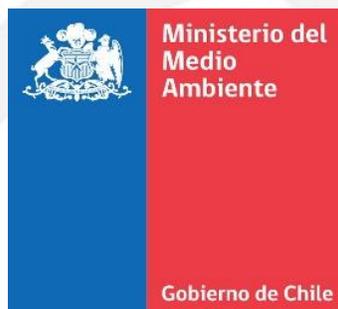




**MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA  
BAHÍA DE QUINTERO**

**ID: 608897-21-LE19**

**SUBSECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE**



**Informe Etapa N°4**

**Mayo de 2020**

<b>MANDANTE</b>	<b>SUBSECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE</b>			
<b>NOMBRE DEL CONTRATO</b>	<b>MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA BAHÍA DE QUINTERO</b>			
<b>TITULO DEL DOCUMENTO</b>	<b>INFORME ETAPA N°4</b>			
<b>NUMERACIÓN</b>	<b>E092-19-SSMA</b>			
<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Preparó</b>	<b>Revisó</b>	<b>Aprobó</b>
<b>A</b>	<b>10-03-2020</b>	<b>Marco Matamala</b>	<b>Juan Torres</b>	<b>Alejandro Arenas</b>
<b>1</b>	<b>07-04-2020</b>	<b>Marco Matamala</b>	<b>Juan Torres</b>	<b>Alejandro Arenas</b>
<b>2</b>	<b>22-04-2020</b>	<b>Marco Matamala</b>	<b>Juan Torres</b>	<b>Alejandro Arenas</b>
<b>3</b>	<b>07-05-2020</b>	<b>Marco Matamala</b>	<b>Juan Torres</b>	<b>Alejandro Arenas</b>

---

## EQUIPO PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

*Jefe de Estudio: Alejandro Arenas H.*

*Especialista Modelación: Marco Matamala C.*

*Ingeniero Sénior: Juan Torres C.*

*Ingeniero Civil: Gustavo Romero S.*

*Ingeniero Civil: Jonás Valdivieso*

*Ingeniero Civil: Patricio Muñoz P.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....</b>	<b>20</b>
3.1	OBJETIVO GENERAL .....	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
<b>4</b>	<b>ANTECEDENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>21</b>
4.1	CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTERO CAMPICHE .....	21
4.2	MAREA .....	23
4.3	OLEAJE.....	25
4.4	BATIMETRÍA .....	29
4.5	VIENTO .....	31
4.6	CORRIENTE.....	34
4.6.1	<i>Corrientes eularianas .....</i>	<i>35</i>
4.6.2	<i>Corrientes Lagrangianas .....</i>	<i>38</i>
4.7	TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD .....	40
4.7.1	<i>Temperatura.....</i>	<i>40</i>
4.7.2	<i>Salinidad.....</i>	<i>41</i>
4.7.3	<i>Densidad.....</i>	<i>42</i>
4.8	EMISIONES DE METALES PESADOS Y NUTRIENTES .....	42
4.8.1	<i>Datos de monitoreo y fiscalización reportados en el marco del cumplimiento del D.S. 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Republica.....</i>	<i>43</i>
4.8.2	<i>Planes de vigilancia y seguimiento de variables ambientales .....</i>	<i>49</i>
4.8.3	<i>Base de datos POAL .....</i>	<i>52</i>
4.8.4	<i>Nutrientes en la bahía de Quintero y Puchuncaví.....</i>	<i>58</i>
4.8.5	<i>Fuente difusa: Material Particulado Sedimentable (MPS) en la bahía de Quintero y Puchuncaví</i>	<i>59</i>
<b>5</b>	<b>MODELO HIDRODINÁMICO Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES DELFT3D .....</b>	<b>60</b>
5.1	CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA PARA LA MODELACIÓN.....	60
5.2	PERIODO DE MODELACIÓN .....	62

<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
6.1	CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN E INDICADOR DE SENSIBILIDAD DEL MODELO NUMÉRICO .....	65
6.2	HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE QUINTERO-PUCHUNCAVÍ .....	67
6.3	ANÁLISIS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES .....	71
6.3.1	<i>Cobre.....</i>	72
6.3.2	<i>Arsénico.....</i>	76
6.3.3	<i>Cadmio .....</i>	80
6.3.4	<i>Mercurio.....</i>	84
6.3.5	<i>Coliformes Fecales .....</i>	89
6.3.6	<i>Nutrientes – Nitrógeno y Fosfato.....</i>	92
6.4	RESULTADOS DE LOS EFECTOS INDIVIDUALES EN LA BAHÍA POR FUENTE EN LA “SITUACIÓN ACTUAL” .....	101
6.4.1	<i>Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1.....</i>	101
6.4.2	<i>Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 2.....</i>	102
6.4.3	<i>Descarga Central Termoeléctrica Nueva Ventanas.....</i>	103
6.4.4	<i>Descarga Central Termoeléctrica Campiche.....</i>	104
6.4.5	<i>Descarga CODELCO - Refinería Ventanas.....</i>	105
6.4.6	<i>Descarga Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Quintero .....</i>	106
6.4.7	<i>Descarga Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Baño Modular.....</i>	106
6.4.8	<i>Descarga ENAP - Terminal Marítimo Quintero .....</i>	107
6.4.9	<i>Descarga COPEC.....</i>	107
6.4.10	<i>Descarga GASMAR - Descarga Bahía de Quintero Circuito 1200.....</i>	108
6.4.11	<i>Descarga Pesquera Quintero.....</i>	109
6.4.12	<i>Descarga Puerto Ventanas S.A. - Terminal Marítimo Puerto Ventanas S.A. (Muelle Mecanizado de Ventanas) .....</i>	109
6.4.13	<i>Descarga ESVAL - ES-Quintero.....</i>	110
6.4.14	<i>Descarga directa aguas servidas-Puchuncaví.....</i>	111
6.5	ESCENARIO DE MODELACIÓN N° 1: (CESE DE FUNCIONAMIENTO UNIDADES DE VENTANA 1 Y 2) .....	112
6.6	ESCENARIO DE MODELACIÓN N° 2: (REDUCCIONES EN LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN 25%)... 114	
6.7	ESCENARIO DE MODELACIÓN N° 3: (CESE DE FUNCIONAMIENTO REFINERÍA CODELCO VENTANA).....	117
<b>7</b>	<b>PROPUESTA ÁREAS DE VIGILANCIA Y RED DE MONITOREO .....</b>	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>CAPACITACIÓN FUNCIONARIOS DEL MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE .....</b>	<b>122</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....</b>	<b>123</b>
<b>10</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>126</b>

## NDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Complejo Industrial Quintero-Puchuncaví (Fuente: Historia ambiental de Quintero y Puchuncaví PRAS).....	14
Figura 2-1: Área de Proyecto Bahía Quintero.....	18
Figura 2-2: Mapa área de interés.....	19
Figura 4-1. Promedio de los caudales medios mensuales del estero Campiche en desembocadura. ....	22
Figura 4-2: Marea Quintero periodo de Verano.....	23
Figura 4-3: Marea Quintero periodo de Invierno.....	23
Figura 4-4: Nodo 33 Oleaje en Aguas Profundas (INH- FUGRO OCEANOR).....	26
Figura 4-5: Matriz tipo de Espectro de densidad de energía del oleaje.....	28
Figura 4-6: Batimetría Bahía de Quintero.....	29
Figura 4-7: Batimetría interpolada a utilizar para el modelo Hidrodinámico.....	30
Figura 4-8 Ubicación estaciones Red de Monitoreo Complejo Industrial Las Ventanas.) Fuente: <a href="http://www.redmonitoreoventanas.cl">http://www.redmonitoreoventanas.cl</a> ).....	32
Figura 4-9: Estaciones de Monitoreo POAL Columna de Agua.....	53
Figura 4-10: Ubicación Estaciones de Monitoreo POAL Columna de Agua 2018.....	54
Figura 4-11: Estaciones Calidad Química de Sedimentos POAL.....	57
Figura 5-1: Diagrama de la Modelación de Dispersión de Contaminantes.....	61
Figura 6-1: Grillas de modelación de oleaje (oleajes en aguas profundas y detalle en el área cercana a la costa).....	63
Figura 6-2: Grilla de modelación modelo hidrodinámico y de dispersión de contaminantes. ....	64
Figura 6-3: Calibración Mareas.....	66
Figura 6-4: Descargas incorporadas en la construcción del Modelo.....	67
<b>Figura 6-5: Patrón de circulación, oleaje reinante fase lunar en sicigia.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 6-6: Patrón de circulación, oleaje reinante fase lunar en cuadratura.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 6-7: Patrón de circulación, oleaje dominante fase lunar en sicigia.....</b>	<b>70</b>

