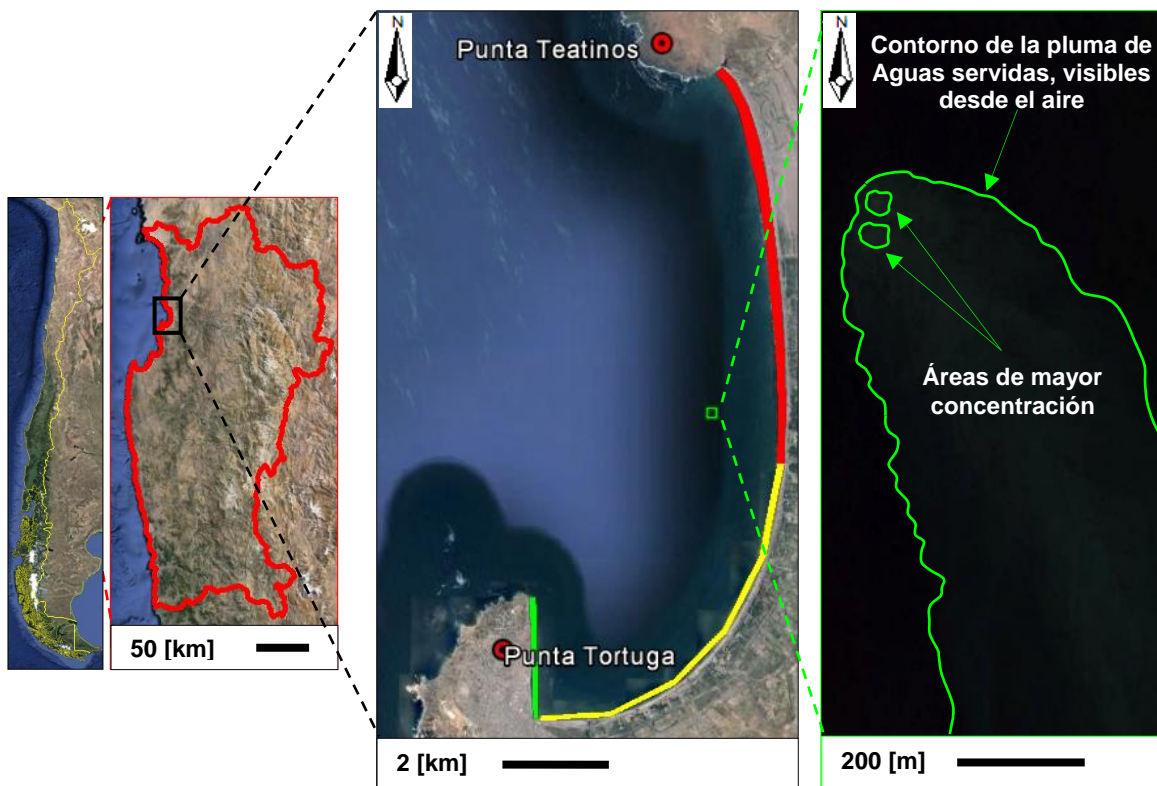


Figura 1-3: Área de estudio, bahía de Coquimbo.
Izquierda: Extensión de Chile y ubicación de la IV región.
Central: Bahía segmentada en zonas de acuerdo a la intensidad del oleaje.
Derecha: Vista aérea de la pluma de aguas servidas.

Fuente: Adaptado de Google Earth.

Por otro lado, en la bahía se desarrollan diferentes actividades entre las que se mencionan, el uso recreacional en su extensa playa, la actividad portuaria derivada del Puerto de Coquimbo (ubicado en Punta Tortuga); y por último, la explotación y manejo de recursos bentónicos a través de la administración de las diferentes asociaciones gremiales de pescadores artesanales y buzos mariscadores de la zona.

En el centro de la bahía, a una profundidad aproximada de 19 metros, se ubica la salida del emisario submarino, el cual fue instalado entre los años 1986 - 1987 y validado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios en 1992 (InduAmbiente, 2015). Perteneció a la empresa Aguas del Valle y posee una longitud de 1.750 metros, donde los últimos 40 corresponden a dos ramas de difusores.

1.3 ALCANCE Y ESTRUCTURA

Dentro del presente estudio, quedan fuera de alcance los análisis químicos y biológicos basados en la interacción de la pluma de aguas servidas con la fauna presente en la bahía de Coquimbo. Además de comparaciones exhaustivas con imágenes satelitales, dado que no se cuenta con mediciones de marea, viento y oleaje durante el período que fueron capturadas las fotografías.

La organización de la Memoria se basa en capítulos, cuya enumeración se detalla a continuación.

- Capítulo 1: Corresponde a la introducción del tema a tratar, estableciendo tanto las generalidades como un contexto del mismo. Además de describir e ilustrar el área de estudio.
- Capítulo 2: Establece los objetivos tanto general como específicos.
- Capítulo 3: Presenta el marco teórico, el cual se encuentra compuesto por una descripción de la modelación hidrodinámica y sus forzantes. Por otro lado, establece las generalidades de los emisarios submarinos y analiza sus campos de desarrollo. Finalmente, describe los modelos numéricos utilizados con sus respectivas ecuaciones.
- Capítulo 4: Presenta la información recopilada para el desarrollo del presente estudio.
- Capítulo 5: Desarrolla la metodología utilizada, estableciendo dos secciones principales. Por un lado, la simulación hidrodinámica; mientras por otro, la simulación de los procesos de mezcla.
- Capítulo 6: Presenta un análisis de la respuesta del comportamiento del contaminante sobre la bahía de Coquimbo, bajo condiciones tanto medias como extremas históricas.
- Capítulo 7 y 8: Exponen las recomendaciones y conclusiones generadas a partir del desarrollo de la Memoria.
- Capítulos 9: Presenta el desarrollo de los Anexos, en sus secciones se realizan análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros utilizados en el procesos de modelación, así como también, el estudio de información complementaria al tema principal.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia en la reducción de coliformes fecales generada por un emisario submarino en su configuración actual, sobre la Bahía de Coquimbo (IV Región), mediante la simulación de *escenarios medios* y *extremos* caracterizados por las forzantes de marea, viento y oleaje responsables de la dispersión del contaminante. Para ello se utiliza como base de evaluación, las exigencias de calidad de agua establecidas por las normas chilenas NCh 1333 of. 78 y D.S. 90/2000.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones hidrodinámicas presentes en la bahía de Coquimbo.
- Cuantificar si existe influencia del oleaje en el patrón hidrodinámico simulado.
- Analizar la influencia de las forzantes sobre la hidrodinámica de la bahía, tanto de forma individual como acoplada.
- Determinar el comportamiento de la pluma de aguas servidas y su influencia en la bahía de Coquimbo tanto en condiciones medias como extremas históricas.
- Evaluar la concentración de coliformes fecales dentro de la bahía de Coquimbo, analizando tanto la *ZPL* como las *AMERB*.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 MODELACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS

Cuando se trata el concepto de modelación es imprescindible tratar en primera instancia con el concepto de sistemas, que no es más que un conjunto de partes que están interrelacionadas entre sí, las cuales al funcionar de forma simultánea generan un comportamiento global (Aracil & Gordillo, 1997). Sus elementos básicos están constituidos tanto por sus partes como por las relaciones establecidas entre ellas.

Considerando los diferentes atributos que poseen las partes y las variaciones presentes en sus interrelaciones, es lógico pensar que el sistema global se alterará a través del tiempo produciendo lo que se conoce como sistema dinámico.

Por otro lado, un modelo es una herramienta utilizada para responder preguntas asociadas a la realidad, el cual se encuentra representado por un sistema concreto y previamente establecido.

La dinámica que se produce dentro de un sistema puede ser simulada a través de la construcción de un modelo, lo que permite alterar sus partes y estudiar los cambios entre las interrelaciones producidas por la alteración ingresada. Los ejemplos son infinitos, ya que prácticamente todo lo que nos rodea podría ser representado a través de un sistema.

Por último, al modelar un sistema se debe establecer un conjunto de ecuaciones matemáticas que al ser resueltas a través del tiempo, representan de forma aproximada la realidad. Sin embargo, el sistema considera un conjunto limitaciones generando sólo una aproximación del comportamiento real. Cabe destacar que el número de cálculos que realiza un modelo, se encuentra relacionado con la resolución espacial (Δx) y temporal (Δt) del mismo. A su vez, Δx y Δt se encuentran vinculados con el concepto de estabilidad. Cuando un modelo es inestable sus resultados se alejan progresivamente de los valores físicamente aceptables y generan la interrupción del programa.

3.2 MODELACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA DEL MAR

La simulación de la hidrodinámica del océano puede ser dividida, según su escala, en dos grandes grupos. El primero involucra a los modelos que tienen por objetivo simular el océano en una escala planetaria, denominados modelos oceánicos de circulación general (OGCM). En el segundo se encuentran los modelos de escala local, utilizados por ejemplo, para simular la hidrodinámica costera. Estos últimos, generalmente se extienden desde la línea de costa, pasando por la plataforma continental, hasta llegar a zonas de aguas profundas. Dependiendo de las variables ingresadas y la escala que se desee estudiar, será el tipo de modelo que se deba utilizar (Blasco, 2007).

Cabe destacar que estas herramientas tienen una importancia innegable para la elaboración de los diferentes proyectos desarrollados en la costa, como el diseño y gestión de puertos, diseño de obras marítimas, la evaluación de la dispersión de contaminantes, entre otros. Sin embargo, los modelos siguen siendo simplemente herramientas que se encuentran sujetas al criterio del usuario y por tanto, su correcta ejecución dependen solamente de él y de una buena validación.

3.3 CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

Para estudiar la evolución de una sustancia en el cuerpo de agua marino, sea un contaminante u organismo, se debe conocer la velocidad de la corriente en cada punto de la zona de interés. Normalmente se utiliza un modelo hidrodinámico, el cual genera como resultado un campo de velocidades y desnivelaciones dentro del área de simulación. La dimensión del modelo (uni, bi o tridimensional) se determina a partir de las características del estudio.

Por otro lado, las corrientes forzadas por la marea, viento y oleaje son las que presentan mayor relevancia en los estudios hidrodinámicos y por tanto, son detalladas en los siguientes apartados. Cabe mencionar que la presión atmosférica no fue considerada como forzante debido a que las estructuras meteorológicas² poseen una escala de longitud horizontal del orden de 1000 [km] o más, y por tanto su valor tiende a ser constante para modelos locales³ (The COMET Program, 2005).

3.3.1 CORRIENTES GENERADAS POR MAREA

Las corrientes de marea son movimientos horizontales que acompañan el ascenso y descenso del nivel del mar. En zonas costeras, bahías o estuarios se conocen como corrientes de flujo y reflujó. Suelen generarse antes de alcanzar los puntos más altos y bajos de los ciclos mareales, donde alteran su dirección en función del ciclo mareal, dirigiéndose hacia la costa en períodos de ascenso y en sentido contrario, mientras se produce el descenso (NOAA, 2015). Para profundizar sobre la generación de la marea revisar el Anexo B.1.

3.3.2 CORRIENTES GENERADAS POR VIENTO

La fuerza ejercida por el viento sobre la superficie del océano se traduce en una transferencia de energía desde la atmósfera hacia la hidrósfera, la cual decrece a medida que la profundidad aumenta. La corriente generada tiene mayor intensidad en las capas superficiales del mar, siendo transferida a las capas inferiores a través de la fricción generada por la capa superior. Para profundizar sobre la generación del viento revisar el Anexo B.2.

3.3.3 CORRIENTES GENERADAS POR OLAJE

El oleaje propagado desde aguas profundas y luego de sufrir una serie de alteraciones físicas al entrar en contacto tanto con la batimetría como con obstáculos durante su propagación (revisar el Anexo B.3), finalmente llega a la costa para disipar su energía a través de la fricción generada por el fondo y la rotura del oleaje. Este último fenómeno surge

² Vaguadas, dorsales, anticiclones y depresiones.

³ La longitud horizontal del modelo utilizado en la presente Memoria es de ~ 15 [km].

cuando la altura de la ola crece hasta comprometer su estabilidad debido a la interacción entre la parte inferior de la misma y el fondo, provocando fricción y resultando en su rotura.

Durante dicho proceso, en forma transversal a la línea de costa (Figura 3-1) la conservación de la cantidad de movimiento relaciona los gradientes del tensor de radiación (exceso de flujo de momentum) con variaciones del nivel medio del mar (*NMM*) y términos asociados a la fricción. Por tanto, el fenómeno de asomeramiento del oleaje estará asociado a una depresión del *NMM*, el cual es mínimo en el punto de rotura, y es denominado *setdown*. Por otro lado, se produce un ascenso constante del *NMM* en la zona de surf, conocido como *setup*, el cual es contenido por la orilla de la playa.

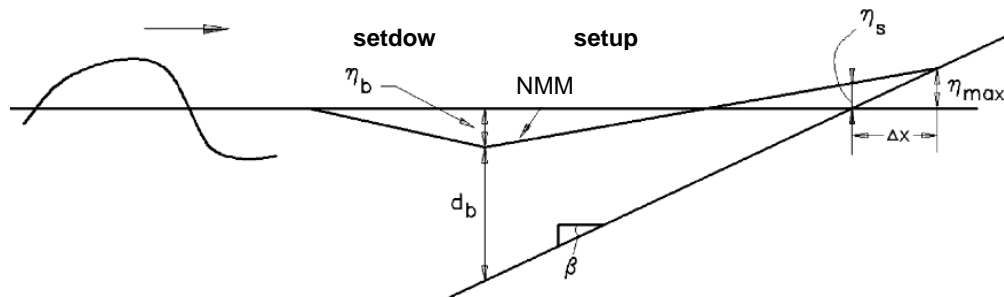


Figura 3-1: Representación gráfica del *setdown* y *setup*.

Fuente: Adaptado de CEM (2003).

Sin embargo, el oleaje real tiende a incidir en la costa con una dirección oblicua generando el *setup* y *setdown* en forma transversal, mientras las corrientes litorales en forma longitudinal a la costa. Estas últimas, surgen por la ausencia de un límite físico el cual sea capaz de contenerlas (Figura 3-2).

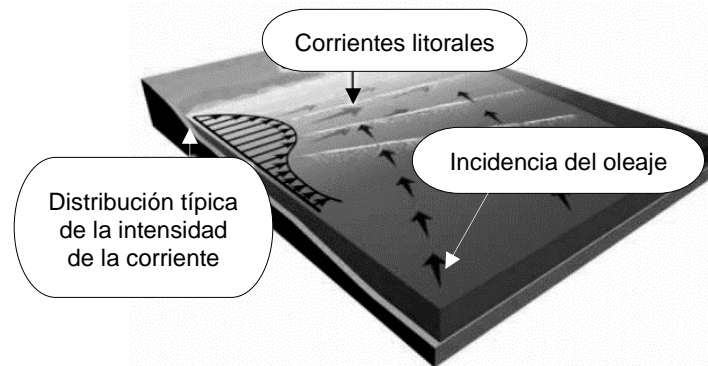


Figura 3-2: Corrientes litorales generadas por la incidencia oblicua del oleaje.

Fuente: Adaptado de The COMET Program (2012).

La velocidad de la corriente longitudinal dependerá de un conjunto de parámetros, entre los más relevantes se encuentra: la altura de ola antes de romper, su período y ángulo de incidencia, así como la pendiente de la batimetría presente en la zona de surf y la fricción producida por la interacción entre la ola y el fondo. Mientras que la intensidad de dichas corrientes, es tan alta que pueden llegar a alterar el patrón de circulación de una bahía (Fernández, 2012).

3.4 EMISARIOS SUBMARINOS: GENERALIDADES Y CONCEPTOS

Como ya se mencionó, un emisario submarino es un conducto que transporta aguas residuales desde una estación de tratamiento hasta mar abierto. Idealmente, el flujo debe ser vertido donde la hidrodinámica del cuerpo de agua favorezca los procesos de mezcla.

Desde el punto del vertido, es posible distinguir dos áreas fundamentales. Al inicio de la descarga se encuentra el campo cercano (área destinada a la zona de mezcla), donde se genera la interacción entre el contaminante y el medio receptor, a partir de la boyantes y momentum del vertido. Cuando se produce un equilibrio densimétrico entre los mismos, finaliza la dilución inicial de la sustancia vertida y se establece el inicio del campo lejano. Dentro de esta nueva zona, tienen relevancia los procesos tanto difusivos como advectivos, fundamentales en el desarrollo de la dilución secundaria. Mientras, en forma paralela, se desenvuelve la dilución terciaria, la cual está relacionada al decaimiento bacterial de la descarga.

Según lo establecido por Ludwig (1988), los procesos de mezcla desarrollados en el campo cercano tienen una importancia significativa en la dilución del contaminante, debido a que su eficiencia alcanza el 99%. Mientras que la dilución del campo lejano presenta una eficiencia del 1% restante.

Por último, los conceptos mencionados en la presente sección se observan en la Figura 3-3, siendo desarrollados en los siguientes apartados.

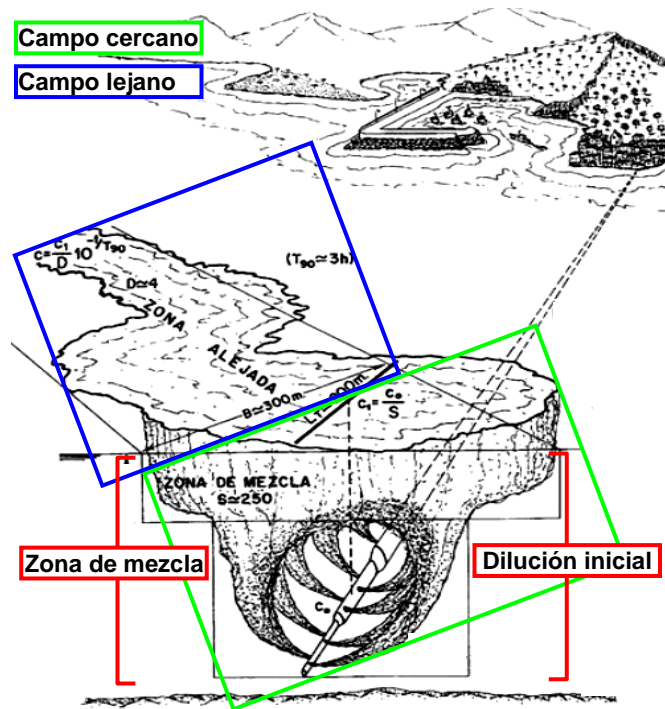


Figura 3-3: Conceptos generales asociados a emisarios submarinos.

Fuente: Adaptado de Olivares (2008).

3.4.1 CAMPO CERCANO

El campo cercano se define como el área donde el comportamiento del vertido está controlado por los siguientes parámetros:

- *Caudal del emisario.*
- *Parámetros de diseño del difusor:* longitud, distribución de las toberas y diámetro de las mismas, profundidad de vertido, entre otros.
- *Propiedades del vertido:* viscosidad, temperatura y salinidad.
- *Propiedades del cuerpo receptor:* distribución de la temperatura y salinidad a lo largo de la columna de agua.

En primer lugar, para lograr una descarga exitosa tanto del punto de vista estético como del aumento de la dilución inicial, se recomienda verter aguas servidas a una profundidad de al menos 20 metros (Ludwig, 1988). A través de esta característica, se espera intersectar un plano de estratificación a lo largo de la columna de agua y capturar la descarga a una profundidad determinada como se observa en la Figura 3-4, b.

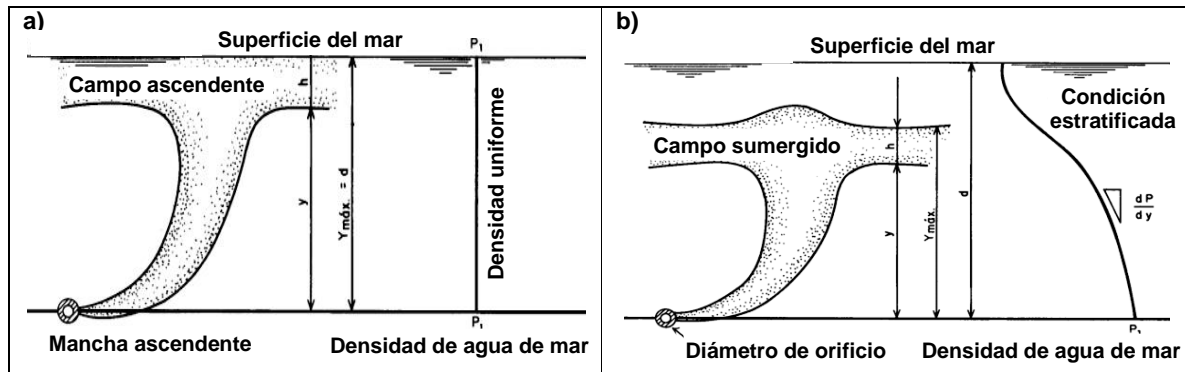


Figura 3-4: Comportamiento de un vertido con boyantes positiva bajo diferentes perfiles de densidad. Cuerpo de agua bajo condiciones a) no estratificadas y b) estratificadas.

Fuente: Adaptado de Ludwig (1988).

Además se sugiere considerar un difusor eficiente, pues este último segmento es el responsable del mayor porcentaje de dilución inicial y por tanto, debe asegurar la protección del medio ambiente (Ludwig, 1988).

Por otro lado, las corrientes influyen tanto en la trayectoria del chorro (mientras éste asciende) como en la dilución inicial del mismo. Su estimación se debe realizar en el área circundante al punto de vertido y tiene gran influencia sobre la distribución de la pluma cuando el vertido se aproxima a la superficie del mar (en un medio receptor no estratificado). Como ejemplo de lo mencionado, en la Figura 3-5 se observa un contaminante con boyantes positiva, vertido en un cuerpo receptor estratificado y bajo la presencia de corrientes.

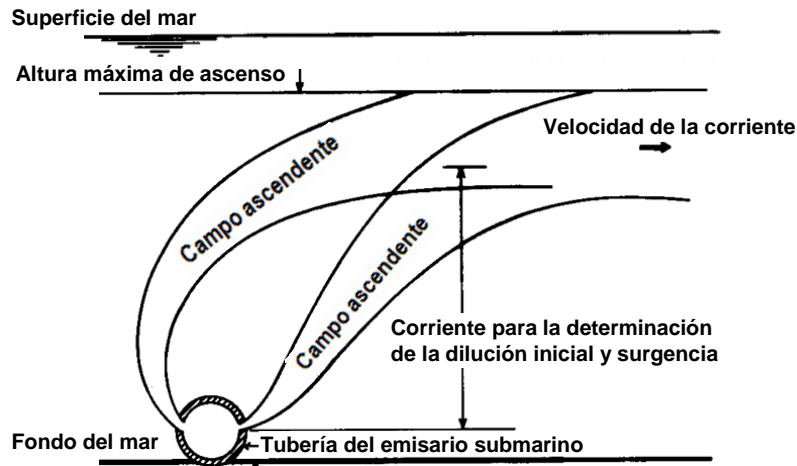


Figura 3-5: Comportamiento de un chorro ascendente, bajo la acción de corrientes. Medio receptor estratificado.

Fuente: Adaptado de Ludwig (1988).

Cabe indicar que la *dilución inicial* y la *zona de mezcla (ZM)* son dos conceptos que tienden a causar confusión. Fundamentalmente por su similitud tanto en el tiempo necesario para su desarrollo como en su área de acción. Por este motivo, se definen con mayor detalle en los siguientes apartados.

3.4.1.1 DILUCIÓN INICIAL

La dilución inicial (D) es definida como el proceso de mezcla que ocurre luego que un contaminante es vertido por un emisario y éste asciende por la columna de agua hasta alcanzar un plano de estratificación, disminuyendo de dicha manera su concentración final (Salas, 2000). Su valor se calcula a través de la ecuación (3.1), siendo el cociente entre la concentración inicial (C_0) y la concentración en el plano de estratificación (C).

$$D = C_0 / C \tag{3.1}$$

Según lo establecido por Ludwig (1988) y Salas (2000), el diseño del difusor es crítico para alcanzar el nivel de dilución inicial deseado. Donde sus parámetros de diseño son su longitud, profundidad, orientación, separación entre las toberas, diámetro de apertura y orientación de las mismas.

3.4.1.2 ZONA DE MEZCLA

La zona de mezcla (ZM) es definida por diferentes autores (Revilla et al., 1995; Salas, 2000) como una región limitada a las cercanías del difusor, en la cual no se aplica un estándar de calidad de agua y cuyo propósito es la mezcla completa entre el vertido y el agua de mar.

Normalmente rodea un área que va desde los 50 a los 600 metros de diámetro y no considera gran parte de los factores presentes tanto en la dilución secundaria como terciaria, como por ejemplo el efecto producido por la radiación del sol.

3.4.2 CAMPO LEJANO

El campo lejano se define como el área donde el vertido es transportado por la hidrodinámica del cuerpo receptor. En él se produce tanto la dilución secundaria como terciaria, asociadas al transporte del contaminante debido al régimen de corrientes locales y al decaimiento bacterial (considerando un contaminante no conservativo).

En el presente campo, la densidad del vertido se encuentra en equilibrio con el medio receptor y en consecuencia, las velocidades verticales pasan a ser insignificantes en comparación a las presentadas en el campo cercano.

3.4.2.1 PROCESOS DE ADVECCIÓN Y DIFUSIÓN

La variación en la concentración de un contaminante introducido en un medio acuático, como se observa en el ejemplo de la Figura 3-6, depende principalmente de la acción conjunta de los procesos de advección y difusión. El primero se encuentra asociado al transporte del contaminante como respuesta de la acción hidrodinámica; mientras que el segundo, a la disgregación de la concentración del mismo. La escala en que se produce la difusión, varía desde el nivel molecular (viscosidad y difusión molecular) hasta el grado de procesos turbulentos oceánicos (difusión turbulenta). Por tanto, la principal diferencia entre la advección y la difusión es que esta última es irreversible (Platónov, 2002).

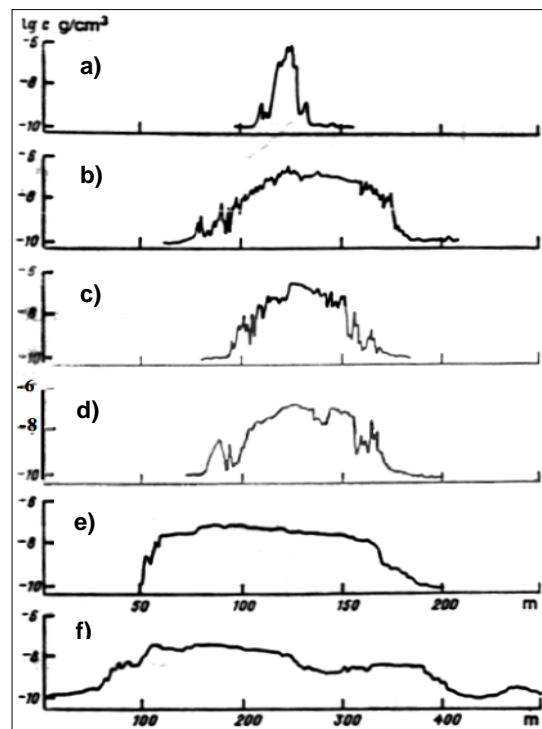


Figura 3-6: Distribución horizontal de un contaminante vertido en la superficie del mar. La variación del registro, medido en minutos, es la siguiente: a) 44, b) 93, c) 108, d) 128, e) 172 y f) 258.

Fuente: Adaptado de Platónov (2002).

3.4.2.2 DECAIMIENTO BACTERIAL

Concepto perteneciente a los mecanismos de transformación que sufren las aguas servidas. Su principal desarrollo se encuentra en el campo lejano, ya que la escala de tiempo para su generación oscila desde horas a semanas.

Según lo indicado por Metcalf & Eddy (1985), el decaimiento bacterial se produce por mortalidad, floculación o sedimentación de las bacterias (como se citó en Padilla & Mondaca, 1995). Por tanto, el factor a tomar en consideración es la tasa de decaimiento bacterial, reconocida internacionalmente por T90 y traducida como el tiempo necesario para que desaparezca el 90% de las bacterias presentes, por ejemplo en los coliformes fecales (Padilla & Mondaca, 1995).

Por otro lado, estudios realizados por Ludwig (1988) calculan valores de T90 comprendidos entre 0.75 y 1.7 horas para aguas tanto tropicales como semitropicales ubicadas en Brasil y sus alrededores. Sin embargo, también menciona que el parámetro T90 debe ser calculado a partir de las variables propias de cada sector.

En Chile se han realizado estudios al respecto (comuna de Penco, Región del Biobío), donde se demostró una disminución del 90% del contenido bacterial en un T90 igual a 1.5 horas. Sin embargo, se recomienda utilizar un T90 de 3 horas como factor de seguridad, el cual puede ser aplicado a lo largo de la costa chilena (Padilla & Mondaca, 1995). La relación existente entre el parámetro T90 y la constante de decaimiento se describe en apartados posteriores (sección 3.5.3).

Por último, cabe destacar que la gran mayoría de los estudios relacionados al cálculo de T90 son realizados durante el día. Ahora bien, considerando que la radiación solar es uno de los factores con mayor influencia en la mortalidad bacterial, es de suponer que el valor de T90 aumentará durante la noche, afectando la extensión de la pluma de descarga. Lo mencionado, tiene especial relevancia en proyectos que consideran puntos de vertido relativamente cercanos a zonas donde se extraen bivalvos (Ludwig, 1988).

3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

3.5.1 CORMIX 2: DESCARGAS SUMERGIDAS A TRAVÉS DE UN DIFUSOR

El software *CORMIX* es un programa comercial que a grandes rasgos calcula la dilución y advección generada en el campo cercano y lejano de vertidos con densidades variables (no considera su viscosidad). Asimismo, destaca como una de las herramientas más adecuadas para la evaluación de los procesos de mezcla, de acuerdo a lo expuesto en el informe de la Comisión Europea "*Orientaciones técnicas para la identificación de las zonas de mezcla*" (como se citó en Troya, 2012). Está compuesto de módulos y su objetivo es resolver los procesos de mezcla. Sus ecuaciones se encuentran fundamentadas en el análisis dimensional del fenómeno, adquiriendo formulaciones semiempíricas del tipo escala de longitud.

Entre las características presentadas por *CORMIX*, se destaca la interacción del vertido con los contornos verticales, tales como la pycnoclina, la superficie del cuerpo de agua receptor o el fondo del mismo. Además considera los procesos generados al disminuir la proximidad entre los chorros expulsados por un difusor (MEDVSA, 2010). No obstante, el proyecto MEDVSA menciona errores asociados a vertidos con boyantes negativa y valores poco exactos en la modelación del campo lejano. Dichas limitaciones no fueron un impedimento para la presente Memoria, ya que *CORMIX* representa de forma adecuada la dilución de aguas servidas dentro del campo cercano, mientras que la modelación en el campo lejano se realizó a través del software *MIKE 21 AD*.

Específicamente, se utilizó el módulo *CORMIX 2*; sus principales características se mencionan a continuación (MixZon Inc, 2007):

- Modela el comportamiento de efluentes con flotabilidad positiva, negativa o neutra.
- Incluye vertidos a través de un difusor (chorros múltiples).
- Incluye tanto el diseño del difusor como las condiciones del medio receptor.

Cabe destacar que *CORMIX 2* considera una distribución Gaussiana del contaminante (concentración más alta en el centro de la pluma, la cual decae hacia los extremos). Específicamente para el caso donde la pluma aflora a la superficie, la concentración lateral (C_L) es equivalente al 46% de la concentración máxima calculada en la línea central de la pluma (C_C), como se aprecia en la Figura 3-7.

Por último, revisar el Anexo C.1 y C.2 para examinar con mayor detalle los métodos y parámetros de cálculo utilizados por *CORMIX*.

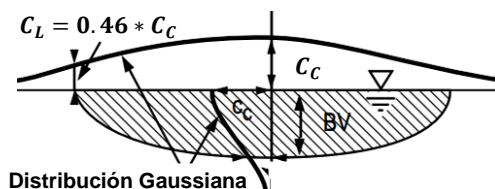


Figura 3-7: Distribución horizontal del contaminante durante la difusión ambiental.

Fuente: (MixZon Inc, 2007)

3.5.2 MIKE 21 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

La unidad básica de *MIKE 21 Flow Model FM* es el módulo hidrodinámico (*HD*), el cual simula la intensidad y dirección de las corrientes en forma bidimensional como respuesta a las forzantes presentes en el mar. Dicho proceso se realiza al solucionar la ecuación de continuidad (3.2) y la ecuación de conservación del momentum en los ejes x (3.3) e y (3.4). Para la discretización espacial de las ecuaciones, se utiliza el método de volúmenes finitos de celdas centradas sobre una malla flexible compuesta por elementos triangulares o cuadráticos (DHI, 2014). Cabe destacar que la definición de cada término se encuentra al concluir la presente Memoria, en la sección titulada *Simbología*.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) - \dots \quad (3.3)$$

$$gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hu_s S$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) - \dots \quad (3.4)$$

$$gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hv_s S$$

Entre las características del modelo, se destaca la consideración de términos fuentes y sumideros, además de los siguientes fenómenos (DHI, 2014):

- *Fuerza de Coriolis (tachada en azul)*: No considerada en las simulaciones ya que el tamaño del modelo es reducido y por tanto, su utilización no es justificada.
- *Presión atmosférica (tachada en verde)*: Constante en el espacio.
- *Término baroclínico (tachado en negro)*: Temperatura y salinidad contantes. Es decir, la densidad no variará en el espacio.
- *Viscosidad turbulenta (tachada en rojo)*: No considerada en las simulaciones a partir del análisis realizado en el Anexo C.3.
- *Precipitación y evaporación*: No consideradas.
- *Inundaciones y secado*: No consideradas.
- *Fricción producida por la interacción con el fondo*: Analizada en el Anexo C.4.
- *Fricción producida por el viento*: Analizada en el Anexo C.5.
- *Gradientes del tensor de radiación*: Acoplados a partir de una simulación realizada en *MIKE 21 SW*.

3.5.3 MIKE 21 FLOW MODEL FM: MÓDULO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

El presente módulo es un subprograma de *MIKE 21 Flow Model FM*, el cual permite simular el transporte (*AD*) de un contaminante en la superficie del cuerpo de agua, en función de las condiciones hidrodinámicas presentes en él (DHI, 2014).

Este módulo considera sustancias que disminuyen su concentración con el paso del tiempo (contaminantes no conservativos), tales como:

- *Calor.*
- *Compuestos xenobióticos.*
- *Bacterias coliformes:* Indicador microbiológico de interés para la presente Memoria.

Mientras su formulación se basa en la ecuación de advección - difusión (3.5), la cual considera el volumen de vertido, la concentración del contaminante tanto en las fuentes como sumideros y una tasa de decaimiento del mismo (sujeto a las características presentes en el medio ambiente receptor). Respecto a este último parámetro, la relación existente entre T90 y la constante de decaimiento (*k*) se aprecia en la ecuación (3.6).

$$\frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial}{\partial x}(uhc) + \frac{\partial}{\partial y}(vhc) = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) - khc + S \quad (3.5)$$

$$k = \frac{2.3}{T90} \quad (3.6)$$

3.5.4 MIKE 21 SPECTRAL WAVE: MÓDULO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Modelo utilizado para simular el crecimiento, decaimiento y transformación del oleaje generado por viento tanto en áreas costeras como aguas profundas. Su formulación está basada en la ecuación de densidad de acción del oleaje (3.7), utilizando las variables independientes de frecuencia angular relativa y dirección del oleaje (DHI, 2014).

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.7)$$

La ecuación de conservación para la acción del oleaje está formulada tanto en coordenadas cartesianas (3.8) como cilíndricas, aplicadas en estudios de pequeña y gran escala, respectivamente.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.8)$$

Los cuatro parámetros de velocidad de propagación de la onda $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ y las fuentes de energía *S*, se observan en las ecuaciones (3.9), (3.10), (3.11) y (3.12), respectivamente.

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad (3.9)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_x d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (3.10)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (3.11)$$

$$S = S_{in} + S_{bot} + S_{surf} + \mathfrak{S}_{nl} + \mathfrak{S}_{ds} \quad (3.12)$$

En particular, los fenómenos que consideran los términos fuente (S) representan el crecimiento y decaimiento de la energía de las olas e interacciones no lineales entre ellas. Su descripción se realiza a continuación:

- *Transferencia de energía desde viento hacia el oleaje (S_{in}):* Considerada.
- *Disipación de energía debido a la fricción con el fondo (S_{bot}):* Considerada.
- *Disipación de energía debido a la rotura del oleaje (S_{surf}):* Considerada.
- *Transferencia de energía no lineal ola - ola (\mathfrak{S}_{nl}):* No considerada.
- *Disipación de energía debido al whitecapping (\mathfrak{S}_{ds}):* No considerada.

Según lo indicado por Holthuijsen (2007), la transferencia de energía desde el viento al oleaje se produce principalmente cerca de peak del espectro y en el rango medio de las frecuencias (Figura 3-8). Dicha energía rápidamente es disipada por el whitecapping y por las interacciones no lineales ola – ola (transporte de la energía a lo largo del espectro). El hecho de no considerar ambos procesos, se traduce en una leve sobrestimación de la energía total del espectro de oleaje, la cual es posible regular a través de la fricción de fondo.

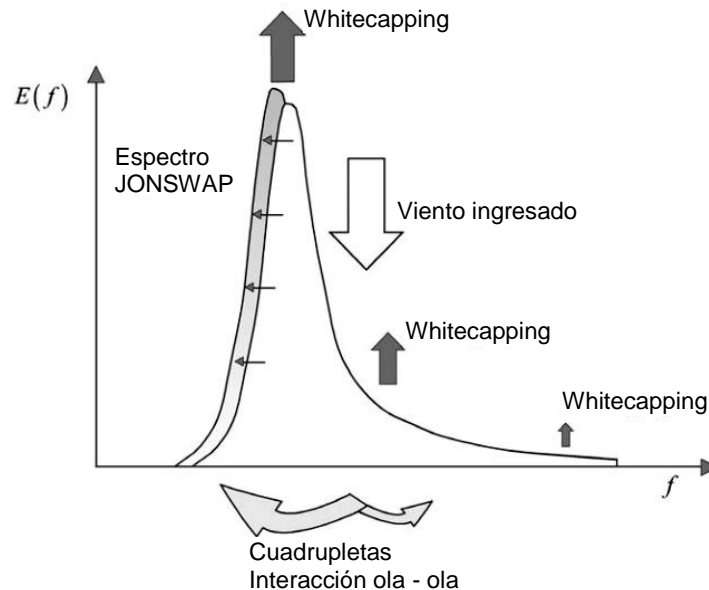


Figura 3-8: Flujo de energía en un espectro JONSWAP.

Fuente: (Holthuijsen, 2007).

Por otro lado, el presente modelo permite calcular los gradientes del tensor de radiación los cuales están asociados a las condiciones del oleaje y son fundamentales en la simulación de las corrientes litorales. Su formulación se observa en la ecuación (3.13), a partir de lo establecido en la documentación científica del programa (DHI, 2014).

$$S_{xx} = \frac{1}{2}g(f_{u2} + f_{pp}), \quad S_{xy} = \frac{1}{2}g(f_{uv}), \quad S_{yy} = \frac{1}{2}g(f_{v2} + f_{pp}) \quad (3.13)$$

Donde:

$$\begin{aligned} f_{pp} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta \\ f_{u2} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos^2\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta \\ f_{uv} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \sin\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta \\ f_{v2} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin^2\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta \end{aligned} \quad (3.14)$$

4 INFORMACIÓN RECOPIADA

4.1 INFORMACIÓN OCEANOGRÁFICA Y METEOROLÓGICA

La información recopilada corresponde a registros de marea, corrientes, vientos, temperatura y salinidad presentes en la bahía de Coquimbo. La distribución de los puntos de registro se observa en la Figura 4-1.

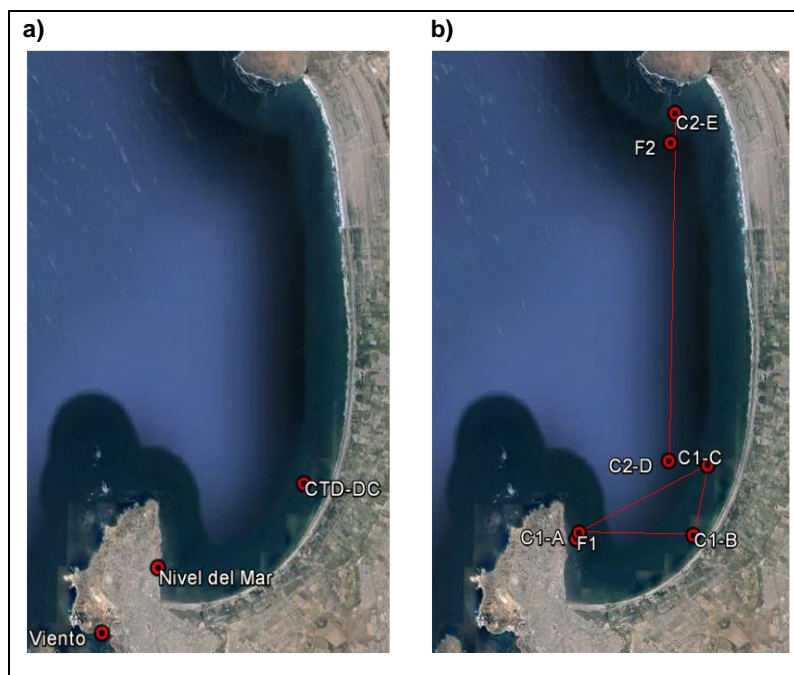


Figura 4-1: Distribución de los puntos de registro de información.
a) Registro de marea, viento, temperatura y salinidad (CTD). b) Registro de corrientes.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 MAREA

El registro horario del nivel del mar fue otorgado por el SHOA a través del CENDHOC, con un rango de 5 años (2007 - 2012). El instrumento de medición se encuentra en el Puerto de Coquimbo (Figura 4-1, a), específicamente en la latitud $29^{\circ} 57' S$ y longitud $71^{\circ} 20.12' W$.

Cabe considerar, que la presente información fue utilizada en el proceso de calibración y validación del desplazamiento vertical de la superficie libre, simulado a través del módulo hidrodinámico de *MIKE 21*.

4.1.2 OLEAJE

La base de datos fue generada por el modelo global Wave Watch III perteneciente a la NOAA, el cual crea un retroanálisis de información de oleaje a partir de campos de viento y modelos atmosféricos, para luego ser validado con altimetría satelital. Su malla se extiende en todo el planeta y posee una resolución de 1° en la latitud y 1° 15' en la longitud.

Específicamente, la información corresponde a parámetros de resumen del oleaje (altura significativa, período peak y dirección media), discretizados cada 3 horas y con una extensión de 13 años (1997 - 2010). Además, se posee la dispersión direccional del oleaje (*Directional spreading*), correspondiente al año 2013 y cuyo detalle se observa en el Anexo D.1. El nodo de extracción se encuentra en aguas profundas con coordenadas de latitud 30° S y longitud 72° 30' W.

4.1.3 CORRIENTES

La información de correntometría Euleriana proviene de una fuente bibliográfica (Universidad de Valparaíso, 2009), cuyo estudio consideró mediciones en los meses de Octubre (2007), Enero, Mayo y Agosto del 2008, con un tiempo de registro promedio de 2.5 días.

La medición se realizó en dos modalidades. La primera consideró la utilización de un ADCP remolcado a dos metros de la superficie, el cual trazó dos circuitos de registro a lo largo de la bahía.

- *Circuito 1:* Traza un triángulo en la zona Sur de la bahía y se encuentra compuesto por los vértices C1-A, C1-B y C1-C.
- *Circuito 2:* Transecto que recorre la bahía de Sur a Norte, donde sus extremos son los puntos C2-D y C2-E

En la segunda campaña se utilizaron correntómetros anclados en dos puntos de la bahía (F1 - F2), para registrar las corrientes a cinco metros de la superficie. La distribución de las estaciones y circuitos de medición, se observa en la Figura 4-1, b.

A continuación se presentan, las principales conclusiones respecto a la medición de las corrientes (Universidad de Valparaíso, 2009).

- *En relación al circuito 1:* El análisis de la dirección de las corrientes superficiales sugiere la presencia de un vórtice con giro antihorario en el sector Sur de la bahía.
- *En relación al circuito 2:* Es posible apreciar en la Figura 4-2 la presencia de un flujo superficial variable en el transecto \overline{DE} . Específicamente, los meses de Enero 2008 y Agosto 2008 presentaron una tendencia hacia el Norte, mientras en Mayo 2008 y Octubre 2007 los flujos dominantes fueron en dirección Este-Oeste. Cabe indicar que la escala de los vectores no es constante para la totalidad de las imágenes.

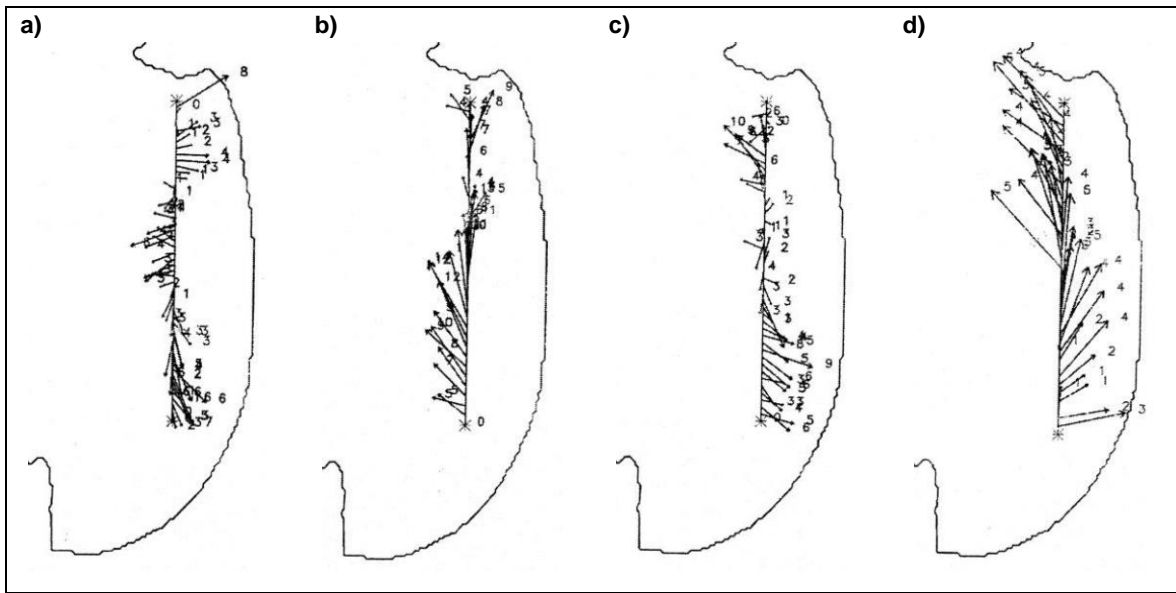


Figura 4-2: Mediciones de la corriente superficial con un ADCP remolcado a lo largo de la bahía. a) Octubre 2007, b) Enero 2008, c) Mayo 2008 y d) Agosto 2008.

Fuente: Adaptado del estudio realizado por la Universidad de Valparaíso (2009).

- En relación a las mediciones realizadas en las estaciones F1 - F2: Como se observa en la Figura 4-3, se registraron corrientes con velocidades promedio entre 0.02 y 0.05 [m/s]. Lo que demuestra la presencia de corrientes de baja magnitud y sugiere un patrón de circulación deficiente, aumentando los tiempos de permanencia de cualquier contaminante vertido dentro de la bahía. Para mayor detalle del tiempo de registro de cada campaña, revisar el Anexo D.2.

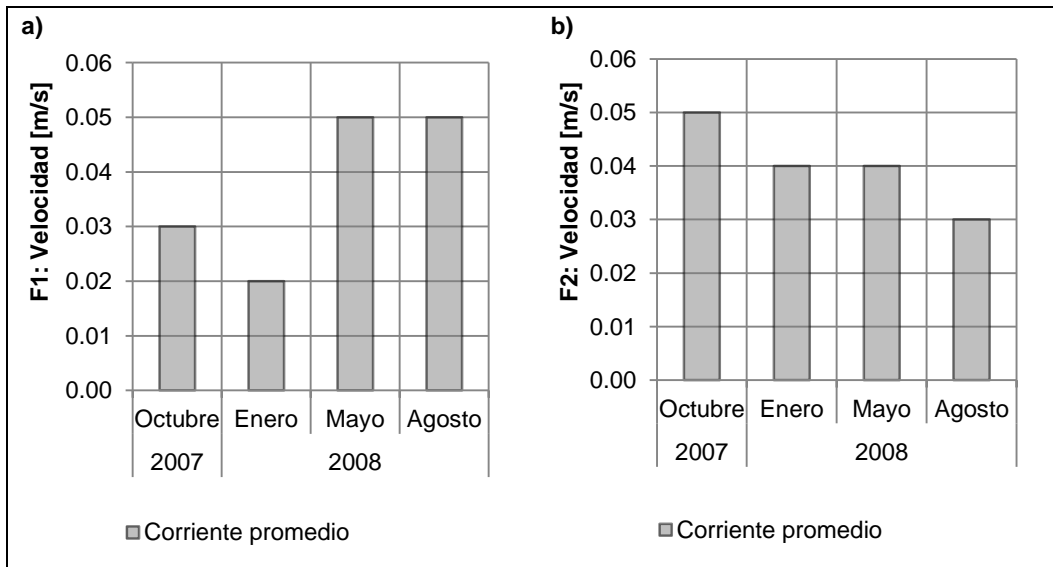


Figura 4-3: Resumen de las mediciones de corrientes, efectuadas por los correntómetros. Estaciones de medición a) F1 y b) F2.

Fuente: Adaptado del estudio realizado por la Universidad de Valparaíso (2009).

4.1.4 TEMPERATURA Y SALINIDAD

El registro tanto de la temperatura como de la salinidad fue realizado mediante un CDT ubicado en la estación de medición *DC* y cuyos resultados se observan en la Figura 4-4.

Cabe considerar que la estación se situó alejada del punto de vertido, para evitar la alteración de las propiedades del cuerpo de receptor al interactuar con la zona de mezcla. Además, la combinación de la temperatura y salinidad para las diferentes fechas de medición, infieren la ausencia de un plano de estratificación a lo largo del año (confirmado por la constante visualización de la pluma de descarga a través de imágenes satelitales).

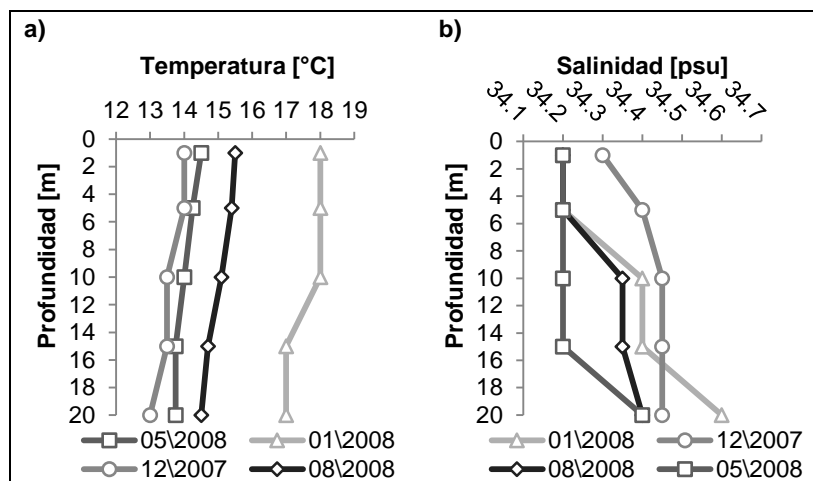


Figura 4-4: Mediciones de la estación DC. Perfiles de a) temperatura y b) salinidad.

Fuente: Adaptado del estudio realizado por la Universidad de Valparaíso (2009).

4.1.5 VIENTOS

El registro de las condiciones de viento, corresponde a mediciones horarias de la intensidad y dirección del mismo desde Febrero (2011) a Noviembre (2015), con una discretización direccional de 45°. Se obtuvo de la estación UCN Guayacan, perteneciente a la Red Agrometeorológica INIA (Agromet, 2012) y ubicada en el límite Suroeste de Punta Tortuga (Figura 4-1, a). Su respectivo análisis se ubica en la sección 5.1.2.2.

4.2 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA

La información batimétrica se obtuvo a través de las cartas náuticas electrónicas N° 4100⁴ y 4111⁵, pertenecientes al SHOA. Su referencia es el Datum Geodésico WGS 1984, mientras sus respectivas escalas son 1:100.000 y 1:15.000. La distribución y alcance de dichas cartas se observa en la Figura 4-5.

⁴ Punta Poroto a Punta Lengua de Vaca.

⁵ Bahías Coquimbo y Herradura de Guayacán.

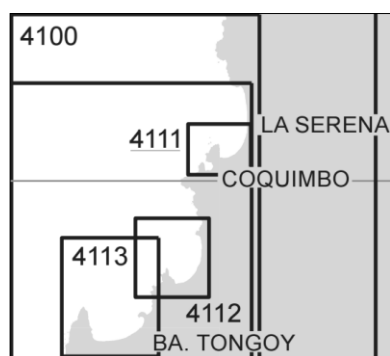


Figura 4-5: Alcance de las cartas náuticas utilizadas.

Fuente: (SHOA - pub. 3000, 2015).

4.3 ZONIFICACIÓN AMBIENTAL DE LA BAHÍA DE COQUIMBO

La presente información se obtuvo de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA, 1996). Entre otras facultades, dicha institución utiliza las normas dictadas por el Gobierno para circunscribir tanto el área donde puede circular cierto contaminante como la concentración del mismo. Entre sus funciones destaca, garantizar la conservación y sustentabilidad de los recursos hidrobiológicos presentes en un sector específico.

En particular, las áreas sensibles consultadas en SUBPESCA corresponden a las áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERB); y la extensión de la zona de protección litoral (ZPL) fue consultada en DIRECTEMAR.

Por tanto, considerando como indicador microbiológico a los coliformes fecales y la presencia tanto de zonas sensibles (cultivo de bivalvos y algas) como áreas de recreación en la bahía de Coquimbo, las normas utilizadas fueron las siguientes:

- Decreto Supremo N° 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Anexo A.1).

"Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales".

- NCh 1333 de 1978 (Anexo A.2).

"Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos".

Por último, el ancho de la ZPL y las características de las AMERB presentes en la bahía de Coquimbo, se observan en el Anexo D.3.

4.4 CARACTERÍSTICAS DEL EMISARIO SUBMARINO Y DE SU VERTIDO

La estructura se encuentra conformada por un conducto principal, el cual finaliza en una rama de dos difusores encargados del proceso de vertido de aguas servidas en el cuerpo receptor. Las características tanto del emisario como de los difusores se detallan en la Tabla 4-1, mientras las especificaciones del vertido son expuestas en la Tabla 4-2. Respecto a este último punto, es posible apreciar un incremento en el caudal de descarga en los meses de verano debido al aumento demográfico en la costa (presencia de turistas). Por otro lado y de acuerdo a los datos entregados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2014), el caudal máximo de diseño es de $0.95 \text{ [m}^3/\text{s]}$, el cual es sobrepasado según los registros (Enero 2008 y Octubre 2007).

Tabla 4-1: Características estructurales del emisario submarino. Divididas en a) emisario y b) difusores.

a)		b)	
Longitud [m]	1710	Longitud [m]	40
Material	Polietileno de alta densidad	Material	Polietileno de alta densidad
Diámetro exterior [m]	0.9	Diámetro exterior [m]	0.63
Profundidad de descarga [m]	19	Número de toberas por difusor	19
Coordenadas aproximadas del punto central de descargas en UTM [m]	Norte: 6690600 Este: 278700	Diámetro interior de las toberas [m]	0.11

Fuente: (Universidad de Valparaíso, 2009).

Cabe indicar que la información expuesta en el presente apartado, fue recopilada del estudio "Diagnóstico de los efectos de las descargas líquidas en la bahía de Coquimbo" (Universidad de Valparaíso, 2009).

Tabla 4-2: Principales características del vertido de aguas servidas.

Parámetro	Enero 2008	Mayo 2008	Agosto 2008	Octubre 2007
Temperatura [°C]	19.7	18.1	18.9	22.5
Coliformes fecales [NMP/100 ml]	1.7E+07	1.1E+06	1.3E+05	-- --
Caudales	Enero 2008	Mayo 2008	Agosto 2008	Octubre 2007
Máximo [m ³ /s]	0.980	0.637	0.880	0.959
Promedio [m ³ /s]	0.764	0.446	0.664	0.757

Fuente: (Universidad de Valparaíso, 2009).

5 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología utilizada fue dividida en dos secciones, descritas en los siguientes apartados (5.1 y 5.2) y resumidas a través de la Figura 5-1. Dichas secciones interactúan entre sí para generar los resultados finales de la presente Memoria. Se sugiere revisar el apartado 5.4 para estudiar en detalle la metodología.

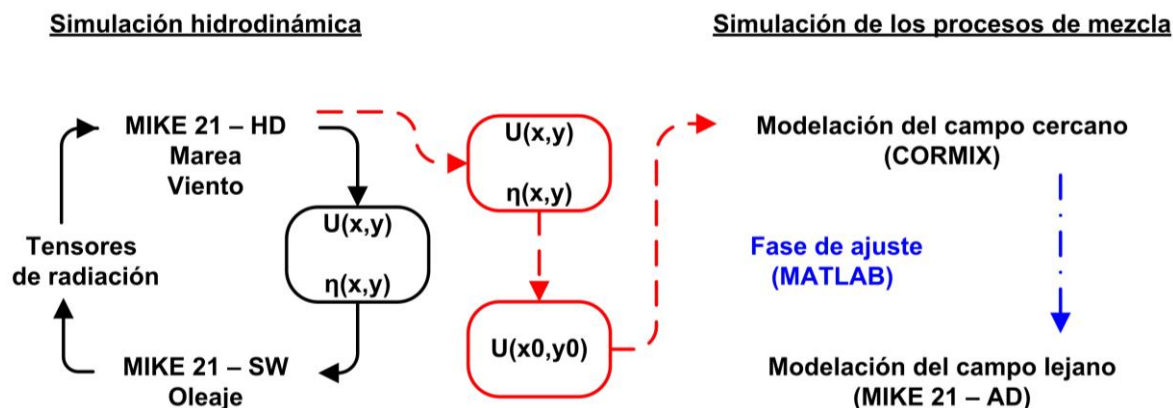


Figura 5-1: Resumen de la metodología utilizada.

Fuente: Elaboración propia.

5.1 SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

5.1.1 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

La confección de la malla batimétrica se realizó en dos etapas. En primer lugar, utilizando el programa *Global Mapper*, se extrajo la información de la línea de costa y profundidades desde las cartas SHOA. Luego, se ingresó dicha información en el programa *MIKE 21* para efectuar procesos de interpolación y generar una malla batimétrica flexible (Figura 5-2, a - b), la cual permite una representación más precisa de la línea de costa. Para mayor detalle de los procedimientos mencionados, revisar el Anexo E.1.

En cuanto a la extensión del modelo se consideró como límites a Punta Teatinos por el Norte y Punta Tortuga por el Sur (ver sección 1.2.2), debido a que dichas zonas tienen gran influencia en la hidrodinámica de la bahía, y se utilizó coordenadas UTM de la zona 19J.

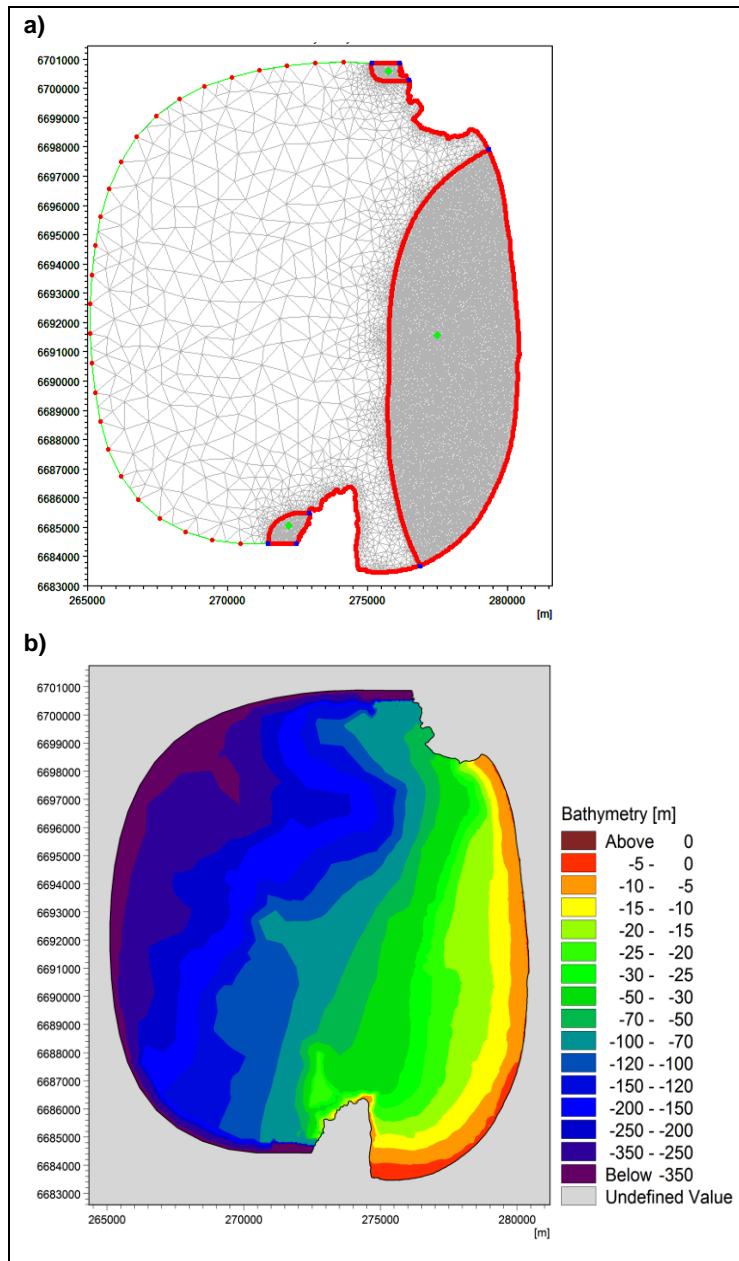


Figura 5-2: Modelo de elevación digital.
a) Malla de interpolación flexible y b) batimetría final.
 Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FORZANTES

Se modelaron condiciones medias y extremas históricas con forzantes de marea, viento y oleaje tanto en forma individual como conjunta.

En los siguientes apartados se analiza cada forzante por separado, con el fin de establecer los valores que serán empleados al configurar tanto los *Modelos MV* como los *MVO*. Para analizar en mayor detalle la estructura de dichos modelos, revisar el Anexo E.2.

5.1.2.1 CASOS DE MAREA

Se procedió a calibrar y validar la marea considerando la relación existente entre las desnivelaciones superficiales del cuerpo de agua y las corrientes asociadas a las mismas (ecuación 13.3, Anexo B.1).

En primer lugar, a partir del registro facilitado por el SHOA (sección 4.1.1), se seleccionó el año 2012 debido a que posee la menor cantidad de información faltante. Luego se realizó un análisis no armónico para comparar los planos mareales de los meses de Febrero y Septiembre. Su principal objetivo fue calcular el nivel medio del mar (*NMM*) para los meses mencionados, cuyo resultado fue 0.94 [m] y 0.86 [m] respectivamente (para mayor detalle revisar Anexo D.4).

A través de dicho análisis, se corroboró la información presentada tanto por DIRECTEMAR (2014) como por las tablas de marea, donde se establece un *NMM* igual a 0.9 [m] para la bahía de Coquimbo. Este valor se utilizó en el modelo hidrodinámico, debido a que corresponde al promedio de los niveles calculados con anterioridad.

La condición de borde del modelo se generó desde principios de Febrero del 2012 hasta principios de Marzo del mismo año. Los valores en los extremos de la frontera abierta corresponden a series temporales de 30 minutos, constituidas a partir de la suma de los siguientes parámetros (ver ecuación 13.1, Anexo B.1):

- *Nivel medio del mar (NMM)*: Establecido en 0.9 [m].
- *Marea astronómica (MA)*: Generada a partir de un modelo global de mareas incorporado en el software *MIKE 21*, el cual considera (por defecto) 69 constituyentes.

Los valores a lo largo de la frontera abierta (Figura 5-3) corresponden a la interpolación de los extremos, procedimiento realizado por subrutinas incluidas en *MIKE 21*.

Por último y debido a los límites impuestos por el tiempo de simulación, fueron seleccionados 3 fragmentos del registro mareal mensual con el fin de evitar la modelación de un mes completo y cumplir con los procesos de calibración y validación de la marea (sección 5.1.3.2). La selección de dichos fragmentos se detalla en la Tabla 5-1 mientras su representación se observa en la Figura 5-4.



Figura 5-3: Condición de borde impuesta en la frontera abierta del modelo hidrodinámico.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-1: Caracterización de los fragmentos de marea utilizados como condición de borde.

Condición	Descripción de la metodología utilizada para su selección
Marea media	Caso seleccionado a partir de un análisis estadístico de la señal de marea. Se consideró una probabilidad no excedencia establecida entre un 25% y 75%, para luego ubicar una situación similar dentro del registro mareal de Febrero del 2012.
Cuadratura	Caso seleccionado a través de un proceso de individualización de las ondas de marea. Se ubicó la menor diferencia entre una pleamar y bajamar consecutiva. Producto del mínimo movimiento vertical se producen flujos y reflujos con bajas intensidades.
Sicigia	La metodología de selección es similar a la condición anterior, con el contraste que se selecciona la mayor diferencia entre una pleamar y bajamar consecutiva.

Fuente: Elaboración propia.

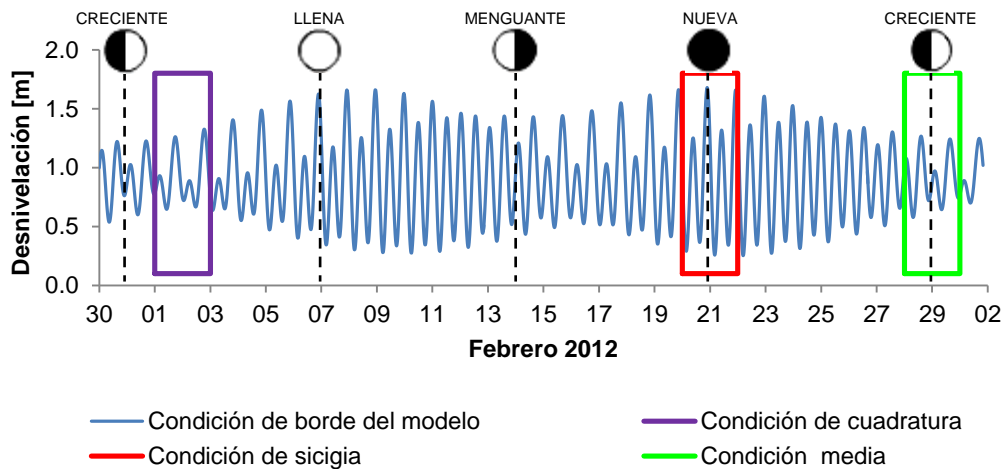


Figura 5-4: Condición de borde validada a través del registro mareal.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2 CASOS DE VIENTO

Los casos medios del viento fueron seleccionados a partir de un análisis estadístico de la dirección del mismo, considerando las características geográficas presentes en la bahía de Coquimbo, la cual se encuentra expuesta a los vientos provenientes desde el Oeste (como fue descrito en el apartado 1.2.2).

De acuerdo al análisis de la rosa de los vientos (Figura 5-5), sus mayores intensidades provienen tanto del tercer como cuarto cuadrante. Por tanto, la metodología utilizada para seleccionar los escenarios característicos, se basó en la división del registro considerando las principales direcciones que afectan la bahía, las cuales son mencionadas a continuación:

- Noroeste (NW).
- Oeste (W).
- Suroeste (SW).

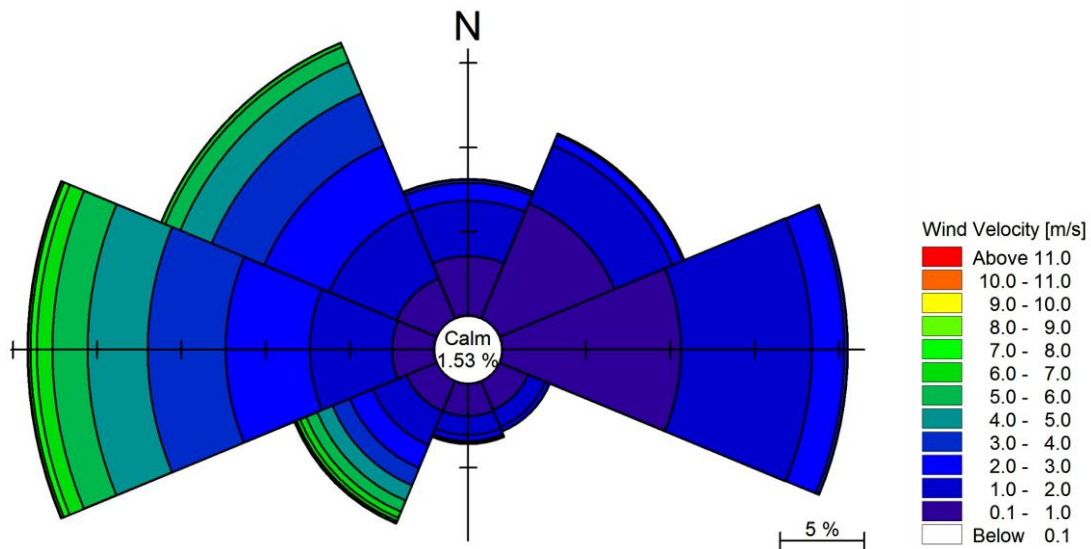


Figura 5-5: Rosa de los vientos, Punta Tortuga.

Fuente: Elaboración propia a través de MIKE 21.

Para cada dirección, se generó una subdivisión según la intensidad de la forzante de acuerdo al 25% y 75% de no excedencia con rangos discretizados en 1 [m/s], como se aprecia en la Figura 5-6.

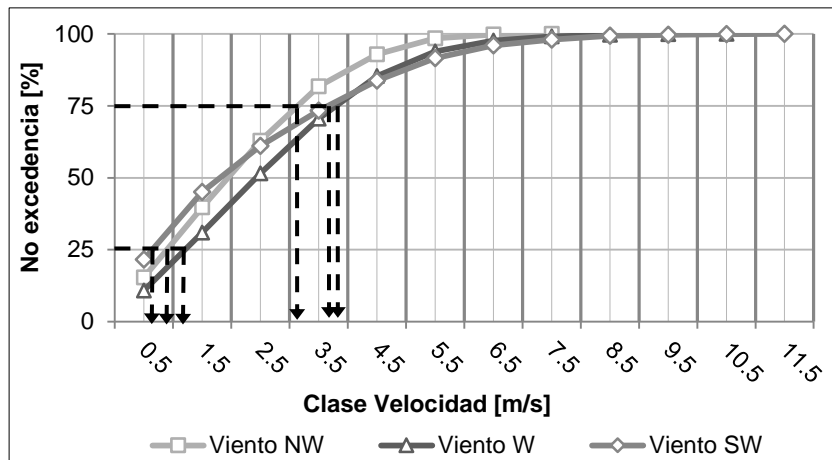


Figura 5-6: Probabilidad de no excedencia del viento, bahía de Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, se seleccionaron los casos medios observados en la Tabla 5-2, donde las direcciones predominantes fueron determinadas a través de la Figura 5-5 y sus intensidades mediante la Figura 5-6.

Tabla 5-2: Casos medios de viento seleccionados.

Caso	No excedencia [%]	Velocidad [m/s]	Dirección [°]
V1	75	3.1	NW
V2	75	3.7	W
V3	75	3.6	SW
V4	25	1.0	NW
V5	25	1.3	W
V6	25	0.6	SW

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los casos extremos de viento fueron seleccionados a partir de la discretización del parámetro direccional de la presente forzante (Tabla 5-3). Se destaca un análisis de sensibilidad asociado a la dirección de viento Oeste, con el fin de generar el peor escenario de divergencia de corrientes (290°), considerando los patrones de circulación tanto en la zona Norte como Sur de la bahía.

Tabla 5-3: Casos históricos de viento extremo.

Caso	Año	Mes	Día	Hora	Velocidad [m/s]	Dirección [°]
V1 E	2012	9	18	13	7.5	315
V2 E	2012	12	6	14	10.7	290
V3 E	2013	9	16	16	11.1	225

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3 CASOS DE OLAJE

La elección de los casos medios de oleaje fue generada a través de una subdivisión de los parámetros que definen la presente forzante. Por un lado, se analizó la propagación a través de una rosa de oleaje; mientras los parámetros de altura significativa y período peak fueron analizados a través de gráficos estadísticos.

Específicamente la dirección de propagación del oleaje, presenta un rango de direccionalidad comprendido entre el Noroeste y el Sur (Figura 5-7). Sin embargo, debido a la protección natural que posee la bahía (a través de Punta Tortuga) y a la baja ocurrencia tanto del Noroeste como del Oeste, solamente se consideró el oleaje proveniente del Suroeste para seleccionar los diferentes casos medios a simular.

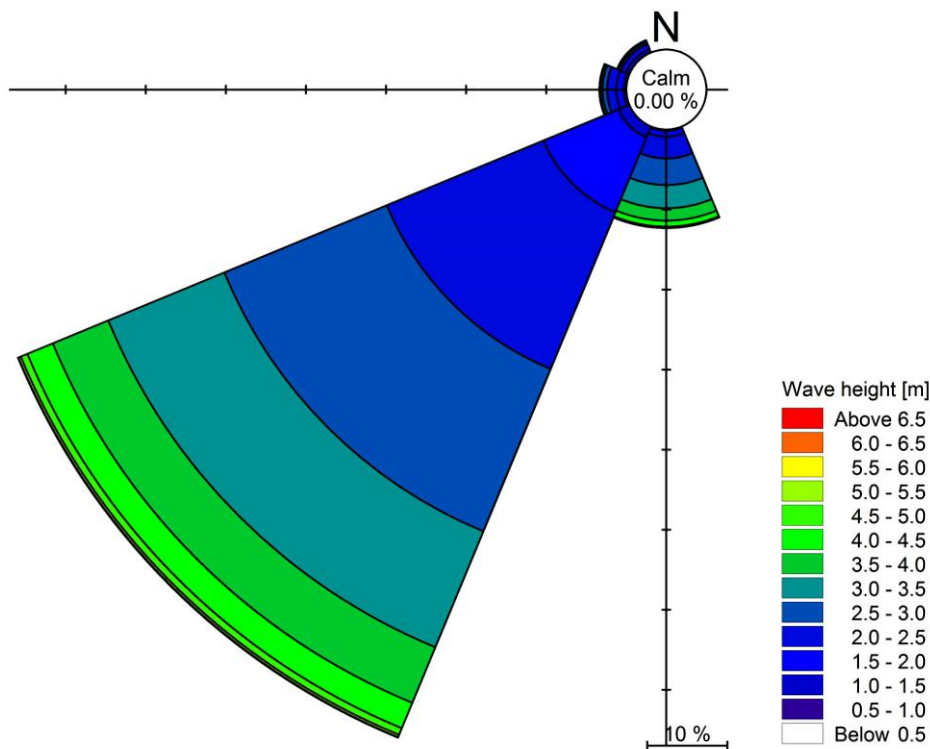


Figura 5-7: Rosa de oleaje, bahía de Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia a través de MIKE 21.

Los parámetros de altura significativa y período peak fueron analizados determinando su probabilidad de no excedencia a través de los gráficos observados en la Figura 5-8, donde se aprecia los valores asociados al 25% y 75% de cada parámetro.

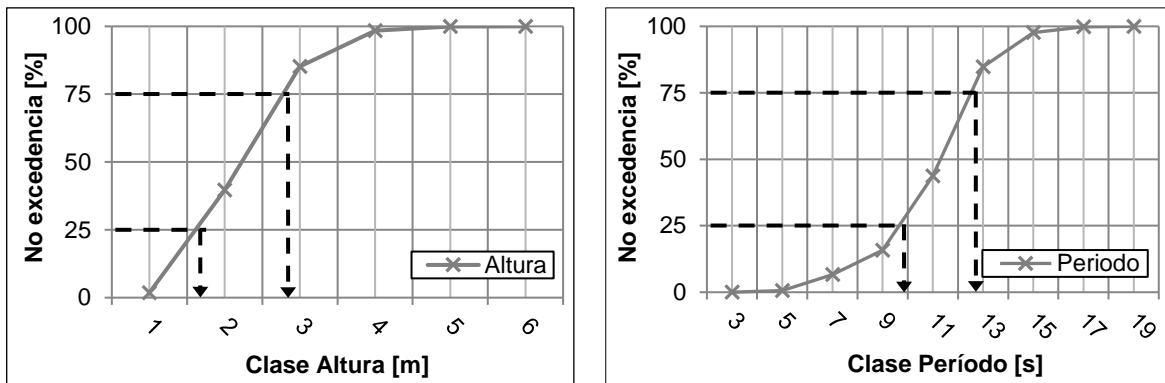


Figura 5-8: Probabilidad de no excedencia del oleaje. Parámetros de altura (izquierda) y período (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, fueron preseleccionados cuatro casos medios de oleaje. No obstante, para establecer un límite superior e inferior de la respuesta hidrodinámica se efectuó un análisis de sensibilidad a través de la modelación de cada caso, cuyo procedimiento es detallado y analizado en el Anexo F.3. Su principal conclusión establece una reducción a dos casos medios, asociados respectivamente al 25% y 75% de no excedencia, el detalle de los mismos se presenta a continuación (Tabla 5-4).

Tabla 5-4: Casos medios de oleaje seleccionados.

Caso	No excedencia de Hs [%]	Altura [m]	No excedencia de Tp [%]	Período [s]	Dirección [°]
O1	75	2.8	75	12.5	SW
O2	25	1.6	25	9.8	SW

Fuente: Elaboración propia.

Por último, los casos extremos fueron discretizados a partir de la dirección de incidencia de la presente forzante (Tabla 5-5). Además, dicha información fue visualizada a través de un gráfico de dispersión (Figura 5-9), el cual muestra la incidencia individual de cada estado de oleaje. Se destacan numerosos eventos provenientes del SW con alturas superiores a los 5.5 [m] y periodos aproximados de 15.5 [s].

Tabla 5-5: Casos históricos de oleaje extremo.

Caso	Año	Mes	Día	Hora	Altura [m]	Período [s]	Dirección [°]
O1 E	1997	8	17	15	4.0	8.3	310.0
O2 E	2005	8	17	3	4.5	12.9	252.5
O3 E	2010	8	19	0	6.3	16.3	234.7

Fuente: Elaboración propia.

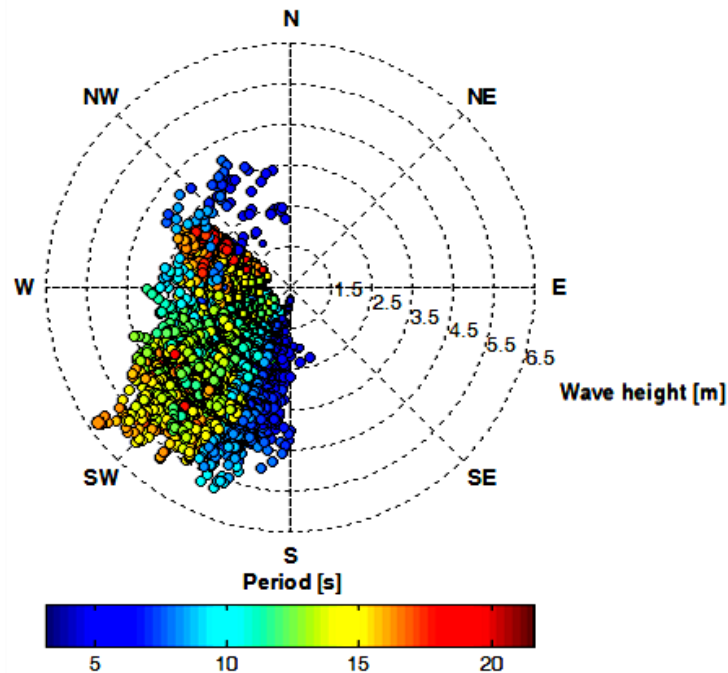


Figura 5-9: Gráfico de dispersión oleaje, bahía de Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia a través de MATLAB.

5.1.3 MODELACIÓN NUMÉRICA

Se simuló el campo de corrientes bidimensional presente en la bahía de Coquimbo, a partir de la modelación acoplada de *MIKE 21 Spectral Waves* y *MIKE 21 Flow Model FM*. Específicamente, mediante el primer módulo se generan los gradientes del tensor de radiación a través del ingreso de las condiciones de oleaje; y por medio del segundo se utilizan dichos gradientes en conjunto con las condiciones de marea y viento para obtener el patrón hidrodinámico.

Por último, con las corrientes simuladas en el punto de vertido, se calculó la dilución inicial de la descarga a través del programa *CORMIX 2* (sección 5.2). Dicha información es fundamental para el módulo de transporte de contaminantes de *MIKE 21*, encargado de simular tanto de la dilución secundaria como terciaria.

5.1.3.1 SIMULACIÓN INDIVIDUAL Y ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA

Las forzantes consideradas en el presente estudio fueron individualizadas a través de la configuración de diferentes modelos, con el fin de analizar la respuesta hidrodinámica e identificar el período de estabilización de cada forzante.

En primera instancia, se analizó el campo hidrodinámico generado por la forzante de marea, confirmando la presencia tanto del flujo como reflujo, con intensidades que varían entre 0 y 0.02 [m/s] en el interior de la bahía (Figura 5-10, a). Por otro lado, las corrientes producidas por viento y oleaje fueron simuladas considerando eventos extremos provenientes del Oeste. Específicamente, la intensidad de las corrientes generadas por viento varían entre

0.02 y 0.10 [m/s] en el área adyacente al emisario (Figura 5-10, b). Las corrientes generadas por oleaje mostraron campos hidrodinámicos inestables debido a la presencia de patrones de recirculación generados por la interacción de los vórtices entre sí y por la geografía de la línea de costa. En cuanto a sus intensidades, exceden los 0.14 [m/s] en gran parte de la costa. No obstante se aprecian áreas con intensidades entre 0.02 y 0.10 [m/s], las cuales son caracterizadas por un gran patrón de recirculación ubicado en el Centro-Sur de la bahía (Figura 5-10, c). El detalle de los resultados mencionados se encuentra en el Anexo F.1.

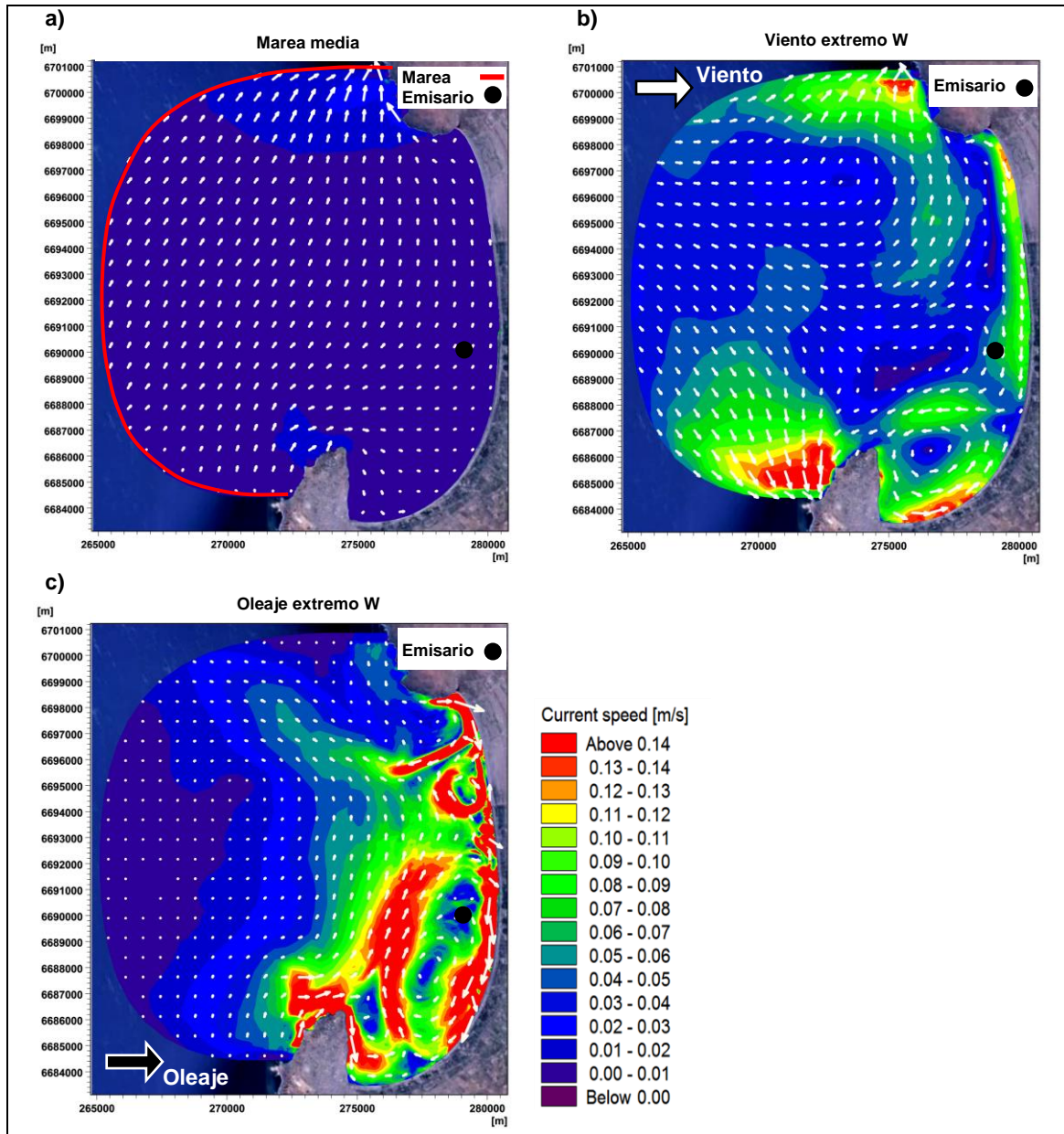


Figura 5-10: Simulación individual de las forzantes.
a) Marea media, b) viento extremo W y c) oleaje extremo W.

Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar la estabilidad de la respuesta hidrodinámica generada por cada forzante, se configuraron seis puntos de evaluación dentro de la bahía. Su principal objetivo fue analizar el comportamiento de las corrientes para cada caso y evaluar su tiempo de estabilización (Figura 5-11).

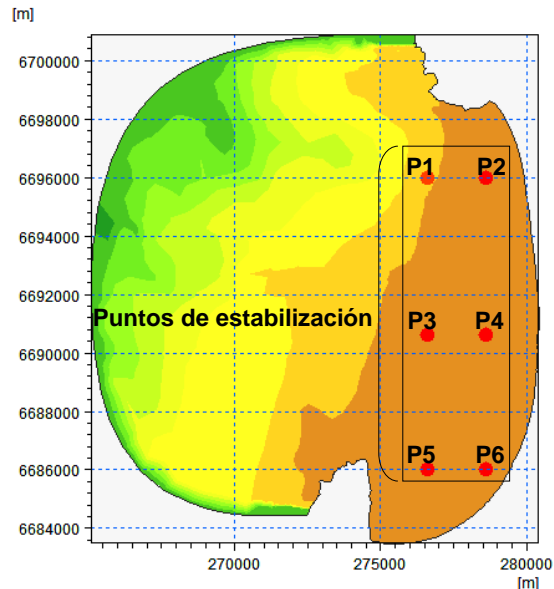


Figura 5-11: Puntos utilizados para evaluar la estabilidad del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se determinó que el oleaje es la forzante que más tiempo demora en alcanzar la estabilidad hidrodinámica con tres días de modelación (Figura 5-12). Por tanto, se consideró un tiempo total de simulación de cinco días, utilizando los últimos dos para el proceso de vertido y estabilización del contaminante. En el Anexo F.2 se detalla lo expuesto en el presente párrafo, se analiza la estabilidad individualizada de cada forzante y se explica que las irregularidades de los puntos P1 y P2 de la Figura 5-12 se deben a la presencia de vórtices en dicha zona de evaluación.

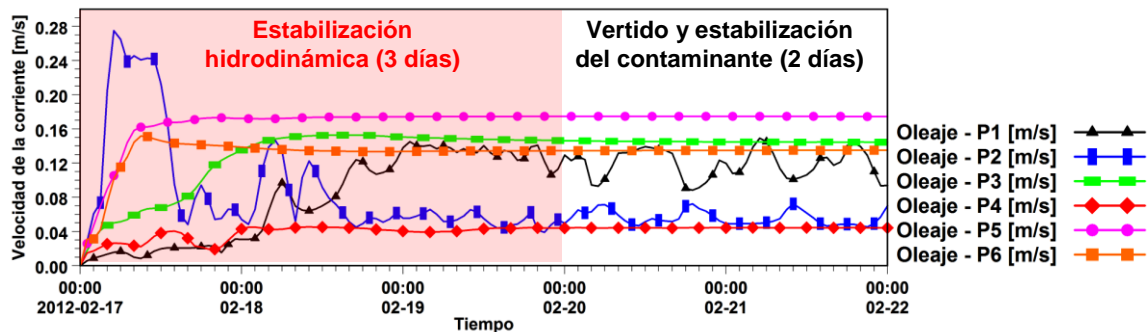


Figura 5-12: Ejemplo de la estabilización del oleaje. Condición W de un evento extremo histórico.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN: MODELO HIDRODINÁMICO

El objetivo de calibrar y validar el modelo hidrodinámico, es aproximar los resultados del mismo a las mediciones *in-situ* correspondientes a la variación del nivel del mar observado (NMO) y a la velocidad de las corrientes, secciones 4.1.1 y 4.1.3, respectivamente. Específicamente se utilizó la curva *1/10th Power Law* para transformar las corrientes integradas en la vertical a velocidades puntuales a una cierta profundidad, para mayor detalle revisar el Anexo F.5.

Para calibrar el NMO (9.1) se utilizó la condición de *Sicigia*, y se validó a través de la condición de *Cuadratura* y *Media* del registro mareal mensual (Tabla 5-6). Esta última condición fue ingresada en la configuración los Modelos MV y MVO, debido a que se desconocen los días exactos en que se registraron las corrientes.

Cabe indicar que las forzantes de viento y oleaje no fueron consideradas en el procedimiento mencionado, debido a su mínima influencia en la variación del nivel del mar. El análisis de sensibilidad que llega a dicha conjetura se ubica en el Anexo F.6.

Por último, los Modelos MV tienen por finalidad establecer la importancia del oleaje sobre la respuesta hidrodinámica cuyo principal resultado fue una disminución significativa en la intensidad de las corrientes al no considerar la forzante mencionada. El detalle de dicho análisis se encuentra en el Anexo E.2.2.

Tabla 5-6: Casos utilizados en el proceso de calibración y validación de la marea.

Caso	Proceso	Marea	Viento	Oleaje
D-1	<i>Calibración</i>	Condición de Sicigia	No incluido	No incluido
D-2	Validación	Condición Media	No incluido	No incluido
D-3	Validación	Condición de Cuadratura	No incluido	No incluido

Fuente: Elaboración propia.

Las corrientes simuladas se calibraron principalmente a través del coeficiente de Manning (utilizando un Modelo MVO). El coeficiente de fricción del viento fue ingresado como dependiente de la intensidad del mismo y su formulación corresponde a la ecuación (9.23) presente en el Anexo C.5. Además, la viscosidad turbulenta no fue considerada debido a su nula influencia en la respuesta hidrodinámica, conclusión derivada del análisis de sensibilidad detallado en el Anexo F.4. En la Tabla 5-7 se presentan los casos simulados en el proceso de calibración y comparación⁶ a través de la configuración de Modelos MVO.

⁶ Se utilizó el término *Comparación* en vez de *Validación* debido a la existencia de un desfase temporal entre el registro de corrientes (2007 - 2008) y la información utilizada para forzar el modelo hidrodinámico (marea 2012, viento 2011 - 2012 y oleaje 1997 - 2010).

Tabla 5-7: Casos utilizados en el proceso de calibración y comparación de las corrientes.

Caso	Proceso	Marea	Viento (Velocidad, Dirección)	Oleaje (Altura, Período, Dirección)
1M	<u>Calibración</u>	Condición media	(3.1 [m/s], NW)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)
2M	Comparación	Condición media	(3.7 [m/s], W)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)
3M	Comparación	Condición media	(3.6 [m/s], SW)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)
4M	Comparación	Condición media	(1.0 [m/s], NW)	(1.6 [m], 9.8 [s], SW)
5M	Comparación	Condición media	(1.3 [m/s], W)	(1.6 [m], 9.8 [s], SW)
6M	Comparación	Condición media	(0.6 [m/s], SW)	(1.6 [m], 9.8 [s], SW)

Fuente: Elaboración propia

La calibración de las corrientes tiene por finalidad aproximar la velocidad simulada con uno de los cuatro períodos de medición descritos en el apartado 4.1.3, considerando la ubicación de las estaciones de registro *F1* - *F2* (Figura 5-13). Dichos registros fueron agrupados como:

- Condición estival: Meses de Octubre (2007) y Enero (2008).
- Condición invernal: Meses de Mayo (2008) y Agosto (2008).

Para efectuar la comparación indicada las corrientes *in-situ* fueron transformadas a velocidades promediadas en la vertical. La ejecución del procedimiento mencionado se detalla en el Anexo F.5 y su principal resultado establece que la variación en las velocidades ya transformadas, genera una disminución del valor *in-situ* igual a 0.002 [m/s]. Sin embargo, en el presente análisis dicho valor es insignificante y por tanto, el valor *in-situ* no sufre transformación alguna.

Por último, los parámetros considerados en la simulación hidrodinámica (*MIKE 21*) fueron clasificados según su respectivo módulo en la sección 5.3.