<b>Figura 6-8: Patrón de circulación, oleaje dominante fase lunar en cuadratura .....</b>	<b>70</b>
Figura 6-9: Dispersión de concentraciones de Cobre ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia) .....	72
Figura 6-10: Dispersión de concentraciones de Cobre ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura).....	73
Figura 6-11: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cu con oleaje reinante.....	74
Figura 6-12: Dispersión de concentraciones de Cu ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia) .....	75
Figura 6-13: Dispersión de concentraciones de Cu ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura).....	75
Figura 6-14: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cu con oleaje dominante ..	76
Figura 6-15: Dispersión de concentraciones de Arsénico ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia).....	77
Figura 6-16: Dispersión de concentraciones de Arsénico ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura).....	77
Figura 6-17: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de As en Bahía de Quintero ...	78
Figura 6-18: Dispersión de concentraciones de As ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia) .	79
Figura 6-19: Dispersión de concentraciones de As ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura) .....	79
Figura 6-20: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de As con oleaje dominante ..	80
Figura 6-21: Dispersión de concentraciones de Cadmio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia) .....	81
Figura 6-22: Dispersión de concentraciones de Cadmio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura).....	81
Figura 6-23: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cd en Bahía de Quintero ...	82
Figura 6-24: Dispersión de concentraciones de Cd ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia) .	83
Figura 6-25: Dispersión de concentraciones de Cd ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura) .....	83

Figura 6-26: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cd con oleaje dominante ..	84
Figura 6-27: Dispersión de concentraciones de Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia).....	85
Figura 6-28: Dispersión de concentraciones de Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura).....	85
Figura 6-29: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Hg en Bahía de Quintero... 86	
Figura 6-30: Dispersión de concentraciones de Hg ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia) .....	87
Figura 6-31: Dispersión de concentraciones de Hg ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura).....	88
Figura 6-32: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Hg con oleaje dominante ..	88
Figura 6-33: Dispersión de concentraciones de Coliformes Fecales NMP/ $\text{m}^3$ en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia).....	89
Figura 6-34: Dispersión de concentraciones de Coliformes fecales (NMP/ $\text{m}^3$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura) .....	90
Figura 6-35: Dispersión de concentraciones de Coliformes fecales (NMP/ $\text{m}^3$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia) .....	91
Figura 6-36: Dispersión de concentraciones de Coliformes fecales (NMP/ $\text{m}^3$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura) .....	91
Figura 6-37: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total ( $\text{mg/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia).....	93
Figura 6-38: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total ( $\text{mg/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura) .....	94
Figura 6-39: Dispersión de concentraciones de Fosfato ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia) .....	95
Figura 6-40: Dispersión de concentraciones de Fosfato ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura).....	95
Figura 6-41: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Fosfato en Bahía de Quintero .....	96

Figura 6-42: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Nitrato en Bahía de Quintero .....	96
Figura 6-43: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia) .....	97
Figura 6-44: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura) .....	98
Figura 6-45: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Nitrato con Oleaje dominante .....	98
Figura 6-46: Dispersión de concentraciones de Fosfato (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia).....	99
Figura 6-47: Dispersión de concentraciones de Nitrato (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura) .....	100
Figura 6-48: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Fosfato con oleaje dominante .....	100
Figura 6-49: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1.....	101
Figura 6-50: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 2.....	102
Figura 6-51: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Central Termoeléctrica Nueva Ventanas .....	103
Figura 6-52: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Central Termoeléctrica Campiche. ....	104
Figura 6-53: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga CODELCO - Refinería Ventanas .....	105
Figura 6-54: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Quintero .....	106
Figura 6-55: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga ENAP - Terminal Marítimo Quintero .....	107
Figura 6-56: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga GASMAR - Descarga Bahía de Quintero Circuito 1200 .....	108
Figura 6-57: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Pesquera Quintero .....	109

Figura 6-58: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga ESVAL - ES-Quintero .....	110
Figura 6-59: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga directa aguas servidas-Puchuncaví 111	
Figura 6-60: Dispersión del Cu para Escenario sin funcionamiento de Ventana 1 y 2. Punto rojo en el mapa representa el punto de extracción de datos .....	112
Figura 6-61: Gráfica de comparación de concentraciones de Cobre para el punto de extracción en el centro de la bahía .....	113
Figura 6-62: Gráfica de comparación de concentraciones de Nitrato para el punto de extracción en el centro de la bahía .....	113
Figura 6-63: Dispersión de contaminantes de Arsénico para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en (µg/L) .....	115
Figura 6-64: Dispersión de contaminantes de Cadmio para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en (µg/L) .....	115
Figura 6-65: Dispersión de contaminantes de Cobre para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en (µg/L) .....	116
Figura 6-66: Dispersión de contaminantes de Mercurio para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en (µg/L) .....	116
Figura 7-1: Red de monitoreo propuesta reducida.....	119
Figura 7-2: Red de monitoreo propuesta reducida.....	120
Figura 7-3: Propuesta de Áreas de Vigilancia .....	121
Figura 8-1: Portada de Video N° 1 de las Creación y configuración de grilla y batimetría del modelo Delft3D .....	122

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Áreas de la cuenca de la estación Estero Quintero en Valle Alegre y de la cuenca del estero Campiche en Desembocadura.....	21
Tabla 4.2. Promedio de los caudales medios mensuales de la Estero Quintero en Valle Alegre y del estero Campiche en Desembocadura.....	22
Tabla 4.3: Registro de niveles de mareas Bahía de Quintero (Fuente Romo 1973).....	24