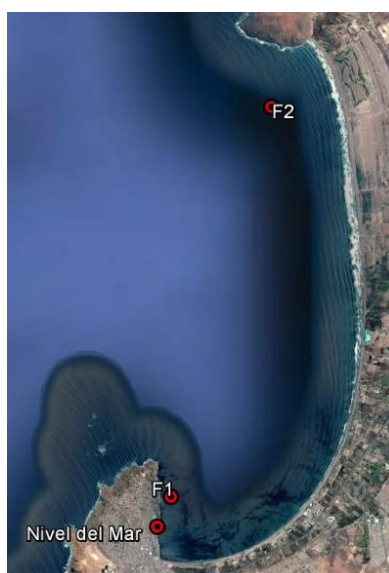


Figura 5-13: Ubicación de los instrumentos de medición. Nivel del mar observado (Puerto de Coquimbo). Puntos de medición de corrientes (*F1* y *F2*).

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la calibración y validación la marea:

La Figura 5-14 indica el ajuste alcanzado en el proceso de calibración y validación de la marea. En particular, se obtuvo un R^2 (coeficiente de determinación) que oscila entre 0.9016 (condición Media) y 0.9463 (condición de Cuadratura).

Cabe suponer que el "ruido" presente en el registro NM SHOA (Figura 5-14, b), se encuentra asociado a un aumento de la velocidad del viento proveniente desde el Noreste, cuyo evento se registró el 29 de Febrero del 2012, y provocó un incremento del nivel del mar registrado por el mareógrafo ubicado en el Puerto de Coquimbo.

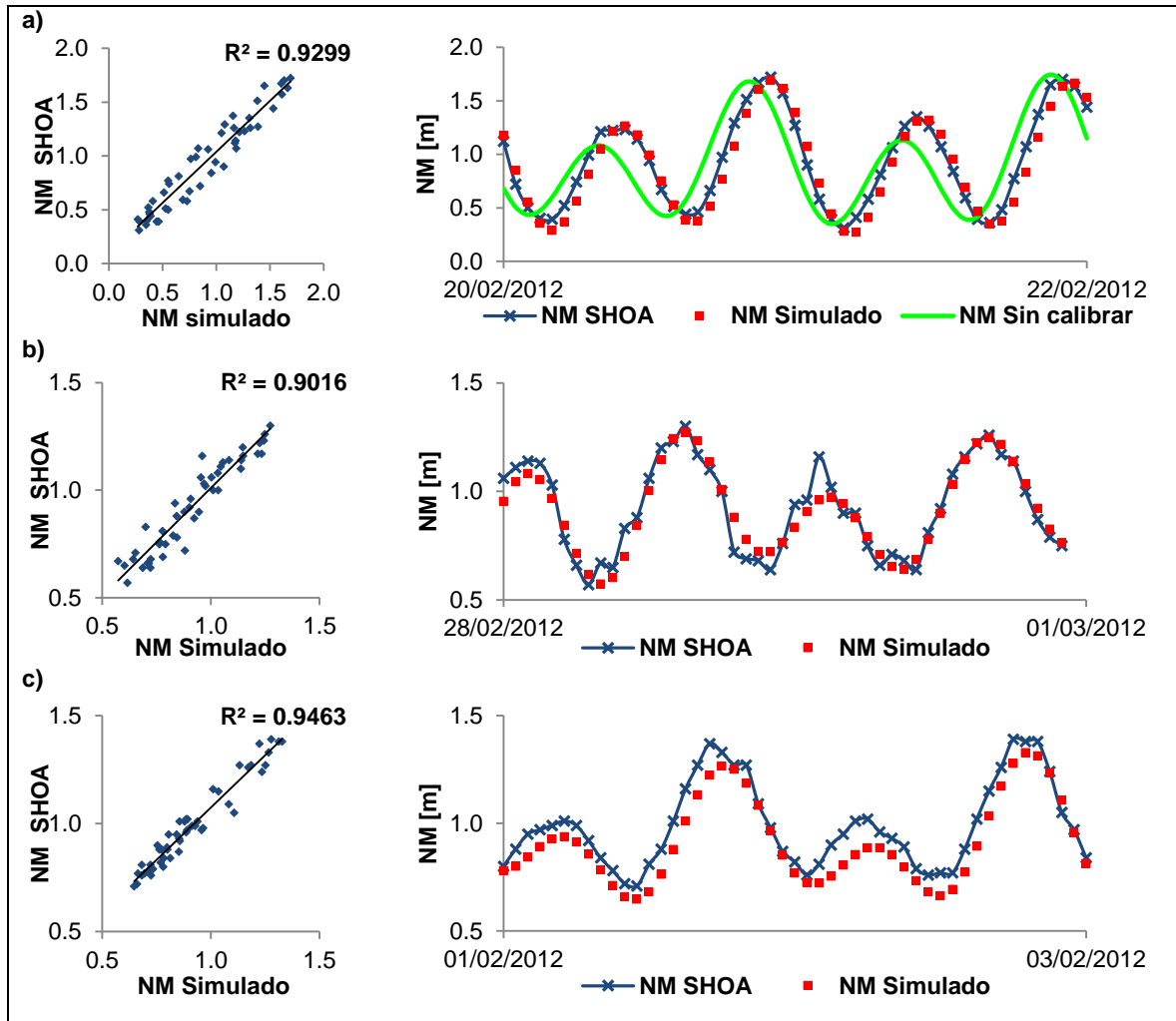


Figura 5-14: Resultado del proceso de calibración y validación - Nivel del mar. Condición de marea para los casos a) D-1, b) D-2 y c) D-3.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la calibración y comparación de las corrientes:

La calibración se realizó ajustando el valor del coeficiente de Manning del caso 1M, mientras la comparación se llevó a cabo con los casos restantes (desde el 2M al 6M). El Anexo E.2.1 detalla los casos simulados, al igual que el ajuste alcanzado por cada modelación. Los principales resultados establecen que los casos 1M, 2M y 3M aproximan sus resultados a la Condición invernal, debido a que generan la combinación de los valores más altos de viento y oleaje. Dentro de dicha condición, los casos se ajustaron con mayor precisión a las mediciones realizadas en Mayo del 2008, en particular, el caso 1M. Los casos 4M, 5M y 6M en contraste aproximan sus resultados a la Condición estival y en particular a los registros de Enero del 2008, donde la simulación 6M exhibió el mejor ajuste. Lo mencionado se estructura a través de Figura 5-15.

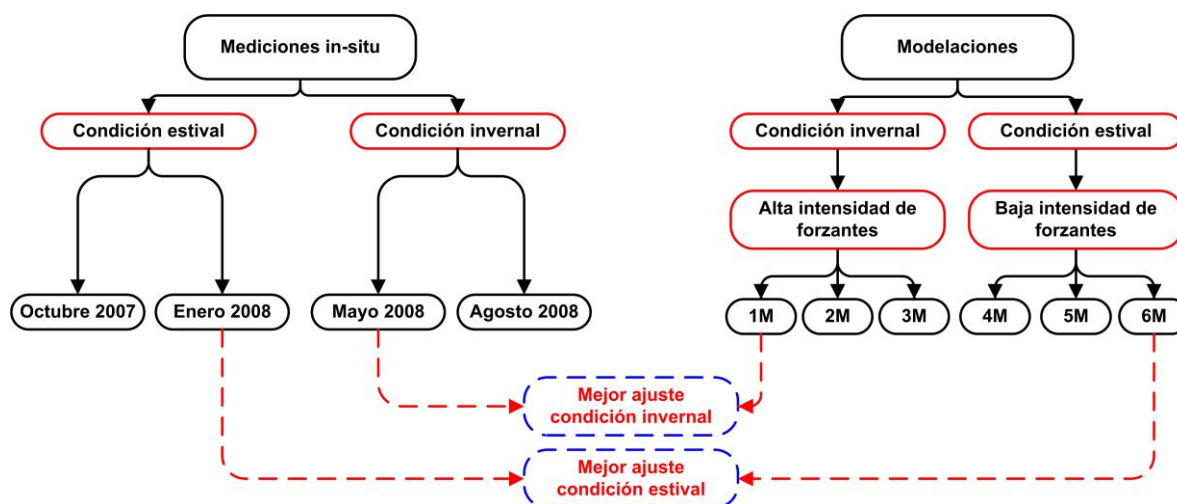


Figura 5-15: Diagrama del ajuste entre las corrientes medidas y simuladas.

Fuente: Elaboración propia.

Es preciso señalar que las mediciones analizadas en la bahía de Coquimbo presentan ciertas desventajas para el proceso de calibración del modelo hidrodinámico. Destacan las siguientes:

- La duración de las mediciones fue aproximadamente de 2 días, siendo insuficiente para establecer un promedio mensual o trimestral de la intensidad de las corrientes. Por otro lado, dicho registro carece del parámetro de dirección el cual permita realizar un correcto análisis.
- Las mediciones efectuadas con ADCP remolcado ayudan a tener una idea del patrón de circulación presente en la bahía. Sin embargo, su utilidad es limitada en el proceso de calibración del modelo hidrodinámico, fundamentalmente por no registrar los días ni horas en que fueron realizadas. Además, al no considerar mediciones simultáneas de viento y oleaje, no es posible analizar cuál es el principal agente forzante de las corrientes dentro de la bahía.

Por último, en la Figura 5-16 se presenta el esquema de los *Modelos MVO*. Cabe indicar que los registros en verde corresponden al valor de las corrientes promedio alcanzadas en los puntos *F1* y *F2*.

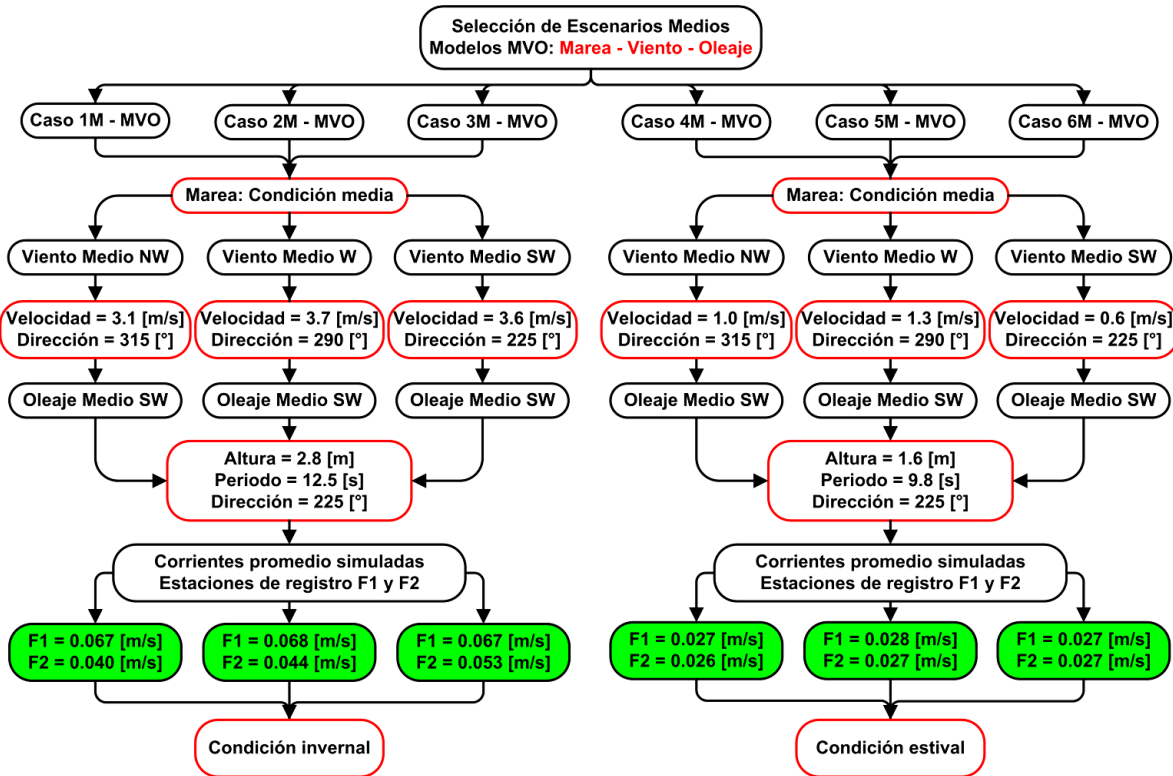


Figura 5-16: Escenarios medios considerando Modelos MVO.
Izquierda: Intensidades más altas (Condición invernal).
Derecha: Intensidades más bajas (Condición estival).
 Fuente: Elaboración propia.

5.2 SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE MEZCLA

El presente apartado detalla la metodología utilizada en la simulación de los procesos de mezcla, a través de la interacción del campo cercano y lejano. Específicamente, la simulación de cada campo y la transición entre los mismos se realizó utilizando los siguientes programas:

- Campo cercano: *CORMIX 2*.
- Transición: *Código en MATLAB*.
- Campo lejano: *MIKE 21 AD*.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, dentro del campo cercano se desarrolla el proceso de dilución inicial. La información necesaria para su cálculo corresponde tanto al diseño del emisario como a las características físicas del cuerpo de agua. Los parámetros con mayor relevancia, se mencionan a continuación:

- Características del vertido generado en el fondo del mar.
- Características de diseño del emisario y del difusor.
- Velocidad de la corriente tanto en el punto de descarga como área circundante (obtenida a través de la simulación hidrodinámica realizada en *MIKE 21 HD*).
- Comportamiento de la densidad a lo largo de la columna de agua, calculada a través de la temperatura y salinidad de la misma. Cabe indicar que el mes seleccionado corresponde a Enero del año 2008. Su elección se basó en la mayor probabilidad de encontrar un medio receptor estratificado (Figura 5-17), debido a las altas temperaturas presentes en dicho período.
- Profundidad del vertido, entre otras.

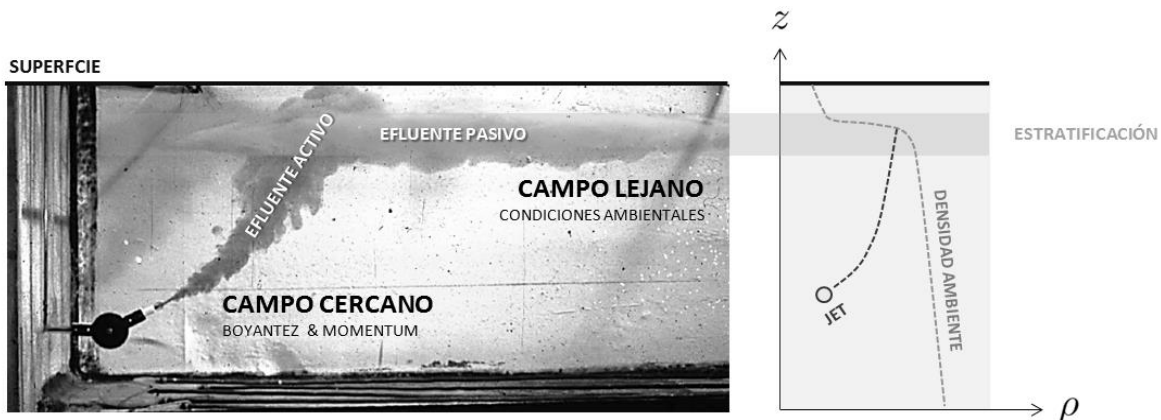


Figura 5-17: Estratificación de un vertido con boyantes positiva.

Fuente: Adaptado de Hofer (1978).

Por otro lado, la interacción entre el patrón de corrientes presente en la bahía y la pluma de descarga, se desarrolla principalmente en el campo lejano.

5.2.1 CAMPO CERCANO

5.2.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESCARGA DEL EMISARIO

El diseño del emisario submarino se realizó utilizando la información detallada en el apartado 4.4. La descarga del mismo fue definida de acuerdo a dos casos de caudal con la misma concentración del vertido ($1.7E+07$ NMP/100 ml). El primero corresponde a condiciones medias de descarga con un caudal de 0.76 [m^3/s] y el segundo a condiciones máximas con un caudal de 0.96 [m^3/s]. Sin embargo, el registro analizado en la sección 4.4 establece que dicho límite es superado en más de una ocasión, asociado principalmente a la temporada de verano donde aumenta el número de turistas.

Entre las consideraciones de mayor relevancia para el diseño del difusor, se destacan:

- *Representación simplificada, asociada a los difusores:* Si bien la estructura posee dos difusores, se configuró un emisario submarino con un solo difusor, siguiendo las recomendaciones realizadas por el proyecto MEDVSA (2010). Esta modificación fue considerada debido a la escasa información del proceso de mezcla a lo largo de la columna de agua y permitió calcular de forma conservadora la concentración del contaminante en el campo cercano. Por tanto, las toberas fueron distribuidas lateralmente a ambos lados del ducto como se observa en la Figura 5-18, donde "s" representa la separación entre las mismas. Cabe destacar que las fotografías satelitales del punto de descarga muestran dos afloramientos superficiales, pero no aseguran la total independencia de los chorros durante su ascenso.

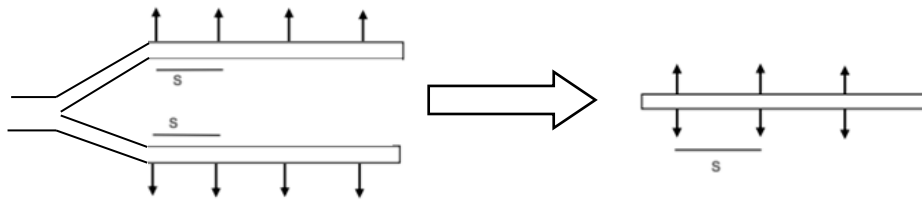


Figura 5-18: Simplificación asociada al difusor.

Fuente: Adaptado de MEDVSA (2010).

- *Representación simplificada, asociada a las toberas:* Una de las principales conclusiones del proyecto MEDVSA (2010) esta asociada al diseño del difusor realizado por CORMIX 2. Si bien el software permite ingresar una gran variedad de detalles relacionados a la distribución toberas, en la práctica el programa considera solamente dos configuraciones. La primera con toberas verticales sobre el difusor (Figura 5-19) y la segunda caracterizada como una ranura equivalente. El programa selecciona automáticamente la simplificación apropiada conforme al ángulo formado entre las toberas y su separación.

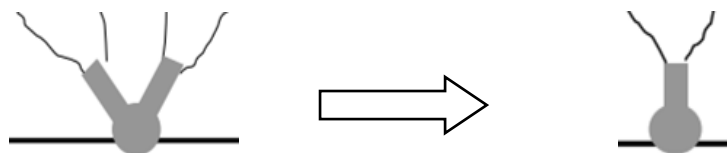


Figura 5-19: Simplificación realizada por CORMIX 2 asociada las toberas del difusor.

Fuente: Adaptado de MEDVSA (2010).

Luego de tener claridad sobre las simplificaciones consideradas, se diseñó un difusor tridimensional a través de la herramienta *CorSpy* perteneciente a *CORMIX* (Figura 5-20).

Por último, los parámetros considerados en la simulación del campo cercano fueron listados en el apartado 5.3.

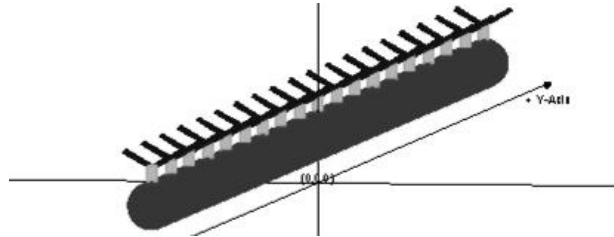


Figura 5-20: Representación 3D del difusor utilizado.

Fuente: Elaboración propia a través de *CorSpy*.

5.2.1.2 RESULTADOS PREVIOS DEL CAMPO CERCANO

El programa *CORMIX 2* genera un documento de texto, el cual contiene los parámetros ingresados y los resultados del proceso de cálculo.

La velocidad de la corriente ingresada en el software, es considerada constante a lo largo de la columna de agua y perpendicular al difusor (limitaciones del programa). Su valor corresponde al promedio de la misma sobre el punto de descarga y su área circundante, siendo extraída del campo hidrodinámico simulado previamente en *MIKE 21 HD (Modelo MVO)*. Es preciso indicar que debido a la carencia de registros de coliformes fecales en el área de estudio, no es posible validar las plumas simuladas.

Los resultados generados fueron graficados a través de un código programado en *MATLAB*, el cual tiene por finalidad ajustar las plumas calculadas tanto por *CORMIX 2* como por *MIKE 21 AD*. Dicho procedimiento se encuentra detallado en la sección 5.2.2. A modo de ejemplo, en la Figura 5-21 se aprecian los gráficos generados por el código antes mencionado. En la parte superior de la imagen se ubican los parámetros más relevantes, seguidos por el perfil de la concentración del contaminante sobre la línea central de la pluma. Los gráficos inferiores representan el comportamiento de dicho contaminante sobre la superficie del mar y en la profundidad del mismo. Sus ejes representan el largo y ancho de la pluma, con el punto de vertido ubicado en la coordenada cero-cero de la vista en planta.

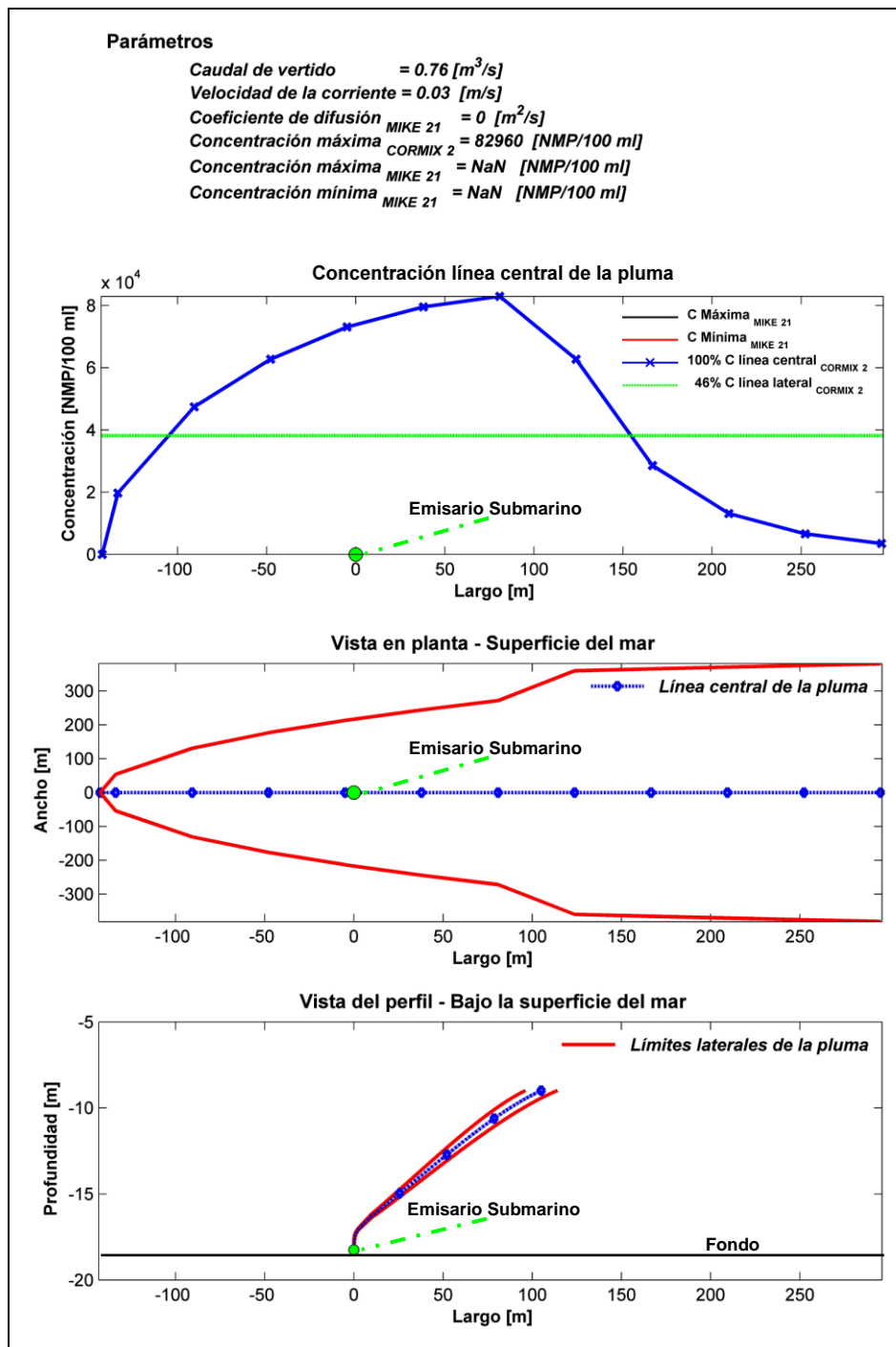


Figura 5-21: Resultados de CORMIX 2, graficados a través de un código programado en MATLAB.

Fuente: Elaboración propia a través de MATLAB.

5.2.2 TRANSICIÓN: FASE DE AJUSTE

A causa de las diferencias existentes en las escalas espacio-temporales donde ocurren los procesos de mezcla, es sumamente difícil desarrollar modelos que simulen de forma sincrónica el campo cercano y lejano (Sojachenski, 2005). En consecuencia, en el apartado anterior (5.2.1) fue descrita la metodología para desarrollar el campo cercano; mientras en el siguiente (5.2.3) se detallan los pasos para el campo lejano. La independencia entre ambas metodologías es suplida por la presente sección, la cual es un tránsito entre un campo y otro. En la Figura 5-22 se mencionan los fenómenos considerados por cada modelo y sus respectivas escalas espacio-temporales.

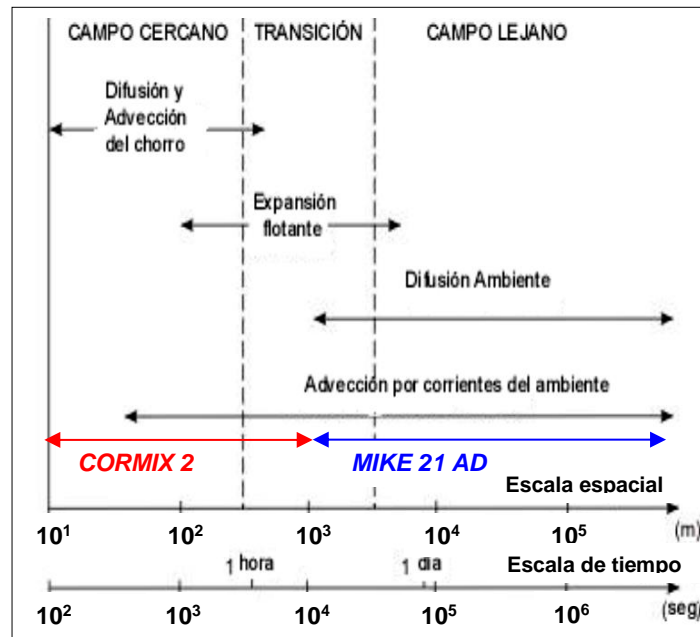


Figura 5-22: Procesos físicos, escalas de espacio y tiempo.

Fuente: Adaptado de Sojachenski (2005).

El proceso de ajuste entre ambos campos se efectúa a lo largo de una transecta perpendicular al emisario submarino, pasando sobre el punto de vertido como se observa en la Figura 5-23. La concentración de los CF se evalúa sobre el centro de la pluma generada por *MIKE 21 AD*, utilizando una longitud promedio de 600 [m] sobre el punto de vertido (Figura 5-24); para luego ajustarla a los resultados de *CORMIX 2*. La discretización temporal corresponde a 1 hora, mientras la espacial es igual a 12.5 metros. Cabe indicar que el presente ajuste entre *MIKE 21* y *CORMIX*, se efectúa considerando el área de transición entre el campo cercano y el campo lejano.

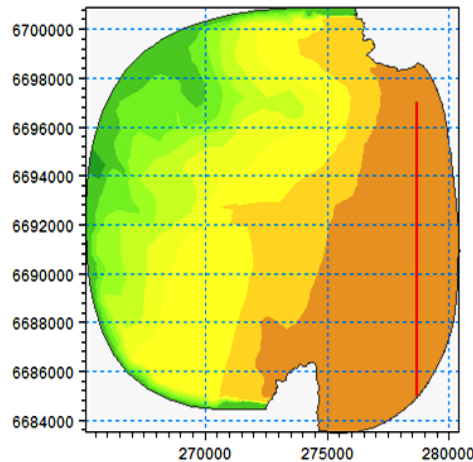


Figura 5-23: Transecto para realizar el proceso de ajuste entre campos.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1 PROCESO DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN

El proceso de ajuste considera un caudal de vertido medio y otro máximo, con el fin de evaluar las limitaciones de los modelos al variar el volumen descarga. Además, a través del caudal máximo se replicó el período donde existe un aumento demográfico importante en la región (meses de verano).

Por otro lado, la pluma simulada por *MIKE 21 AD* presenta leves desplazamientos horizontales debido a la interacción de tres forzantes (marea, viento y oleaje) sobre el cuerpo de agua. Para considerar dicha variación en el proceso de ajuste se graficó tanto la máxima como mínima concentración de la línea central de la pluma, durante las últimas 24 horas de simulación. En resumen, cada gráfico de ajuste cuenta con las cuatro líneas mencionadas a continuación:

1. *Negra*: Concentración máxima de la línea central, simulada en *MIKE 21 AD*.
2. *Roja*: Concentración mínima de la línea central, simulada en *MIKE 21 AD*.
3. *Azul*: Concentración de la línea central, simulada en *CORMIX 2*.
4. *Verde*: Concentración del límite lateral, simulada en *CORMIX 2*. Su valor corresponde al 46% de la concentración de la línea central (azul) y por tanto, es contante a lo largo del eje.

Según Ludwig (1988), para estimar el comportamiento de un contaminante, es razonable comenzar con un valor del coeficiente de dispersión igual a $2 [m^2/s]$ para luego ser ajustado mediante diferentes métodos.

Por último, entre las tareas realizadas en *CORMIX 2* se encuentra el análisis de la concentración y extensión del contaminante en la superficie del mar. A su vez en *MIKE 21 AD* se calibró la concentración del contaminante y el coeficiente de dispersión sobre el punto de vertido. Cabe destacar que para facilitar el proceso de ajuste entre ambos modelos se programó un algoritmo en *MATLAB* el cual grafica la concentración de CF en la línea central de ambas plumas.

5.2.2.2 RESULTADOS DE LA TRANSICIÓN

En el presente apartado se analiza el ajuste de algunos *casos medios* (1M - 6M) y la totalidad de los *casos extremos históricos* (1E - 2E - 3E). En el Anexo G.1, se presentan los casos restantes y los parámetros de ajuste con mayor relevancia (Tabla 9-15).

Los *casos medios* fueron seleccionados a partir del mayor ajuste hidrodinámico tanto para la Condición invernal como estival. Es preciso indicar que el coeficiente de dispersión no fue medido en la bahía de Coquimbo, y su utilización en el presente estudio solo buscó el ajuste entre los modelos. Es decir, para *casos extremos* donde la pluma se advecta con rapidez, se utilizó un bajo coeficiente de difusión ($1 \text{ m}^2/\text{s}$) para simular una pluma estresa y alargada; en cambio, para los *casos medios* asociados a una condición estival, se utilizó un coeficiente de difusión alto ($5 \text{ m}^2/\text{s}$)⁷ para simular una acumulación del vertido en la superficie por la presencia de corrientes de baja intensidad (machas circulares, con poca advección). En síntesis, el valor del coeficiente tiene directa relación con la intensidad de la corriente del modelo y con el ajuste de las plumas simuladas por *MIKE 21 AD* y *CORMIX 2* para el campo cercano.

- *Caso 1M. Modelo asociado a una Condición invernal. Figura 5-24, a - b:* Demuestra respectivamente, un ajuste apropiado tanto con un caudal de vertido medio como máximo. No obstante, se evidencian restricciones en la simulación de *MIKE 21 AD* las cuales se encuentran asociadas tanto a la discretización de la malla computacional como a la inestabilidad presentada por el módulo de advección - difusión, las cuales no fueron resueltas debido a una limitada capacidad de cómputo del procesador y al tiempo de simulación requerido.
- *Caso 6M. Modelo asociado a una Condición estival. Figura 5-24, c - d:* Debido a la hidrodinámica de baja intensidad, el vertido tiende a acumularse en el punto de descarga. En consecuencia, se simula una extensa pluma en *CORMIX 2*, la cual no es replicada con exactitud en *MIKE 21 AD* por la presencia de inestabilidades (analizadas en el párrafo anterior). Sin embargo, se admite como una primera aproximación al considerar las limitaciones computacionales y la falta de mediciones de campo (CF) las cuales permitan validar las plumas simuladas. Cabe destacar que a través de los resultados de *MIKE 21* se modelan los dos puntos de vertido del emisario, los cuales fueron unificados en *CORMIX 2* debido a las limitaciones de este último software.
- *Casos 1E. Figura 5-24, e:* Se aprecia un ajuste en el valor más alto de la concentración de ambas plumas. Sin embargo, su decaimiento no sigue la misma tendencia y queda la incertidumbre si al reducir la discretización de la malla computacional se logrará un mejor ajuste. Aun así, se aprecia una distribución en forma de campana en la pluma simulada por *MIKE 21 AD*, siendo una buena señal para futuros estudios.
- *Caso 2E. Figura 5-24, f:* Demuestra un excelente ajuste, a diferencia del resto de los casos extremos. Las corrientes de mediana intensidad tanto en la zona de descarga como área circundante, generadas por forzantes provenientes del Oeste, responden

⁷ Se utilizó un coeficiente de difusión de $3 \text{ m}^2/\text{s}$ para los *casos medios* asociados a una *condición invernal* (1M - 2M - 3M).

al patrón de recirculación presente en el centro de la bahía, cuyo centro de giro se superpone con la zona de descarga. Cabe destacar que el análisis detallado del campo hidrodinámico para este caso se ubica en el apartado 6.2.1.

- *Caso 3E. Figura 5-24, g:* Se aprecia un ajuste similar al caso 1E; sin embargo, difiere tanto en el sentido del flujo como a la intensidad del mismo. La velocidad de la corriente en el punto de descarga y área circundante, es ligeramente superior en el presente caso ($\sim 0.006 \text{ m/s}$), lo que genera una distribución más rápida del contaminante en *MIKE 21 AD* y por consiguiente, una tendencia similar a los resultados de *CORMIX 2*.

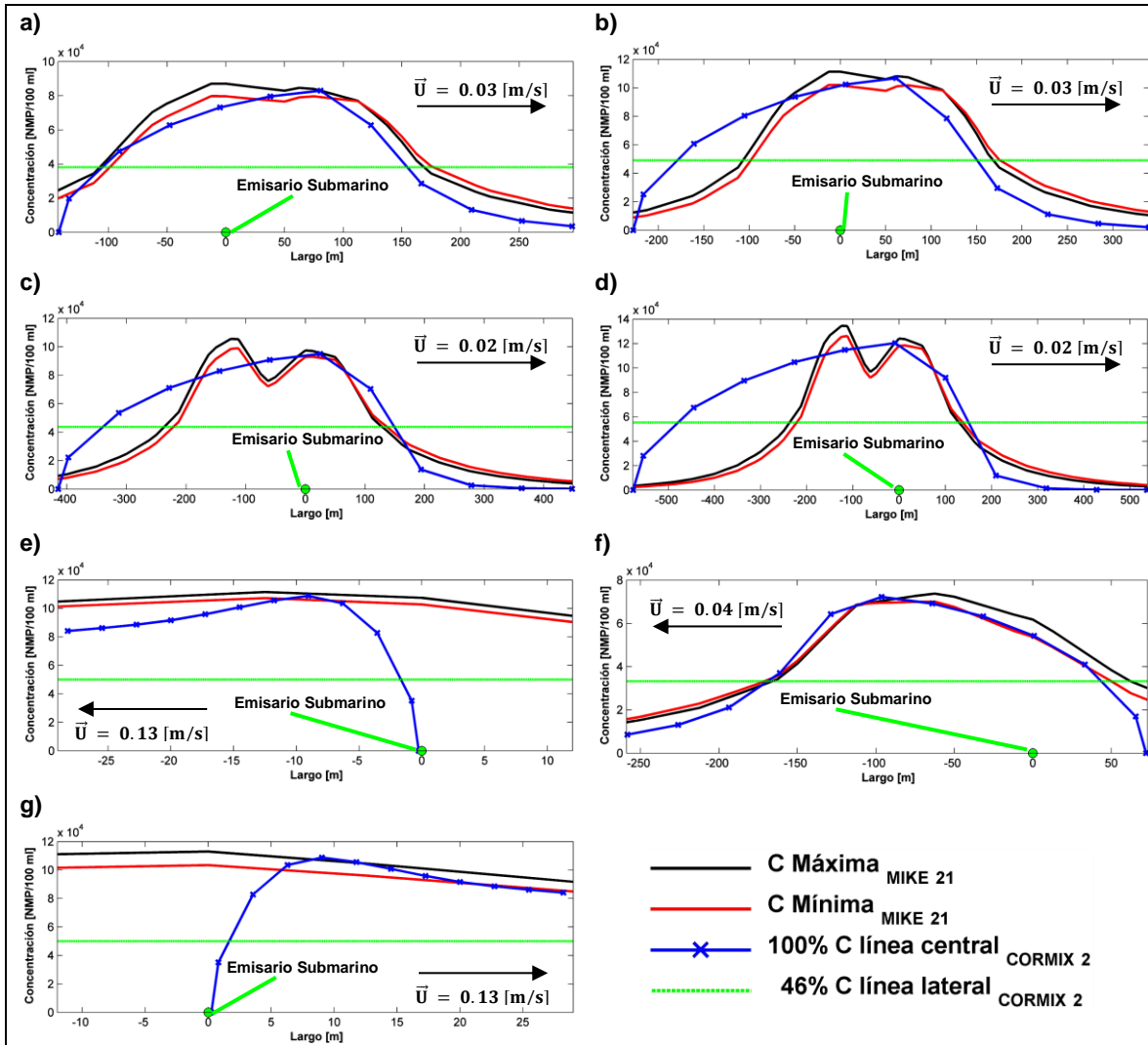


Figura 5-24: Concentración línea central de la pluma. Fase de ajuste entre CORMIX 2 y MIKE 21 AD. Casos medios: 1M a) Caudal medio - b) Caudal máximo. 6M c) Caudal medio - d) Caudal máximo. Casos extremos históricos: e) 1E Caudal medio. f) 2E Caudal medio. g) 3E Caudal medio.

Fuente: Elaboración propia a través de MATLAB.

5.2.3 CAMPO LEJANO

Como se detalló en apartados anteriores, el modelo hidrodinámico se encuentra calibrado para representar de forma adecuada la velocidad y dirección de las corrientes para una Condición invernal y estival.

Luego de alcanzar la estabilidad hidrodinámica, fue vertido un contaminante en el interior de la bahía. En el transcurso de la simulación se formó una pluma a partir de los efectos advectivos de las corrientes.

5.2.3.1 COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA DE DESCARGA

La concentración de coliformes fecales fue evaluada tanto en la *ZPL* como en las *AMERB* de la bahía de Coquimbo, a través de una serie de transectas (Figura 9-11, Anexo D.3). Estas transectas grafican la concentración del contaminante durante el último día de simulación y se encuentran temporalmente discretizadas cada 6 horas.

En el siguiente apartado se analiza en detalle el comportamiento hidrodinámico. A su vez, se estudia el comportamiento de la pluma de descarga tanto en condiciones medias como extremas históricas, cuantificando el contaminante en la *ZPL* y *AMERB*.

5.3 PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA MODELACIÓN DEL CAMPO LEJANO Y CERCANO

Es importante establecer que la modelación es un proceso iterativo. Por tanto, se encuentra sujeto a la modificación de sus diferentes elementos y parámetros.

Basado en ello, la simulación en *MIKE 21* tuvo múltiples alteraciones para alcanzar la convergencia de los casos considerados. Por tanto, en la Tabla 5-8 solo se detallaron los parámetros más importantes; utilizados luego de cumplir los procesos de estabilización, calibración y validación.

Tabla 5-8: Parámetros utilizados en la simulación del campo lejano.

Módulo	Sección	Parámetro	Valor
MIKE 21 HD	Eddy Viscosity	No considerado	-- --
	Bed resistance	Número de Manning	20
	Coriolis forcing	No considerado	-- --
	Wind friction	Variable según la intensidad del viento	0.001255 - 0.002425
	Wave radiation	Variable según la simulación realizada con <i>MIKE 21 SW</i>	-- --
	Source	Emisario submarino	-- --
	Initial conditions	Constante Elevación superficial	Dependiente del valor inicial de la condición de borde
MIKE 21 SW	Basic equations	Formulación espectral	Directionally decoupled parametric formulation
	Water level conditions	Variable según la simulación realizada con <i>MIKE 21 HD</i>	-- --
	Current conditions	Variable según la simulación realizada con <i>MIKE 21 HD</i>	-- --
	Diffraction	No considerado	-- --
	Wave breaking	Valor de Gamma considerado constante	0.8
	Bottom friction	Coefficiente de fricción	0.02
	Initial conditions	Sin espectro	2.8
	Boundary Conditions	Dispersión direccional	4
MIKE 21 AD	Dispersion	Coefficiente de dispersión constante	Su valor es modificado según las condiciones del modelo utilizado, estableciendo un rango entre 1 y 5
	Decay	Constante	0.0002

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los principales parámetros ingresados en *CORMIX 2* se observan distribuidos en la Tabla 5-9, el resto fue calculado de forma interna por el mismo programa.

Tabla 5-9: Parámetros utilizados en las simulaciones realizadas en *CORMIX 2*.

Sección	Subsección	Parámetro	Valor	Unidad
Effluent data	-- --	Effluent flowrate (Q_o)	0.76 - 0.96	m^3/s
	-- --	Effluent velocity (U_o)	2.11 - 4.21	m/s
	Fresh water effluent density	Temperature (T_o)	20	$^{\circ}C$
		Density (ρ_o)	998.266	kg/m^3
	Pollutant types	Non conservative	8	/day
Ambient geometry and Flow field data	-- --	Average depth (H_A)	20	m
	-- --	Depth at discharge (H_d)	20	m
	-- --	Unbounded	-- --	-- --
	-- --	Manning's n	0.02	-- --
	-- --	Wind speed	2	m/s
	Steady	Ambient velocity (U_A)	Dependent of <i>MIKE 21</i>	-- --
		Ambient flowrate (Q_A)	-- --	-- --
Ambient density data	Non fresh water	Density at surface (ρ_{as})	1024.54	kg/m^3
		Density at bottom (ρ_{ab})	1025.2	kg/m^3
Discharge geometry data	Multiport	Alterm./Vert.	-- --	-- --
		N° of openings	38	-- --
		Diffuser length	38	m
		Dist. to 1 ^{ad} end-point YB_1	1711	m
		Dist. to 2 st far end-point YB_2	1749	m
		Port height (h_o)	1.875	m
		Port diameter (D_o)	0.11	m
		Contraction ratio	1	-- --
		Vert. angle θ	60	$^{\circ}$
		Align. angle γ	90	$^{\circ}$
		Horiz. angle σ	0	$^{\circ}$
		Relat. orient. angle β	90	$^{\circ}$
	Nozzle direction same	-- --	-- --	
Mixing zone data	Non toxic effluent	No WQ standard	-- --	-- --
	Mixing zone specified	Region of interest	1000	m

Fuente: Adaptación del ingreso de datos de *MixZon Inc* (2007).

5.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA

La Figura 5-25 muestra la estructura utilizada con el fin de cumplir los objetivos de la presente Memoria. Cabe destacar que la línea segmentada en rojo establece una condicionalidad negativa, la cual genera un bucle que se repite hasta que la condición se cumple (línea segmentada en azul).

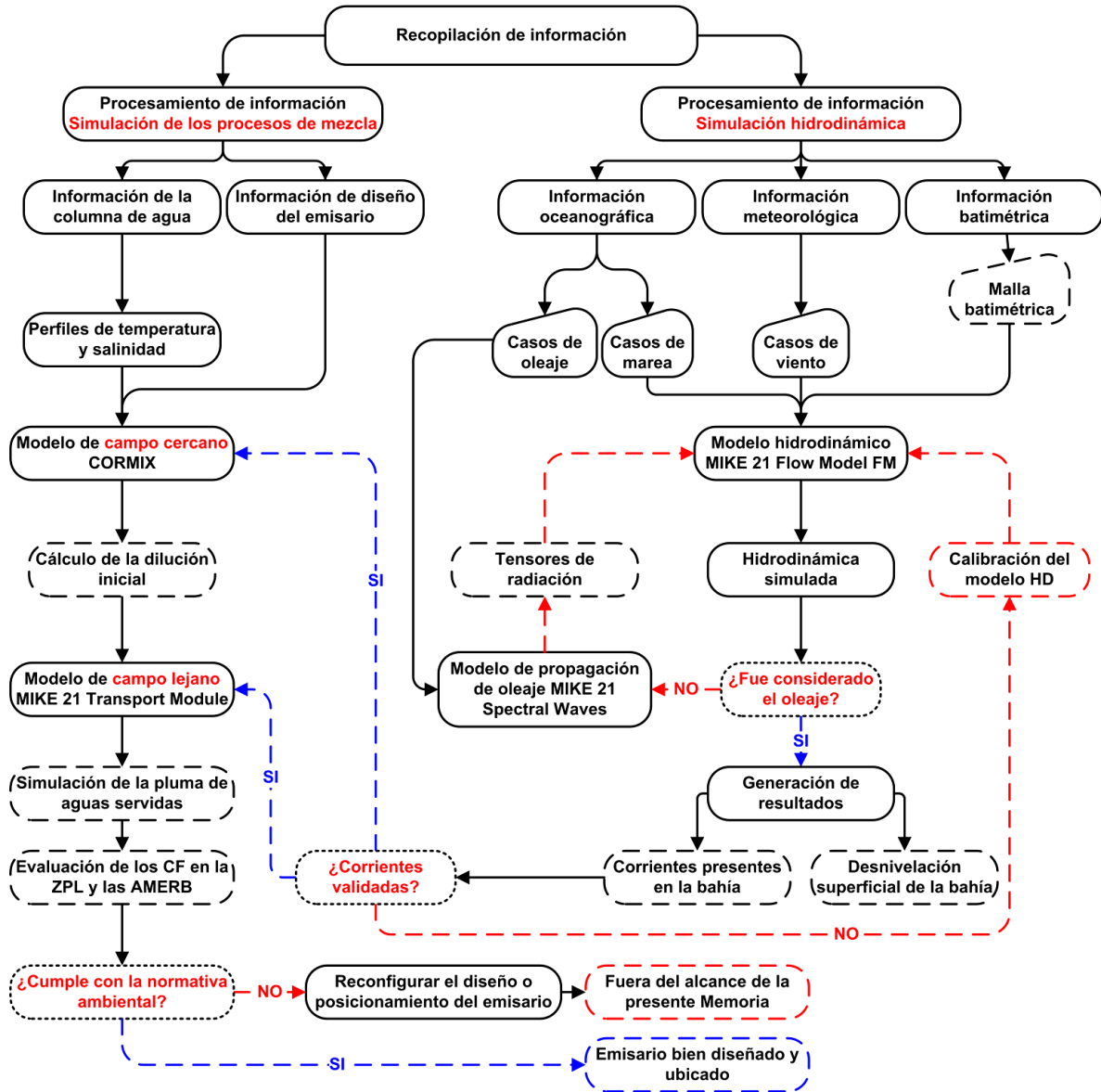


Figura 5-25: Estructura de la metodología utilizada en la presente Memoria.