Tabla 4.4: Amplitud y fase de las constantes armónicas, incluyendo sus respectivos errores. Invierno 2016. (Fuente ECOTECNOS 2016) .....	24
Tabla 4.5: Constantes armónicas input, condición de borde modelo Delft3D- Flow.....	25
Tabla 4.6: Nodo Oleaje Fugro.....	26
Tabla 4.7: Estaciones Meteorológicas de la DMC cercanas a la bahía de Quintero.....	31
Tabla 4.8: Información Disponible de Vientos en el Área de Estudio .....	33
Tabla 4.9: Correntometría realizadas en la bahía de Quintero.....	34
Tabla 4.10: Campañas de Medición de Corrientes (Invierno y Verano ECOTECNOS) .....	35
Tabla 4.11: Capas por ADCP. ELB Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N°3. AES GENER. Bahía Quintero, verano 2016.....	37
Tabla 4.12: Capas por ADCP. ELB Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N°3. AES GENER. Bahía Quintero, invierno 2016.....	37
Tabla 4.13: Coordenadas de lanzamiento de derivadores. ELB Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N°3. AES GENER. Bahía Quintero.....	38
Tabla 4.14: Ubicación de las estaciones CTDO campañas Verano e Invierno 2016 (Fuente: ECOTECNOS) ..	40
Tabla 4.15: Datos de entrada por descarga de Residuos Líquidos.....	45
Tabla 4.16: Carga de Contaminantes en 15 días.....	46
Tabla 4.17: Carga de contaminante media diaria (100 Hab/día) (Fuente: D.S. 90, 2001) .....	47
Tabla 4.18: Carga de contaminantes para descarga directa de aguas servidas Puchuncaví .....	49
Tabla 4.19: Planes de Vigilancia o Seguimiento Ambiental en Unidades Fiscalizables (Fuente: MMA-HOLON, 2019).....	49
Tabla 4.20: Variables de Monitoreo para las Unidades Fiscalizables (Fuente: MMA-HOLON, 2019) .....	50
Tabla 4.21: Resumen de Parámetros Monitoreados por UF con Información relevante para el Estudio .....	50
Tabla 4.22: Análisis de Cobre Total del PVA en Matriz Acuosa.....	51
Tabla 4.23: Análisis de Arsénico Total del PVA en Matriz Acuosa .....	52
Tabla 4.24: Estaciones de Monitoreo POAL Calidad de Columna de Agua .....	52
Tabla 4.25: Estaciones POAL 2018.....	55

---

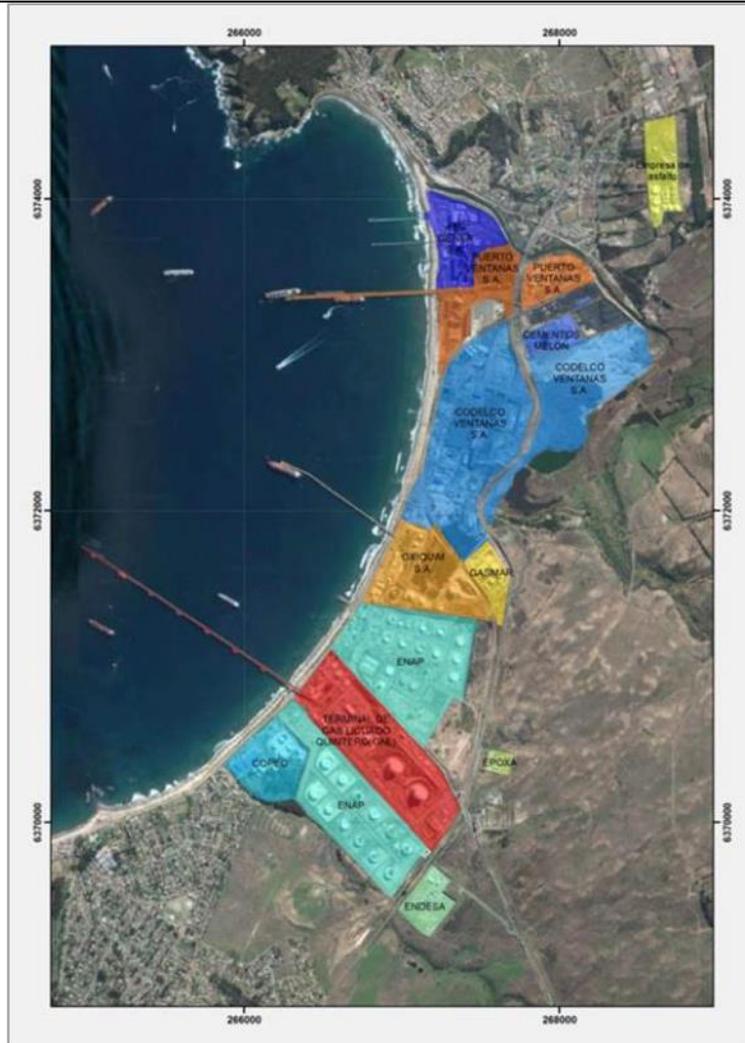
Tabla 4.26: Valores Metales presenten en columna de agua POAL 2018 .....	55
Tabla 4.27: Metales Prioritarios en Comparación a las Normativas Nacionales e Internacionales .....	56
Tabla 4.28: Resumen metales pesados prioritarios en sedimentos y normativa internacional .....	57
Tabla 4.29: Fuente difusa, Emisiones atmosféricas utilizadas en el modelo de dispersión de contaminantes .....	59
Tabla 4.30: Carga de Contaminantes en 15 días.....	59
Tabla 6.1: Características del PC de Modelación .....	65
Tabla 6.2: Resumen de calibración del módulo hidrodinámico, para magnitudes de la corriente.....	66
Tabla 6.3: Disminución de las concentraciones de contaminantes .....	117

---

## 1 INTRODUCCIÓN

El parque industrial en la Bahía de Quintero (ver Figura 1-1), se ha expandido en sus más cuarenta años de funcionamiento, lo cual significó una importante fuente laboral y de desarrollo para la zona, llevando a crear sectores habitacionales y balnearios. Sin embargo, el crecimiento industrial también produjo impactos ambientales que desde sus inicios provocaron la resistencia de varios actores locales. Los primeros fueron los agricultores que interpusieron demandas contra ENAMI por daño a cultivos y animales, luego se sumaron los profesores de la zona, quienes redactaron quejas a la autoridad por la contaminación a la que estaban expuestos. Esto implicó que en la década de los ochenta ya se hicieran estudios del nivel de contaminación en el agua y el suelo, y de la salud de los trabajadores de la refinería y la fundición. En el año 1992 se reconoció el alto nivel de contaminación del aire en la zona, por lo que se adoptaron medidas como el Plan de Descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas, propuesto por ENAMI y Chilgener y aprobado por el Decreto Supremo N° 252/92 del Ministerio de Minería. En tanto, en 1993 el Ministerio de Agricultura, por medio del Decreto Supremo N°346/93, declaró Puchuncaví y Quintero como zona saturada de contaminación por anhídrido sulfuroso y material particulado.

El episodio de intoxicación masiva de alumnos y profesores en la ex escuela La Greda debido a una fuga de dióxido de azufre de la fundición y refinería Codelco Ventanas, que derivó en su cierre y relocalización; los dos derrames de petróleo en la bahía; las decenas de alzas de emisión de SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) y otros incidentes ambientales, han implicado que las exigencias de la comunidad sean más visibles, solicitando en un corto plazo soluciones concretas. ((Fuente: Historia ambiental de Quintero y Puchuncaví PRAS)



**Figura 1-1: Complejo Industrial Quintero-Puchuncaví (Fuente: Historia ambiental de Quintero y Puchuncaví PRAS)**

Por otra parte, el Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Quintero y Puchuncaví (PRAS de Quintero y Puchuncaví) es un programa multisectorial liderado por el Ministerio del Medio Ambiente. El cual busca el diálogo entre actores diversos que permita a los ciudadanos del territorio, mediante un modelo participativo, vivir en un ambiente libre de contaminación. así como también señalar las prioridades de recuperación ambiental y social definiendo la gradualidad de su implementación.

Este proceso participativo ha identificado, para ambas comunes, 25 objetivos que se han denominado objetivos territoriales, que a su vez pueden traducirse en objetivos institucionales para garantizar la respuesta de los diversos sectores a través de sus respectivos instrumentos.

---

Para la componente territoriales:

- Alcanzar una buena calidad del medio marino que permita diferentes usos (productivos, recreación, salud)
- Asegurar estándares de infraestructura y procesos industriales seguros para la biodiversidad marina Mar, se han establecido 2 objetivos

Para cada uno de los objetivos identificarlos en el proceso, el PRAS<sup>1</sup> propone un conjunto de opciones de soluciones o medidas, las cuales han sido debidamente consensuadas por los integrantes del Consejo para la Recuperación ambiental y Social (CRAS) de Quintero y Puchuncaví, bajo un esquema de participación liderado por el Ministerio del Medio Ambiente. El programa presenta un total de 123 opciones de soluciones, cuya implementación progresiva significará una mejora en la calidad de vida de los habitantes de Quintero y Puchuncaví

Para la componente Mar, algunas de las soluciones propuestas por el CRAS son:

- Reducir la carga contaminante que recibe la bahía, a través del uso de las mejores tecnologías en los procesos industriales.
- Dragado de sedimentos en áreas con acumulación de contaminantes.
- Implementación de una norma de calidad de agua secundaria.
- Realizar una revisión del Decreto Supremo N°90/2001 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- Realizar estudios que permitan: Determinar la contaminación por metales pesados y el alcance histórico de esta; medir los efectos sinérgicos de los flujos de materiales contaminantes en la bahía.

El presente estudio tiene por finalidad predecir el comportamiento de los diversos contaminantes presentes en la bahía de Quintero y su interacción para determinar zonas de vigilancia ambiental, a través de modelación matemática. Así mismo, se requiere capacitar a profesionales del Ministerio del Medio Ambiente, en el uso de software de modelación hidrodinámica, con el fin de servir como apoyo para la elaboración de instrumentos de gestión ambiental

---

<sup>1</sup> Programa para la Recuperación Ambiental y Social (PRAS) de Quintero Puchuncaví. páginas 81 a la 94. Ministerio del Medio Ambiente. 2017. Santiago, Chile

Para evaluar y caracterizar adecuadamente todos los fenómenos descritos anteriormente, se requiere la utilización de diferentes técnicas y herramientas de modelación numérica avanzadas, dependiendo del fenómeno de análisis, las cuales se describen en los próximos capítulos.

En términos generales, asegurar el buen éxito en el desarrollo de este tipo de estudios de modelación hidráulica con técnicas y herramientas numéricas avanzadas de hidrodinámica, están directamente relacionados con los siguientes tres aspectos:

- Adecuada Información Base en términos de calidad y cantidad
- Adecuada recopilación y análisis de la información de línea base del estudio, relacionada con el medio marino: batimetría, condiciones atmosféricas, oleaje, marea, corrientes, calidad de aguas y sedimentos, biota marina litoral, pelágica y bentónica.
- Adecuadas Técnicas y Modelos numéricos a utilizar (tipo 1D, 2D, 3D) según el fenómeno

La información base se refiere a la calidad y cantidad de datos que permiten describir y caracterizar adecuadamente el sistema hídrico sobre el cual vamos a realizar el estudio. Esto se refiere a características físicas del medio marino, de tipo: batimétricas, oceanográficas (oleaje, mareas, corrientes, vientos, temperatura, salinidad), sedimentológicas, configuración y diseño de las Obras de Tomas o Descargas (geometría, caudal, reglas de operación, etc.) y que estén en concordancia con el objetivo del estudio.

En cuanto a la adecuada elección y uso de modelos numéricos, es fundamental contar con herramientas que permitan representar adecuadamente el fenómeno que se desea estudiar. En el caso de las descargas al ambiente marino es importante reproducir de manera adecuada las corrientes, inducidas por oleaje, viento y mareas, que son las principales forzantes físicas del medio receptor, que transportan la pluma descargada, sea de tipo térmica, salina, de sedimentos o una combinación de estas. Se debe aplicar en estos casos un modelo numérico 2D (bidimensional) de carácter regional, que acople propagación de oleaje desde aguas profundas, generación de oleaje por viento local, efectos de desnivelación mareal, en conjunto con modelos hidrodinámicos que permitan modelar y analizar el campo de circulación general de las corrientes en el sistema marino próximo a la zona de captación / restitución de caudales.

Posteriormente, o en forma conjunta, se deben emplear herramienta numéricas del tipo 3D (tridimensional), que permitan, en forma local, caracterizar en planta y en la vertical los gradientes

térmicos, densimétricos y fenómenos turbulentos de mezcla, que permita analizar en planta y a nivel de profundidad (capas), el efecto de una descarga al medio marino, y con ello simular la dilución y el transporte de las plumas de sedimentos, térmica y salina, y someterlo a fenómenos de advección, dispersión y dilución provocados por las corrientes características de la zona en estudio.

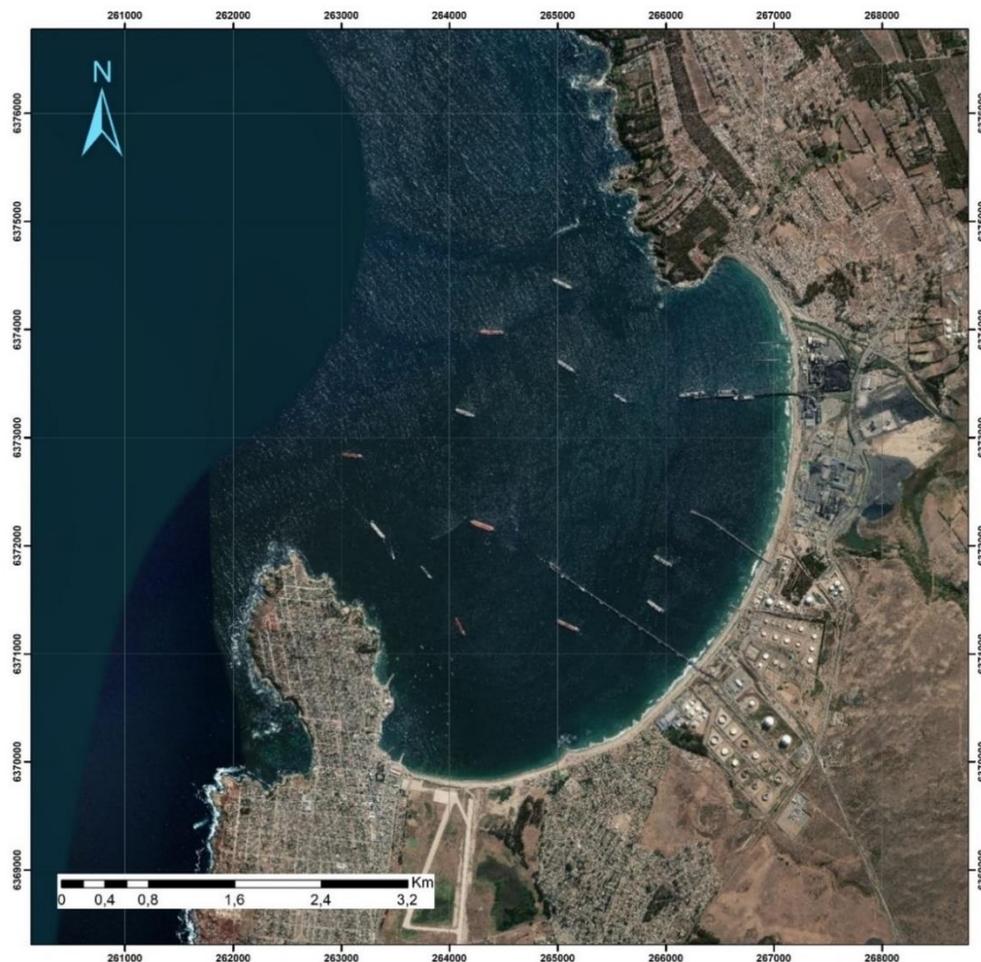
Localmente, en la zona de la descarga se debe analizar el campo cercano en cuanto a las características de mezcla, difusión y dilución que se generan, de modo de transferir adecuadamente la concentración / dilución inmediata que se genera al ambiente marino, y que, por resolución espacial de la grilla de modelación, o limitaciones físicas de las ecuaciones del modelo numérico, podría no quedar representada adecuadamente, en la transferencia al modelo de campo lejano.