Fuente: Elaboración propia.

6 COMPORTAMIENTO DEL CONTAMINANTE SOBRE LA BAHÍA DE COQUIMBO

La presente Memoria posee dos resultados principales, i) el comportamiento que sufre el vertido de aguas servidas sobre la bahía de Coquimbo y ii) la concentración de coliformes fecales sobre la *ZPL* y las *AMERB*, considerando los límites establecidos por las normas ambientales chilenas NCh 1333 of. 78 y D.S. 90/2000.

Los resultados se encuentran divididos de acuerdo a la intensidad de las forzantes y, a su vez, subdivididos de acuerdo al patrón hidrodinámico simulado y al comportamiento de la pluma del contaminante.

Cabe indicar que en los siguientes apartados se analizan los *casos medios* que presentan un mayor ajuste hidrodinámico y la totalidad de los *casos extremos históricos*. Los resultados de los *casos medios* restantes se describen en el Anexo H.

6.1 MODELOS FORZADOS BAJO CONDICIONES MEDIAS

6.1.1 RESULTADOS DEL CAMPO HIDRODINÁMICO

En la Figura 6-1 se aprecia el comportamiento hidrodinámico de la bahía de Coquimbo para los modelos *1M* y *6M*, los cuales presentaron un mejor ajuste para la Condición invernal y estival, respectivamente.

En ambos modelos se aprecia un pequeño vórtice antihorario ($\sim 1.4 \text{ km}$) en el extremo Sur de la bahía, concordante con las campañas de medición de corrientes descritas en la sección 4.1.3; mientras, más al centro de la bahía se aprecia un vórtice horario de mayor tamaño ($\sim 3.5 \text{ km}$). La interacción entre ambos, genera una corriente con origen en la costa y direccionada hacia los 330° aproximadamente, siendo consistente con imágenes satelitales de la bahía donde se observa su presencia a través de la distribución del sedimento en suspensión (Figura 6-1, *b*). Para una comparación más exhaustiva de dichas fotografías sería necesario contar con mediciones de marea, viento y oleaje dentro de la bahía en la fecha y hora exacta en que fue capturada la imagen. Esta comparación si bien posible, escapa de los alcances del presente trabajo. A continuación se presenta un análisis detallado de cada caso.

- *Caso 1M*. Figura 6-1, *a*: El patrón hidrodinámico muestra una tendencia direccional de la corriente hacia Noreste, exceptuando la zona sur de la bahía, la cual se encuentra protegida por Punta Tortuga. Se observan velocidades sobre 0.14 [m/s] tanto en el borde externo de Punta Tortuga (debido a las características batimétricas de la zona) como interno de la misma (influenciadas por la presencia del vórtice Sur). Desde ahí hasta el extremo Noreste de la bahía, se aprecia una franja con intensidades aproximadas de 0.1 [m/s] . En el punto de vertido y área circundante, se calculó una corriente promedio igual a 0.03 [m/s] .

- Caso 6M. Figura 6-1, c: Se aprecia el mismo patrón hidrodinámico identificado en el caso 1M, con la diferencia que la intensidad es relativamente baja ($\sim 0.01 - 0.04 \text{ m/s}$). Aun cuando en el punto de vertido se calculó una corriente promedio igual a 0.01 [m/s] , para el proceso de ajuste se utilizó una velocidad igual a 0.02 [m/s] debido a una mayor presencia de dicha intensidad en el área circundante.

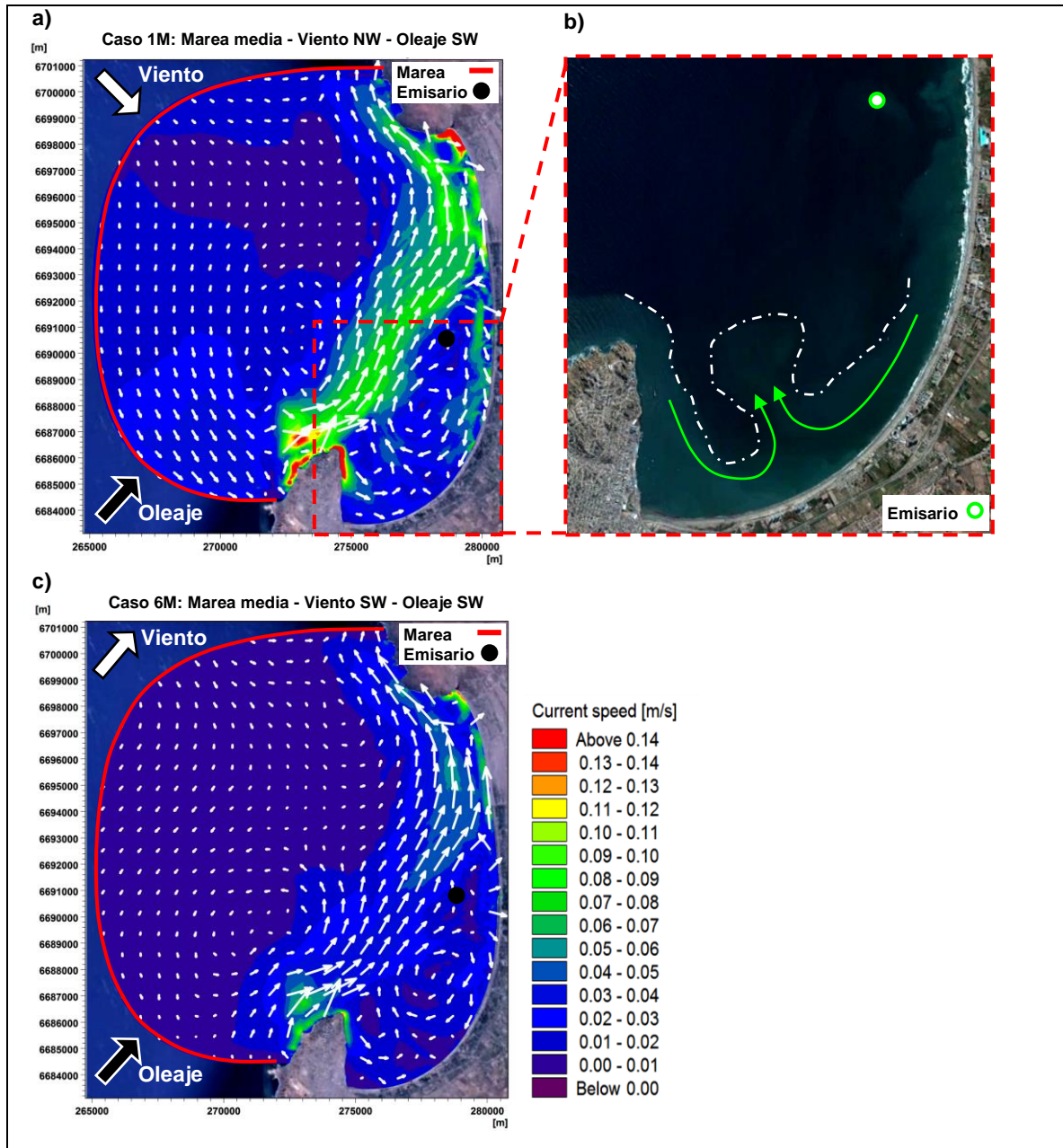


Figura 6-1: Respuesta hidrodinámica de simulaciones MVO.
a) Caso 1M. b) Adaptado de Google Earth - Junio 9, 2015. c) Caso 6M.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA

El comportamiento de la pluma de descarga, considerando un caudal de vertido medio para los casos *1M* y *6M*, se aprecia en la Figura 6-2. Cabe destacar que las diferencias en la forma de la pluma entre la simulación de caudal de vertido medio y máximo, son despreciables a simple vista, siendo el motivo de la omisión de las imágenes de este último caso. Sin embargo, sus efectos son analizados en la siguiente sección a través de la cuantificación de CF sobre las áreas sensibles de la bahía.

La importancia del análisis de un caudal máximo de vertido se fundamenta en un aumento del volumen del contaminante que entra en el sistema. En la actualidad se produce un aumento demográfico considerable en verano (debido a los turistas que visitan la región) y con ello, se incrementa tanto el caudal de descarga de aguas servidas como la posibilidad de repercutir negativamente sobre la bahía (si las condiciones ambientales no son las propicias).

Como recomendación, se sugiere revisar la Figura 9-11 (Anexo D.3) para una mayor claridad sobre la disposición tanto de la *ZPL* como las *AMERB* presentes en la bahía de Coquimbo. A continuación se presenta el análisis del comportamiento de la pluma en cada caso.

- *Caso 1M. Figura 6-2, a:* Se aprecia una disposición ovalada de la pluma, donde su extremo inferior se aproxima a la *ZPL* y a las *AMERB* tanto de *Coquimbo* como de *Peñuelas Sector A*, en concentraciones menores a las establecidas en las normas ambientales ($< 70 \text{ NMP} / 100 \text{ ml}$). Cabe destacar que el coeficiente de difusión, utilizado en el modelo *MIKE 21 AD*, es de $3 \text{ [m}^2/\text{s]}$.
- *Caso 6M. Figura 6-2, b:* Se observa una pluma con forma circular, cuya extensión se aproxima a la *ZPL* y las *AMERB* tanto de *Coquimbo* como de *Peñuelas*. Su alcance se fundamenta en un medio receptor con deficiente advección, lo que causa una acumulación del contaminante vertido. Por otro lado, su concentración en el límite del *AMERB Coquimbo* supera los $70 \text{ [NMP} / 100 \text{ ml]}$; mientras las concentraciones que llegan a la playa son permisibles de acuerdo a las normas chilenas. Por último, el coeficiente de difusión utilizado es de $5 \text{ [m}^2/\text{s]}$.

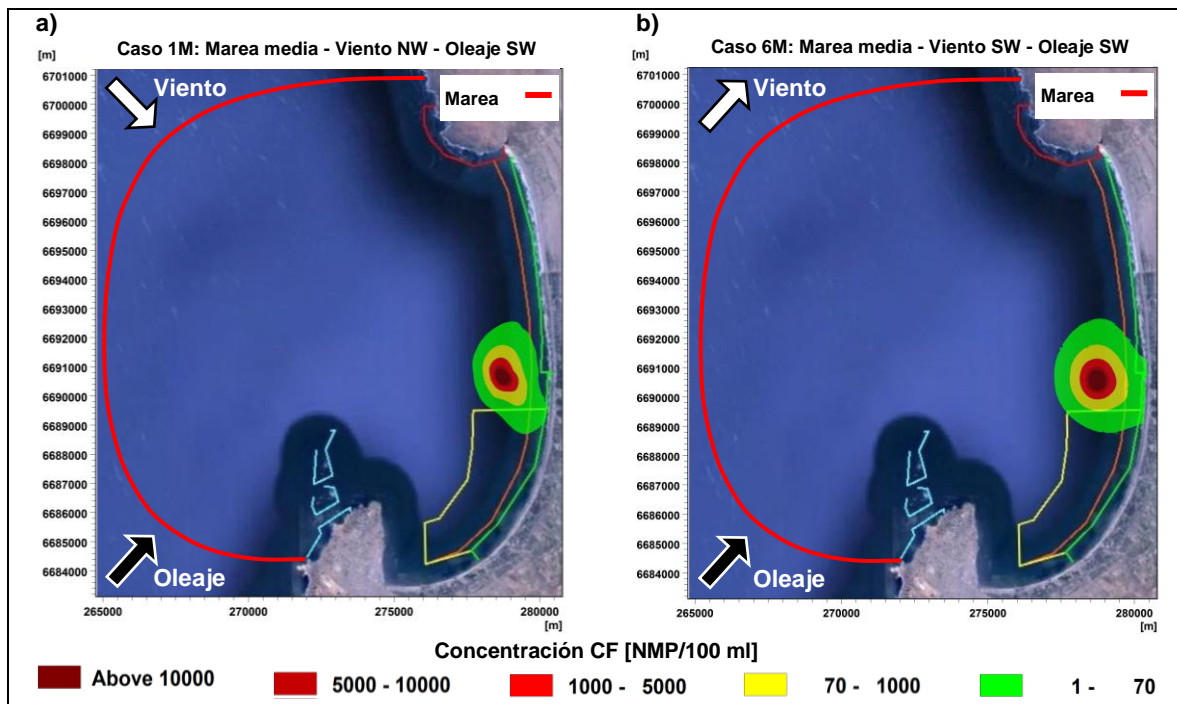


Figura 6-2: Comportamiento de la pluma con un caudal medio de vertido. Simulaciones MVO. Casos a) 1M y b) 6M.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.1 ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CF EN LA ZPL Y LAS AMERB

La cuantificación de los coliformes fecales sobre el límite de la ZPL y las AMERB de Coquimbo y Peñuelas, se observa en la Figura 6-3, Figura 6-5 y Figura 6-6, respectivamente. Los casos analizados son 1M y 6M, considerando un caudal de vertido tanto medio como máximo. El período de visualización corresponde a las últimas 24 horas de simulación con intervalos de 6 horas, donde los modelos ya se encuentran estabilizados tanto en el campo hidrodinámico como en los procesos de mezcla. El análisis de los casos restantes se efectúa en el Anexo H.2 y como recomendación, se sugiere revisar la Figura 9-11 (Anexo D.3) para una mayor claridad sobre la disposición de la ZPL y las AMERB presentes en la bahía de Coquimbo.

A continuación se presenta el análisis de la cuantificación del contaminante tanto para la ZPL como las AMERB alteradas.

ZPL (Figura 6-3): Se aprecia una concentración de coliformes fecales que no superan los límites establecidos en las normas ambientales ($< 1000 \text{ NMP} / 100 \text{ ml}$) tanto para el caso 1M (Figura 6-3, a) como para el caso 6M (Figura 6-3, b). Sin embargo, este último presenta una concentración de CF mayor, debido a la baja intensidad hidrodinámica de dicho caso. A su vez, se aprecia una leve diferencia entre el caudal medio y el máximo. Cabe destacar que la variación de CF a través del tiempo es prácticamente insignificante y por ello solo se presenta un gráfico con las variaciones medias entre las 0 y 24 horas para ambos casos.

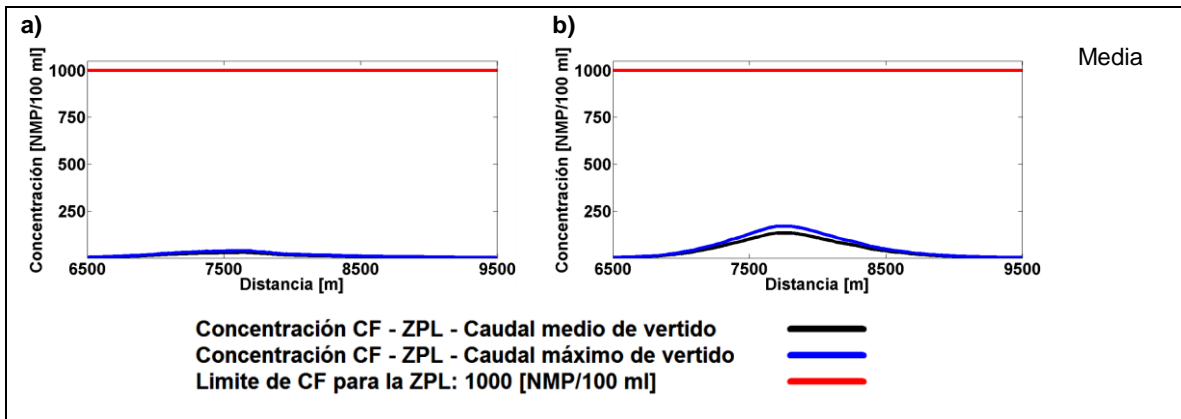


Figura 6-3: Concentración de los CF en la ZPL. Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 1M y b) 6M.

Fuente: Elaboración propia.

- AMERB Coquimbo (Figura 6-5): Se aprecia que el caso 1M (Figura 6-5, a) mantiene la concentración de CF bajo el límite establecido por la normativa ambiental. Por su parte, el caso 6M (Figura 6-5, b) presenta un sobrepaso del valor impuesto para las AMERB ($< 70 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$) alcanzando los $\sim 120 \text{ [NMP}/100 \text{ ml]}$ en su peor registro. Además, se observa una diferencia entre el caudal de vertido medio y máximo ($\sim 20 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$). Cabe destacar que la oscilación del registro se debe a la consideración de la forzante de marea en el modelo hidrodinámico. Si bien dicha fluctuación se presenta en todos los casos, se aprecia con claridad en las AMERB donde el límite de CF es más restrictivo en comparación a la ZPL.
- AMERB Peñuelas (Figura 6-6): No se aprecia un sobrepaso del límite establecido por la normativa ambiental para ninguno de los dos casos (1M y 6M). La discontinuidad observada en Figura 6-6, b; responde a la transición entre los Sectores A y B. Este último, se encuentra más cercano a la costa y por tanto alcanza concentraciones más bajas de CF (Figura 6-4).

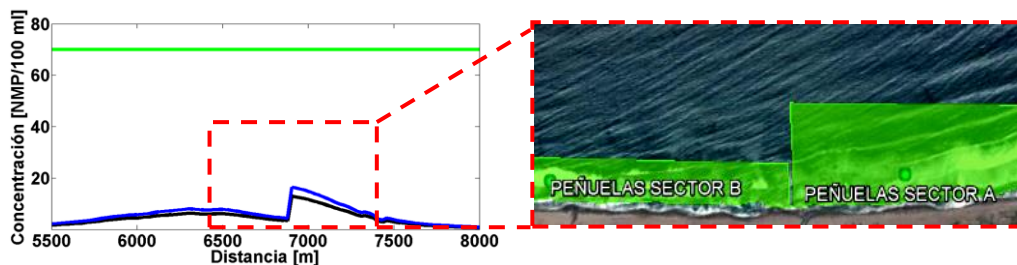


Figura 6-4: Discontinuidad entre el Sector A y B del AMERB Peñuelas.

Fuente: Adaptación del estado de tramitación AMERB (SUBPESCA, 2013).

En síntesis, el caso 6M presentó una mayor aproximación a los límites establecidos por la normativa ambiental, debido a la acumulación del contaminante sobre el punto de vertido. Cabe recordar que dicho caso representa una combinación de las forzantes de marea media, viento SW y oleaje SW con intensidades asociadas al 25% de no excedencia.

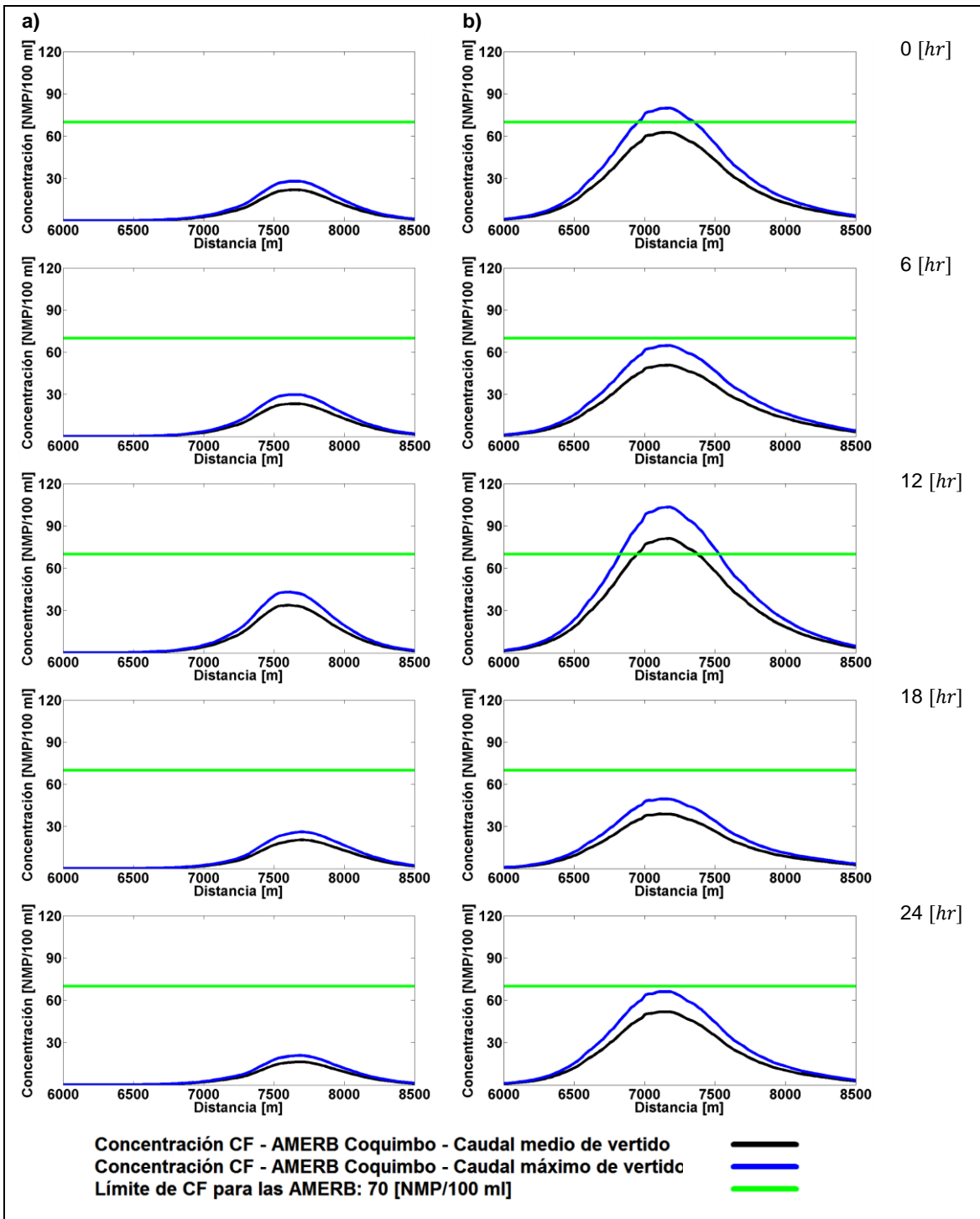


Figura 6-5: Concentración de los CF en el AMERB Coquimbo. Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 1M y b) 6M.

Fuente: Elaboración propia.

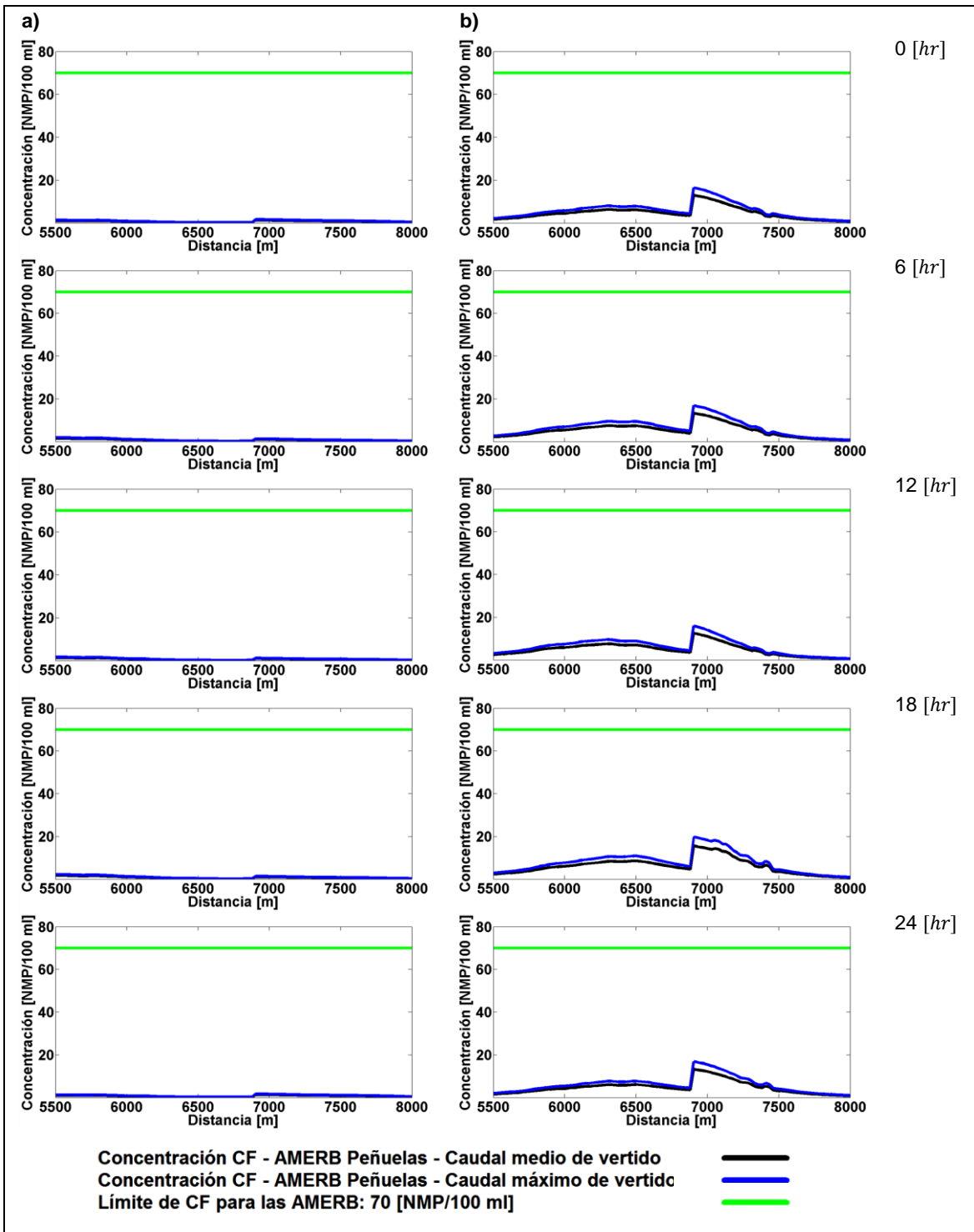


Figura 6-6: Concentración de los CF en el AMERB Peñuelas. Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 1M y b) 6M.

Fuente: Elaboración propia.

6.2 MODELOS FORZADOS BAJO CONDICIONES EXTREMAS HISTÓRICAS

6.2.1 RESULTADOS DEL CAMPO HIDRODINÁMICO

En la Figura 6-7, se observa el campo hidrodinámico de los casos *1E*, *2E* y *3E*; simulados a través de *MIKE 21 HD*. El análisis del comportamiento de las corrientes se detalla a continuación.

- *Caso 1E. Figura 6-7, a:* Se aprecia un patrón hidrodinámico direccionado al Sur y con ausencia de vórtices. La intensidad de los flujos costeros superan los $0.14 [m/s]$, mientras el resto de la bahía exhibe velocidades entre 0.06 y $0.1 [m/s]$. Específicamente, sobre el punto de descarga y área circundante, las corrientes oscilan entre 0.12 y $0.13 [m/s]$.
- *Caso 2E. Figura 6-7, b:* Se aprecia un campo hidrodinámico con la presencia de múltiples vórtices de variados tamaños e intensidades. En la zona Sur de la bahía existe una corriente hacia el 330° , generada por la convergencia de dos vórtices. Cabe destacar que sobre el punto de descarga del emisario se encuentra el centro de un gran vórtice, el que genera corrientes de baja magnitud las cuales oscilan entre 0.03 a $0.05 [m/s]$ y cuya direccionalidad muestra una leve tendencia hacia el Sur.
- *Caso 3E. Figura 6-7, c:* Es el campo hidrodinámico más intenso de los tres. Sobre el área circundante del punto de descarga, las corrientes tienden hacia el Norte con intensidades promedio de $0.13 [m/s]$. Sin embargo, hacia el Noroeste de dicho punto, las corrientes presentan mayores intensidades y generan una fuerte advección de la pluma de aguas servidas que es analizada en el apartado 6.2.2.

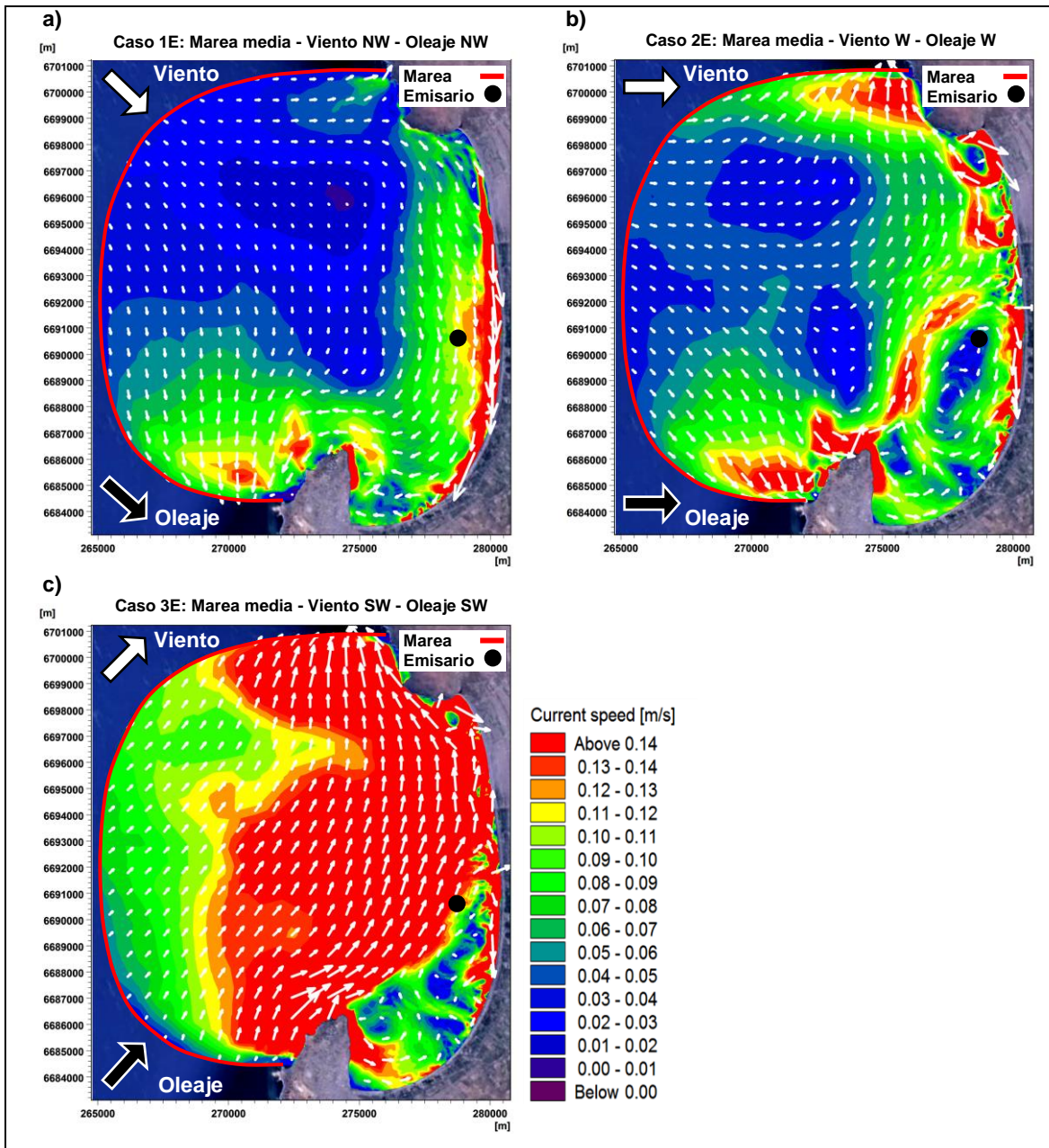


Figura 6-7: Respuesta hidrodinámica bajo condiciones extremas históricas. Simulaciones MVO. Casos a) 1E, b) 2E y c) 3E.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA

En la Figura 6-8 se aprecia la distribución de la pluma al ser transportada por el campo hidrodinámico de la bahía, detallado en el apartado anterior. El análisis de cada caso se especifica a continuación y se recomienda revisar la Figura 9-11 (Anexo D.3) para tener claridad sobre la disposición de la ZPL y las AMERB presentes en la bahía de Coquimbo.

- *Caso 1E. Figura 6-8, a:* Se aprecia un transporte de la pluma en dirección Sur. Ésta no tiene ningún tipo de contacto con la ZPL; no obstante, interactúa con el AMERB Coquimbo alcanzando concentraciones que superan los límites ambientales establecidos ($> 70 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$). El detalle de la cuantificación del contaminante y su respectivo análisis se encuentra en el apartado 6.2.2.1. Cabe destacar que el coeficiente de difusión utilizado por el modelo MIKE 21 AD, corresponde a $1 \text{ [m}^2/\text{s]}$.
- *Caso 2E. Figura 6-8, b:* Se observa una tendencia de la pluma en dirección Sur, aunque menos definida y con bordes irregulares, debido al patrón hidrodinámico con múltiples vórtices. Si bien la ZPL está en contacto con el contaminante, se encuentra dentro de los límites permitidos por las normas ambientales chilenas ($< 1000 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$). No obstante, la pluma alcanza la AMERB Coquimbo en concentraciones mayores a $70 \text{ [NMP}/100 \text{ ml]}$. Por último, el coeficiente de difusión utilizado corresponde a $3 \text{ [m}^2/\text{s]}$ debido a que la intensidad de las corrientes en el área circundante al punto de vertido, son similares en intensidad a los casos medios asociados a condiciones invernales ($1M - 2M - 3M$).
- *Caso 3E. Figura 6-8, c:* Es el caso que presenta el comportamiento más caótico de la pluma de aguas servidas. Específicamente, el contaminante se distribuye a lo largo de la playa a tal velocidad que los coliformes fecales no tienen tiempo suficiente de decaer en forma natural. Se observa que las concentraciones sobre ciertas áreas de la ZPL superan los $1000 \text{ [NMP}/100 \text{ ml]}$ y los $70 \text{ [NMP}/100 \text{ ml]}$ en la AMERB Peñuelas
- al igual que los límites establecidos para las AMERB Peñuelas tanto del Sector A como B ($> 70 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$). Cabe destacar que su coeficiente de difusión es de $1 \text{ [m}^2/\text{s]}$ y fue el único caso donde el contaminante interactuó con la playa, afectando aproximadamente siete kilómetros de costa con concentraciones superiores a $70 \text{ [NMP}/100 \text{ ml]}$.

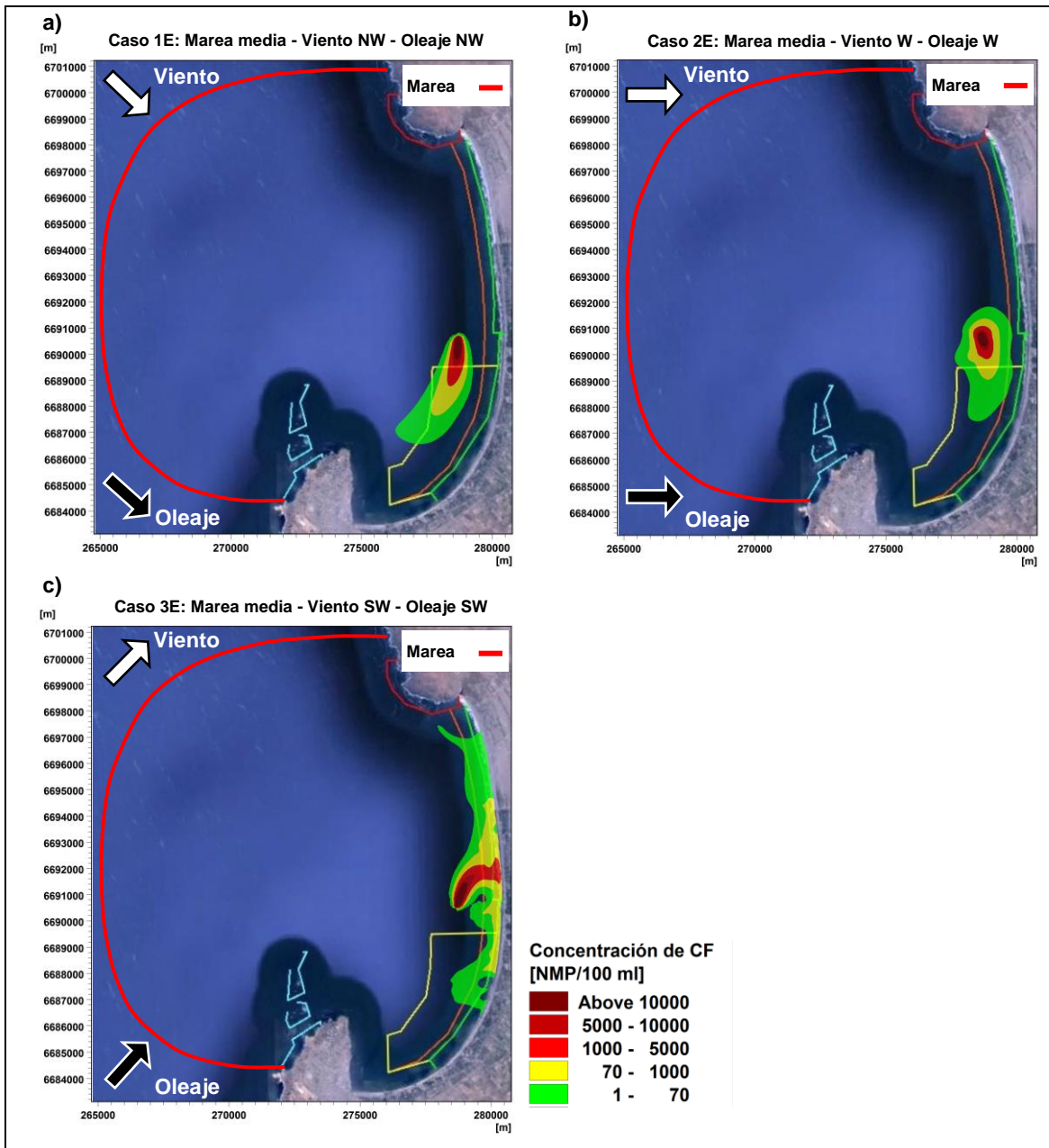


Figura 6-8: Comportamiento de la pluma de descarga bajo condiciones extremas históricas. Simulaciones MVO. Casos a) 1E, b) 2E y c) 3E.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2.1 ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CF LA ZPL Y LAS AMERB

A continuación se cuantificó la concentración de coliformes fecales sobre la ZPL y las AMERB, considerando los *casos extremos históricos* con un caudal de vertido medio.

- ZPL (Figura 6-9): En los casos 1E y 2E, asociados a modelos hidrodinámicos forzados con viento y oleaje provenientes desde el Noroeste y Oeste respectivamente, la concentración de coliformes fecales es tan baja que no logra ser representada por el gráfico. Sin embargo, el caso 3E (forzado desde el Suroeste), aproxima la pluma a un flujo de alta intensidad ubicado al Norte del punto de descarga el cual advecta el contaminante hasta la playa y lo distribuye tanto al Norte como Sur de la bahía. Por tanto, sobrepasa los 1000 [NMP/ 100 ml] sobre la ZPL con una concentración máxima de ~ 3000 [NMP/ 100 ml] durante la totalidad del tiempo analizado y en una sección comprendida entre 0.5 y 1 [km].
- AMERB Coquimbo (Figura 6-10 a): Se observa que los casos 1M y 2M superan el límite establecido por la normativa ambiental (> 70 NMP/ 100 ml) producto de la tendencia hacia el Sur de sus respectivas plumas. El caso 1M presenta un máximo de ~ 5000 [NMP/ 100 ml] con un ancho de aproximadamente 1 [km]; mientras el caso 2M alcanza los ~ 400 [NMP/ 100 ml] con un ancho aproximado de 0.5 [km].
- AMERB Peñuelas (Figura 6-10 b): Los casos 1E y 2E no generan ninguna alteración, cuantificando una concentración igual a cero. Sin embargo, el caso 3E alcanza una concentración de CF de ~ 2000 [NMP/ 100 ml], superando el límite ambiental de 70 [NMP/ 100 ml] en aproximadamente de 5 [km]. Cabe destacar que la discontinuidad graficada presente en el eje x , corresponde al cambio entre el Sector A y B del AMERB Peñuelas.

En síntesis, los tres *casos extremos históricos* afectan la bahía en diferentes zonas y concentraciones. Cuando la pluma se desplaza hacia el Sur, altera la calidad de agua del AMERB Coquimbo (casos 1E y 2E); mientras cuando se desplaza al Este, altera la ZPL y AMERB Peñuelas (caso 3E).

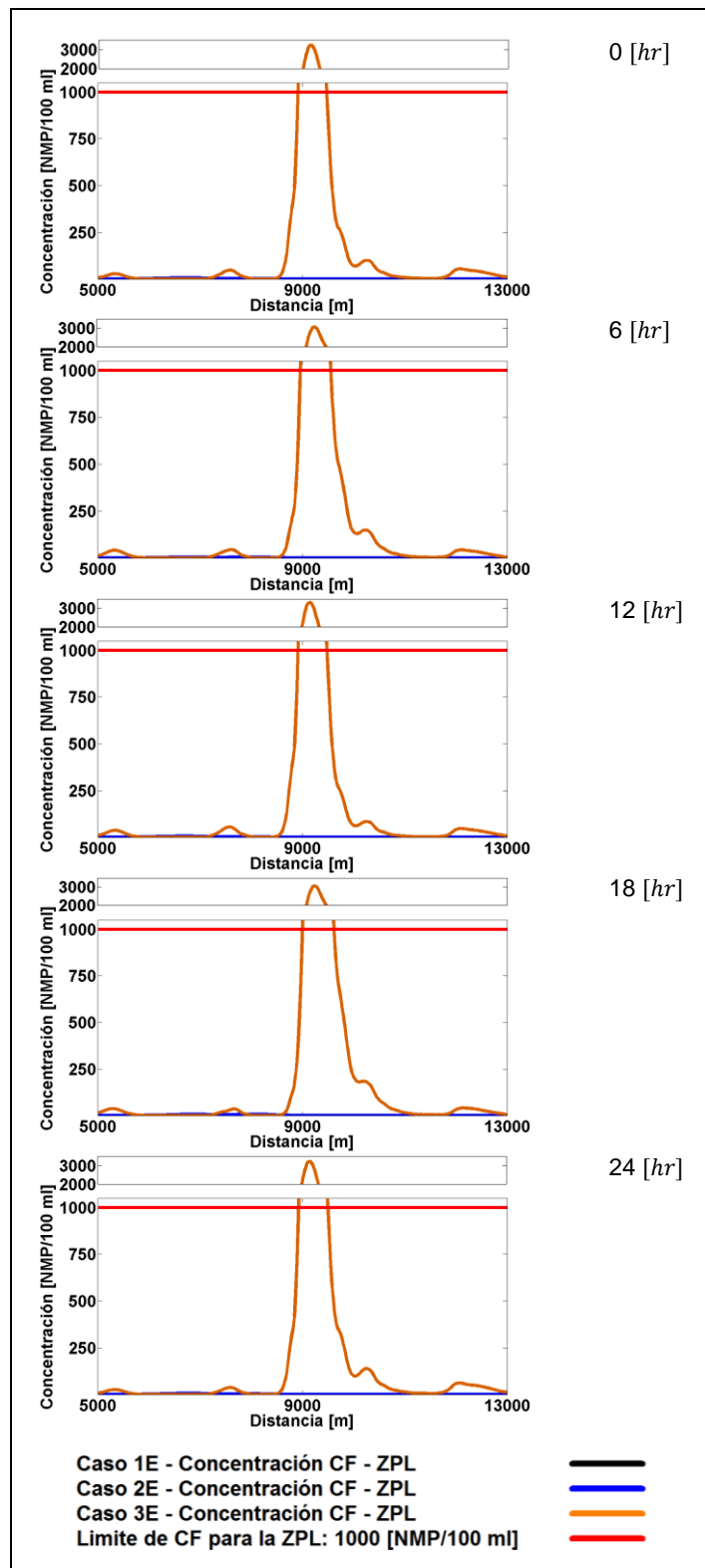


Figura 6-9: Concentración de los CF en la ZPL bajo casos extremos históricos.

Fuente: Elaboración propia.

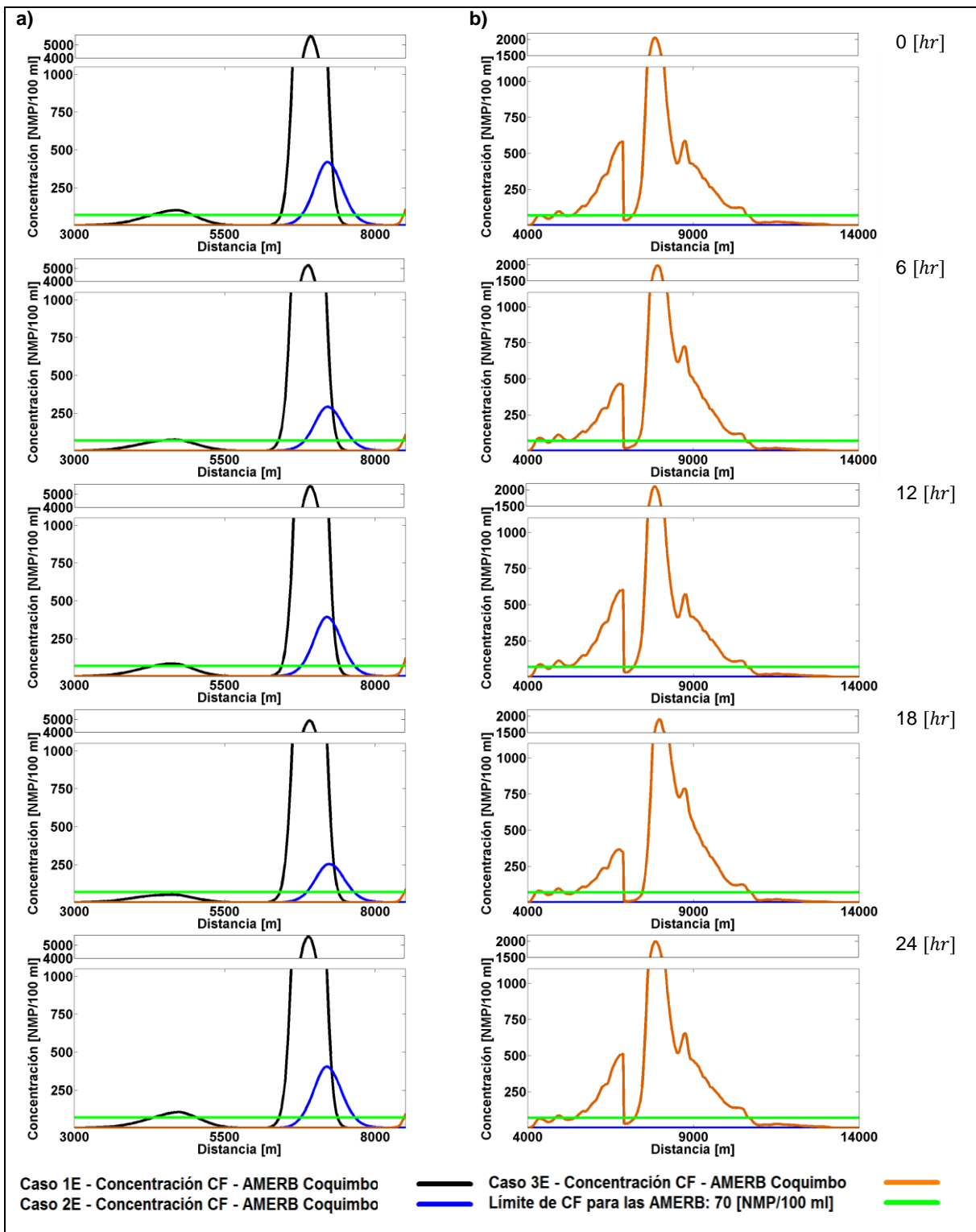


Figura 6-10: Concentración de los CF en las AMERB bajo casos extremos históricos. Variación en el tiempo de la concentración de CF para: a) AMERB Coquimbo y b) AMERB Peñuelas.

Fuente: Elaboración propia.

7 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de la presente Memoria tienen por finalidad generar una lista de sugerencias para proyectos asociados al vertido de aguas servidas en el mar. Estas recomendaciones se agrupan de acuerdo a la direccionalidad de sus ideas generales.

Respecto a la medición de datos:

- Realizar la medición de corrientes *in-situ* (adyacente al punto de descarga), con la finalidad de analizar la hidrodinámica en tiempo real y ajustar de forma automática el caudal de descarga.
- Realizar mediciones de marea, viento y oleaje en forma trimestral; con longitudes de registro acordes a las mediciones de las corrientes. La medición simultánea tanto de las forzantes como de sus efectos hidrodinámicos permite una apropiada calibración y validación del modelo utilizado. En particular y de acuerdo a lo planteado por Ludwig (1988), se debe medir la intensidad y dirección de las corrientes en diferentes estaciones, con intervalos de 15 minutos y una longitud del registro de al menos 30 días por campaña.
- Realizar la medición del coeficiente de dispersión sobre el cuerpo de agua, durante el período en que se realiza el registro de las corrientes. Se recomienda que el coeficiente sea medido una vez por cada campaña, para establecer si existe una variabilidad anual.
- Realizar la medición de los factores necesarios para calcular el parámetro de T90 (radiación solar, salinidad, capacidad de dilución presente en el medio, entre otros) tanto en el día como en la noche, considerando que la radiación solar tiene una participación fundamental sobre la mortalidad de las bacterias presentes en los coliformes fecales. En teoría, el valor del T90 debería aumentar en ausencia de luz solar, provocando un incremento en la extensión de la pluma durante las noches (De Luque, García & Palacio, 2010).

Respecto a la modelación hidrodinámica:

- Realizar el proceso de calibración y validación de las forzantes (información proveniente de modelos regionales), utilizando los datos de campo.
- Realizar modelaciones previas con las forzantes individualizadas para comprender tanto sus efectos sobre la hidrodinámica como sus períodos de estabilización. Luego, analizar modelos configurados con todas las forzantes actuando de forma simultánea.

Respecto a la modelación de los procesos de mezcla:

- Tener en cuenta, al momento de seleccionar el modelo que calcule la dilución inicial (campo cercano), el tipo de contaminante, estratificación del medio receptor y la capacidad del modelo de simular la interacción entre el contaminante y los bordes verticales del cuerpo de agua.

- Establecer, dentro de la configuración de un modelo bidimensional, un coeficiente de dispersión variable en el espacio. Específicamente para *MIKE 21 AD*, generar un área circundante al punto de vertido donde el coeficiente mencionado sea diferente al cuerpo de agua restante. Su finalidad se basa en mejorar el ajuste de la pluma en el campo cercano para los casos en que el caudal de vertido máximo o las corrientes débiles del medio receptor generan una acumulación del contaminante sobre el punto de descarga. Mientras, fuera de dicho perímetro, configurar un coeficiente de dispersión asociado al cuerpo de agua de interés (mediciones *in-situ*). Es preciso considerar a su vez, tanto la estabilidad del esquema numérico adoptado como las limitaciones del procesador que será utilizado (tiempo de simulación).

Respecto a la *instalación del emisario submarino*:

- Según Ludwig (1988), para lograr una descarga exitosa tanto del punto de vista estético como de una apropiada dilución inicial, se recomienda verter aguas residuales a una profundidad de al menos 20 metros. A su vez, la ubicación del punto de descarga del emisario debe estar en zonas con mínima sensibilidad ambiental (mar abierto), alejada tanto de bahías como de estuarios. De dicha manera se espera evitar los impactos innecesarios sobre playas, zonas de cultivo de mariscos y desembocaduras de ríos.

Respecto a la *normativa ambiental*:

- Realizar una modificación en el D.S. N° 90/2000, ya que sólo regula los residuos industriales líquidos (Riles) en función de los valores máximos. Por otra parte, no regula el volumen diario del contaminante descargado y no plantea la necesidad de reevaluar la interacción entre un emisario submarino y el medio ambiente. Específicamente, el emisario analizado en la presente Memoria, fue instalado en 1987. Por tanto, es de suponer que la demanda demográfica ha aumentado; y en consecuencia, el volumen del contaminante vertido sobre la bahía ha sufrido variaciones que deben ser consideradas en nuevas simulaciones.
- Generar un plan de muestreo en áreas donde son descargados contaminantes al mar. Si bien la NCh 411⁸ contempla un conjunto de acciones en cuanto a la manipulación de muestras, no considera una distribución espacio-temporal de las estaciones de muestreo. Ello repercute tanto en su seguimiento histórico como en la protección de áreas sensibles como la *ZPL* y las *AMERB*. Por tanto, se plantea crear una norma secundaria de calidad ambiental⁹, la cual contenga los requisitos mínimos para evaluar este tipo de proyectos y una distribución de las estaciones de muestreo en forma similar a lo observado en la Figura 7-1 (considerando las limitaciones geográficas locales). En dicha imagen existe un perímetro circundante al punto de vertido con cuatro estaciones y luego dos líneas de muestreo en dirección a la costa. Como sugerencia, distribuir las estaciones sobre los límites de la *ZPL* y las *AMERB*. Es preciso indicar que el seguimiento histórico debería ser a través de un programa

⁸ Titulada *Muestreo de aguas residuales, recolección y manejo de muestras*.

⁹ Tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza, son de carácter local y no necesariamente nacional.

de monitoreo de acceso público, el cual evalúe los mismos puntos y permita generar un registro de la calidad de aguas del sitio de interés. Dicha información es esencial al momento de calibrar y validar la modelación de los procesos de mezcla realizados por un software específico.

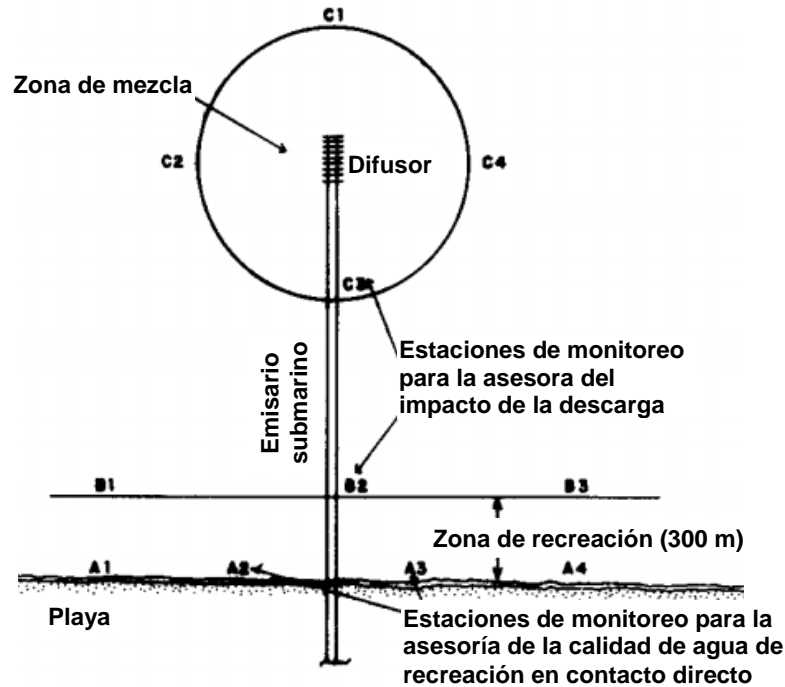


Figura 7-1: Representación de distribución de las estaciones de muestreo.

Fuente: Adaptación de Ludwig (1988).

Por otro lado, se identificaron diferentes tópicos de investigación relacionados al vertido de sustancias en el mar (aguas servidas u otros contaminantes), destacando los siguientes estudios:

- Determinar si la capacidad de filtración de los bivalvos aumenta la concentración de microorganismos de origen fecal, considerando la acumulación y proliferación de las bacterias coliformes en su interior. Evaluar dichos resultados en estudios donde la pluma de aguas servidas afecten las AMERB.
- Simular una pluma de aguas servidas para comparar su extensión al modificar el parámetro T90 entre un valor diurno y nocturno¹⁰. Evaluar sus efectos sobre el medio ambiente y plantear modificaciones a la normativa ambiental.

¹⁰ La radiación solar es el principal agente responsable en la mortalidad de las bacterias coliformes.

8 CONCLUSIONES

Las conclusiones de la presente Memoria están estructuradas en dos secciones principales. La primera se encuentra asociada a la simulación hidrodinámica y la interacción entre las forzantes; mientras la segunda tiene relación con la simulación de los procesos de mezcla.

Respecto a la simulación hidrodinámica es posible señalar:

- La decisión de excluir una forzante dentro del proceso de modelación hidrodinámica, debe ser realizada comprendiendo la influencia individual de cada forzante sobre el campo de corrientes simulado.
- Se reconoce la influencia del oleaje sobre el patrón hidrodinámico, el cual genera múltiples vórtices en una configuración costera compleja (bahía). Los *Modelos MVO*¹¹ ajustan mejor sus resultados a las mediciones de campo, incrementando su velocidad en presencia de oleaje entre 0.01 y 0.06 [m/s] para los casos asociados a la Condición invernal (1M - 2M - 3M). Por su parte los casos asociados a la Condición estival (4M - 5M - 6M) aumentaron su intensidad entre 0.02 y 0.03 [m/s]. Además, los vórtices generados afectaron el campo de circulación en su totalidad, generando aumentos en la intensidad del ~ 70% en comparación a modelos que no consideran el oleaje como forzante.
- El efecto que produce la modelación individual de cada forzante sobre la intensidad y patrón de la corriente generada, se caracteriza de forma específica. La marea produce corrientes de baja intensidad, con direcciones que establecen su flujo y reflujo. Por su parte, el viento genera flujos claramente definidos hacia el Sur o Norte dependiendo de su dirección de incidencia, y en algunos casos crea un vórtice bien definido en la zona Sur de la bahía. Por último, el oleaje forma numerosos vórtices en la costa y traza patrones de recirculación sobre toda la bahía. Además esta última forzante es la que presenta una mayor relevancia, puesto que la configuración geográfica y la batimetría local generan áreas de baja profundidad (aumento de la velocidad de las corrientes inducidas por oleaje) en la zona de rompiente y en especial frente a Punta Tortuga, generando flujos que condicionan completamente la hidrodinámica de la bahía de Coquimbo.
- El vórtice registrado por las mediciones de corriente del *Circuito 1*¹², fue simulado de forma apropiada por los diferentes casos considerados.

Respecto a la simulación de los procesos de mezcla es posible señalar:

- La pluma de aguas servidas no debería ser visible en la superficie la bahía de Coquimbo. No obstante, se observa su presencia durante todo el año y contrasta con algunos de los párrafos asociados a la estética, descritos en el NCh 1333 of. 78 (ver Anexo A.2). Por otro lado, al considerar tanto las aguas servidas emergidas como los vientos provenientes del mar durante horas de la tarde, es probable que un fuerte

¹¹ Marea, viento y oleaje.

¹² Zona Sur de la bahía de Coquimbo.

hedor llegue a la costa, donde disfrutan de la playa habitantes de la región y turistas. Debido a lo mencionado, se cuestiona la eficiencia en la reducción de coliformes fecales realizado por el presente emisario submarino.

- Para la fase de transición entre los resultados de campo cercano y lejano, fue esencial la interacción entre el chorro vertido y la superficie del cuerpo de agua (característica considerada por *CORMIX 2*). A partir de ello, se obtuvo la concentración del contaminante en la línea central de la pluma y se realizó el proceso de ajuste entre *CORMIX 2* y *MIKE 21 AD*.
- La transición entre *CORMIX 2* y *MIKE 21 AD* presenta resultados apropiados. Específicamente se logró un excelente ajuste en el caso *extremo 2E* y en los casos *medios* asociados a una Condición invernal (1M - 2M - 3M). Por otro lado, el ajuste fue parcial en los casos correspondientes a una Condición estival (4M - 5M - 6M) y en los casos *extremos 1E* y *3E*. Es preciso destacar que los ajustes parciales se encuentran relacionados a la capacidad del procesador utilizado, y en ningún caso, a capacidad de los software¹³.
- La cuantificación de coliformes fecales para los casos *medios* asociados a una Condición invernal (1M - 2M - 3M) no superan los límites impuestos por las normas ambientales en la ZPL y en las diferentes *AMERB* presentes en la bahía de Coquimbo. Sin embargo, en los casos que simulan una Condición estival (4M - 5M - 6M), los límites ambientales fueron superados en el *AMERB Coquimbo* tanto para el caudal de vertido medio como máximo. Sus concentraciones respectivas variaron entre 80 y 120 [NMP/100 ml] siendo que el límite para dicha área es de 70 [NMP/100 ml]. Dicho resultado, se basa en la presencia de corrientes con bajas intensidades, lo que genera una acumulación del contaminante sobre el punto de vertido.
- En los casos *extremos históricos*, la pluma fue transportada a lo largo de la bahía excediendo los límites establecidos por las normas ambientales tanto para la ZPL como las *AMERB*. En particular, en el caso *1E* se cuantificó un máximo de coliformes fecales de ~ 5000 [NMP/100 ml] sobre el *AMERB Coquimbo*; mientras el caso *2E* presentó ~ 400 [NMP/100 ml] para el mismo *AMERB*; y por último, el caso *3E* fue el único que afectó tanto la ZPL como el *AMERB Peñuelas* con concentraciones máximas de ~ 3000 y ~ 2000 [NMP/100 ml], respectivamente.

¹³ La capacidad del procesador limitaron la discretización espacio-temporal, es decir, un mayor resolución se traducía en tiempos de cálculo inviábiles o sobrecalentamiento del equipo.

GLOSARIO

Altura media de la bajamar más baja: Promedio de las bajamares diarias más bajas.

Altura media de la bajamar: Promedio de todas las bajamares.

Altura media de la pleamar más alta: Promedio de las pleamares diarias más altas.

Altura media de la pleamar: Promedio de todas las pleamares.

Anticiclón: Centros de alta presión. Generan situaciones de tiempo estable y ausencia de precipitaciones.

Áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos: Régimen de acceso, asigna derechos de explotación exclusiva a organizaciones de pescadores artesanales, mediante un plan basado en la conservación de los recursos bentónicos presentes en sectores previamente delimitados.

Bivalvos: Clase de molusco que tiene su cuerpo protegido por dos valvas, las cuales conforman la concha de estos animales invertebrados. Dependiendo de la especie pueden enterrarse en superficies blandas o adherirse a superficies duras. Su alimento lo extraen del agua del mar, a través de mecanismos de filtración. Entre los más conocidos se encuentran los mejillones, las almejas y las ostras.

Calibración: Proceso donde se ajusta el valor de los parámetros de un modelo, dentro de rangos físicamente adecuados, con el objetivo de obtener resultados aproximados a las mediciones de campo (correspondientes a desplazamientos verticales del nivel del mar, corrientes, parámetros del medio receptor, entre otros).

Chorro: Término relacionado al campo cercano, donde predominan las fuerzas de inercia a partir de las condiciones de vertido. Este concepto será apropiado mientras la descarga se encuentra en movimiento ascendente, considerando las diferencias densimetrías del medio receptor.

Ciclón: Centros de baja presión. Generan situaciones de nubosidad y mal tiempo.

Contaminante: Aumento o disminución de una sustancia o propiedad del medio, generando consecuencias negativas en el medio ambiente.

Contaminante conservativo: Sustancia que no sufre degradación de ningún tipo y por tanto, no presenta tasas de crecimiento o decaimiento.

Contaminante no conservativo: Sustancia o propiedad que sufre una degradación a través del tiempo, presentando coeficientes característicos de decaimiento o crecimiento.

Corrientes baroclínicas: Generadas en situaciones donde la densidad de la columna de agua varía lateralmente, de tal forma que en dos puntos situados a una misma profundidad existe un gradiente de densidad. Dicho gradiente, genera una corriente lateral incluso si no existe una diferencia en la altura superficial del mar.

Efecto de Coriolis: Fenómeno generado por la rotación de la Tierra, el cual tiende a desviar la trayectoria de los fluidos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

Estratificación del mar: Fenómeno caracterizado por una densidad vertical variable, generando diferentes capas horizontales.

Flujo: Proceso del aumento lento y continuo del mar sobre la línea de costa. Se debe al incremento progresivo de la atracción gravitacional producida por la Luna y el Sol. Genera las denominadas corrientes de flujo.

Fronteras abiertas del modelo: Límites que se encuentran en contacto con el mar.

Fronteras cerradas del modelo: Límites que se encuentran en contacto con tierra.

Hidrosfera: Parte de la Tierra ocupada por los océanos, mares, ríos y lagos, considerando todas las masas y corrientes de agua.

Marea alta o pleamar: Momento en que el nivel del mar alcanza su máxima altura, dentro de un ciclo de mareal.

Marea baja o bajamar: Momento en que el nivel del mar alcanza su mínima altura, dentro de un ciclo mareal.

Mareas de cuadratura (marea muerta): Producidas cuando el Sol, la Luna y la Tierra generan un ángulo de 90 grados. Según su disposición, produce los fenómenos de Cuarto Creciente y Cuarto Menguante, caracterizados por la visualización de una media Luna.

Mareas de sicigia (marea viva): Producidas cuando el Sol, la Luna y la Tierra se encuentran alineadas, generando una suma de las fuerzas gravitatorias producidas por los dos primeros astros. Según el orden de la alineación, se producen los fenómenos de Luna Llena y Luna Nueva.

Mareógrafo: Instrumento ubicado principalmente en los puertos para registrar las mareas. También denominado como mareómetro. Se puede reemplazar por una regla de marea.

Modelo MV: Término adoptado en la presente Memoria, para referirse a modelos que utilizan las forzantes de marea y viento, en forma simultánea.

Modelo MVO: Término adoptado en la presente Memoria, para referirse a modelos que utilizan las forzantes de marea, viento y oleaje, en forma simultánea.

Nivel medio de la marea: Corresponde al promedio de todas las pleamares y bajamares registradas durante el período de observación.

Nivel medio del mar: Corresponde al promedio de las alturas horarias de la marea. La excelencia de su cálculo dependerá de la longitud del período de observación.

Picnoclina: Capa de agua en la que se registra un cambio brusco de densidad. En los ecosistemas de agua dulce, tales como lagos, este cambio de densidad es causado principalmente por modificaciones en la temperatura; mientras que en los ecosistemas marinos como los océanos, puede ser debido a variaciones en la temperatura o salinidad.

Pluma: Término relacionado al campo lejano, donde el movimiento se determina principalmente por las corrientes del medio receptor. Este concepto, será considerado cuando las velocidades ascendentes del vertido sean despreciables (equilibrio densimétrico), independiente si éste surge a la superficie o no.

Rango de marea: Diferencia vertical entre una pleamar y bajamar consecutiva.

Reflujo: Forma inversa del flujo. Es definido como el proceso de descenso del mar sobre la línea de costa. Genera las corrientes de reflujo.

Validación: Proceso para verificar que los resultados modelados, representan de forma aproximada la realidad. De este modo se validan los parámetros ajustados en el proceso de calibración.

Zona de protección litoral (ZPL): Área entre la línea de costa y un punto en mar abierto, la cual asegure tanto la protección de la flora y fauna litoral como el contacto directo con las personas.

Zona de surf: Área comprendida entre el punto de rotura y la línea de costa.

Zonificación de los usos del borde costero: Instrumento que permite ordenar y planificar la distribución de la costa de acuerdo a los diferentes usos y actividades que son desarrolladas al interior de dicho espacio. Por otro lado, considera la protección de los recursos naturales, optimizando sus beneficios socioeconómicos y minimizando los posibles conflictos entre los diferentes usuarios y actividades.

SIMBOLOGÍA

GENERAL

NMO	Nivel del mar observado
NMM	Nivel medio del mar en la zona de estudio
MA	Marea astronómica o gravitacional
RM	Residuos meteorológicos
A_i	Amplitud de cada constituyente armónica [m]
$\omega_i = 2\pi/T_i$	Velocidad angular [rad/hr]
δ_i	Desfase de cada uno de los armónicos [rad]
T_i	Período de cada constituyente [hr]

ASOCIADA A MIKE 21

$N(\sigma, \theta)$	Espectro de densidad del acción del oleaje
$E(\sigma, \theta)$	Espectro de densidad de energía del oleaje
f_r	Frecuencia relativa
$\sigma = 2\pi f_r$	Frecuencia angular relativa
θ	Dirección del oleaje
$N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$	Densidad de acción del oleaje
t	Tiempo
$\vec{x} = (x, y)$	Coordenadas cartesianas
(x, y, t)	Coordenadas del espacio y tiempo
$\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$	Velocidad de propagación para una onda de grupo
$S(S_{in}, S_{nl}, S_{ds}, S_{bot}, S_{surf})$	Parámetro asociado a <i>MIKE 21 SW</i> . Fuentes de energía por viento, transferencia de energía no lineal ola-ola; y disipación de la misma debido a whitecapping, fricción de fondo y rotura de oleaje, respectivamente
\vec{U}	Vector de velocidad de la corriente
c_g	Celeridad de grupo

s	Coordenada espacial en la dirección del oleaje
m	Coordenada perpendicular a s
$\nabla_{\vec{x}}$	Operador diferencial
$\eta(x, y, t)$	Superficie de elevación
$d(x, y, t)$	Profundidad del agua desde el nivel medio
$h = \eta + d$	Profundidad total del agua
$\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz / h$	Componente de velocidad x promediada en la vertical
$\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz / h$	Componente de velocidad y promediada en la vertical
$f = 2\Omega \sin \phi$	Parámetro de Coriolis, donde Ω es la velocidad angular de revolución y ϕ es la latitud geográfica
g	Aceleración de gravedad
ρ	Densidad del agua
ρ_0	Densidad referencial del agua
p_a	Presión atmosférica
$\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$	Tensión del viento sobre la superficie del agua
$\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$	Tensión por fricción del fondo
$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$	Gradientes del tensor de radiación
h_b	Profundidad en la cual se produce la rotura del oleaje
x_b	Distancia medida desde la playa hasta el punto de rotura
$\bar{\eta}_b$	Variación del nivel medio del mar en el punto de rotura
T_{xx}, T_{xy}, T_{yy}	Componentes de esfuerzos laterales T_{ij}
S	Parámetro asociado a <i>MIKE 21 HD</i> . Magnitud de la descarga debido a fuentes puntuales
u_s, v_s	Velocidad con que las fuentes puntuales vierten el fluido
u, v	Parámetro asociado a <i>MIKE 21 AD</i> . Componentes de la velocidad horizontal x e y
D_x, D_y	Coefficientes de dispersión en las direcciones x e y
k	Coefficiente de decaimiento lineal

c	Concentración del contaminante en el medio receptor (unidad arbitraria)
c_S	Concentración del contaminante en la fuente de vertido
Q_S	Fuente de vertido
S	Parámetro asociado a <i>MIKE 21 AD</i> . $Q_S, (c_S - c)$

ASOCIADA A CORMIX 2

H_A	Profundidad media del cuerpo receptor en la zona de vertido
U_A	Velocidad de la corriente en el cuerpo receptor, considerada paralela a la costa
ρ_A	Densidad del fluido receptor
$DISTB$	Distancia entre la costa y el punto medio del difusor
h_0	Altura de las toberas respecto al fondo
D	Diámetro de las toberas
U_0	Velocidad de salida del chorro
ρ_0	Densidad del vertido
C_0	Diferencia entre la concentración inicial del contaminante antes de ser vertido y la concentración del mismo en el cuerpo receptor
θ	Ángulo de inclinación del chorro respecto al fondo horizontal
σ	Ángulo horizontal entre el chorro y la corriente en el medio receptor
β	Ángulo horizontal de los chorros vertidos respecto al tramo difusor
γ	Ángulo horizontal entre el tramo difusor y la corriente presente en el medio receptor
$g = 9.81 [m/s^2]$	Gravedad
$\varepsilon = -\frac{g}{\rho_r} \frac{\partial \rho}{\partial z}$	Gradiente de densidad relativa en el medio receptor
$g_0' = g \frac{\Delta \rho_0}{\rho_A}$	Gravedad reducida
L_D	Longitud del tramo difusor
S	Separación entre toberas

Q_0	Parámetro. Caudal del vertido
q_0	Parámetro. Caudal del vertido por ranura
M_0	Parámetro. Cantidad de movimiento del vertido. Representa energía transmitida al fluido en el momento de su descarga resultando en el transporte del flujo por una cierta distancia
m_0	Parámetro. Cantidad de movimiento del vertido por ranura
J_0	Parámetro. Flotabilidad del vertido, representando el efecto que tiene la gravedad sobre el vertido
j_0	Parámetro. Flotabilidad del vertido por ranura
$L_Q = L_{Q-M}$	Escala flujo de caudal - cantidad de movimiento
$L_M = L_{M-B}$	Escala cantidad de movimiento - flotabilidad
L_m	Escala cantidad de movimiento - corriente del medio receptor
L_b	Escala flotabilidad - corriente del medio receptor
L_m'	Escala cantidad de movimiento - estratificación del medio receptor
L_b'	Escala flotabilidad - estratificación del medio receptor
l_M	Escala cantidad de movimiento - flotabilidad de flujo bidimensional, en ranura
l_m	Escala cantidad de movimiento - corriente del medio receptor para flujo bidimensional, en ranura
l_m'	Escala cantidad de movimiento - estratificación del medio receptor para flujo en ranura
l_b'	Escala flotabilidad - estratificación del medio receptor
l_a	Escala corriente del cuerpo receptor - estratificación del medio

SIGLAS

AD: Advección - difusión.

ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler. Instrumento acústico de efecto Doppler utilizado para medir corrientes.

AMERB: Áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos.

CDT: Sonda oceanográfica para medir temperatura, salinidad y profundidad.

CENDHOC: Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile.

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

CF: Coliformes fecales, parámetro microbiológico.

CORMIX: Cornell Mixing Zone Expert System (sistema experto de la zona de mezcla de la Universidad de Cornell).

DHI: Danish Hydraulic Institute (Instituto de Hidráulica Danés).

DIRECTEMAR: Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante.

ESSBIO S.A.: Empresa encargada de proveer soluciones y servicios de alta calidad en el ciclo integral del agua (agua potable, alcantarillado y descontaminación de aguas servidas) y en la gestión integral de residuos.

HD: Hidrodinámico.

MEDVSA: Metodología de diseño de los vertidos de la salmuera al mar, para reducir el impacto ambiental de las plantas desaladoras.

MixZon: Mixing Zone Specialists.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración de Océanos y Atmósfera de Estados Unidos).

OGCM: Modelos oceánicos de circulación general.

SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

SUBPESCA: Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.

WAVEWATCH III: Modelo de oleaje de tercera generación, desarrollado por la NOAA.

ZPL: Zona de protección litoral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agromet. (2012). *Red agrometeorológica nacional de INIA*. Recuperado el 10 de 11 de 2015, de <http://agromet.inia.cl/>
- Aracil, J., & Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza Editorial.
- Armada de Chile. (2007). *El combate a la contaminación en el medio ambiente acuático*. Chile.
- Blasco, J. (2007). Modelado y simulación numérica de la hidrodinámica marina en zonas costeras. *Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada*, 1-26.
- CEPIS. (1995). *Disposición final de aguas residuales en ciudades costeras, aplicación de emisarios submarinos*. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaca/e/dispagua.html>
- Cifuentes, J., Torres, P., & Frías, M. (1986). *El océano y sus recursos III*. México.
- Cifuentes, J., Torres, P., & Frías, M. (1991). *El futuro de los océanos, XII, Primera edición*. México.
- De Luque, M., García, F., & Palacio, C. (2010). *Determinación del T90 en la bahía de Santa Marta (Col.)*.
- DHI. (2014). *Foro de DHI*. Recuperado el 6 de Junio de 2015, de <http://forum.mikebydhi.com/index.php>
- DHI. (2014). MIKE 21 Flow Model Advection/Dispersion Module. User Guide.
- DHI. (2014). MIKE 21 Flow Model Advection-Dispersion Module. Scientific Documentation.
- DHI. (2014). MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module. Scientific Documentation.
- DHI. (2014). MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module. User Guide.
- DHI. (2014). MIKE 21 Spectral Waves Module. Scientific Documentation.
- DHI. (2014). *MIKE 21 Toolbox*.
- DHI. (2014). MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator. Scientific Documentation.
- DIRECTEMAR. (2006). *Guía metodológica sobre procedimientos y consideraciones ambientales básicas para la descarga de aguas residuales mediante emisarios submarinos*.
- DIRECTEMAR. (2014). *Armada de Chile Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante*. Recuperado el Julio de 2015, de <http://www.directemar.cl/>
- DIRECTEMAR. (2015). *Registro histórico de la ZPL*. Recuperado el 14 de 07 de 2015, de http://www.directemar.cl/images/stories/Descargas_SPMAA/RESOLUCIONES/2012/Registros_ZPL_2002-2015.pdf

- Fernández, D. C. (2012). Estudio integral de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en Chelem, Yucatán. México.
- García, R. (2009). Evaluación del potencial de la energía originada por corrientes de marea para generación en sistemas aislados. Chile.
- Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental. Universidad de Cantabria. (1995). *Metodología de estudio de los saneamientos litorales*. España.
- Gutiérrez Delgado, A. R. (2012). Dispersión y caoticidad de partículas pasivas en las aguas oceánicas de la región occidental de Cuba. La Habana, Cuba.
- Hofer, K. (1978). Eine verbesserte Theorie turbulenter Freistrahlen im stratifizierten Medium und ihr Vergleich mit dem Experiment. *Mitteilung VAW-ETH No. 31*.
- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*.
- InduAmbiente. (15 de Mayo de 2015). *www.induambiente.com*. Obtenido de Portal de descontaminación industrial y recursos energéticos: <http://www.induambiente.com/agua/un-largo-y-angosto-tratamiento.html>
- Instituto nacional de normalización. (1978). *NCh1333 Of. 78 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*. Santiago.
- Leppe, A., & González, D. (1997). *El emisario submarino como sistema de tratamiento de aguas servidas*. Concepción.
- Ley N° 19.300. (1994). *Sobre las bases generales del medio ambiente*. Chile.
- López, A. (2013). Tema 13: 1. Hidrodinámica de la zona de rompientes. Universidad de Granada.
- Ludwig, R. (1988). *Ubicación y diseño de emisario submarinos*.
- MEDVSA. (2010). Metodología de diseño de los vertidos al mar de la salmuera, para reducir el impacto ambiental de las plantas desaladoras. España.
- Metcalf & Eddy. (1985). Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Barcelona, España: Labor.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). *D.S. N° 90 Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales*. Santiago.
- MixZon Inc. (2007). CORMIX User Manual. United States.
- NOAA. (25 de Marzo de 2008). *NOAA Ocean Service Education*. Obtenido de NOAA Ocean Service Education: <http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/currents/05currents1.html>
- NOAA. (11 de 05 de 2015). *National Ocean Service*. Obtenido de National Ocean Service: http://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/
- Nuño, S. (2008). La Tierra en que vivimos - La Serena. Chile.
- OCEANA. (2007). *Emisario submarinos: El mar no es un retrete*.

- Padilla, L., & Mondaca, A. (1995). *Caracterización microbiológica de un emisario submarino: Evaluación de su eficiencia*. Concepción.
- Platónov, A. (2002). Aplicación de imágenes de satélite SAR en los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el Mediterráneo noroccidental. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Revilla, J., Medina, R., Nikolov, K., Roldán, A., Juanes de la Peña, J., & Álvarez, C. (1995). *Metodología de estudio de los saneamientos litorales*. Grupo de emisarios submarinos e hidráulica ambiental. Universidad de Cantabria.
- Salas, H. (2000 actualización de 1988). *Emisarios submarinos. Enfoque general, conceptos básicos de diseño y requerimiento de datos para América Latina y el Caribe*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Sámano, M. (2011). *Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad del agua en un sistema de información geográfica*. Santander: Universidad de Cantabria.
- SHOA - pub. 3000. (2015). *Catálogo de cartas y publicaciones náuticas*.
- SHOA - pub. 3013. (1992). *Glosario de marea y corrientes*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- SHOA - pub. 3202. (1999). *Método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- Sojachenski, M. (2005). Algoritmos de acoplamiento para modelos de campo cercano y campo lejano para la predicción de descargas de efluentes de aguas residuales tratadas en la costa oceánica. Valparaíso, Chile.
- SUBPESCA. (1996). *Subsecretaría de Pesca y Acuicultura*. Recuperado el Agosto de 2015, de <http://www.subpesca.cl/>
- SUBPESCA. (2013). *Visualizador de mapas*. Obtenido de <http://200.68.53.58/visualizador/>
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2014). *Respuesta SAC N° 10202516*.
- Teknimap Ambiental. (1993). Algunas reflexiones sobre la contaminación marina. <http://www.teknimap.es/>.
- The COMET Program. (2005). *Definición de mesoescala*. Recuperado el 2016, de [www.meted.ucar.edu: https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mesodefn_es/](http://www.meted.ucar.edu:https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mesodefn_es/)
- The COMET Program. (2012). *Rip Currents: Nearshore Fundamentals*. Recuperado el 04 de 02 de 2016, de <http://www.meted.ucar.edu/>
- Tolman, H. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCHIII version 3.14.
- Troya, L. (2012). Determinación de la zona de mezcla de los vertidos hídricos en el estuario de Guadiana. Sevilla, España.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2003). Coastal engineering manual. Washington, D.C., United States.

Universidad de Valparaíso. (2009). *Diagnóstico de los efectos de las descargas líquidas en la bahía de Coquimbo*. Valparaíso.

9 ANEXOS

ANEXO A

A.1 EXTRACTO D.S. N° 90/2000

Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

Específicamente, el punto de interés de la norma para la presente Memoria es la sección 4.4 titulada "Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos", la cual especifica las concentraciones máximas de diferentes contaminantes en la ZPL (Tabla 9-1). Es de particular interés el valor límite de coliformes fecales para dicha zona, correspondiente a 1000 [NMP/100 ml].

Por otro lado, establece la concentración máxima de coliformes fecales para áreas destinadas tanto al manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERB) como a la acuicultura, correspondiente a 70 [NMP/100 ml].

Tabla 9-1: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la ZPL.

Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible	Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	mg/L	20	Hierro disuelto	mg/L	10
Aluminio	mg/L	1	Manganeso	mg/L	2
Arsénico	mg/L	0.2	Mercurio	mg/L	0.005
Cadmio	mg/L	0.02	Molibdeno	mg/L	0.1
Cianuro	mg/L	0.5	Níquel	mg/L	2
Cobre	mg/L	1	Nitrógeno total kjeldahl	mg/L	50
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1000 - 70	PH	Unidad	6-9
Índice de fenol	mg/L	0.5	Plomo	mg/L	0.2
Cromo hexavalente	mg/L	0.2	SAAM	mg/L	10
Cromo total	mg/L	2.5	Selenio	mg/L	0.01
DBO ₅	mg O ₂ /L	60	Sólidos sedimentables	ml/l/h	5
Estaño	mg/L	0.5	Sólidos suspendidos Totales	mg/L	100
Fluoruro	mg/L	1.5	Sulfuros	mg/L	1
Fósforo	mg/L	5	Zinc	mg/L	5
Hidrocarburos totales	mg/L	10	Temperatura	°C	30
Hidrocarburos volátiles	mg/L	1			

Fuente: Adaptado Tabla 4 del D.S. N° 90/2000.

A.2 EXTRACTO NCH1333 OF. 78

Requisitos de calidad de agua para diferentes usos.

La presente norma fija los criterios de calidad del agua de acuerdo a su uso y teniendo como pauta de evaluación los aspectos físicos, químicos y biológicos de masas o cursos de agua. No obstante, toma en cuenta la capacidad de autopurificación y dilución que posee el cuerpo receptor.

Específicamente, el punto de interés es la sección 7 titulada "*Requisitos para agua destinada a recreación y estética*".

En cuanto a la estética, la norma establece que debe estar exenta de las siguientes sustancias atribuibles a descargas de residuos.

- Materias que sedimenten formando depósitos objetables.
- Desechos flotantes, aceite, espuma y otros sólidos.
- Sustancias que produzcan color, olor, sabor o turbiedad objetable.
- Materias, incluyendo radionucleídos, en concentraciones o combinaciones que sean tóxicas o que produzcan reacciones fisiológicas indeseables en seres humanos, peces, otros animales y plantas.
- Sustancias y condiciones o combinaciones de éstas, en concentraciones que produzcan vida acuática indeseable.

En cuanto a la recreación con contacto directo (como por ejemplo, natación, buceo, esquí acuático) debe cumplir como mínimo los requisitos establecidos en la Tabla 9-2.

Por último, el agua destinada a recreación sin contacto directo debe cumplir los mismos requisitos que se indican para la recreación con contacto directo, pero solamente en las siguientes características:

- Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales.
- Aceites flotantes y grasas.
- Aceites y grasas emulsificadas.
- Sustancias que produzcan olor o sabor inconvenientes.

Tabla 9-2: Requisitos del agua para recreación con contacto directo.

Características	Requisito
PH	6.5 a 8.3 excepto si las condiciones naturales de las aguas muestran valores diferentes, pero en ningún caso menor de 5 o mayor de 9
Temperatura máxima en °C	30
Claridad mínima	Visualización de discos Secchi a 1.2 [m] de profundidad
Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales	Ausentes
Aceites flotantes y grasas, mg/l, máximo	5
Aceites y grasas emulsificadas, mg/l, máximo	10
Color, unidad Escala Pt-Co, máximo	100
	Ausencia de colorantes artificiales
Turbiedad, unidades Escala Sílice, máximo	50
Coliformes fecales	1000
Sustancias que produzcan olor o sabor inconvenientes	Ausentes

Fuente: Adaptado Tabla 3 de la NCh1333 Of. 78.

A.3 FUENTES DE DESCARGA EN LA COSTA CHILENA

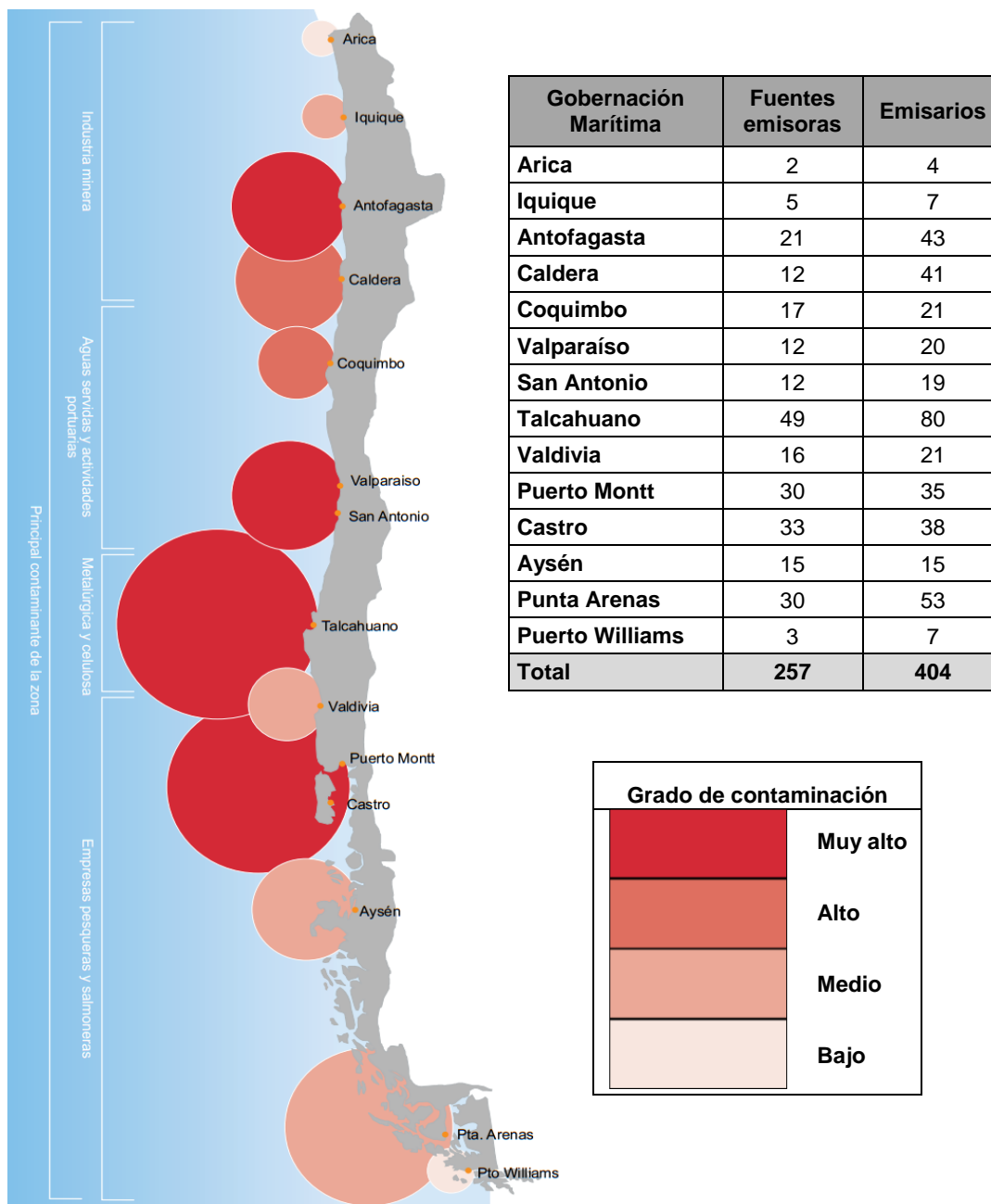


Figura 9-1: Total de fuentes de vertido en la costa chilena establecida por la DIRECTEMAR.

Fuente: Adaptado de OCEANA (2007).

ANEXO B

B.1 GENERACIÓN DE LA MAREA

La marea es definida como el ascenso y descenso del nivel del mar, originando oscilaciones de largo período. Su generación resulta, principalmente, de la atracción gravitacional que la Luna y el Sol ejercen sobre los océanos de la Tierra (SHOA - pub. 3013, 1992).

La atracción que ejerce la Luna sobre la cara terrestre más alejada de ella, es menor y la inercia trata de alejar la hidrosfera del satélite natural, generando como respuesta la protuberancia observada en la Figura 9-2, a. Por otro lado, en la cara terrestre ubicada frente a la Luna, la atracción gravitacional es más intensa y la inercia trata de mantener la capa fluida en su lugar. Sin embargo, la fuerza gravitacional es más fuerte y genera una segunda protuberancia (Figura 9-2, b). Es preciso indicar que la posición de dichas protuberancias no es estática, sino más bien, dependen del movimiento que la Luna realiza alrededor de la Tierra (NOAA, 2015).

Por su parte, el Sol también desempeña un papel importante tanto en la posición como el tamaño de las protuberancias, sin embargo, su análisis escapa de los fines de la presente Memoria.

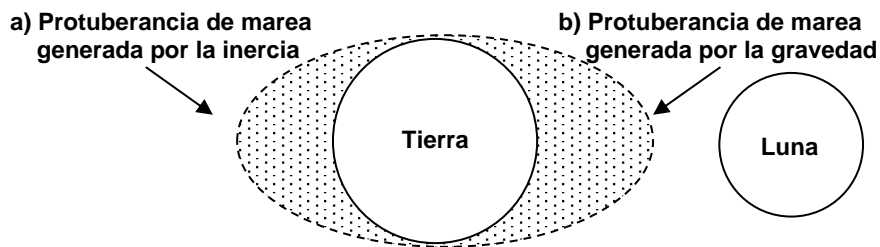


Figura 9-2: Efectos de la atracción gravitacional entre la Tierra y la Luna, sobre el océano.

Fuente: Adaptación a partir de NOAA (2015).

Los principales términos utilizados en la descripción de la marea, se mencionan a continuación. Su respectiva definición se encuentra en la sección correspondiente al *Glosario*.

- Marea alta o pleamar
- Marea baja o bajamar
- Flujo y reflujo
- Sicigia o marea viva
- Cuadratura o marea muerta

En particular, cuando se registra la altura de la superficie del cuerpo de agua a través de un mareógrafo, se aprecia una desnivelación (*NMO*) que es igual a la suma de tres componentes fundamentales. Las cuales se consideran en la ecuación (9.1) y corresponden

al nivel medio del mar (*NMM*), la marea astronómica (*MA*) y los residuos meteorológicos (*RM*).

$$NMO = NMM + MA + RM \quad (9.1)$$

El primero corresponde a un plano que es extraído de un registro horario del nivel del mar, medido dentro de la zona de estudio (SHOA - pub. 3202, 1999).

Por otro lado, la marea astronómica puede ser expresada matemáticamente como la sumatoria de una serie de constituyentes armónicas presentes en la onda de marea (9.2), las cuales son producto de movimientos periódicos generados por la interacción entre los astros.

$$MA = \sum_i^n A_i \cos(\omega_i t + \delta_i) \quad (9.2)$$

De forma simultánea a la influencia de los astros sobre hidrósfera terrestre, se presentan efectos meteorológicos, los cuales producen alteraciones en el nivel del mar conocidos como residuos meteorológicos. Dichos efectos son de tipo aleatorio y corresponden a oscilaciones generadas por la acción conjunta de los gradientes de presión atmosférica (marea barotrópica) y a la tensión tangencial, producida por el viento local, sobre la superficie de agua.

En cuanto al análisis de la marea, se puede realizar a través de los métodos detallados a continuación.

1. Análisis armónico

El presente análisis permite la descomposición un registro de marea, en las constituyentes armónicas que la conforman, lo que posibilita futuros pronósticos (SHOA - pub. 3013, 1992).

En la práctica, es posible generar un registro de la marea astronómica a partir de un modelo global de mareas. De dicha forma, se pueden sumar los efectos producidos por la acción del viento sobre la superficie del mar y el nivel medio del mismo en la zona de interés.

2. Análisis no armónico

Corresponde al cálculo de un conjunto de valores a partir del análisis de un registro de desnivelaciones horarias del mar, desde los cuales se pueden graficar los planos de marea correspondientes al período de observación (Figura 9-3).

Para efectuar el cálculo mencionado, el registro debe estar completo y ordenado desde las 0 a las 23 horas (SHOA - pub. 3202, 1999).