Finalmente, es muy importante mencionar que, resulta fundamental que el modelador a cargo del estudio sea un profesional con experiencia en este tipo de desarrollos, conocedor de las limitaciones y campos de validez de las herramientas computacionales que utilice, de modo que con criterio y metodología robusta, guíe las modelaciones y logre enfocarse en los aspectos más relevantes de la problemática en estudio, de forma de lograr una adecuada representación y posterior análisis de los resultados para, finalmente, obtener una adecuada caracterización y cuantificación de los fenómenos físicos relevantes en este tipo de estudios.

## 2 ÁREA DE ESTUDIO

Las comunas de Quintero y Puchuncaví se ubican política y geográficamente en la Región de Valparaíso, encontrándose al lado norte de la Provincia de Valparaíso.

El área específica de estudio se ubicada en la Bahía de Quintero específicamente en el Parque Industrial de Quintero - Puchuncaví, presentado en Figura 2-1.



**Figura 2-1: Área de Proyecto Bahía Quintero**

La Figura 2-2 presenta el mapa del área de interés en función de la ubicación de fuentes de emisión identificadas, estero, zonas que entreguen servicios ecosistémicos (considerando áreas de manejo, reservas y otras actividades económicas que se desarrollen en las cercanías) y zonas de importancia para la biodiversidad de la bahía.

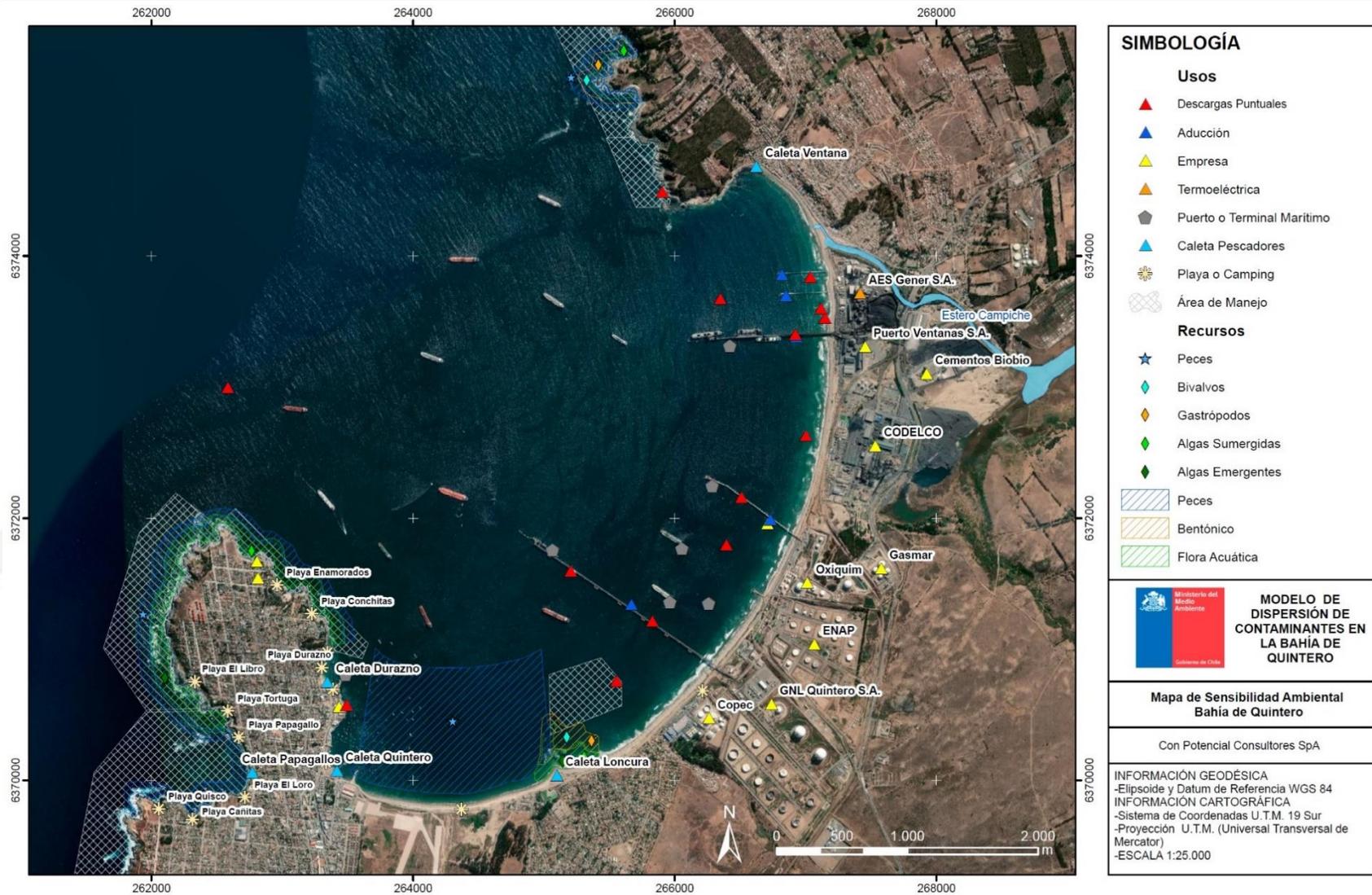


Figura 2-2: Mapa área de interés

---

### 3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

#### 3.1 Objetivo general

Caracterizar los procesos temporales y espaciales relacionados con la dispersión y acumulación de contaminantes, tales como metales pesados y nutrientes, descartados en la bahía de Quinteros (emisión de fuentes puntuales y difusas), mediante modelación hidrodinámica y de calidad del agua, que permita establecer la circulación y acumulación de contaminantes en la bahía de Quinteros y los efectos individuales y sinérgicos de las fuentes.

Los objetivos principales que se plantean abordar para los estudios Hidrodinámicos y de Calidad de Agua a desarrollar son los siguientes:

#### 3.2 Objetivos específicos

Para dar cumplimiento a los objetivos generales planteados se propone los siguientes objetivos específicos

- Definir los principales parámetros o contaminantes a modelar, tales como metales pesados y nutrientes, según los potenciales efectos adversos en el uso de la bahía de Quinteros (productivos, recreacional, etc.) o en la salud de los ecosistemas marinos y costeros y la información disponible
- Definir el/los modelo/s específico/s a utilizar en base a los parámetros seleccionados, la información disponible, el área de interés y los objetivos generales del estudio.
- Generar un modelo de dispersión de contaminantes para la bahía de Quintero, modelar escenarios de emisiones y cargas que permitan conocer el estado actual de la bahía y determinar los efectos individuales y sinérgicos de las fuentes para cada contaminante
- Capacitar a funcionarios del Ministerio de Medio Ambiente en materias de hidrodinámica, calidad del agua uso del modelo de dispersión de contaminantes en bahías, generación e interpretación de resultados del modelo. Lo anterior, de tal manera que los funcionarios capacitados puedan utilizar de manera óptima esta herramienta en el marco de la elaboración de futuros instrumentos de gestión ambiental para la bahía.

## 4 ANTECEDENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

A continuación, se presentan los resultados de recopilación de los antecedentes disponible en el área de estudio para los parámetros necesarios para la construcción del modelo.

### 4.1 Caudales medios mensuales estero Campiche

Se estimaron los caudales medios mensuales del estero Campiche con el objetivo de incluir dentro del modelo de dispersión el efecto que causa sobre la Bahía de Quintero y Puchuncaví. Para estimar los caudales se utilizó el método de transposición de caudales, usando como base los datos de caudal de la estación fluviométrica Estero Quintero en Valle Alegre. Se escogió esta estación porque es la más cercana al estero Campiche y su cuenca es adyacente a la cuenca del estero Campiche. La estación Estero Quintero en Valle Alegre tiene registros de caudal medio mensual desde 1996 a la fecha, totalizando 21 años de datos. Sin embargo, para calcular el caudal medio mensual promedio se utilizaron 16 de los 21 años, ya que se eliminaron cinco años que tenían menos de 10 meses con datos.

La Tabla 4.1 muestra las áreas de la cuenca de la estación Estero Quintero en Valle Alegre y de la cuenca del estero Campiche en Desembocadura. Estas áreas se utilizaron en el método de transposición de caudales. La Tabla 4.2 muestra el promedio de los caudales medios mensuales de la estación Estero Quintero en Valle Alegre y los calculados para el estero Campiche en desembocadura mediante el método de transposición de caudales.

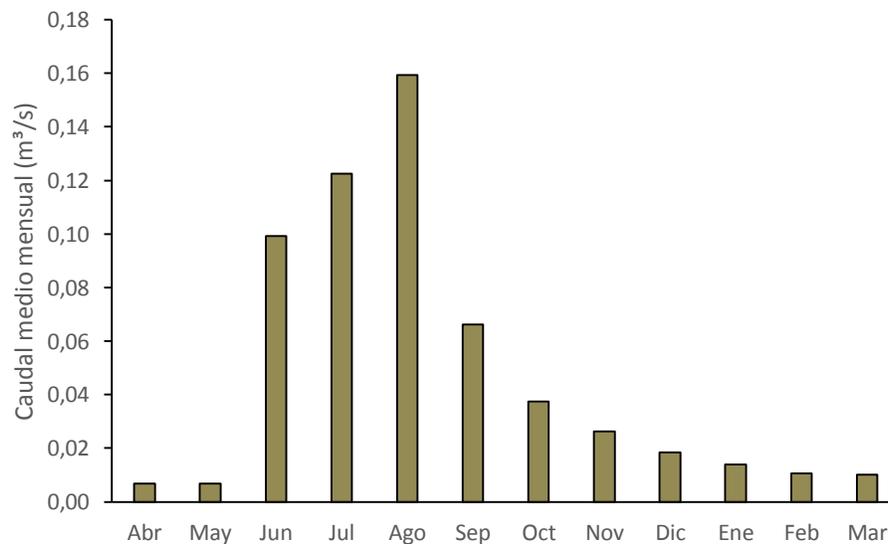
**Tabla 4.1. Áreas de la cuenca de la estación Estero Quintero en Valle Alegre y de la cuenca del estero Campiche en Desembocadura.**

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )
Estación estero Quintero en Valle Alegre	91
Desembocadura estero Campiche	103

**Tabla 4.2. Promedio de los caudales medios mensuales de la Estero Quintero en Valle Alegre y del estero Campiche en Desembocadura.**

	Estación	Campiche
Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Ene	0,014	0,016
Feb	0,011	0,012
Mar	0,010	0,011
Abr	0,007	0,008
May	0,007	0,008
Jun	0,099	0,112
Jul	0,123	0,139
Ago	0,159	0,180
Sep	0,066	0,075
Oct	0,038	0,042
Nov	0,026	0,030
Dic	0,018	0,021

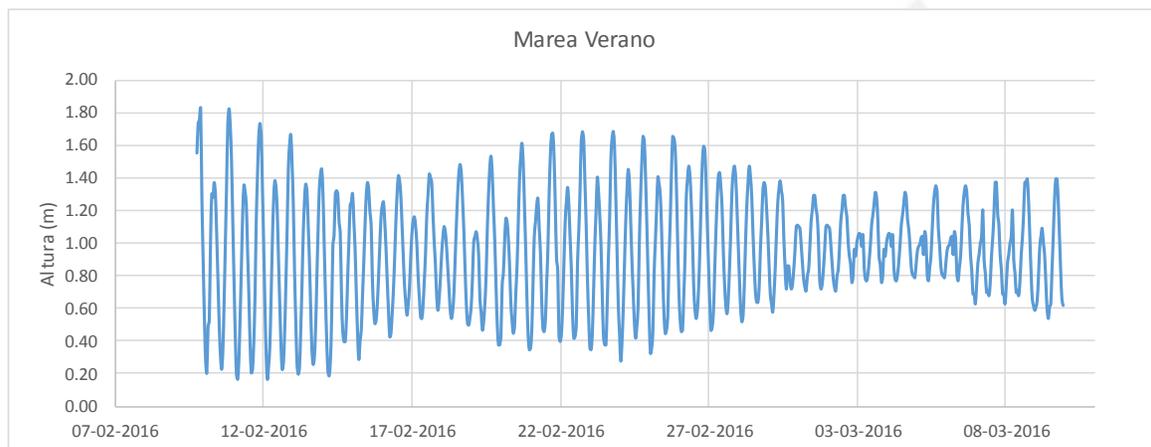
La Figura 4-1 muestra el promedio de los caudales medios mensuales calculados para el estero Campiche. Se puede observar que los mayores caudales medios mensuales se alcanzan durante los meses de invierno (junio, julio y agosto) y los menores caudales, en los meses de verano (enero, febrero y marzo), lo que implica que el estero Campiche tiene un régimen pluvial.



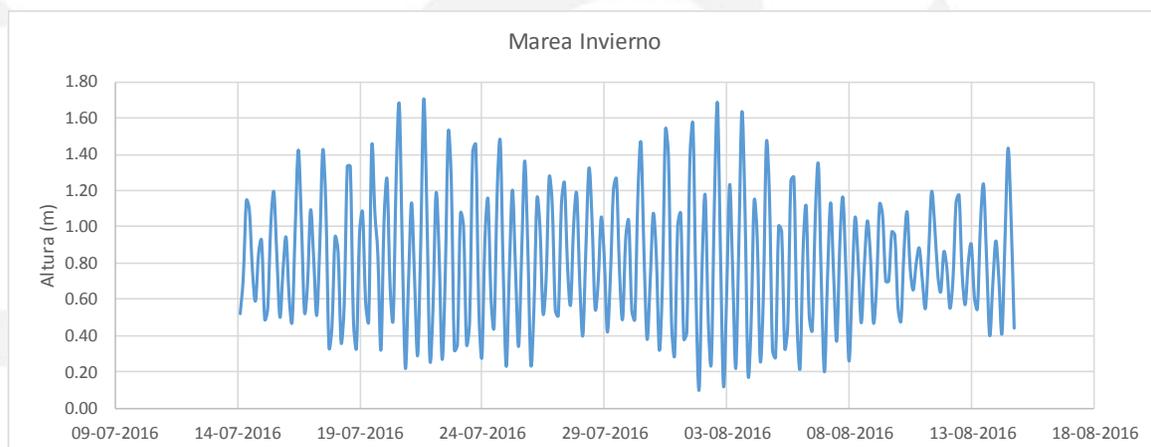
**Figura 4-1. Promedio de los caudales medios mensuales del estero Campiche en desembocadura.**

## 4.2 Marea

Una de las forzantes más relevantes para los estudios hidrodinámicos es la marea, la que es capaz de generar corrientes y transportes de masa. Los datos de mareas se obtuvieron la SEA LEVEL STATION MONITORING FACILITY que cuenta con registros del mareógrafo del SHOA para la Bahía de Quintero (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=qtro2>), cuyas mareas para los periodos modelados son expuestas en la Figura 4-2 y Figura 4-3 (Verano e invierno respectivamente).