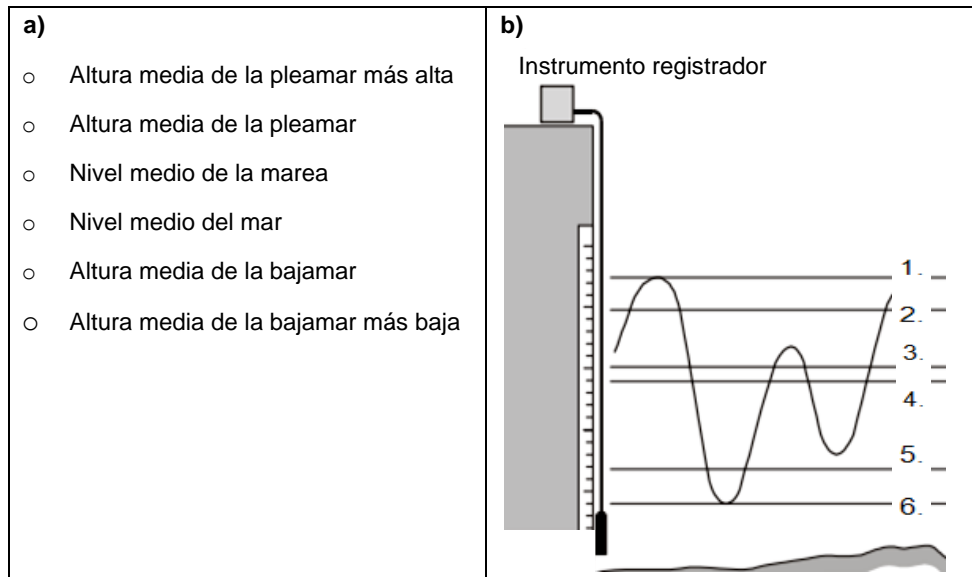


Figura 9-3: Principales planos de marea.
a) Leyenda. b) Representación gráfica.

Fuente: Adaptado del SHOA - pub. 3202 (1999).

Por último, cabe considerar la existencia de una relación entre la desnivelación provocada por la marea y las corrientes tanto de flujo como refluo, inducidas por la misma. Una forma simplificada para representar dicha relación, en la condición abierta de un modelo bidimensional, es a través de la ecuación (9.3) donde se calculan los vectores de velocidad tanto en el plano x como y .

$$u = \pm \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \eta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad \& \quad v = \pm \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \eta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (9.3)$$

B.2 GENERACIÓN DEL VIENTO

Se produce a partir del movimiento horizontal del aire desde los anticiclones (*A*) hacia las depresiones (*B*), generando patrones de circulación de viento como la observada en la Figura 9-4, donde su intensidad estará directamente relacionada con los gradientes de presión generados. Para nuestro país, los centros de presión *A* y *B* se encuentran en el Pacífico Sureste y en la región Indonésica, respectivamente.

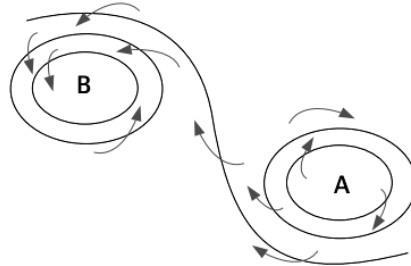


Figura 9-4: Circulación del aire a partir de los centros de presión.

Fuente: (NOAA, 2008).

Por otro lado, es esencial contar con un pronóstico de vientos para predecir el oleaje a través de modelos globales, tal como WAVEWATCH III el cual fue desarrollado por la NOAA.

Usualmente se considera que las corrientes superficiales del mar, producidas por el viento, tienen como límite una profundidad de 100 metros (NOAA, 2008). Sin embargo, su dirección se verá afectada por el efecto de Coriolis (Figura 9-5, a), tanto en la capa superficial como en las inferiores, generando desviaciones a lo largo de la columna de agua teniendo como consecuencia la Espiral de Ekman (Figura 9-5, b).

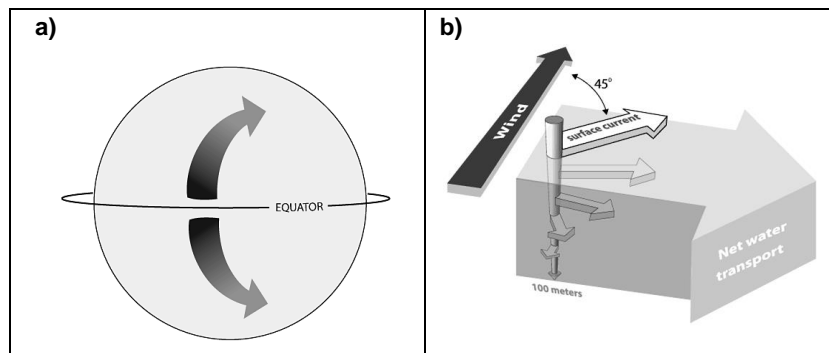


Figura 9-5: Fenómenos oceánico - atmosféricos.

a) Efecto de Coriolis sobre los hemisferios de la Tierra. b) Espiral de Ekman.

Fuente: (NOAA, 2008).

B.3 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Las olas se producen luego que el viento circula sobre la superficie del océano. La zona de generación recibe el nombre de Fetch, se encuentra limitada por un área donde circula el viento en forma constante y sin variaciones abruptas en la dirección del mismo. También puede ser limitado por características topográficas, como las presentes en zonas costeras o en el interior de grandes lagos. Por otro lado, si existe un gran cambio de la velocidad o dirección, el Fetch debe ser redefinido.

Cuando el campo de viento es constante tanto en su dirección como intensidad, el oleaje se propaga fuera del Fetch sin que sus características sean alteradas, ya que la ola alcanza un estado de equilibrio (completamente desarrollada). Este tipo de oleaje recibe el nombre de Swell y entre sus principales características destaca su distribución ordenada, donde es posible apreciar una tendencia direccional definida, y la capacidad de propagarse por largas distancias sin una pérdida significativa de energía.

Por otro lado, cuando el oleaje se encuentra con un obstáculo en su camino, se produce la difracción y reflexión (Figura 9-6, a - e), las cuales se definen respectivamente como el fenómeno de transferencia de energía a la "sombra" generada por el obstáculo y el proceso en que la ola es reflejada por un *cuerpo* que impide su desplazamiento (buques, rocas emergidas y hasta la misma costa). Además, en el momento que las orbitas inferiores de la ola comienzan a interactuar con el fondo, se presentan los fenómenos de refracción y shoaling (Figura 9-6, b - c), los que modifican la dirección de propagación y la alturas de las olas, respectivamente. Por último, en la costa tiene lugar la rotura del oleaje y con ello, se disipa la energía del mismo (Figura 9-6, d). Cabe destacar que los fenómenos mencionados tienden a coexistir, presentando zonas en que algunos predominan respecto de otros.

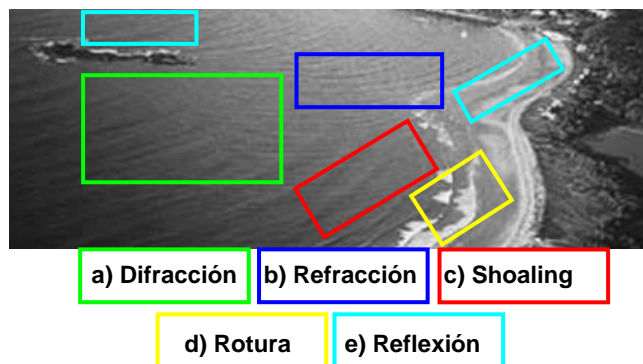


Figura 9-6: Fenómenos de propagación del oleaje.

Fuente: Adaptado de Fernández (2012).

ANEXO C

C.1 ESTRUCTURA DEL MODELO CORMIX

La presentación de la interfaz del modelo es a través de siete pestañas (Figura 9-7), donde las primeras cinco están destinadas al ingreso de información; mientras las últimas dos, cumplen la función de procesamiento de resultados.

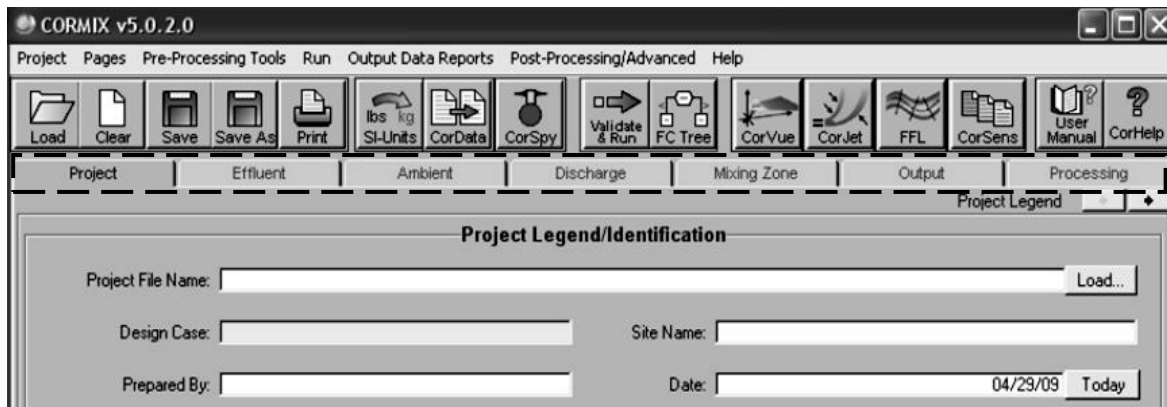


Figura 9-7: Menú principal de la interfaz de usuario del software CORMIX.

Fuente: Adaptado de MixZon Inc (2007).

Las diferentes pestañas se detallan a continuación:

- *Descripción del proyecto (Project):* Especifica el caso de simulación a través del ingreso de información básica del proyecto.
- *Características del efluente (Effluent):* Se presentan diferentes alternativas de contaminantes entre conservativos, no conservativos, descargas térmicas y salinas. Por otro lado, se debe ingresar el caudal, temperatura y concentración del contaminante de interés presente en el efluente.
- *Condiciones del medio receptor (Ambient):* En esta pestaña se deben introducir tanto los parámetros físicos como geométricos necesarios para caracterizar el cuerpo receptor. Entre los parámetros físicos más importantes se encuentra la densidad de la columna de agua, donde CORMIX caracteriza cuatro tipos de distribución de densidad vertical a través de una esquematización simplificada e ilustrada en la Figura 9-8; sin embargo, la última categoría sólo se encuentra disponible para versiones más avanzadas del software.
 - *Tipo A:* Perfil lineal de densidad (*utilizado en la presente Memoria*).
 - *Tipo B:* Dos capas de densidad constantes intersecadas por un salto de la misma (ubicación de la picnoclina).
 - *Tipo C:* Capa de densidad superficial constante, intersecada por un salto de la misma (ubicación de la picnoclina), para finalizar con un perfil en la sección inferior.

- *Tipo D*: Se aprecian tres capas de densidad al igual que en el *tipo C*, con la diferencia de que cada una de ellas varía en función de la profundidad (puede, o no, presentar picnoclina. Depende de que tan brusco sea el cambio de densidad en la capa intermedia).

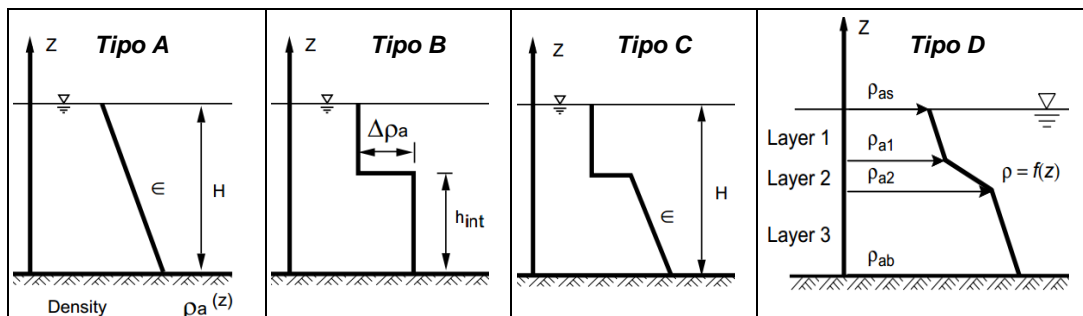


Figura 9-8: Representación de la estratificación del medio receptor mediante CORMIX.

Fuente: Adaptado de MixZon Inc (2007).

- *Características del dispositivo de vertido (Discharge)*: Se diferencia entre vertidos sumergidos a través de emisario único (*CORMIX 1*), emisario terminado en difusor (*CORMIX 2*) y vertidos superficiales (*CORMIX 3*).

Debido a los fines de la presente Memoria, se especificaron solamente las características de *CORMIX 2*. En dicha subpestaña, se establecen las condiciones geométricas del difusor (Figura 9-9), donde el origen del sistema coordenado se ubica en el centro del difusor.

Por último y según lo establecido en la "Ficha 3.2. Subsistema *CORMIX 2 V.1.1*" perteneciente al proyecto MEDVSA (2010), *CORMIX* permite establecer numerosas configuraciones del difusor. No obstante, en términos prácticos, el modelo simplifica dichas configuraciones y calcula el vertido a través de los dos diseños descritos a continuación.

- *Configuración 1*: Difusor con elevadores verticales de una tobera, con chorros unilaterales y perpendiculares al difusor.
- *Configuración 2*: Cuando las características geométricas del difusor genera una interacción entre los chorros expulsados, se asume la hipótesis de vertido a través de *ranura equivalente*, la cual recorre completamente el difusor. La dirección de la ranura es vertical y perpendicular al difusor.

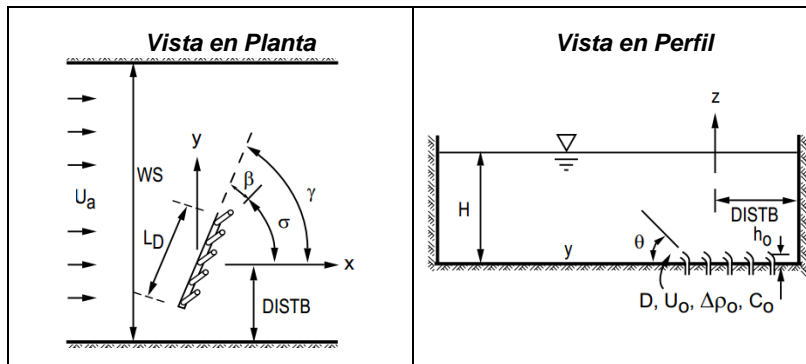


Figura 9-9: Parámetros esquematizados y definidos por CORMIX 2.

Fuente: Adaptado de MixZon Inc (2007).

- **Zona de mezcla (Mixing Zone):** Se especifica, por un lado si el contaminante vertido en el medio receptor es toxico o no; mientras por otro, existe posibilidad de establecer límites del área donde se producirá la zona de mezcla.
- **Resultados (Output):** Entre los archivos de salidas seleccionables se encuentran.
 - *Archivo de predicción (.prd).*
 - *Informe de sesión (.ses).*
 - *Descripción de la clase de flujo (.flw).*
 - *Recomendaciones de diseño (.rec).*
 - *Registro de procesamiento (.jrn).*
 - **Opciones de tratamiento de la información (Processing):** Se establecen las opciones disponibles para realizar la modelación ya configurada, eligiendo entre una simulación completa y directa o por partes. Es decir, validando los datos ingresados, calculando los parámetros necesarios para describir el comportamiento del chorro en el campo cercano y finalmente, clasificando el flujo simulado.

C.2 BASE TEÓRICA DEL MODELO CORMIX

Modelo basado en el análisis dimensional de los procesos de mezcla, a partir de la definición de variables cuya agrupación genera diversos parámetros. Específicamente, cuando no existe interacción entre chorros expulsados por el difusor, se calculan los parámetros asociados al caudal, cantidad de movimiento y flotabilidad del vertido, a través de las ecuaciones respectivas (9.4, a - b - c). Mientras, cuando existe interacción entre los chorros, las ecuaciones respectivas corresponden a (9.5, a - b - c).

$$\begin{array}{lll}
 \text{a) } Q_0 = \frac{\pi}{4} D^2 U_0 & \text{b) } M_0 = U_0 Q_0 & \text{c) } J_0 = g'_0 Q_0 \quad (9.4)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
 \text{a) } q_0 = \frac{Q_0}{L_D} & \text{b) } m_0 = \frac{M_0}{L_D} & \text{c) } j_0 = \frac{J_0}{L_D} \quad (9.5)
 \end{array}$$

Los parámetros indicados permiten caracterizar diferentes clases de flujos, asociados a sus respectivos paquetes de cálculo (MixZon Inc, 2007). Se pueden definir más de 35 clases de flujos dependiendo de las variables ingresadas en el modelo, el cual contiene más de 25 paquetes de cálculo para la completa caracterización tanto del chorro vertido como su posterior pluma de descarga. Cabe destacar que el movimiento de esta última, está determinada tanto por la flotabilidad del fluido vertido como por las corrientes presentes en el medio receptor.

Por otro lado, el programa determina diferentes escalas de longitud derivadas tanto de la relación de los flujos entre sí como de parámetros ya definidos. Las cuales se agrupan en dos categorías (detalladas a continuación), asociadas a la presencia de una interacción entre los chorros expulsados por el difusor.

Sin interacción entre los chorros: Medio receptor con densidad uniforme.

- *Escala flujo de caudal - cantidad de movimiento* ($L_Q = L_{Q-M}$): Representa la distancia a partir de la cual el comportamiento del flujo pasa de estar dominado por el caudal a estar dominado por la cantidad de movimiento transmitido durante la descarga.
- *Escala cantidad de movimiento - flotabilidad* ($L_M = L_{M-B}$): Representa la distancia a partir de la cual el comportamiento del flujo pasa de estar dominado por la cantidad de movimiento transmitida durante la descarga a estar dominado por la flotabilidad.

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{J_0^{1/2}} \quad (9.6)$$

- *Escala cantidad de movimiento - corriente del medio receptor* (L_m): Representa la distancia a partir de la cual el comportamiento del chorro pasa a estar dominado por la cantidad de movimiento transmitida durante la descarga a estar dominado por la corriente presente en el cuerpo de agua.

$$L_m = \frac{M_0^{1/2}}{U_A} \quad (9.7)$$

- *Escala flotabilidad - corriente del medio receptor* (L_b): Representa la distancia a partir de la cual la pluma pasa de estar dominada por la flotabilidad a estar dominada por la corriente presente en el cuerpo de agua.

$$L_b = \frac{J_0}{U_A^3} \quad (9.8)$$

Sin interacción entre los chorros: Medio receptor estratificado.

- *Escala cantidad de movimiento - estratificación del medio receptor (L_m'):* Representa la distancia a la cual el chorro pasa de estar dominado por la cantidad de movimiento de la descarga a estar dominado por la estratificación presente en el cuerpo de agua.

$$L_m' = \frac{M_0^{1/4}}{\varepsilon^{1/4}} \quad (9.9)$$

- *Escala flotabilidad - estratificación del medio receptor (L_b'):* Representa la distancia a partir de la cual la pluma pasa de estar dominada por la flotabilidad a estar dominada por la estratificación presente en el cuerpo de agua.

$$L_b' = \frac{J_0^{1/4}}{\varepsilon^{3/8}} \quad (9.10)$$

Con interacción entre los chorros: Medio receptor con densidad uniforme.

- *Escala cantidad de movimiento - flotabilidad de flujo bidimensional, en ranura (l_M):* Representa la distancia a partir de la cual el comportamiento del flujo bidimensional (representado como un vertido por ranura) pasa de estar dominado por la cantidad de movimiento transmitida durante la descarga a estar dominado por la flotabilidad.

$$l_M = \frac{m_0}{j_0^{2/3}} \quad (9.11)$$

- *Escala cantidad de movimiento - corriente del medio receptor para flujo bidimensional, en ranura (l_m):* Representa la distancia a partir de la cual el chorro bidimensional (representado como un vertido por ranura) pasa de estar dominado por la cantidad de movimiento transmitida durante la descarga a estar dominado por la corriente del cuerpo de agua.

$$l_m = \frac{m_0}{U_A^2} \quad (9.12)$$

Con interacción entre los chorros: Medio receptor estratificado.

- *Escala cantidad de movimiento - estratificación del medio receptor para flujo en ranura (l_m'):* Representa la distancia a partir de la cual el chorro (representado como un vertido por ranura) pasa de estar dominado por la cantidad de movimiento transmitida durante la descarga a estar dominado por la estratificación del cuerpo de agua.

$$l_m' = \frac{m_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/3}} \quad (9.13)$$

- *Escala flotabilidad - estratificación del medio receptor (l_b'):* Representa la distancia a partir de la cual la pluma pasa de estar dominada por la flotabilidad a estar dominada por la estratificación del cuerpo de agua.

$$l_b' = \frac{j_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/2}} \quad (9.14)$$

- *Escala corriente del cuerpo receptor - estratificación del medio (l_a):* Representa la distancia a partir de la cual la pluma pasa de estar dominada por la corriente del cuerpo de agua a estar dominada por la estratificación del mismo.

$$l_a = \frac{U_A}{\varepsilon^{1/2}} \quad (9.15)$$

Por último, *CORMIX* clasifica los vertidos en diversas categorias entre las cuales se encuentran los vertidos sobre el fondo o superficiales, en medios ambientes acuáticos con densidad homogénea o estratificados, y con presencia de corrientes o no. Subdividiéndolas, finalmente, en clases de flujo.

C.3 VISCOSIDAD DE REMOLINO O TURBULENTA - MIKE 21

Las componentes de los esfuerzos laterales (T_{ij}), presentes en las ecuaciones de conservación del momentum (3.3) y (3.4), son calculadas a partir de las formulaciones presentes en la ecuación (9.16). Las cuales consideran la advección diferencial y la fricción tanto viscosa como turbulenta.

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (9.16)$$

Donde A es el coeficiente de viscosidad turbulenta asociado a un plano horizontal; mientras (\bar{u}, \bar{v}) , corresponde a la velocidad de la corriente promediada en la vertical para los ejes x e y .

Específicamente en *MIKE 21 HD*, dicho coeficiente puede ser distribuido espacialmente con un valor constante o variable. Además, ser determinado a partir de las siguientes opciones.

- Sin viscosidad turbulenta. Donde $A = 0$.
- Determinado a través del ingreso directo de la viscosidad de Eddy. Donde A es constante en el tiempo, pero tiene la posibilidad de ser variable en el espacio.
- Determinado a través del cálculo de la viscosidad de Eddy, utilizando la relación propuesta por Smagorinsky.

Esta última opción se calcula a través de la ecuación (9.17), la cual relaciona el coeficiente de viscosidad de Eddy con escalas de longitud característica.

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{12}S_{12}} \quad (9.17)$$

Donde l es una longitud característica y c_s es la constante de Smagorinsky, la cual se recomienda que varíe entre 1 y 0.25. Mientras, la tasa de deformación está dada por la ecuación (9.18).

$$S_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (9.18)$$

C.4 FRICCIÓN PRODUCIDA POR INTERACCIÓN CON EL FONDO - MIKE 21

La tensión por fricción de fondo ($\overline{\tau_b}$) es determinada por la ecuación (9.19) la cual, a su vez, es parte de las ecuaciones de conservación del momentum (3.3) y (3.4).

$$\frac{\overline{\tau_b}}{\rho_0} = c_f \overline{u_b} |\overline{u_b}| \quad (9.19)$$

Donde c_f es el coeficiente de arrastre del fondo, ρ_0 es la densidad del agua y $\overline{u_b} = (u_b, v_b)$ es la velocidad del flujo sobre el fondo. Sin embargo, para cálculos bidimensionales, corresponde a la velocidad del flujo promediada en la vertical.

Además el coeficiente mencionado, puede ser calculado a través del número de Chezy (C) o de Manning (M), siendo sus respectivas ecuaciones (9.20) y (9.21).

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (9.20)$$

$$c_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2} \quad (9.21)$$

De las mismas se desprende que a menor coeficiente de fricción se produce un aumento en la fricción por fondo, y viceversa. Siendo h la profundidad del agua y g la aceleración de gravedad.

Específicamente en *MIKE 21 HD*, la fricción por fondo puede ser distribuida con un valor constante o variable. Además, ser determinada por una de las siguientes opciones.

- *Sin resistencia de fondo.*
- *Número de Chezy:* Para aplicaciones costeras los valores recomendados varían entre 30 y 50 [$m^{1/3}/s$].
- *Número de Manning:* Para aplicaciones costeras los valores recomendados varían entre 20 y 40 [$m^{1/3}/s$].

C.5 FRICCIÓN PRODUCIDA POR EL VIENTO - MIKE 21

La tensión del viento sobre la superficie del agua ($\vec{\tau}_s$) es determinada por la relación empírica observada en la ecuación (9.22), la cual a su vez, es parte de las ecuaciones de conservación del momentum (3.3) y (3.4).

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |u_w| \vec{u}_w \quad (9.22)$$

Donde c_d es el coeficiente de arrastre del viento, ρ_a es la densidad del aire y $\vec{u}_w = (u_w, v_w)$ es la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del mar.

El coeficiente mencionado, puede ser ingresado en el modelo *MIKE 21 HD* como un parámetro constante o dependiente de la velocidad del viento, a través de la ecuación (9.23). Dicha formulación corresponde a los estudios realizados por Jin Wu (1980, 1994), los que entregaron resultados consistentes para aplicaciones en zonas costeras.

$$c_d = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad (9.23)$$

Específicamente, se relaciona la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del mar (w_{10}), con los parámetros $c_a = 0.001255$, $c_b = 0.002425$, $w_a = 7$ [m/s] y $w_b = 25$ [m/s], determinados en las investigaciones de Jin Wu.

ANEXO D

D.1 DISPERSIÓN DIRECCIONAL DEL OLEAJE

El presente parámetro, de acuerdo a la configuración de *MIKE 21 SW*, fue caracterizado como *Directional spreading index* igual a 4 tanto para las condiciones medias como extremas históricas de oleaje.

Su transformación desde la *Directional standard deviation* (Figura 9-10) se realizó de acuerdo al manual del modelo, a través de la Tabla 9-3.

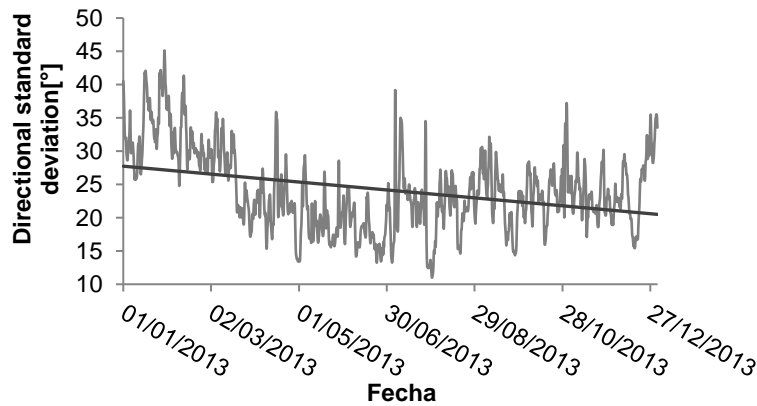


Figura 9-10: Dispersión direccional del oleaje para la bahía de Coquimbo, año 2013.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que este último parámetro (*Directional standard deviation*) se calculó a través del modelo WAVEWATCH III utilizando la ecuación (9.24) presente en el manual (Tolman, 2009).

$$\sigma_{\theta} = \left[2 \left\{ 1 - \left(\frac{a^2 + b^2}{E^2} \right)^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (9.24)$$

Donde:

σ_{θ} = Directional standard deviation

$$a = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos(\theta) F(f_r, \theta) df_r d\theta$$

$$b = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin(\theta) F(f_r, \theta) df_r d\theta$$

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f_r, \theta) df_r d\theta$$

$F(f_r, \theta)$ = Espectro de densidad de energía bidimensional

Tabla 9-3: Tabla de transformación entre parámetros de Dispersión direccional.

Directional spreading index	Directional standard deviation [°]
1	39.15
2	32.52
3	28.36
4	25.45
5	23.28
6	21.58
7	20.20
8	19.05
9	18.08
10	17.24
11	16.52
12	15.87

Fuente: Adaptado de DHI (2014).

D.2 RESUMEN DEL REGISTRO REALIZADO POR LOS CORRENTÓMETROS

En la Tabla 9-4 se observa el resumen de las corrientes registradas en los puntos de medición *F1* y *F2*. Su tiempo de registro promedio es de 2.5 días y se desconoce los períodos exactos de medición.

Tabla 9-4: Corrientes superficiales registradas por correntómetros anclados. Puntos de medición *F1* y *F2*.

Estación	Fecha muestreo [mes/año]	Tiempo de registro [días]	Velocidad promedio [m/s]
F1	01/2008	1.95	0.02
F1	05/2008	2.26	0.05
F1	08/2008	2.13	0.05
F1	10/2007	2.42	0.03
F2	01/2008	1.97	0.04
F2	05/2008	2.25	0.04
F2	08/2008	2.12	0.03
F2	10/2007	2.31	0.05

Fuente: Adaptado del estudio realizado por la Universidad de Valparaíso (2009).

D.3 UBICACIÓN DE LA ZPL Y AMERB PARA LA BAHÍA DE COQUIMBO

En la Tabla 9-5 se presenta el ancho de la zona de protección litoral, correspondiente a la bahía de Coquimbo y el límite del indicador microbiológico para dicha zona según la norma.

Tabla 9-5: Ancho de la ZPL para la bahía de Coquimbo.

N°	Año	Empresa responsable del cálculo	Ancho ZPL [m]	Cuerpo de agua receptor	Concentración de CF permitidos por norma [NMP/100 ml]
37	2003	ESSCO S.A	676	Bahía de Coquimbo	1000

Fuente: Adaptado DIRECTEMAR (2015).

La Tabla 9-6 detalla las características de las áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos trazados dentro de la bahía. Éstas corresponden a zonas de acceso exclusivo para organizaciones de pescadores artesanales legalmente constituidos, donde se deben realizar tareas que favorezcan la recuperación y manejo de los recursos bentónicos explotados. El trazado de las áreas sensibles presentes en la bahía se observa la Figura 9-11.

Tabla 9-6: Características de las AMERB presentes en la bahía de Coquimbo.

Nombre AMERB	Categoría	Organización	Concentración de CF permitidos por norma [NMP/100 ml]
Punta Teatinos	Operativo	Asociación Gremial de pescadores artesanales y buzos mariscadores de caleta San Pedro La Serena	70
Peñuelas Sector A y B	Operativo	Asociación Gremial de pescadores y buzos de Peñuelas - IV Región	70
Coquimbo	Disponible	Asociación Gremial de pescadores artesanales y buzos mariscadores de Coquimbo	70
Península de Coquimbo A, B y C	Operativo	Asociación Gremial de buzos y asistentes de buzos de Coquimbo	70

Fuente: (SUBPESCA, 2013).

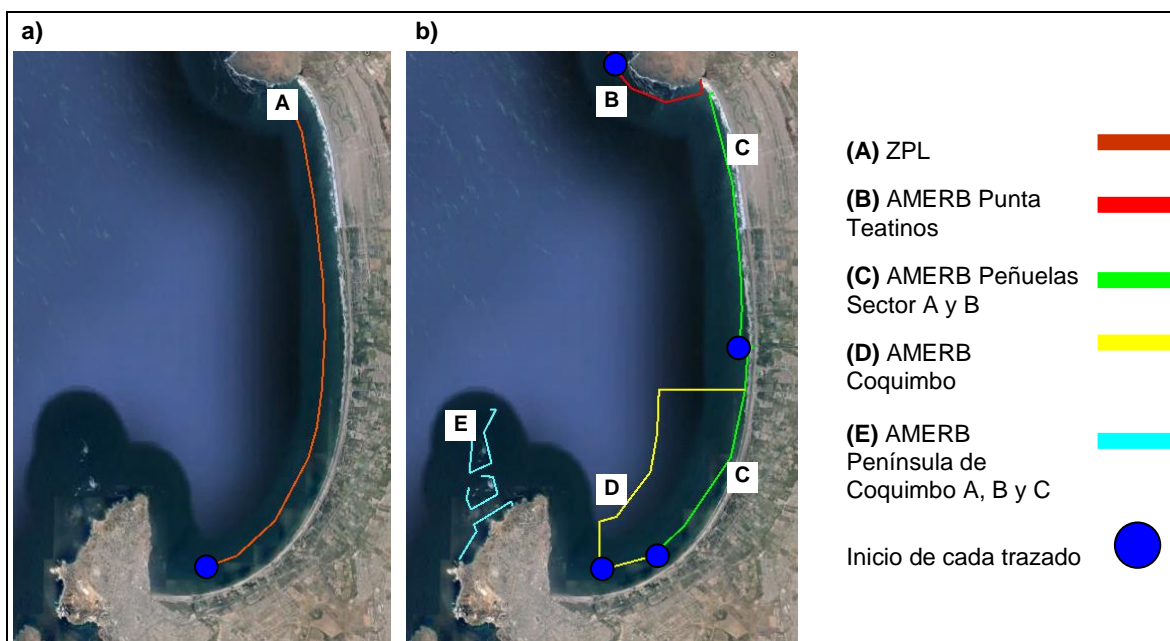


Figura 9-11: Zonificación ambiental de la bahía de Coquimbo.
a) Trazado de la ZPL y b) trazado de las AMERB presentes en la bahía de Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia.

D.4 ANÁLISIS NO ARMÓNICO

En la Tabla 9-7, se compara el valor de los planos mareales resultantes del análisis no armónico realizado sobre el registro de marea del Puerto de Coquimbo para los meses de Febrero y Septiembre del año 2012.

Tabla 9-7: Resumen de los planos mareales generados a partir de un análisis no armónico.

Nombre del plano mareal	Febrero	Septiembre
Nivel medio del mar [m]	0.94	0.86
Nivel medio de la marea [m]	0.93	0.85
Altura media de la pleamar [m]	1.38	1.31
Altura media de la bajamar [m]	0.48	0.39
Altura media de las pleamares más altas [m]	1.53	1.42
Altura media de las bajamares más bajas [m]	0.44	0.35

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO E

E.1 GENERACIÓN DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL Y PARÁMETROS SELECCIONADOS

En el presente apartado se detallaron los procedimientos utilizados en la confección de la malla batimétrica final. Dichas operaciones fueron divididas según el software utilizado y cuya interacción se visualiza a través del diagrama de la Figura 9-12.

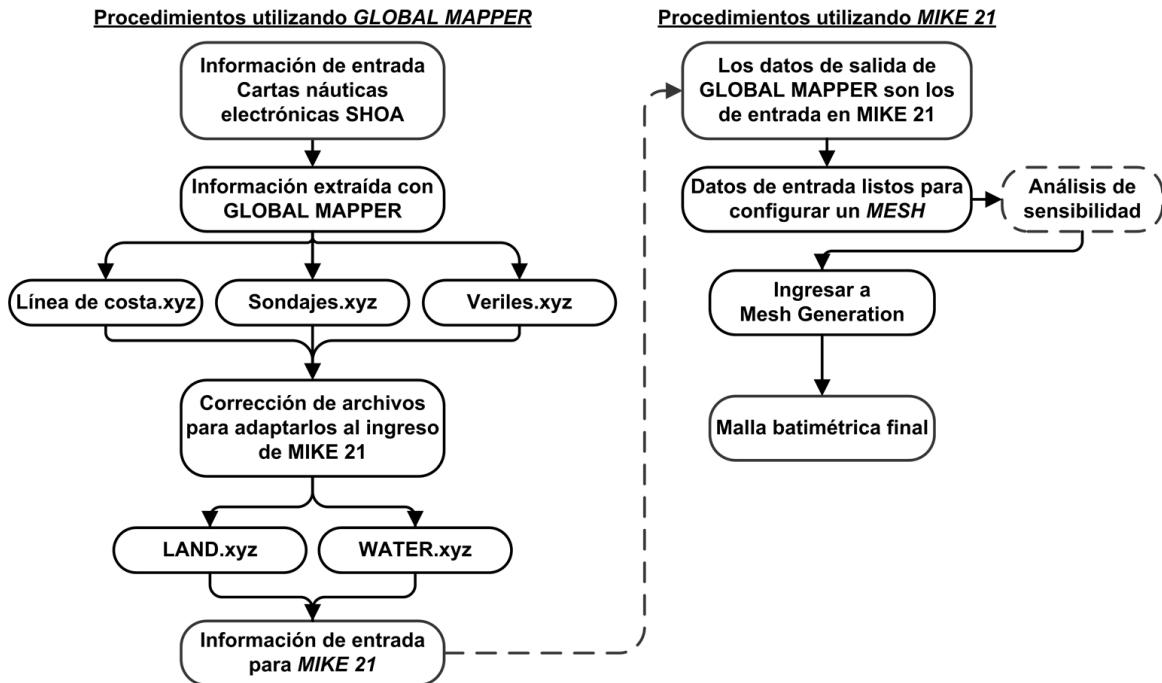


Figura 9-12: Diagrama de flujo. Generación de la malla batimétrica.

Fuente: Elaboración propia.

E.1.1 PROCEDIMIENTOS UTILIZANDO GLOBAL MAPPER

A continuación, se describen los pasos para extraer la información desde las cartas náuticas electrónicas, a través el software *Global Mapper*.

- Se cargó la batimetría de la zona de interés.
- Se verificó la proyección y Datum geodésico.
- Se eliminó la información innecesaria, trabajando solamente con los sondajes, veriles y línea de costa. Éste paso es fundamental para una correcta representación del relieve batimétrico.
- Se exportó los sondajes, veriles y línea de costa por separado, a través de archivos con extensión ".xyz". Dicho procedimiento permitió revisar, corregir errores y adaptar los datos para su correcto ingreso en el software *MIKE 21*, a través de la generación dos archivos fundamentales nombrados como "*Land*" y "*Water*".

E.1.2 PROCEDIMIENTOS UTILIZANDO MIKE 21

Luego de cargar los archivos "Land" - "Water" en MIKE 21, se realizó un *análisis de sensibilidad batimétrico*, el que consistió en seleccionar los parámetros y distribución de la malla flexible, además de considerar una correcta representación del comportamiento que sufre la pluma de descarga sobre la bahía de Coquimbo y el costo computacional asociado. Los parámetros finales se detallan en la Tabla 9-8.

Tabla 9-8: Parámetros seleccionados luego del análisis de sensibilidad batimétrico.

Parámetro	Selección
Forma de elementos	Triangular
Forma de condición de borde	Circular
Espaciado de línea de costa [m]	50
Número de anidados	3
Características de anidados	Entre 20 y 50 metros de lado
Método de interpolación	Natural neighbour

Fuente: Elaboración propia.

E.2 CASOS MODELADOS

En los siguientes apartados se detalla los casos simulados, los cuales son divididos en *escenarios medios* y *extremos históricos*; y a su vez, subdivididos en *Modelos MVO* (marea - viento - oleaje) y *MV* (marea - viento).

Se destaca que los *casos extremos históricos* tienen por objetivo representar las peores condiciones ambientales, considerando la extensión del registro que se posee. A su vez, se encuentran configurados como la combinación de los eventos más intensos de cada forzante. Cabe mencionar que los procesos de mezcla bajo dichas condiciones ambientales, no pueden ser validados debido a la dificultad de la toma de muestras *in-situ*.

Por otro lado, los *Modelos MV* tienen por objetivo cuantificar la variabilidad en la respuesta hidrodinámica si el oleaje no se encuentra considerado como forzante. En la actual práctica, el oleaje se asume irrelevante en estudios de dispersión de contaminantes cuando el punto vertido se ubica fuera de la zona de rompiente, despreciando su capacidad para promover la mezcla.

El proceso de calibración consistió en la modelación de diversos escenarios donde se ajustaron diferentes parámetros, analizando su influencia en el patrón hidrodinámico. Luego de analizar diferentes configuraciones, se llegó a la conclusión que el único parámetro posible de alterar corresponde al coeficiente de Manning; con ello, se simularon los casos *1M* a *6M* variando dicho coeficiente y analizando su aproximación con las mediciones de la corriente promedio en las estaciones *F1* y *F2*. Para las condiciones extremas históricas se adoptó el mismo valor debido a la carencia de registros bajo condiciones ambientales extremas.

E.2.1 ESCENARIOS MEDIOS - MODELOS MVO

Los presentes casos corresponden a simulaciones forzadas a través de marea, viento y oleaje característicos de la bahía de Coquimbo. Debido a que se desconoce la fecha específica del registro de mediciones *in-situ* de corrientes, se realizó un análisis estadístico a partir de las diferentes forzantes y se consideró la combinación indicada en la Tabla 9-9.

Tabla 9-9: Combinación de las forzantes para generar la condición estival e invernal.

Forzante	<u>Condición estival</u>	<u>Condición invernal</u>
Marea	Media	Media
Viento	Menos intensa	Más intensa
Oleaje		

Fuente: Elaboración propia.

A partir del supuesto mencionado, se compararon los diferentes *casos medios* asociados a la Condición estival (*4M* - *5M* - *6M*), con las mediciones de los meses correspondientes a Octubre y Enero (Figura 9-13, a - b). Se aprecia que los resultados de Enero del 2008 se aproximan en mayor medida al transecto de 45°, siendo el modelo *6M* el que presenta un mejor ajuste.

En cuanto a la Condición invernal (*1M* - *2M* - *3M*), se aprecia en la Figura 9-13, c - d; la comparación para los meses de Mayo y Agosto. El registro que presenta mejor ajuste es el

mes de Mayo, y dentro del mismo, la combinación simulada por el caso 1M demuestra una mayor aproximación al transecto de 45°.

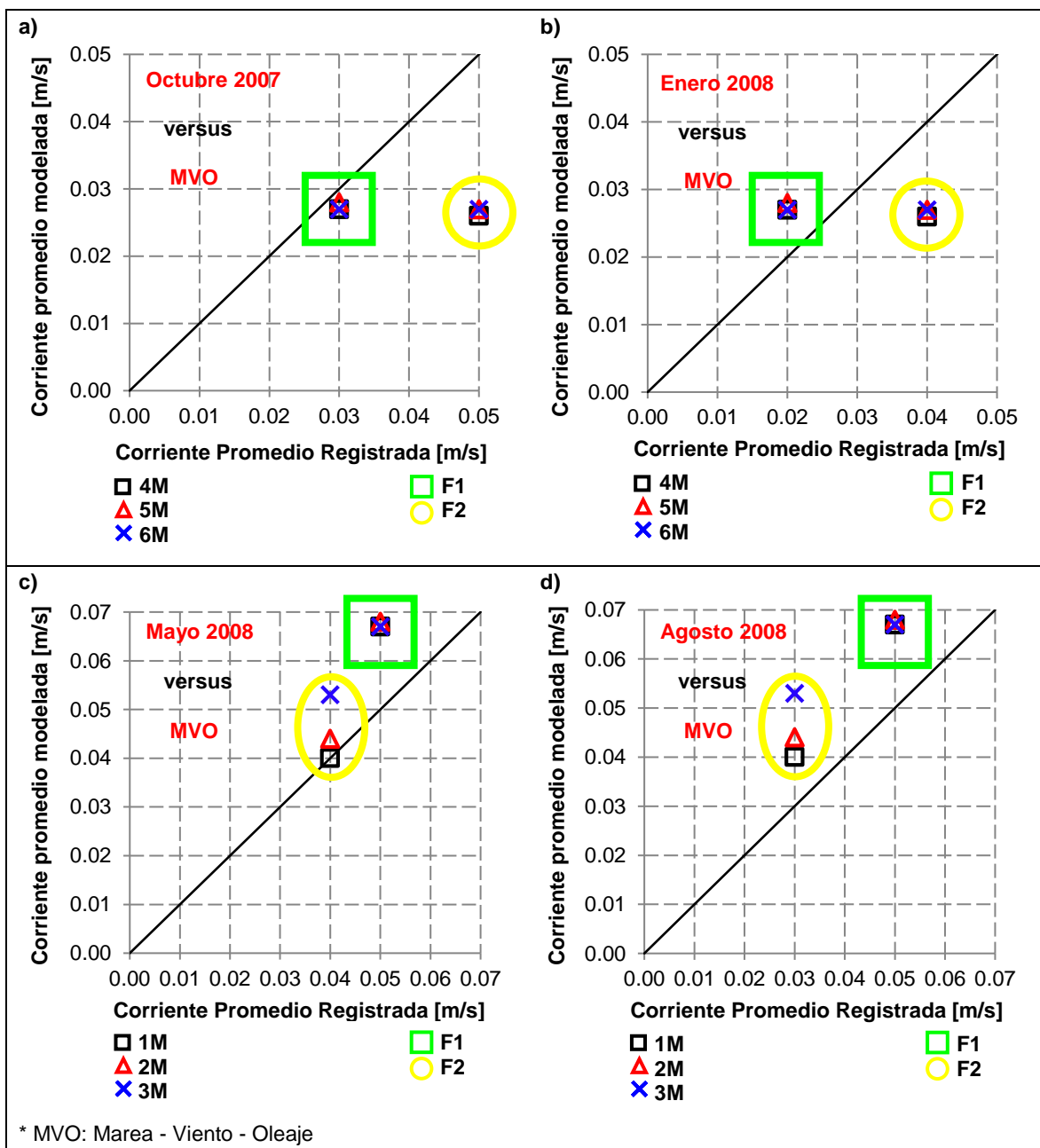


Figura 9-13: Comparación entre las corrientes promedio y las simuladas. Puntos de registro F1 y F2. a) Octubre 2007, b) Enero 2008, c) Mayo 2008 y d) Agosto 2008.

Fuente: Elaboración propia.

En resumen para los Modelos MVO, el caso 1M de Mayo 2008 y el caso 6M de Enero 2008, asociados a una Condición invernal y estival respectivamente, son los que presentan un mayor ajuste a las corrientes registradas en las estaciones F1 y F2.

E.2.2 ESCENARIOS MEDIOS - MODELOS MV

Como ya se mencionó, los modelos *MV* tienen por finalidad cuantificar la importancia de incluir el oleaje como forzante en el proceso de simulación hidrodinámica.

La principal conclusión del presente apartado se resume en que la velocidad de las corrientes de los *Modelos MVO* son un 70% mayor en comparación a los *Modelos MV*, y por tanto, se ajustan mejor mediciones realizadas en la bahía de Coquimbo.

Dicha conclusión se realizó luego de comparar los resultados de la corriente simulada con la medición de las estaciones *F1* y *F2*, correspondientes a la *Condición estival* (Figura 9-15) e *invernal* (Figura 9-16). Cabe mencionar que se consideró un coeficiente de arrastre del fondo con el mismo valor tanto para los *Modelos MVO* como *MV*.

Con ello se demuestra el importante papel que cumple la forzante del oleaje en configuraciones costeras complejas, como lo son las bahías.

La distribución de los diferentes casos, considerando *Modelos MV*, se observan en la Figura 9-14, donde se aprecia en verde el valor alcanzado por las corrientes promedio en los puntos de registro *F1* y *F2*.