**Figura 4-2: Marea Quintero periodo de Verano**



**Figura 4-3: Marea Quintero periodo de Invierno**

El régimen de mareas de la bahía, al igual que el de todo el sector costero de la región central del país corresponde al tipo de mareas mixtas, compuesta por dos bajas mareas y dos pleamares con un periodo de 6 horas y 15 minutos entre plea y bajamar (Romo, 1973). Algunos registros tabulados se presentan en la Tabla 4.3 con valores referidos al Nivel de Reducción de Sondas (NRS).

**Tabla 4.3: Registro de niveles de mareas Bahía de Quintero (Fuente Romo 1973)**

Parámetro	Valor
Extrema pleamar de sicigia (m)	1,85
Nivel medio de las pleamares de sicigia (m)	1,40
Nivel medio de las pleamares de cuadratura (m)	1,16
Nivel medio del mar (m)	0,85
Nivel medio de las bajamares de cuadratura (m)	0,56
Nivel medio de las bajamares de sicigia (m)	0,30
Extrema bajamar de sicigia (m)	0,08

Por otra parte, en la línea base marítima de la Declaración de Impacto Ambiental “Módulos de Desalación de Agua de Mar Unidad Ventanas 3 – AES GENER S.A., Bahía de Quintero” S.A. se determinaron las constituyentes armónicas a partir de mediciones de mareas en terreno, las que son presentadas en la Tabla 4.4 (Glosario de las constituyentes son presentadas en el **ANEXO N° 1**).

**Tabla 4.4: Amplitud y fase de las constantes armónicas, incluyendo sus respectivos errores. Invierno 2016. (Fuente ECOTECNOS 2016)**

Constituyente	Frecuencia (cph)	Amplitud (cm)	Fase (°)	Constituyente	Frecuencia (cph)	Amplitud (cm)	Fase (°)
*MM	0,0015122	3,85	46,51	MO3	0,1192421	0,22	203,33
MSF	0,0028219	1,14	319,66	*M3	0,1207671	0,42	73,35
*ALP1	0,0343966	0,87	56,16	MK3	0,1222921	0,16	240,21
2Q1	0,0357064	0,29	297,69	SK3	0,1251141	0,21	13,17
*Q1	0,0372185	2,21	295,33	MN4	0,1595106	0,11	24,11
*O1	0,0387307	9,12	298,96	*M4	0,1610228	0,29	143,27
NO1	0,0402686	0,63	254,91	SN4	0,1623326	0,14	81,38
*K1	0,0417807	11,58	324,56	MS4	0,1638447	0,18	220,42
*J1	0,0432929	1,5	7,4	S4	0,1666667	0,06	355,92
OO1	0,0448308	0,98	53,76	2MK5	0,2028035	0,06	319,49
UPS1	0,046343	0,16	8,02	2SK5	0,2084474	0,14	354,92
*EPS2	0,0761773	1,05	218,94	*2MN6	0,2400221	0,19	199,62
*MU2	0,0776895	2,92	242,27	M6	0,2415342	0,11	119,25
*N2	0,0789992	10,45	285,14	2MS6	0,2443561	0,16	136,62
*M2	0,0805114	42,21	305,33	2SM6	0,2471781	0,16	238,56
*L2	0,0820236	1,68	286,17	3MK7	0,2833149	0,07	281,55
*S2	0,0833333	16,25	311,75	M8	0,3220456	0,12	310,04
ETA2	0,0850736	0,69	314,95				

Para utilizar esta condición de borde se debe adaptar a las unidades que maneja el modelo, por lo que los datos de las constantes armónicas quedan de la forma presentada en la Tabla 4.5:

Constantes armónicas input, condición de borde modelo Delft3D- Flow, esto quiere decir multiplicar la frecuencia por 360 para pasarla a grados y la amplitud transformar de centímetros a metros.

**Tabla 4.5: Constantes armónicas input, condición de borde modelo Delft3D- Flow**

Constituyente	Frecuencia (deg/h)	Amplitud (m)	Fase (°)	Constituyente	Frecuencia (deg/h)	Amplitud (m)	Fase (°)
*MM	0,544392	0,0385	46,51	MO3	42,927156	0,0022	203,33
MSF	1,015884	0,0114	319,66	*M3	43,476156	0,0042	73,35
*ALP1	12,382776	0,0087	56,16	MK3	44,025156	0,0016	240,21
2Q1	12,854304	0,0029	297,69	SK3	45,041076	0,0021	13,17
*Q1	13,39866	0,0221	295,33	MN4	57,423816	0,0011	24,11
*O1	13,943052	0,0912	298,96	*M4	57,968208	0,0029	143,27
NO1	14,496696	0,0063	254,91	SN4	58,439736	0,0014	81,38
*K1	15,041052	0,1158	324,56	MS4	58,984092	0,0018	220,42
*J1	15,585444	0,015	7,4	S4	60,000012	0,0006	355,92
OO1	16,139088	0,0098	53,76	2MK5	73,00926	0,0006	319,49
UPS1	16,68348	0,0016	8,02	2SK5	75,041064	0,0014	354,92
*EPS2	27,423828	0,0105	218,94	*2MN6	86,407956	0,0019	199,62
*MU2	27,96822	0,0292	242,27	M6	86,952312	0,0011	119,25
*N2	28,439712	0,1045	285,14	2MS6	87,968196	0,0016	136,62
*M2	28,984104	0,4221	305,33	2SM6	88,984116	0,0016	238,56
*L2	29,528496	0,0168	286,17	3MK7	101,993364	0,0007	281,55
*S2	29,999988	0,1625	311,75	M8	115,936416	0,0012	310,04
ETA2	30,626496	0,0069	314,95				

### 4.3 Oleaje

La base de datos de oleaje espectral en aguas profundas a utilizar corresponde a un set de oleaje proporcionado por el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) proveniente de FUGRO OCEANOR la cual, los genera mediante reanálisis utilizando el software WAM (WAve prediction Model), que corresponde a un modelo de oleaje de tercera generación. Cuenta con una extensión temporal de 20 años, desde 1993 hasta el 2013, con registros cada 3 horas.

El punto de oleaje corresponde al nodo 31 ubicado frente a las costas de Valparaíso, específicamente en las coordenadas presentadas en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Nodo Oleaje Fugro