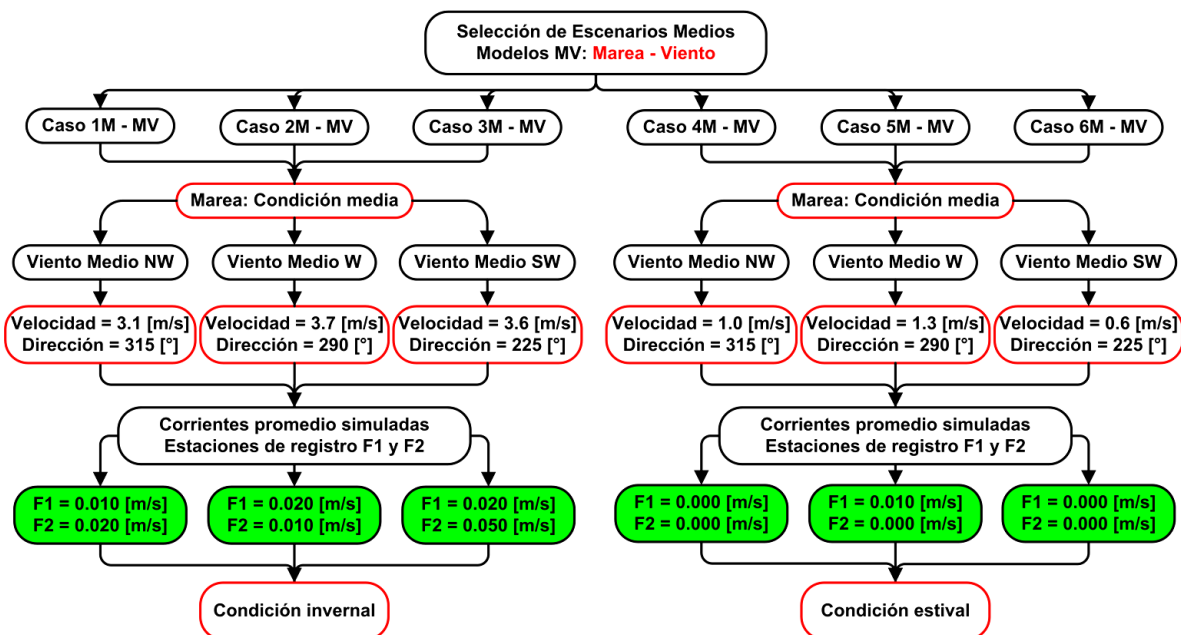


Figura 9-14: Escenarios medios considerando Modelos MV.
Izquierda: Intensidades más altas (Condición invernal).
Derecha: Intensidades más bajas (Condición estival).

Fuente: Elaboración propia.

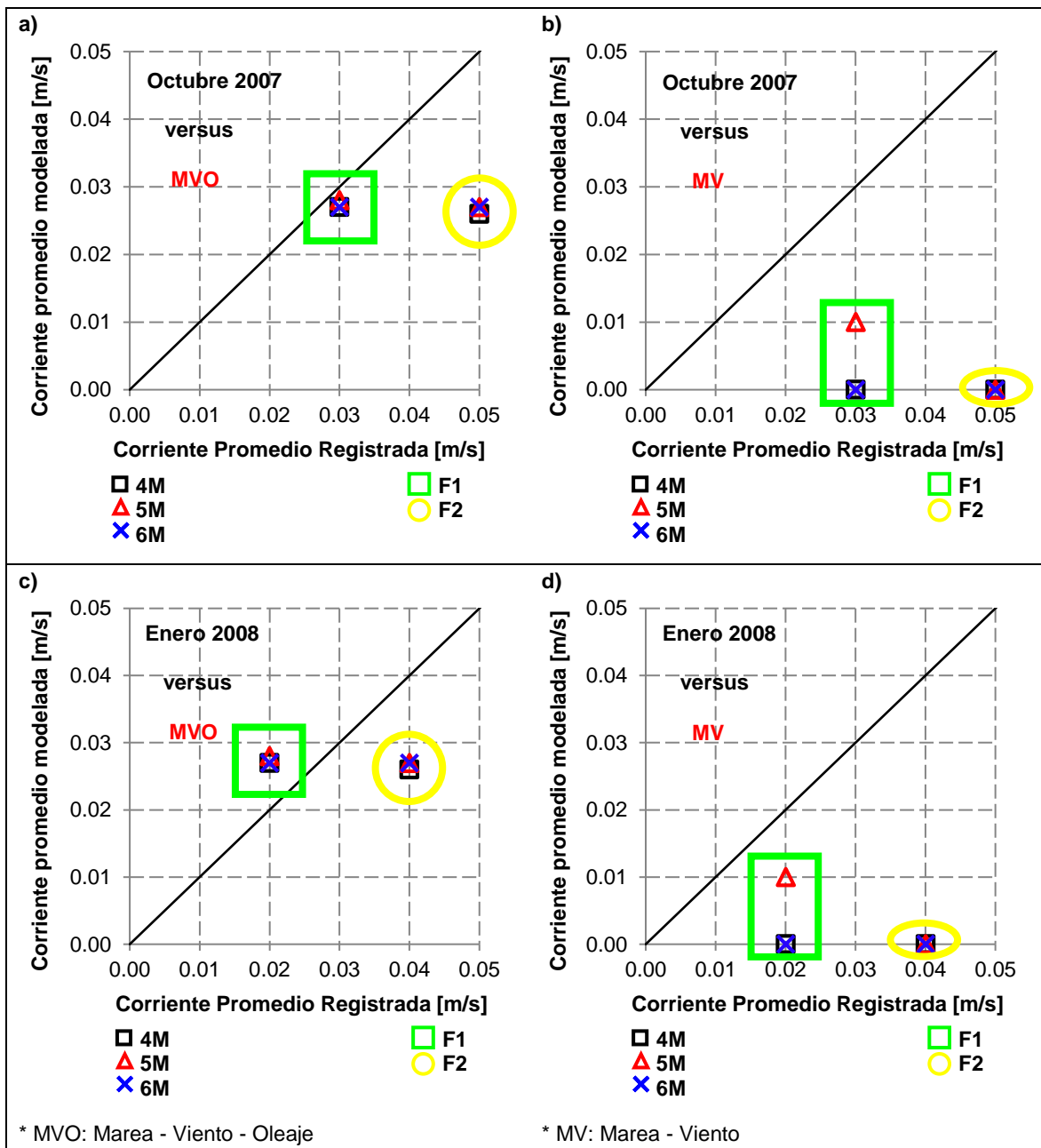


Figura 9-15: Condición estival - Ajuste logrado considerando modelos MVO y MV.
a) Octubre 2007 - MVO, b) Octubre 2007 - MV, c) Enero 2008 - MVO y d) Enero 2008 - MV.

Fuente: Elaboración propia.

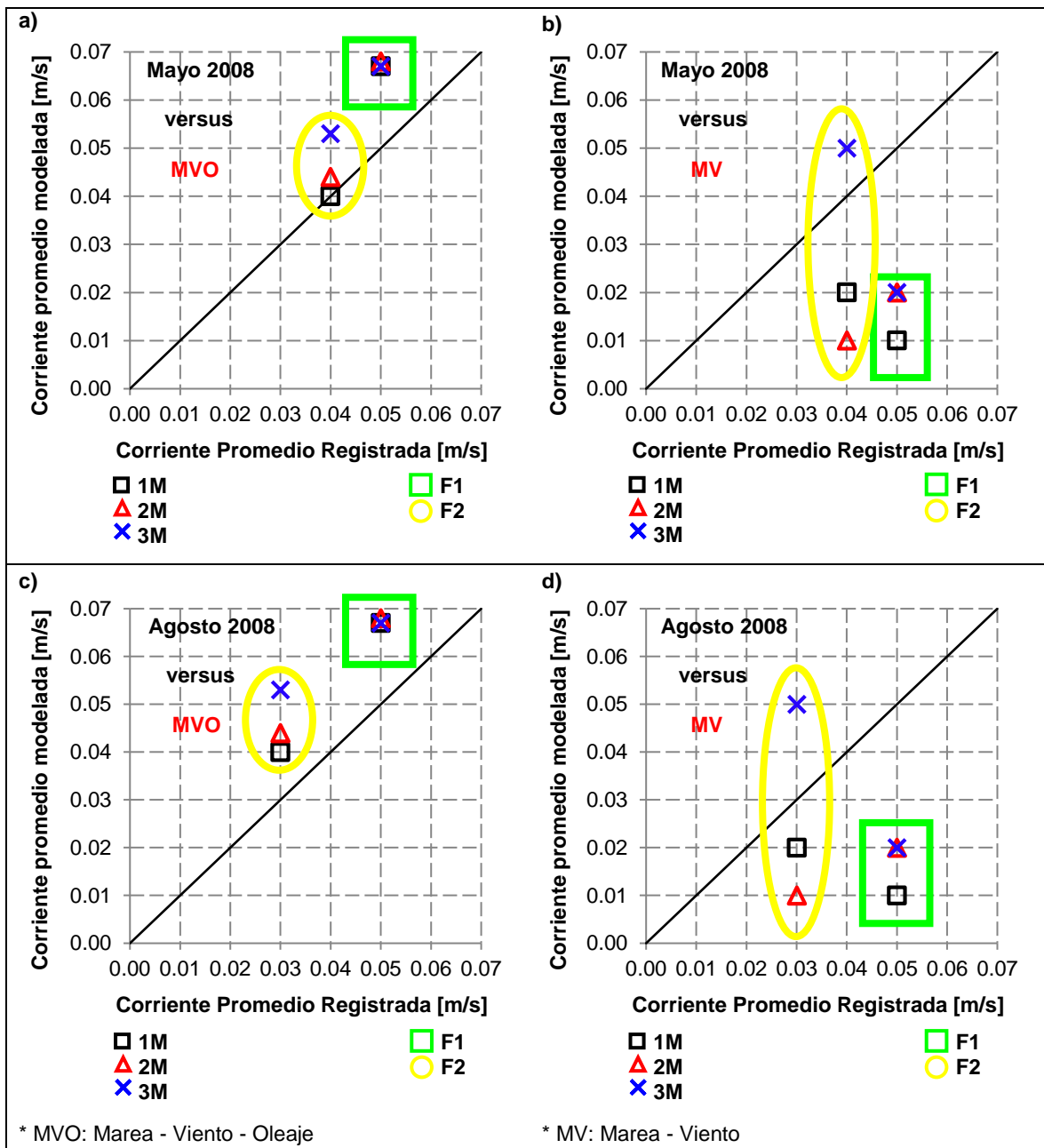


Figura 9-16: Condición invernal - Ajuste logrado considerando modelos MVO y MV.
a) Mayo 2008 - MVO, b) Mayo 2008 - MV, c) Agosto 2008 - MVO y d) Agosto 2008 - MV.

Fuente: Elaboración propia.

E.2.3 ESCENARIOS EXTREMOS - MODELOS MVO

Los casos extremos sólo consideran *Modelos MVO*, puesto que se demostró la importancia de la forzante de oleaje sobre el patrón hidrodinámico de la bahía de Coquimbo.

Cabe destacar que los parámetros utilizados se basaron en la calibración de los *Modelos MVO* correspondientes a las condiciones medias. En la Figura 9-17 se presenta el esquema de casos considerados en la presente sección.

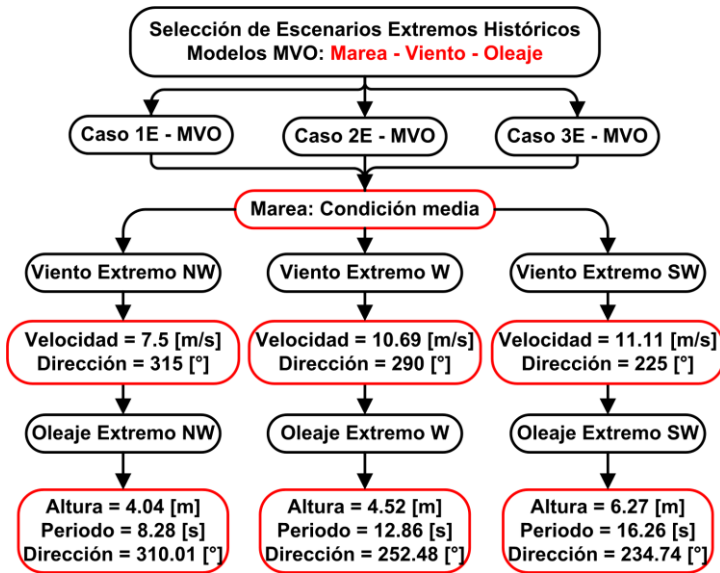


Figura 9-17: Escenarios extremos históricos considerando Modelos MVO.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO F

F.1 SIMULACIÓN INDIVIDUAL - RESPUESTA HIDRODINÁMICA

Debido a la complejidad del modelo es recomendable realizar la simulación de cada forzante por separado y luego de verificar que su respuesta hidrodinámica se encuentra exenta de errores. Sin este paso es posible que la simulación genere resultados incorrectos y sea un arduo trabajo identificar en qué fase del proceso se encuentra el error. Específicamente se utilizó la marea media como condición de borde del modelo, mientras las forzantes tanto de viento como de oleaje se simularon a través de eventos extremos históricos con el fin de generar una mayor respuesta hidrodinámica y verificar posibles anomalías en el proceso de modelación.

En primer lugar se analizó la marea (Figura 9-18), verificando la presencia de las corrientes de flujo y reflujó dentro del período simulado, con velocidades relativamente bajas (~ 0.00 - 0.02 m/s) sobre el punto de descarga del emisario y área circundante al mismo.

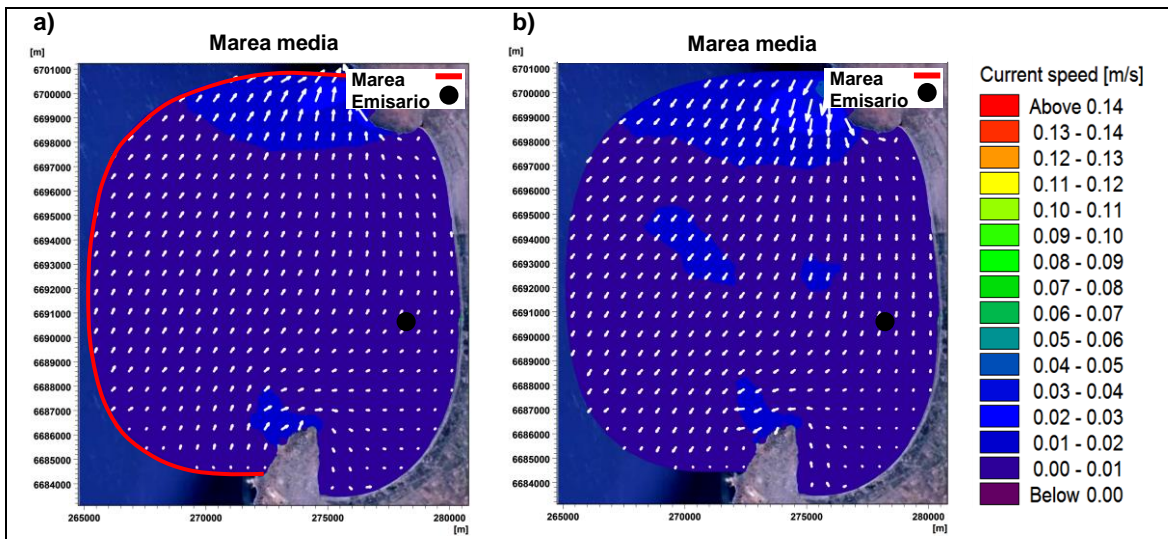


Figura 9-18: Respuesta hidrodinámica a partir del forzamiento con marea media.
a) Flujo y b) reflujó de marea.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, es posible analizar la respuesta hidrodinámica debido al viento en la Figura 9-19. Se aprecia un vórtice en el extremo Sur de la bahía generado por la condición W; mientras que las velocidades más altas (> 0.14 m/s) se registraron en la condición SW debido tanto a la convergencia del flujo e interacción con la batimetría frente a Punta Tortuga como a la misma intensidad de la forzante.

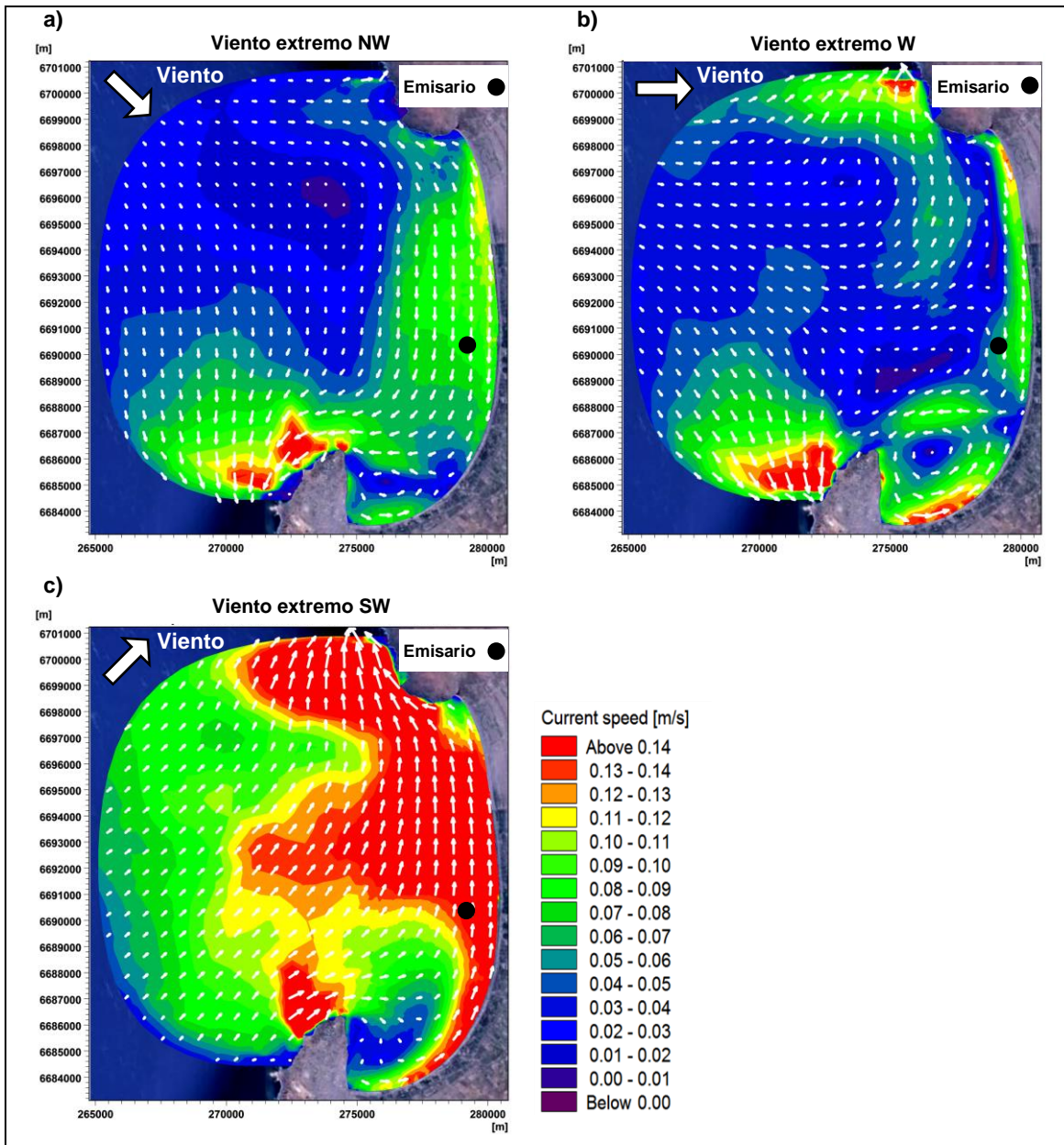


Figura 9-19: Respuesta hidrodinámica a partir del forzamiento con viento extremo. Condición a) NW, b) W y c) SW.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la simulación de las corrientes generadas por el oleaje (Figura 9-20) se observó un mayor área donde se supera los 0.14 [m/s], siendo el evento SW el más intenso. Además, se destaca la formación de múltiples vórtices tanto en la costa como en el resto de la bahía. Específicamente, en el extremo Sur de la misma se genera una corriente de resaca debido a la convergencia dos vórtices, siendo consistente con las mediciones *in-situ* realizadas en la zona.

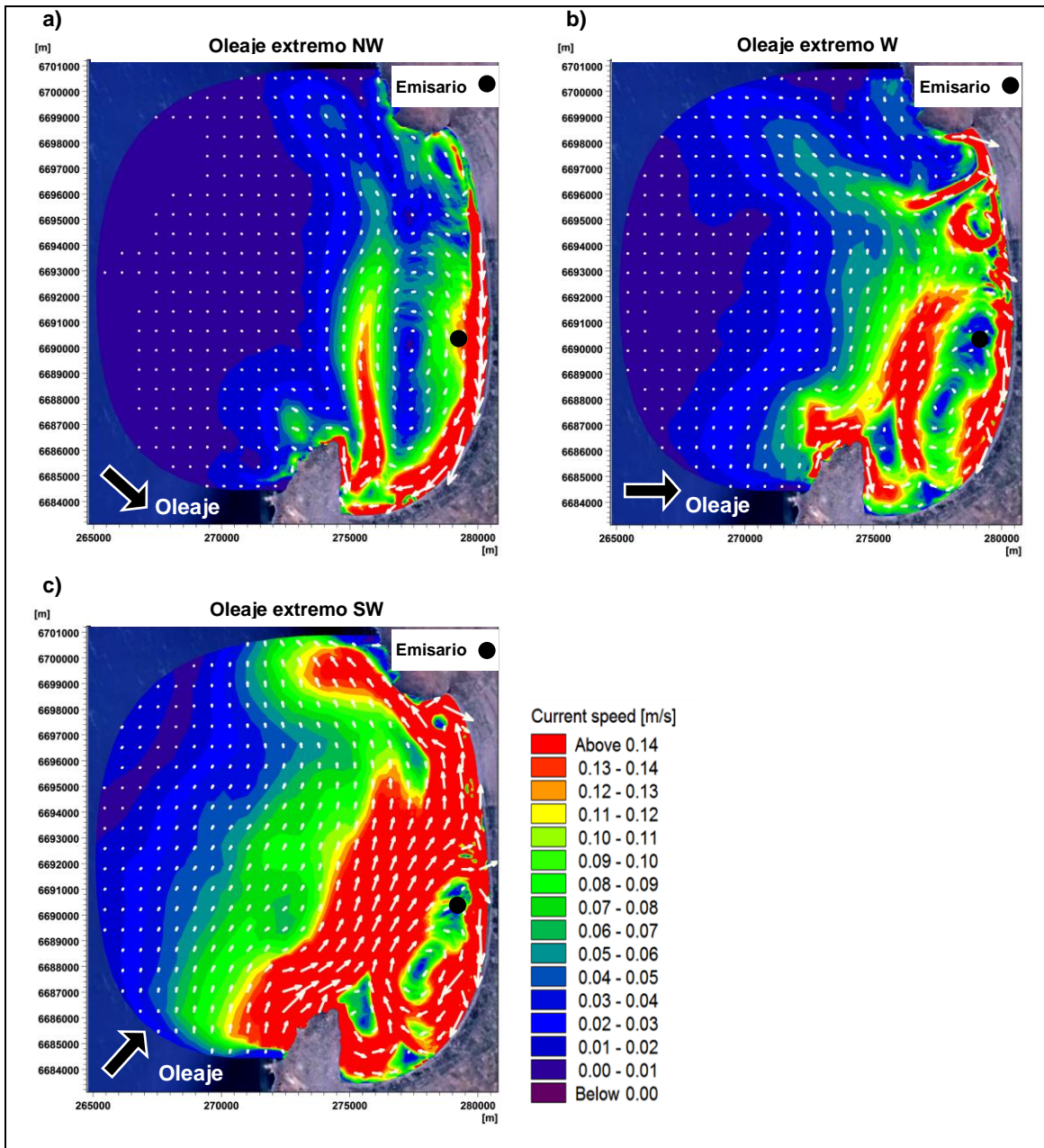


Figura 9-20: Respuesta hidrodinámica a partir del forzamiento con oleaje extremo. Condición a) NW, b) W y c) SW.

Fuente: Elaboración propia.

F.2 SIMULACIÓN INDIVIDUAL - ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA

Se efectuó un análisis de la estabilidad sobre la respuesta hidrodinámica, con el fin de señalar que forzante requiere más tiempo en alcanzar dicha condición y su resultado influyó directamente sobre el tiempo de simulación del modelo general.

Por tanto, como se mencionó en el apartado 5.1.3.1, se designaron puntos de evaluación dentro de la bahía con el propósito de visualizar la velocidad de las corrientes generadas por cada forzante y evaluar su tiempo de estabilización (Figura 9-21).

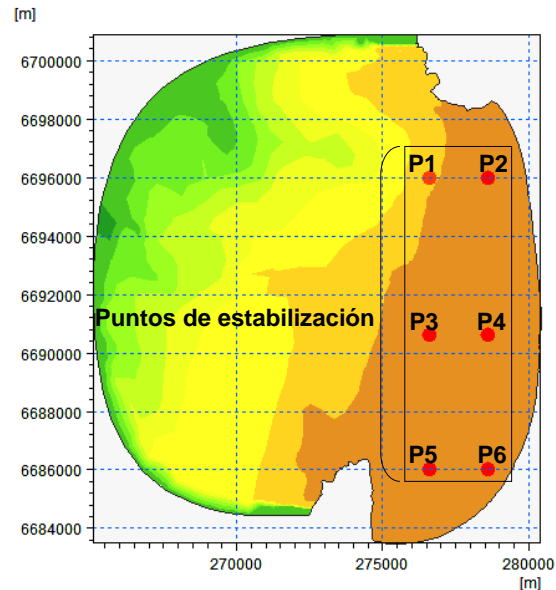
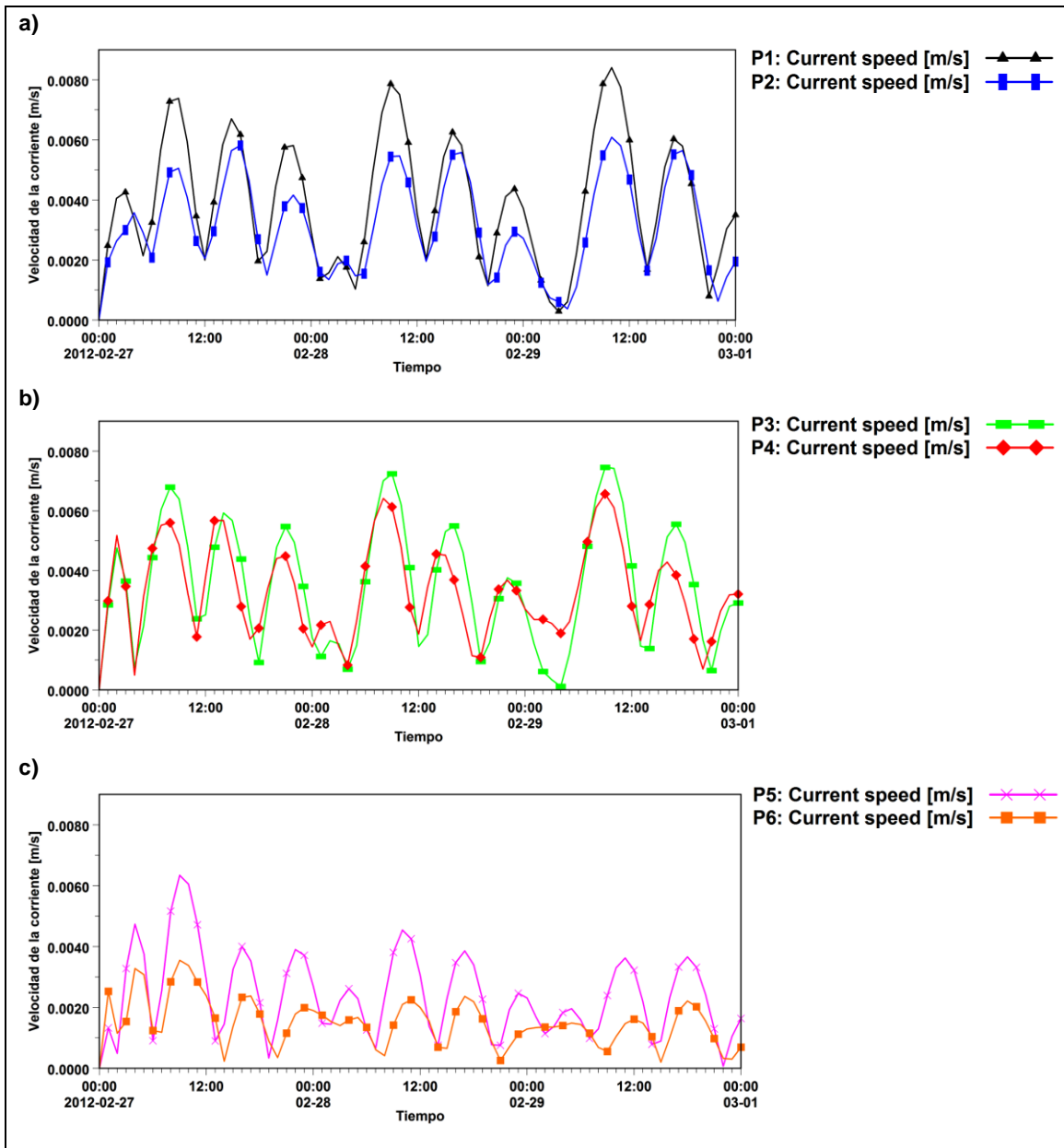


Figura 9-21: Puntos utilizados para evaluar la estabilidad del modelo (repetición).

Fuente: Elaboración propia.

Específicamente, la estabilización de la marea consideró la simulación de la *condición media* y analizó el comportamiento de las corrientes sobre los seis puntos de registro agrupados de acuerdo a su ubicación (Figura 9-22). Se aprecia claramente un ascenso y descenso en la velocidad debido a las corrientes de flujo y refluo producidas por la marea. Además, a pesar de su carácter periódico, su estabilización no toma más de 12 horas de la simulación. Por tanto, es la forzante que necesita menor tiempo para alcanzar dicha condición. Cabe destacar que las estaciones P5 y P6 (Figura 9-22, c) presentan la menor velocidad producto del abrigo brindado por Punta Tortuga.



**Figura 9-22: Estabilización de la marea - Condición media.
Evaluación de los Puntos a) 1 - 2, b) 3 - 4 y b) 5 - 6.**

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para evaluar la estabilidad de la respuesta hidrodinámica utilizando como forzante al viento, se simularon los eventos extremos históricos correspondientes a las direcciones de incidencia NW, W y SW (Figura 9-23 a, b y c, respectivamente). El caso NW fue el evento que presentó menor intensidad y alcanzó su estabilidad luego de dos días, mientras el caso W la logró a los tres días de simulación. Por último, el caso SW -si bien es el más intenso de los tres- fue el evento que alcanzó su estabilidad con mayor rapidez, bordeando el día y medio de modelación. De ahí que se requiere de al menos dos días de simulación para estabilizar la presente forzante.

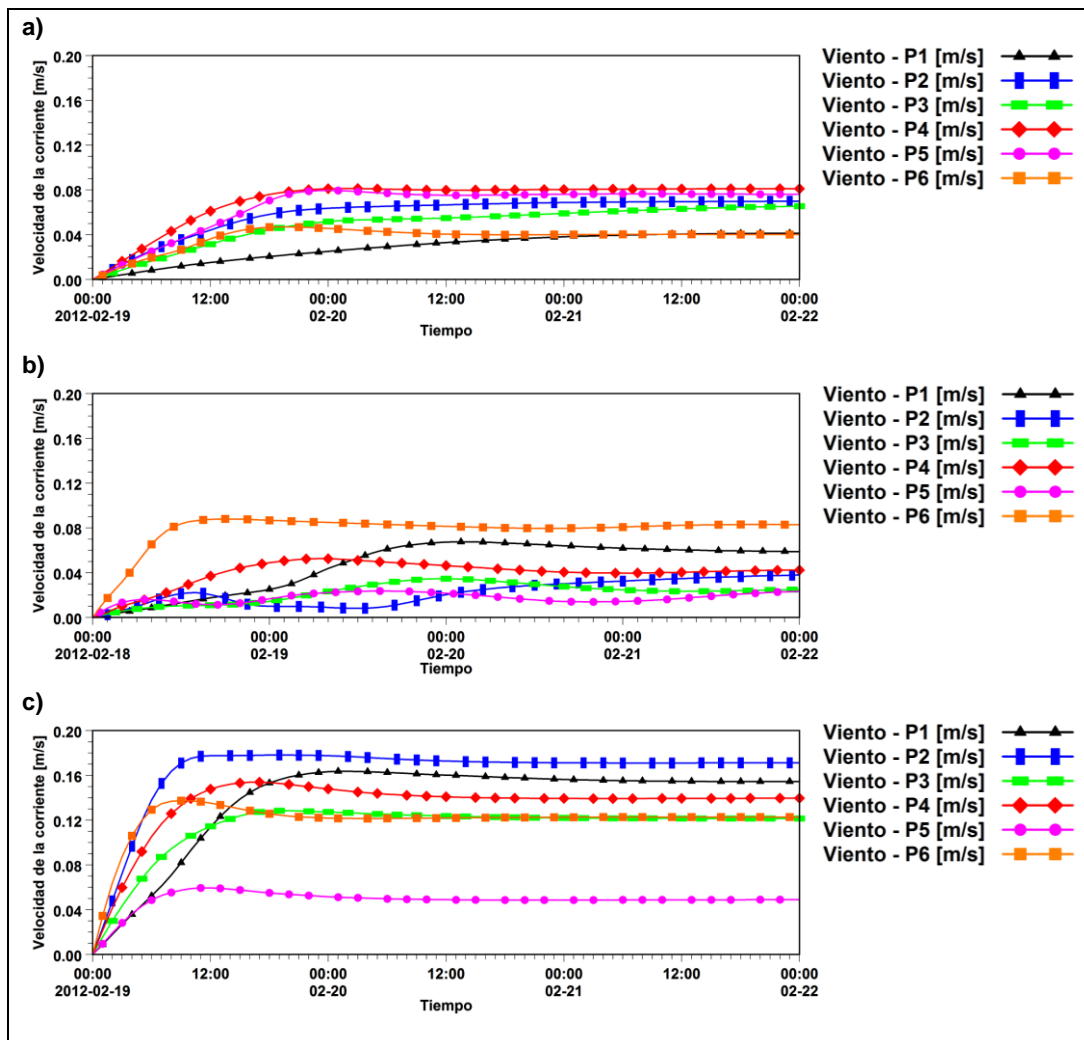


Figura 9-23: Estabilización del Viento - Eventos extremos históricos.
Condición a) NW, b) W y c) SW.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, los resultados de la estabilización hidrodinámica utilizando al oleaje como forzante para su condición NW, W y SW, se observan en la Figura 9-24 a, b y c respectivamente. Cabe destacar que debido a la generación los múltiples vórtices, la presente forzante es la más difícil de estabilizar, alcanzando dicha condición luego de tres días de modelación. No obstante, las estaciones P1 y P2 de la condición de W alcanzaron una estabilidad parcial, debido a la presencia de vórtices en el sector Norte de la bahía.

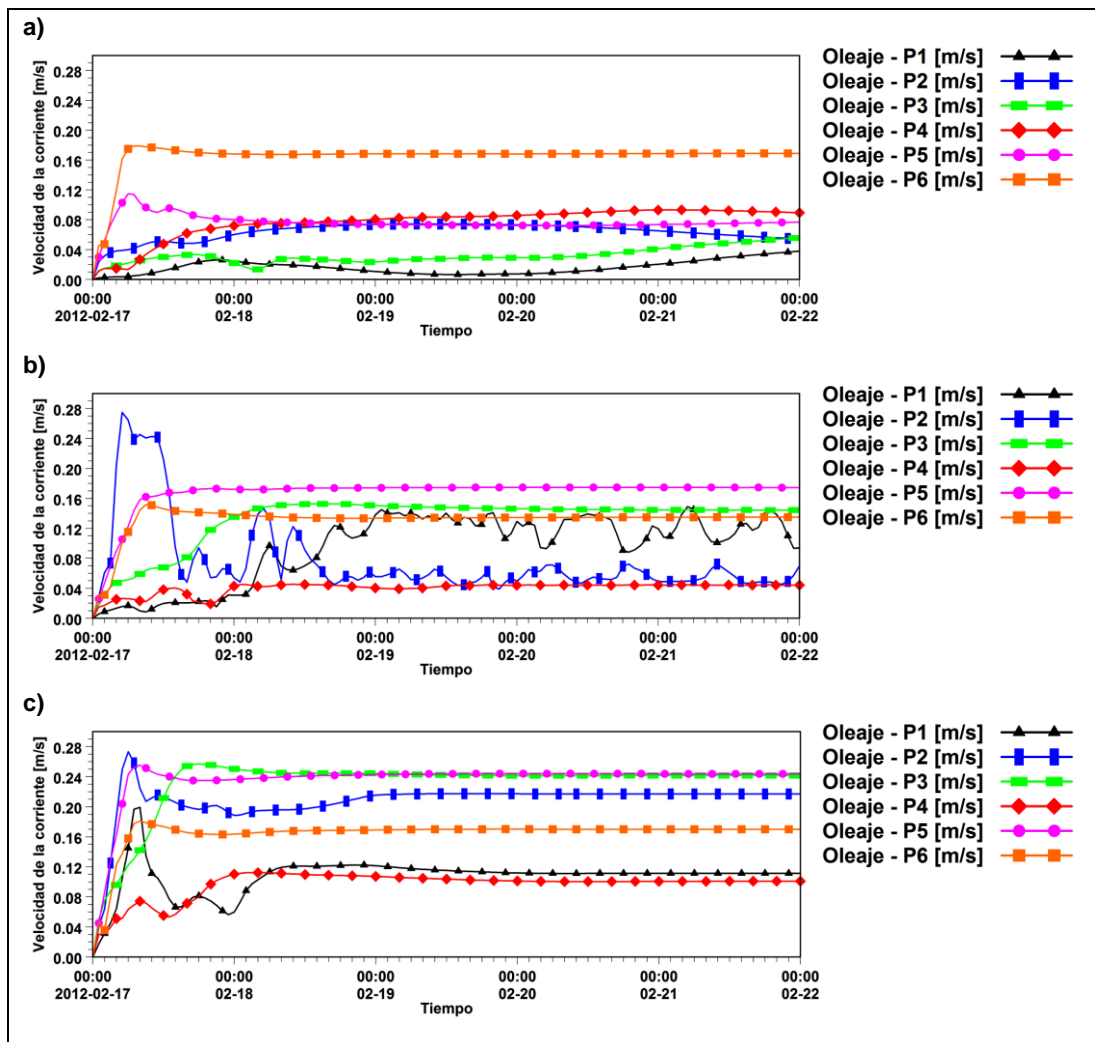


Figura 9-24: Estabilización del Oleaje - Eventos extremos históricos. Condición a) NW, b) W y c) SW.

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, se determinó que el oleaje es la forzante que más tiempo demora en alcanzar la estabilidad y se estableció un tiempo de simulación de cinco días donde en los últimos dos se produce el vertido del contaminante. Para demostrar que los resultados de la presente sección son adecuados, a continuación se exponen algunos resultados parciales considerando modelos generales (MVO).

Resultados:

Luego de calibrar el *Modelo MVO*, se corroboró que la estabilización de tres días es apropiada (Figura 9-25). Además se aprecia como las estaciones P5 y P6 varían su intensidad de acuerdo a la dirección de incidencia de las forzantes y a la condición de abrigo que ofrece Punta Tortuga.

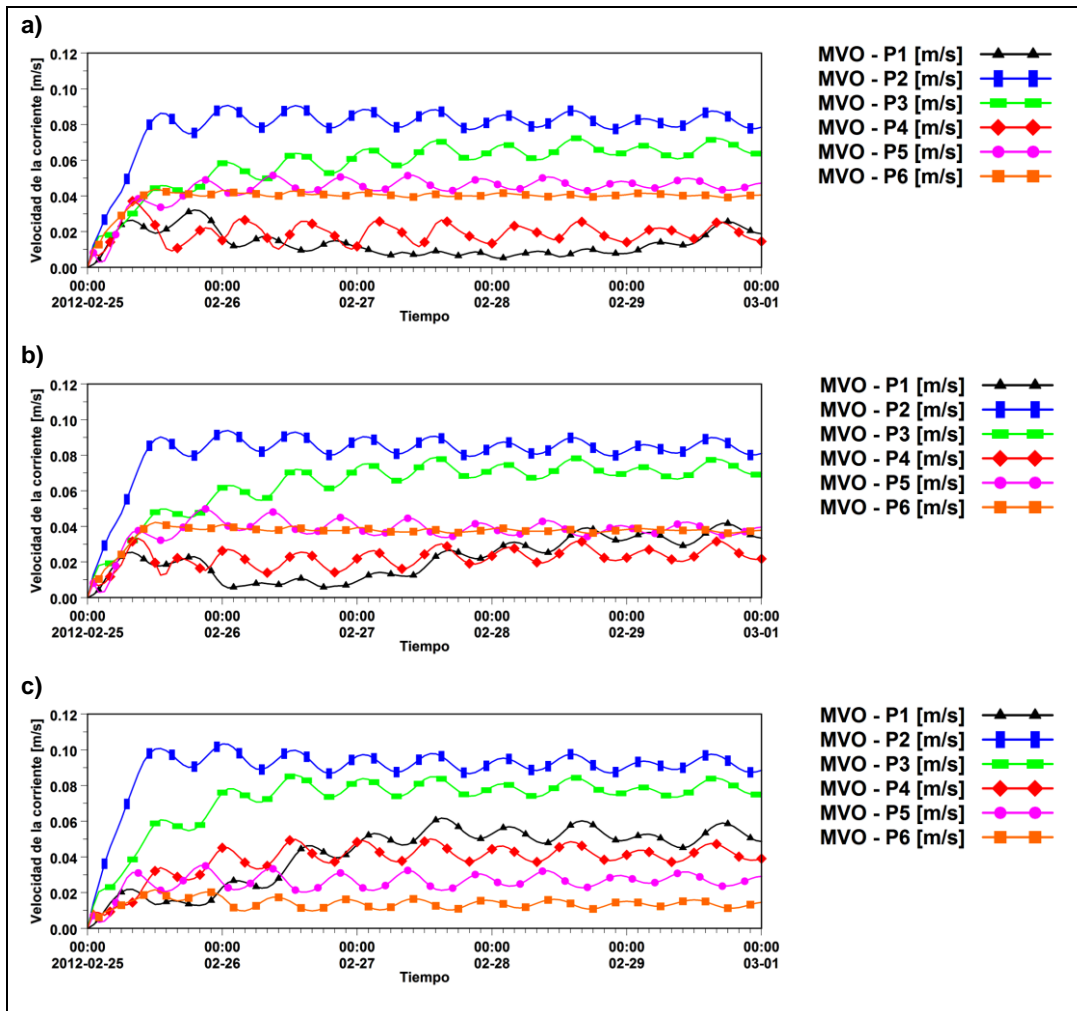


Figura 9-25: Estabilización de modelos globales combinando Marea - Viento - Oleaje. Condición a) NW, b) W y c) SW.

Fuente: Elaboración propia.

F.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - CASOS DE OLAJE

Luego de preseleccionar cuatro casos de oleaje en el apartado 5.1.2.3 (Tabla 9-10), se realizó un análisis de sensibilidad para considerar solamente a dos de ellos, asociados a la mayor y menor influencia del oleaje sobre el patrón hidrodinámico de la bahía.

Tabla 9-10: Preselección - Casos medios de oleaje.

Casos	No excedencia de Hs [%]	Altura [m]	No excedencia de Tp [%]	Período [s]	Dirección [°]
1	75	2.8	75	12.5	SW
2	75	2.8	25	9.8	SW
3	25	1.6	75	12.5	SW
4	25	1.6	25	9.8	SW

Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

La evaluación se llevó a cabo a través de la comparación gráfica de la intensidad de las corrientes en los seis puntos de registro. No obstante, producto de la geografía de la zona de estudio y de las características del oleaje simulado, las estaciones *P1* y *P2* alcanzan una estabilidad parcial lo que impide su utilización en el análisis de sensibilidad.

Como se aprecia en la Figura 9-26, los casos preseleccionados 1 y 4 son los que generan la mayor y menor intensidad en las corrientes respectivamente, siendo considerados en los modelos *MVO* (Tabla 9-11). Mientras los casos 2 y 3, fueron omitidos ya que su efecto sobre la hidrodinámica se encuentra en un nivel intermedio.

Tabla 9-11: Selección - Casos medios de oleaje.

Casos	No excedencia de Hs [%]	Altura [m]	No-excedencia de Tp [%]	Período [s]	Dirección [°]
1	75	2.8	75	12.5	SW
2	25	1.6	25	9.8	SW

Fuente: Elaboración propia.

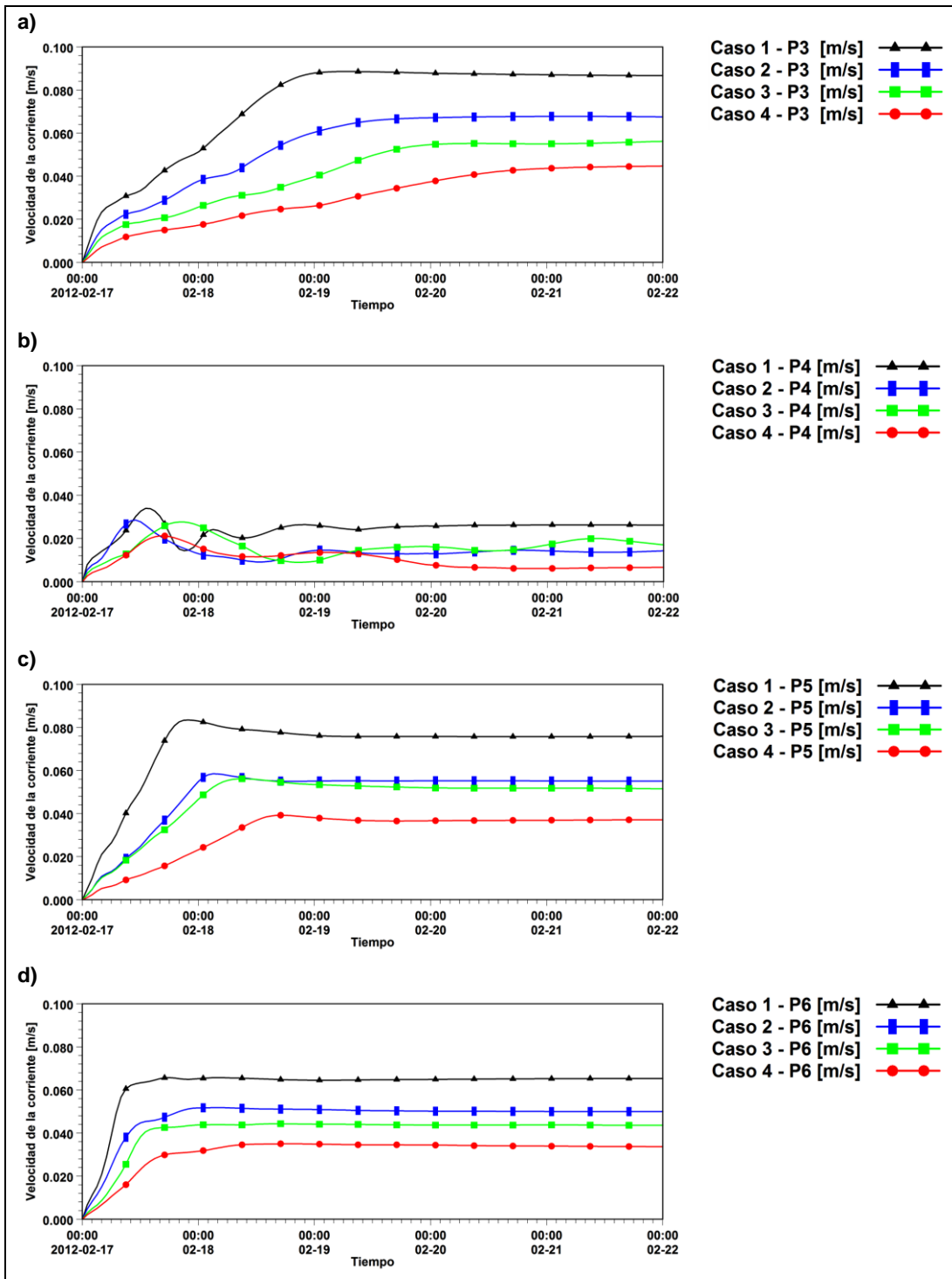


Figura 9-26: Análisis de sensibilidad de los casos de oleaje. Evaluación de los Puntos a) 3, b) 4, c) 5 y d) 6.

Fuente: Elaboración propia.

F.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - VISCOSIDAD TURBULENTA

El presente análisis de sensibilidad se efectuó para de verificar la influencia de la viscosidad turbulenta dentro de las modelaciones realizadas.

En primer lugar, se definieron los casos a simular (Tabla 9-12) considerando las condiciones medias de un *Modelo MVO*. Luego se contrastó la respuesta hidrodinámica a través de series temporales, utilizando los puntos de la Figura 9-21. Adicionalmente en la Figura 9-27 se representó el caso 1 a través de una serie de puntos, mientras para los casos 2 y 3 se trazaron líneas continuas. Cabe destacar que en todos los casos las forzantes fueron constantes, variando únicamente las formulaciones de la viscosidad turbulenta y sus parámetros asociados.

Tabla 9-12: Casos seleccionado para realizar el análisis de sensibilidad de la viscosidad turbulenta.

Caso	Formulación viscosidad turbulenta	Coeficiente	Marea	Viento (Velocidad, Dirección)	Oleaje (Altura, Período, Dirección)
1	Smagorinsky	$C_S = 0.28$	Media	(3.6 [m/s], SW)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)
2	Constante de Eddy	$A = 0.06$	Media	(3.6 [m/s], SW)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)
3	Sin viscosidad turbulenta	-- --	Media	(3.6 [m/s], SW)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)

Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

A partir de la comparación de las series temporales asociadas a los casos 1 y 2 (Figura 9-27, a), fue concluido que no existe una diferencia significativa entre un modelo que considera el coeficiente de Smagorinsky y otro que utiliza la constante de Eddy.

Además se efectuó a un segundo análisis comparando un caso que considera la constante de Eddy con otro sin viscosidad turbulenta (Figura 9-27, b). Se calcularon variaciones del orden de 0.002 [m/s] en algunos puntos de medición (*P1 - P3 - P5*) las cuales no se aprecian a simple vista.

En consecuencia la viscosidad turbulenta no fue considerada en la configuración de los *Modelos MVO*, debido a que las magnitudes de dichas variaciones no afectan a los fines de la presente Memoria.

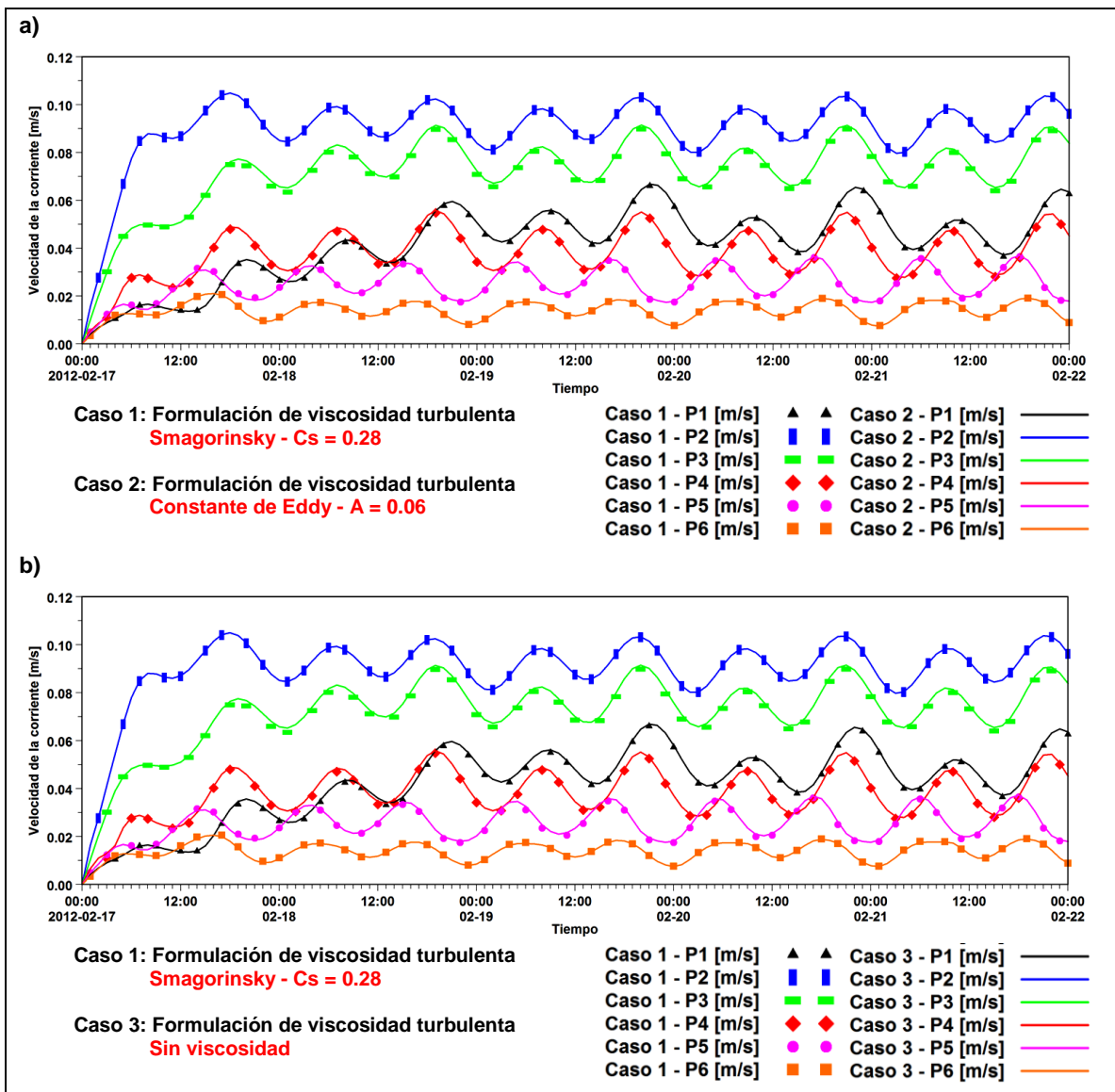


Figura 9-27: Análisis de sensibilidad - Viscosidad Turbulenta.
Comparación entre los Casos a) 1 - 2 y b) 1 - 3.

Fuente: Elaboración propia.

F.5 TRANSFORMACIÓN DEL REGISTRO DE CORRIENTE

Como se mencionó en la sección 4.1.3, las corrientes medidas en las estaciones *F1* y *F2* fueron registradas a través de correntómetros anclados a cinco metros de profundidad desde la superficie, mientras la velocidad de la corriente obtenida por el modelo hidrodinámico corresponde a la velocidad promediada en la vertical. Por tanto, para comparar ambas mediciones entre sí, se transformó la velocidad puntual a una promediada en la vertical a través de la metodología establecida por Garcia (2009).

En dicho estudio se registró una distribución vertical de la velocidad de las corrientes (Figura 9-28). Sus ejes corresponden a las magnitudes normalizadas tanto de la velocidad como profundidad y se trazó en rojo el *1/10th Power Law* calculado a través de la ecuación (9.25).

Cabe destacar que la distribución de velocidades a lo largo de la columna de agua es particular para cada zona y sólo se utilizó el caso de Garcia (2009) para ilustrar la tendencia que de la curva *1/10th Power Law* en comparación a los datos registrados en el canal Laucayec.

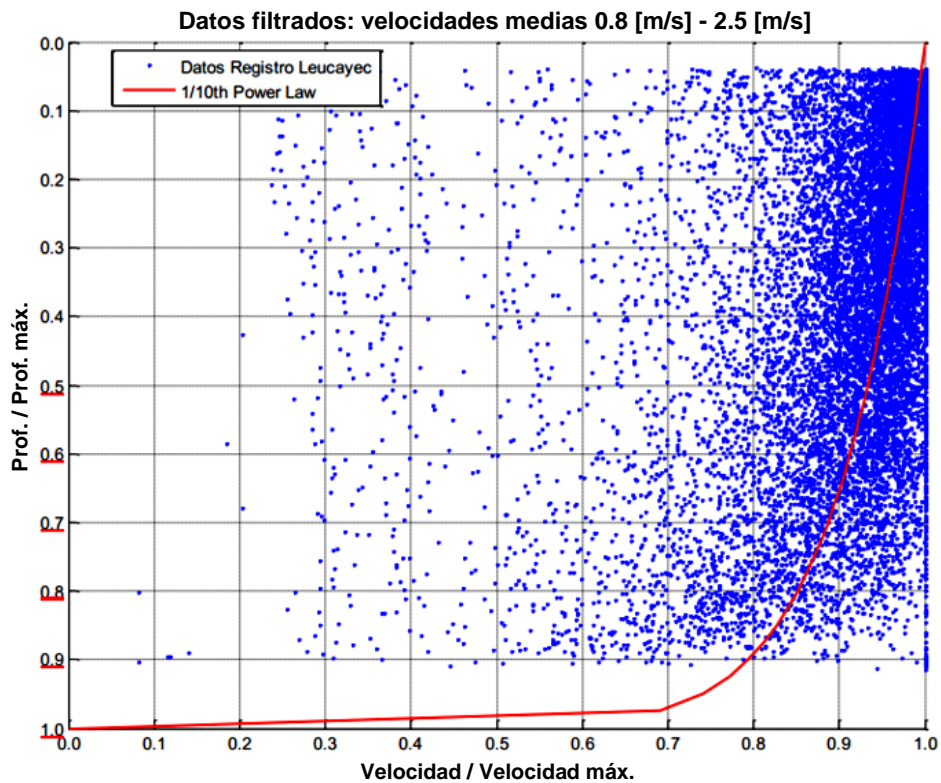


Figura 9-28: Perfil vertical de velocidades - Canal Laucayec.

Fuente: (García, 2009).

$$v(z) = v_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/10} \quad (9.25)$$

Luego de seleccionar el plano de referencia $z_0 = h$ y cambiar el valor de v_0 por la velocidad superficial v_s , la fórmula es transformada a la expresión mostrada a continuación (ecuación 9.26).

$$v(z) = v_s \left(\frac{z}{h} \right)^{1/10} \quad (9.26)$$

La cual es posible modificar a partir de procedimientos matemáticos y así generar la ecuación (9.27).

$$\bar{v} = \frac{10v(z)}{11 \left(\frac{z}{h} \right)^{1/10}} \quad (9.27)$$

Donde $h = 19 [m]$ y $v(z) =$ velocidad a los 14 [m] de profundidad $= v(14)$, considerando valores asociados al presente estudio. Mientras \bar{v} corresponde a la velocidad promediada en la vertical.

Finalmente, a través de esta última ecuación, se transformaron las velocidades *in-situ* y se generaron los resultados expuestos en la Tabla 9-13. Se aprecia que las intensidades disminuyen su velocidad entre 0.001 y 0.002 [m/s]. Sin embargo, es una variación insuficiente ($\sim 5\%$) para modificar de forma significativa el registro de corrientes.

Tabla 9-13: Registro de la transformación desde corrientes in-situ a promediadas en la vertical.

Características	F1				F2			
Velocidades in-situ	0.03	0.02	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03
Velocidades transformadas	0.028	0.019	0.047	0.047	0.047	0.038	0.038	0.028

Fuente: Elaboración propia.

F.6 INFLUENCIA DEL VIENTO Y OLEAJE SOBRE EL NIVEL MEDIO DEL MAR

Para cuantificar la influencia del viento y oleaje sobre el nivel medio del mar (NMM), fueron simulados los casos de la Tabla 9-14. Los cuales presentan la misma condición de borde y difieren en la consideración de las forzantes de viento y oleaje.

Tabla 9-14: Casos utilizados para cuantificar la influencia del viento y oleaje sobre el NMM.

Caso	Marea	Viento (Velocidad, Dirección)	Oleaje (Altura, Período, Dirección)
1	Condición de sicigia	No considerado	No considerado
2	Condición de sicigia	(3.6 [m/s], SW)	(2.8 [m], 12.5 [s], SW)

Fuente: Elaboración propia.

La principal conclusión establece que tanto el viento como el oleaje afectan en forma mínima el NMM¹⁴, generando una variación del R^2 de 0.001 (Figura 9-29).

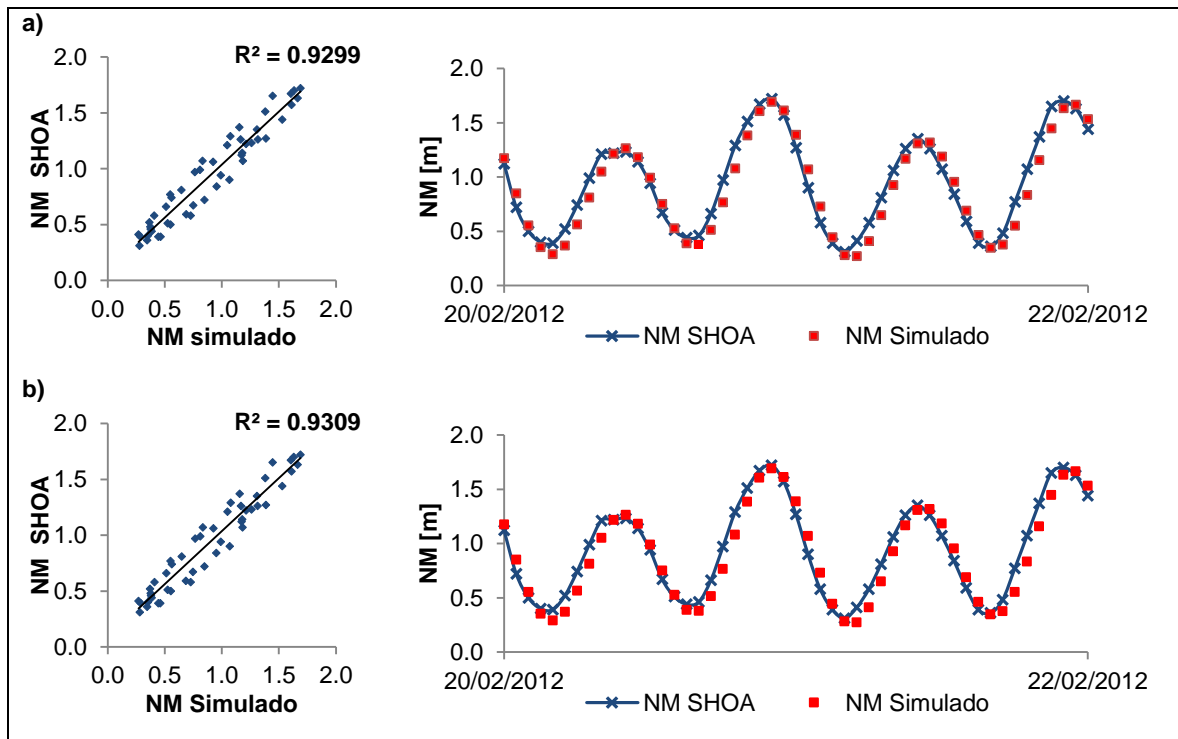


Figura 9-29: Análisis de la influencia del viento y oleaje sobre el nivel medio del mar.
a) Caso 1: Maree. b) Caso 2: Maree - Viento - Oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ Sin embargo, son sumamente relevantes en la generación de corrientes litorales.

ANEXO G

G.1 RESULTADOS DEL PROCESO DE AJUSTE ENTRE CORMIX Y MIKE 21 AD

Los casos 2M y 3M (Figura 9-30, a - b y c - d) se encuentran asociados a una Condición invernal. Se caracterizan por un mayor ajuste de las plumas simuladas por *CORMIX 2* y *MIKE 21 AD* dentro del campo cercano. En comparación, los casos 4M y 5M (Figura 9-30, e - f y g - h) se asocian a una Condición estival donde, la baja intensidad de las corrientes, genera plumas demasiado extensas y dificulta su ajuste.

En particular, el caso 3M (Figura 9-30, c - d) presentó la mayor aproximación de las plumas dentro del campo cercano. Sin embargo, el criterio de selección se basó en la comparación hidrodinámica de cada caso, cuyo análisis de encuentra en el Anexo E.2.1.

La Tabla 9-15 detalla los parámetros más relevantes en los diferentes casos simulados. Es preciso recordar, que la velocidad de la corriente en *CORMIX 2* se considera perpendicular al difusor; mientras el coeficiente de dispersión en *MIKE 21 AD*, es constante en el espacio, tiempo y entre los escenarios de vertido medio y máximo.

Tabla 9-15: Parámetros utilizados en los diferentes casos simulados.

Caso	Velocidad de la corriente [m/s]	Dirección de la corriente perpendicular al difusor	Coefficiente de dispersión [m ² /s]
1M	0.03	Desde el Sur hacia el Norte	3
2M	0.03	Desde el Sur hacia el Norte	3
3M	0.04	Desde el Sur hacia el Norte	3
4M	0.02	Desde el Sur hacia el Norte	5
5M	0.02	Desde el Sur hacia el Norte	5
6M	0.02	Desde el Sur hacia el Norte	5
1E	0.13	Desde el Norte hacia el Sur	1
2E	0.04	Desde el Norte hacia el Sur	3
3E	0.13	Desde el Sur hacia el Norte	1

Fuente: Elaboración propia

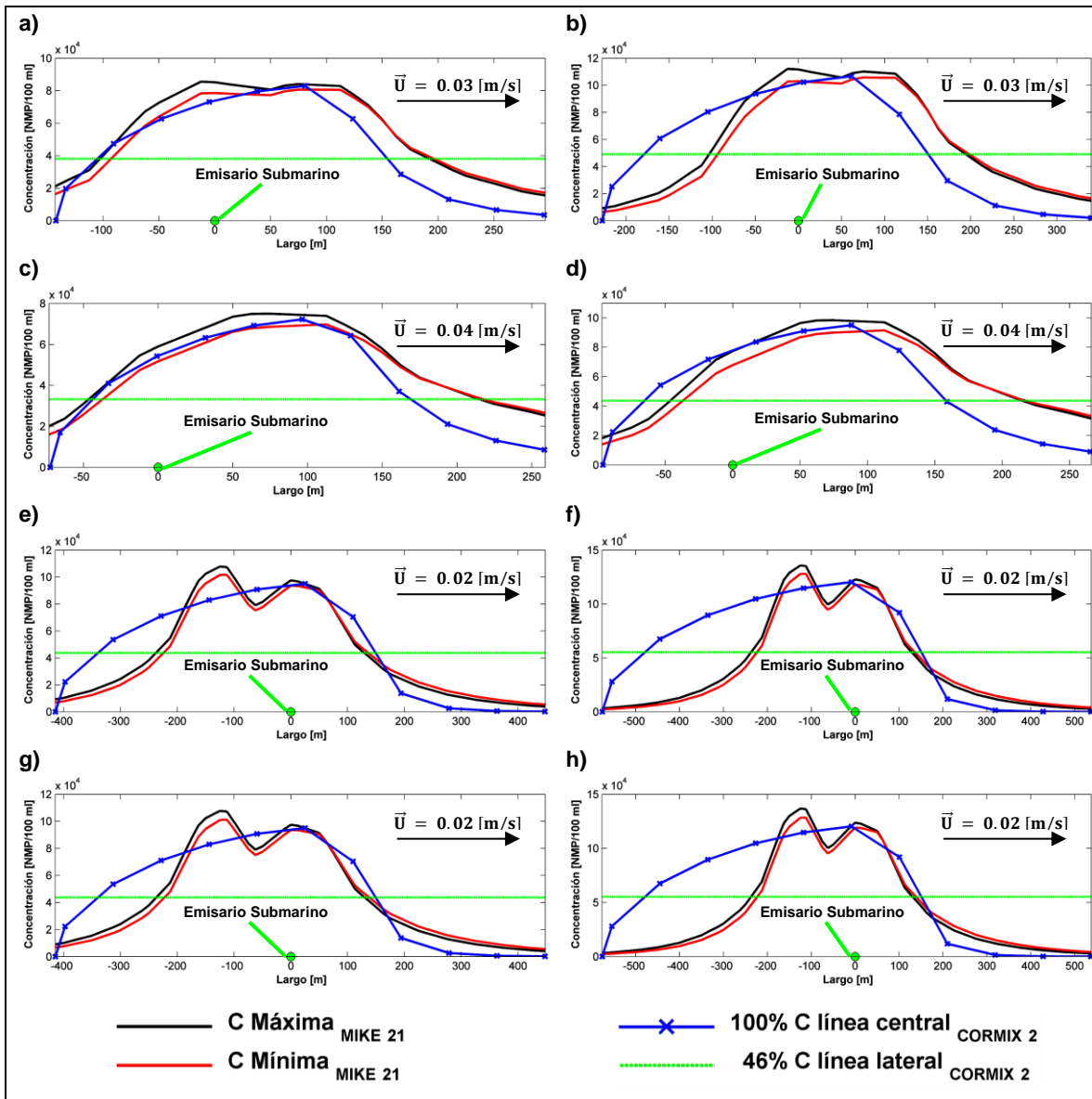


Figura 9-30: Concentración línea central de la pluma. Fase de ajuste entre CORMIX 2 y MIKE 21 AD. Casos medios: 2M a) Caudal medio - b) Caudal máximo. 3M c) Caudal medio - d) Caudal máximo. 4M e) Caudal medio - f) Caudal máximo. 5M g) Caudal medio - h) Caudal máximo.

Fuente: Elaboración propia a través de MATLAB.

ANEXO H

H.1 ANÁLISIS DEL CAMPO HIDRODINÁMICO Y DE LA PLUMA DE DESCARGA

En la Figura 9-31 se aprecia el comportamiento hidrodinámico para los casos *2M* - *3M* y *4M* - *5M*, respectivamente. Sus características generales son semejantes a las detalladas en la sección 6.1.1 (casos *1M* y *6M*); mientras sus particularidades se analizan a continuación. Cabe indicar que si bien los campos hidrodinámicos de los diferentes casos medios presentan algunas diferencias en cuanto a direcciones e intensidades de las corrientes (asociadas a la incidencia de las forzantes), éstas no repercuten de forma significativa en la advección de la pluma; y por ende, en las concentraciones de CF cuantificadas en las áreas sensibles (*ZPL* y *AMERB*), siendo corroborado en el Anexo H.2.

- *Casos 2M y 3M. Figura 9-31, a - b:* El patrón hidrodinámico general es similar tanto en la direccionalidad como en la intensidad del mismo, siendo su principal diferencia la velocidad de la corriente litoral. Específicamente, para el modelo forzado con viento proveniente desde el Oeste (caso *2M*), la corriente longitudinal desde el centro al Sur de la bahía es más intensa, lo que genera un comportamiento diferente en el transporte de la pluma de aguas servidas. Por otro lado, el modelo forzado con viento proveniente desde el Suroeste (caso *3M*) genera corrientes más intensas frente a Punta Tortuga y afecta la velocidad de la misma tanto en el punto de vertido como área circundante, promediando una corriente de $0.04 [m/s]$.
- *Casos 4M y 5M. Figura 9-31, c - d:* Se presenta el mismo patrón hidrodinámico tanto en direccionalidad como intensidad, debido a la baja intensidad de las forzantes. En ambos casos se calcula una intensidad de la corriente, sobre el punto de vertido y área circundante, igual a $0.02 [m/s]$.

Por otro lado, en la Figura 9-32 se aprecia el comportamiento de la pluma de vertido para los casos *medios 2M, 3M, 4M y 5M*; mientras su análisis particular se efectúa a continuación.

- *Casos 2M y 3M. Figura 9-32, a - b:* Se aprecia una disposición ovalada de la pluma con tendencia hacia el Sur y Norte, respectivamente. En ambos casos, la concentración de CF sobre la *ZPL* y las *AMERB* son menores a $70 [NMP/100 ml]$; mientras que su coeficiente de difusión es de $3 [m^2/s]$.
- *Casos 4M y 5M. Figura 9-32, c - d:* Se observa una pluma con tendencia circular y sin grandes diferencias. En ambos casos, se aproxima tanto a la *ZPL* como al *AMERB Coquimbo* y en esta última supera los límites permitidos de acuerdo a las normas ambientales ($> 70 NMP/100 ml$). Cabe destacar que el coeficiente de difusión, utilizado en ambos casos, es igual a $5 [m^2/s]$.

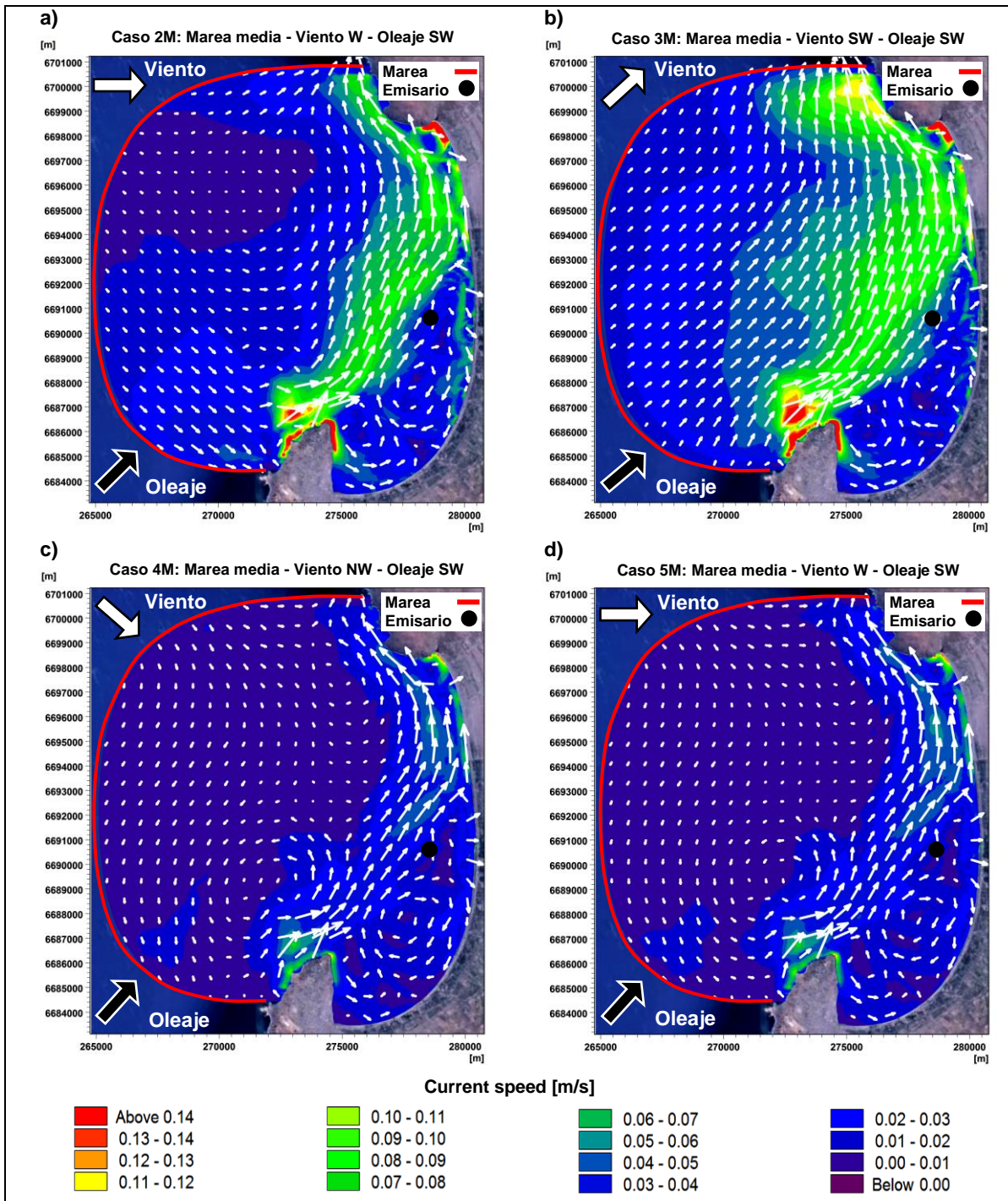


Figura 9-31: Respuesta hidrodinámica de simulaciones MVO. Casos a) 2M, b) 3M, c) 4M y d) 5M.

Fuente: Elaboración propia.

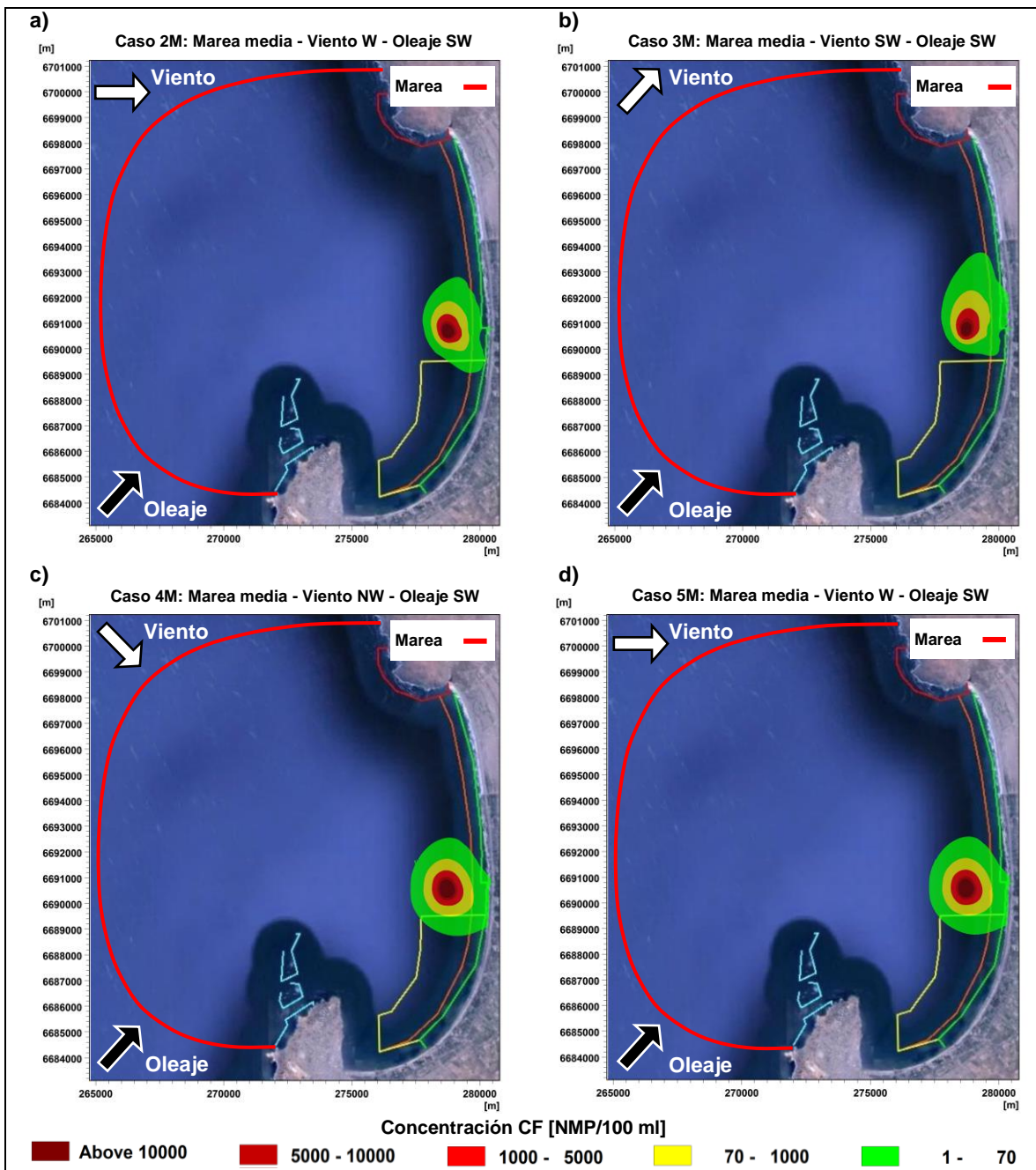


Figura 9-32: Comportamiento de la pluma con un caudal medio de vertido. Simulaciones MVO. Casos a) 2M, b) 3M, c) 4M y d) 5M.

Fuente: Elaboración propia.

H.2 ANÁLISIS DE CF EN LA ZPL Y LAS AMERB

En el presente Anexo, se analizó la cuantificación de los CF sobre el límite de la ZPL y las AMERB tanto de Coquimbo como de Peñuelas, para los casos medios 2M, 3M, 4M y 5M; los que consideran un caudal de vertido tanto medio como máximo. Se destaca una mínima influencia de la dirección e incidencia de las forzantes (casos medios) sobre la concentración de los CF en las áreas sensibles.

Por otro lado, es preciso recordar que el límite en la concentración de CF, de acuerdo a la normativa ambiental, es de 70 [NMP/ 100 ml] para las AMERB y 1000 [NMP/ 100 ml] para la ZPL.

Por último, se desarrolla el análisis para las zonas sensibles presentes en la bahía.

- ZPL:
 - Casos 2M y 3M (Figura 9-33, a - b): En ambos casos, se observa una concentración de CF que no supera los 100 [NMP/ 100 ml] y por tanto, no transgreden las normas ambientales.
 - Casos 4M y 5M (Figura 9-33, c - d): Se aprecia, en ambos casos, una alta similitud en la distribución del contaminante. Además, sus concentraciones máximas bordean los ~ 200 [NMP/ 100 ml] y, por tanto, cumplen con la normativa ambiental vigente (< 1000 NMP/ 100 ml).
- AMERB Coquimbo:
 - Casos 2M y 3M (Figura 9-34, a - b): Sólo se aprecian variaciones en el caso 2M, con una concentración promedio del contaminante de 10 [NMP/ 100 ml]. Por tanto, se encuentra bajo del límite normado para las AMERB.
 - Casos 4M y 5M (Figura 9-35, a - b): Se observa una similitud de la distribución del contaminante en ambos casos. No obstante, la cuantificación en el modelo 4M es levemente superior (una diferencia entre ambos de ~ 10 NMP/ 100 ml). Por otro lado, ambos modelos superan el límite ambiental para las AMERB y alcanzan un promedio de ~ 85 [NMP/ 100 ml] para los casos de caudal de vertido medio y ~ 110 [NMP/ 100 ml] para los de caudal máximo.
- AMERB Peñuelas:
 - Casos 2M y 3M (Figura 9-36, a - b): Se aprecian variaciones de la concentración del contaminante en el Sector B del presente AMERB. Sin embargo, ambos casos cumplen con la normativa ambiental y, específicamente, el caso 3M muestra mayores registros (~ 10 NMP/ 100 ml).
 - Casos 4M y 5M (Figura 9-36, c - d): Se observan variaciones similares en cuanto a su forma y concentraciones máximas (~ 15 NMP/ 100 ml); además, ambos casos cumplen con el límite establecido en la normativa ambiental.

En síntesis, solamente los casos 4M y 5M sobrepasaron el límite establecido en el AMERB Coquimbo; mientras el resto de las zonas sensibles registraron concentraciones permisibles de acuerdo a la normativa ambiental.

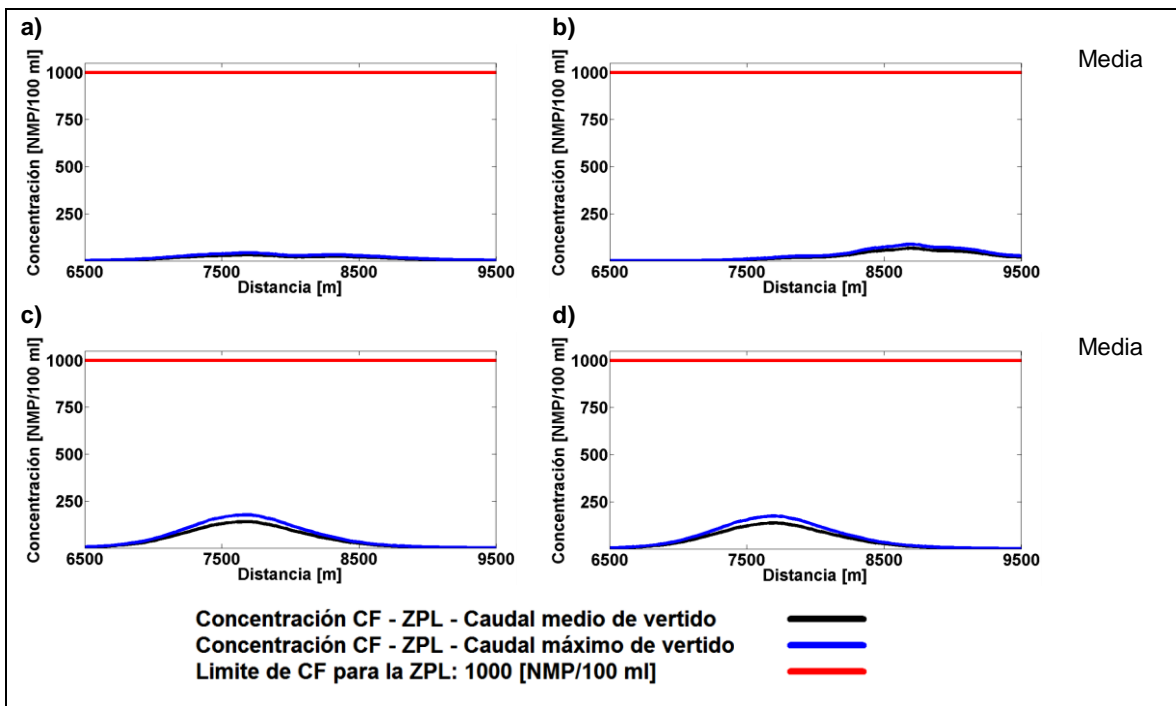


Figura 9-33: Concentración de los CF en la ZPL. Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 2M, b) 3M, c) 4M y d) 5M.

Fuente: Elaboración propia.

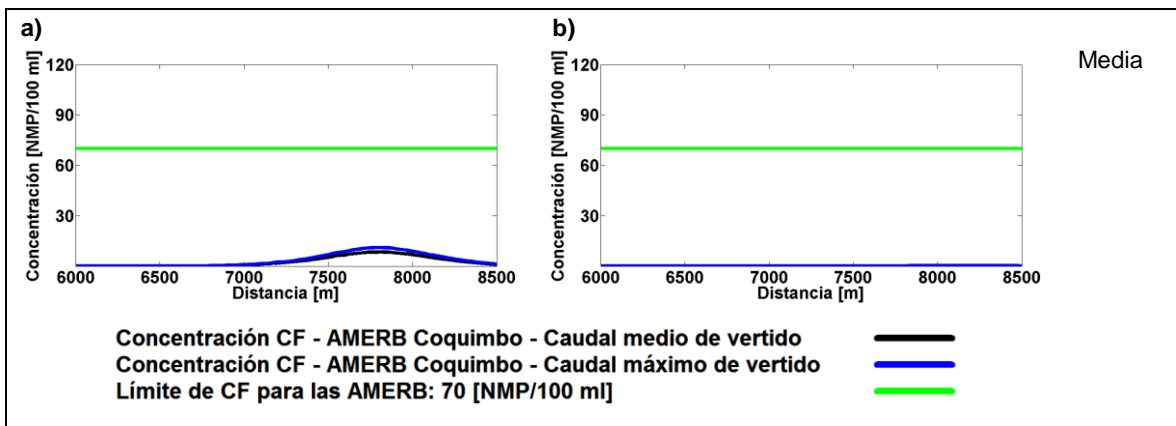


Figura 9-34: Concentración de los CF en el AMERB Coquimbo. Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 2M y b) 3M.

Fuente: Elaboración propia.

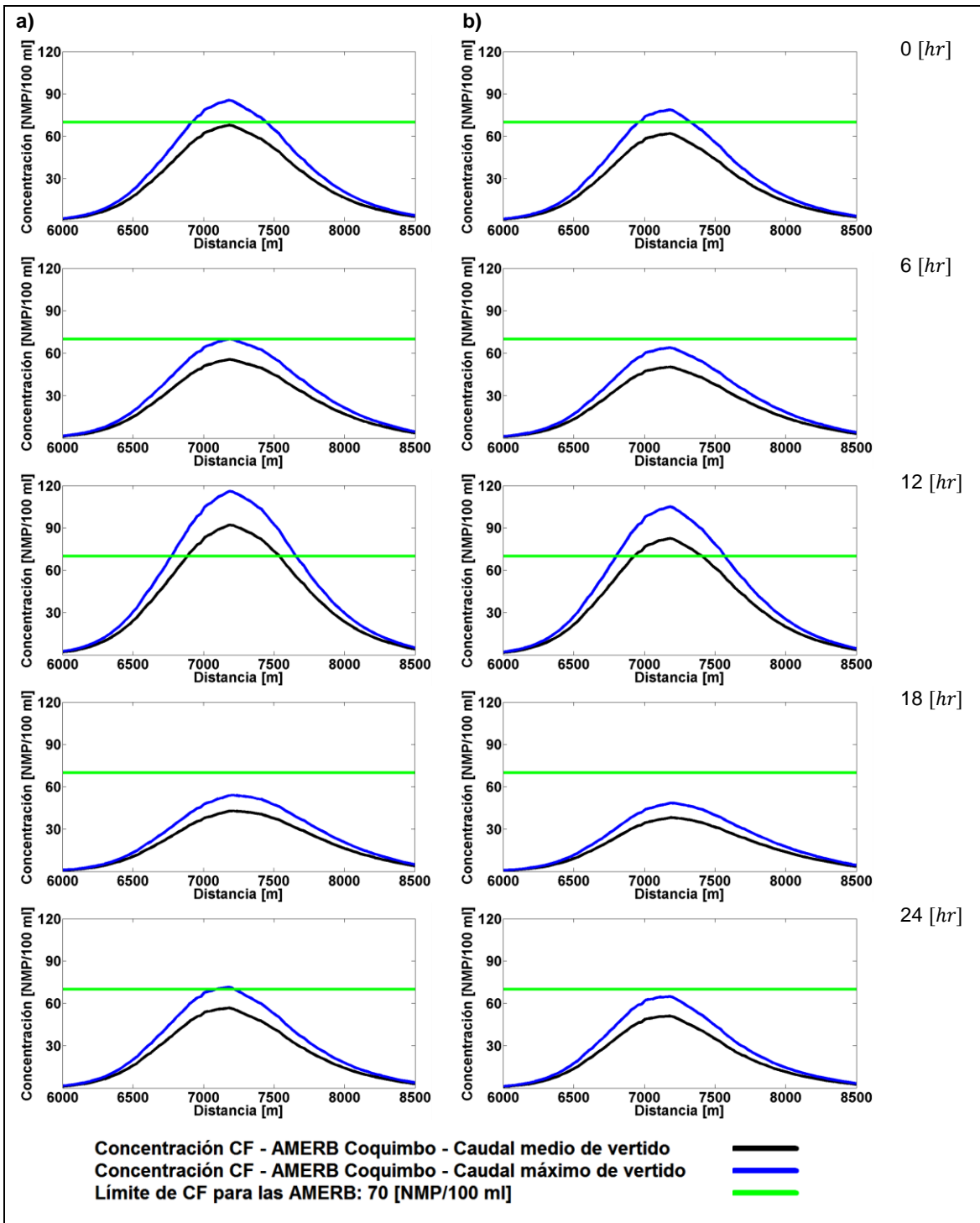


Figura 9-35: Concentración de los CF en el AMERB Coquimbo (continuación). Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 4M y b) 5M.

Fuente: Elaboración propia.

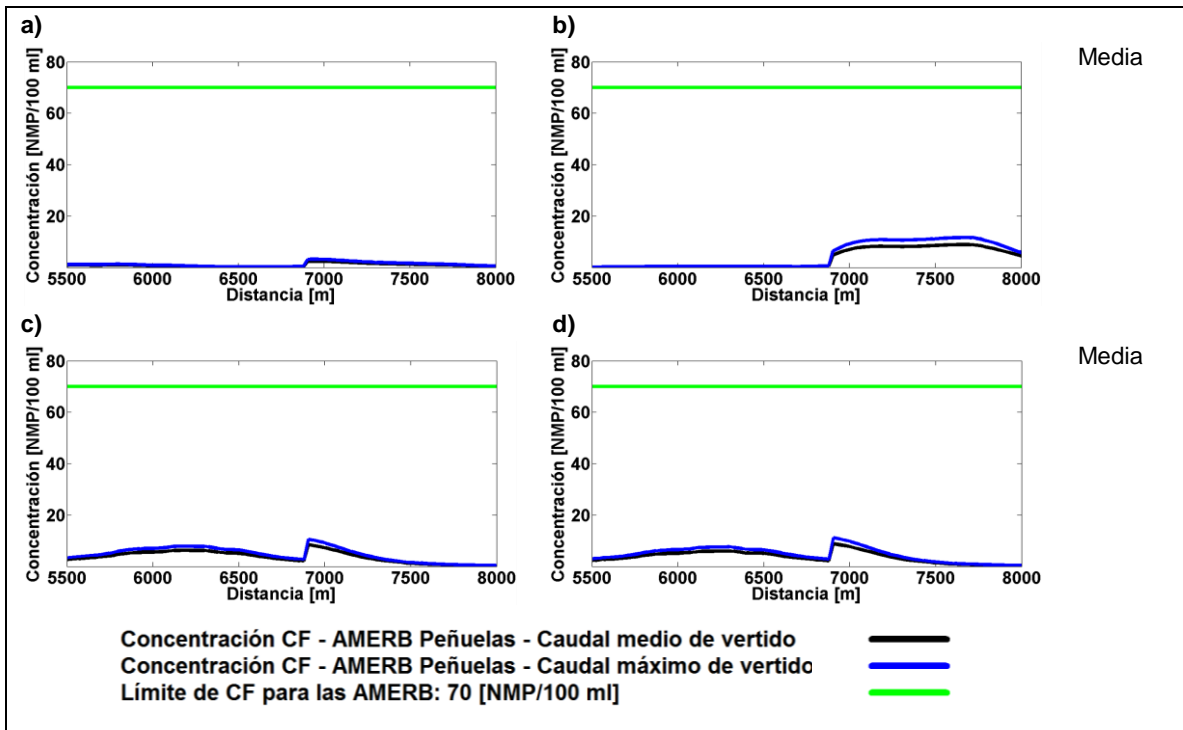


Figura 9-36: Concentración de los CF en el AMERB Peñuelas.
Variación en el tiempo de la concentración. Casos a) 2M, b) 3M, c) 4M y d) 5M.

Fuente: Elaboración propia.