Nombre	Lat. (°S)	Long. (°W)	Profundidad (m)
F1	33,0	73,5	3.600

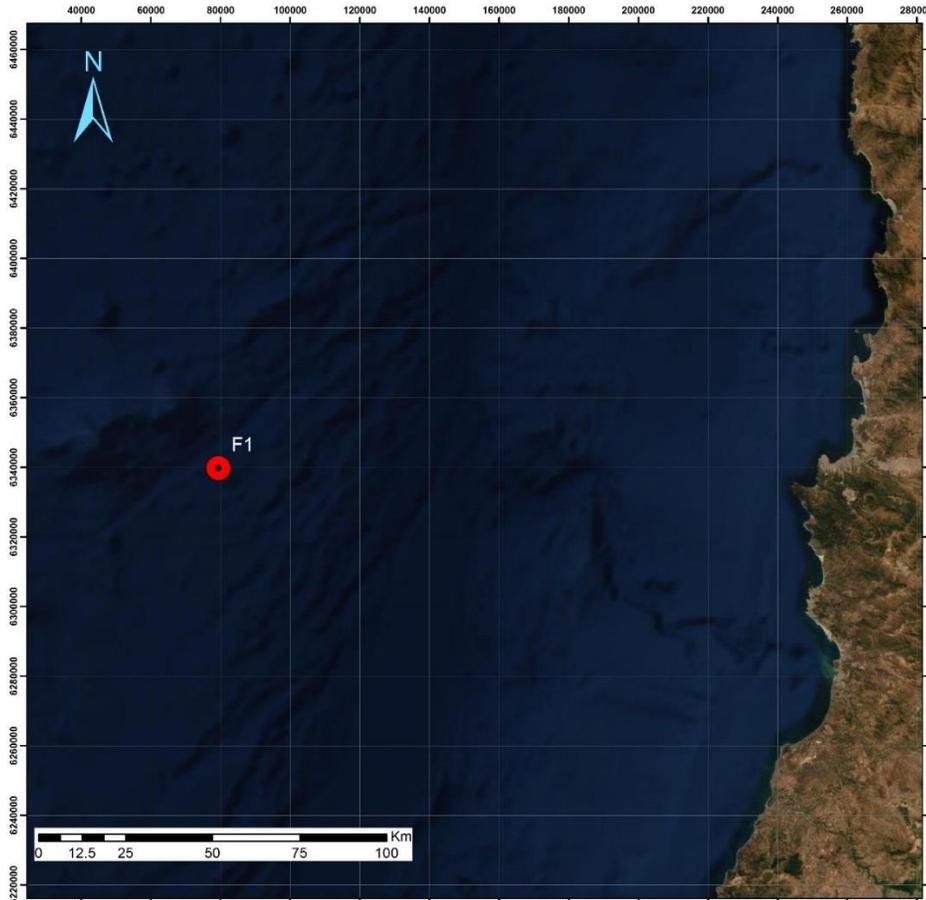


Figura 4-4: Nodo 33 Oleaje en Aguas Profundas (INH- FUGRO OCEANOR)

A partir de los datos espectrales  $S(f, \theta)$  es posible calcular los parámetros de resumen del oleaje.

La altura significativa espectral  $H_{m0}$  se obtiene en base a la integración del espectro direccional asumiendo que la función de densidad espectral se acerca a una distribución de tipo Rayleigh (Holthuijsen, 2007).

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

Donde  $m_0$  corresponde al momento de orden 0 del espectro direccional  $S(f, \theta)$ . El momento de orden n del espectro direccional es calculado como:

$$m_n = \iint f^n S(f, \theta) df d\theta$$

Donde  $f$  es la frecuencia,  $\theta$  es la dirección y  $n$  es el orden del momento calculado.

Como periodo característico del oleaje se considera el periodo energético del oleaje  $T_e$ . Este ha sido ampliamente utilizado en estudios de caracterización energética del oleaje (p. ej.: Lenee-Bluhm et al., 2011; Iglesias and Carballo, 2011), ya que, representa de mejor manera climas de oleaje donde existe aporte de energía proveniente de más de una frecuencia. Al contrario, el periodo peak  $T_p$  solo caracteriza de forma adecuada espectros unimodales, ya que, corresponde al inverso de la frecuencia que registra mayor aporte de energía.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

Con respecto a la dirección del oleaje, para este trabajo se optó por utilizar la dirección media del oleaje, ya que, de forma de forma similar a lo ocurrido en el caso del periodo del oleaje esta representa mejor climas de oleaje donde la energía proviene de más de una dirección, lo cual no puede ser capturado por la dirección peak  $\theta_m$ . La dirección media se define como:

$$\theta_m = \tan^{-1} \left( \frac{\int \sin \theta S(f, \theta) df d\theta}{\int \cos \theta S(f, \theta) df d\theta} \right)$$

Se presenta a continuación un espectro tipo extraído de la base de datos antes señalada:



#### 4.4 Batimetría

Para la construcción de la batimetría se utilizaron las cartas náuticas del SHOA 4321 Bahía Quintero, 4320 Quintero a Valparaíso, 5111 Valparaíso, 4000 Coquimbo a Valparaíso. En la Figura 4-6, se presenta los Puntos de batimetría para la bahía de Quintero.

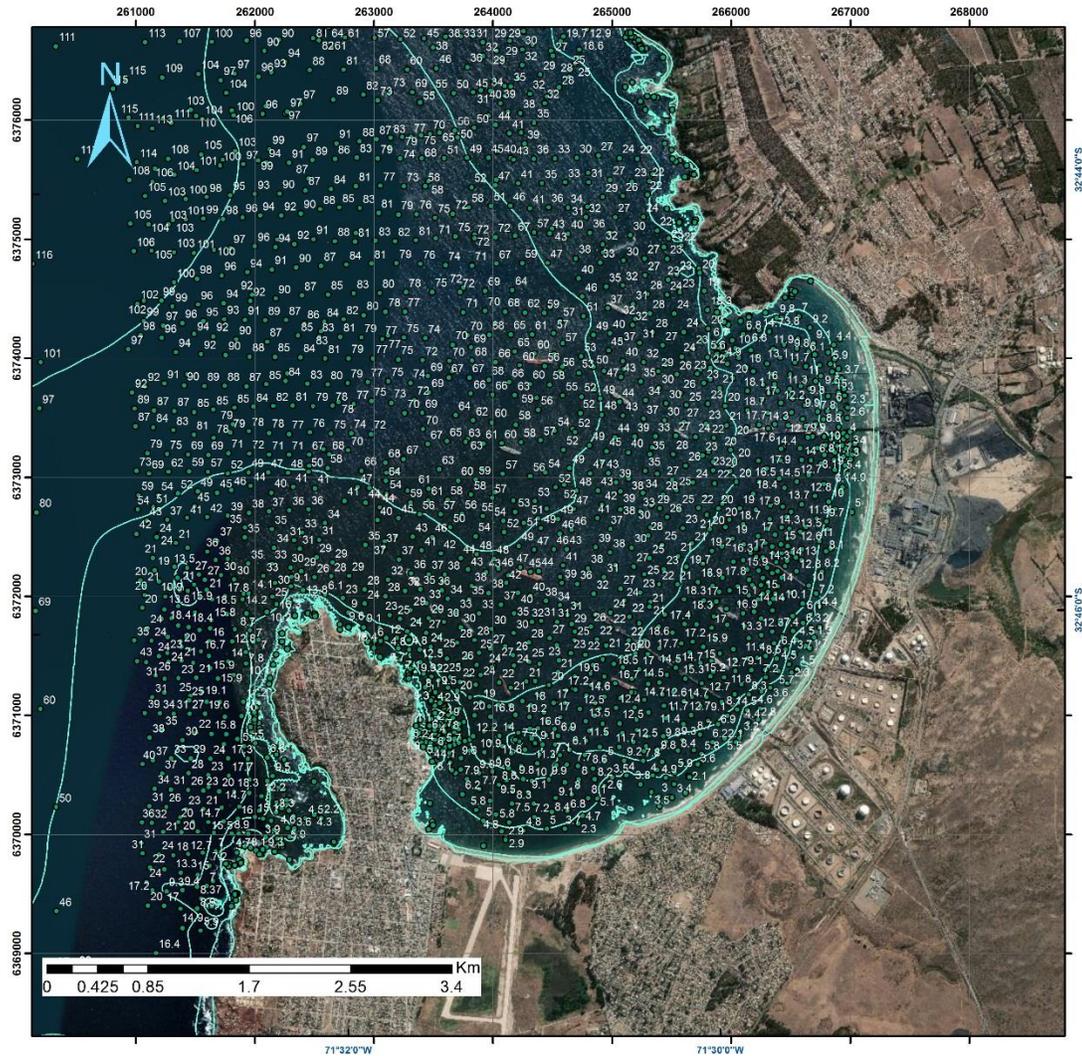


Figura 4-6: Batimetría Bahía de Quintero

Se presenta una gráfica de superficie 3D de la Batimetría a utilizar en el Modelo hidrodinámico y de dispersión de contaminantes.

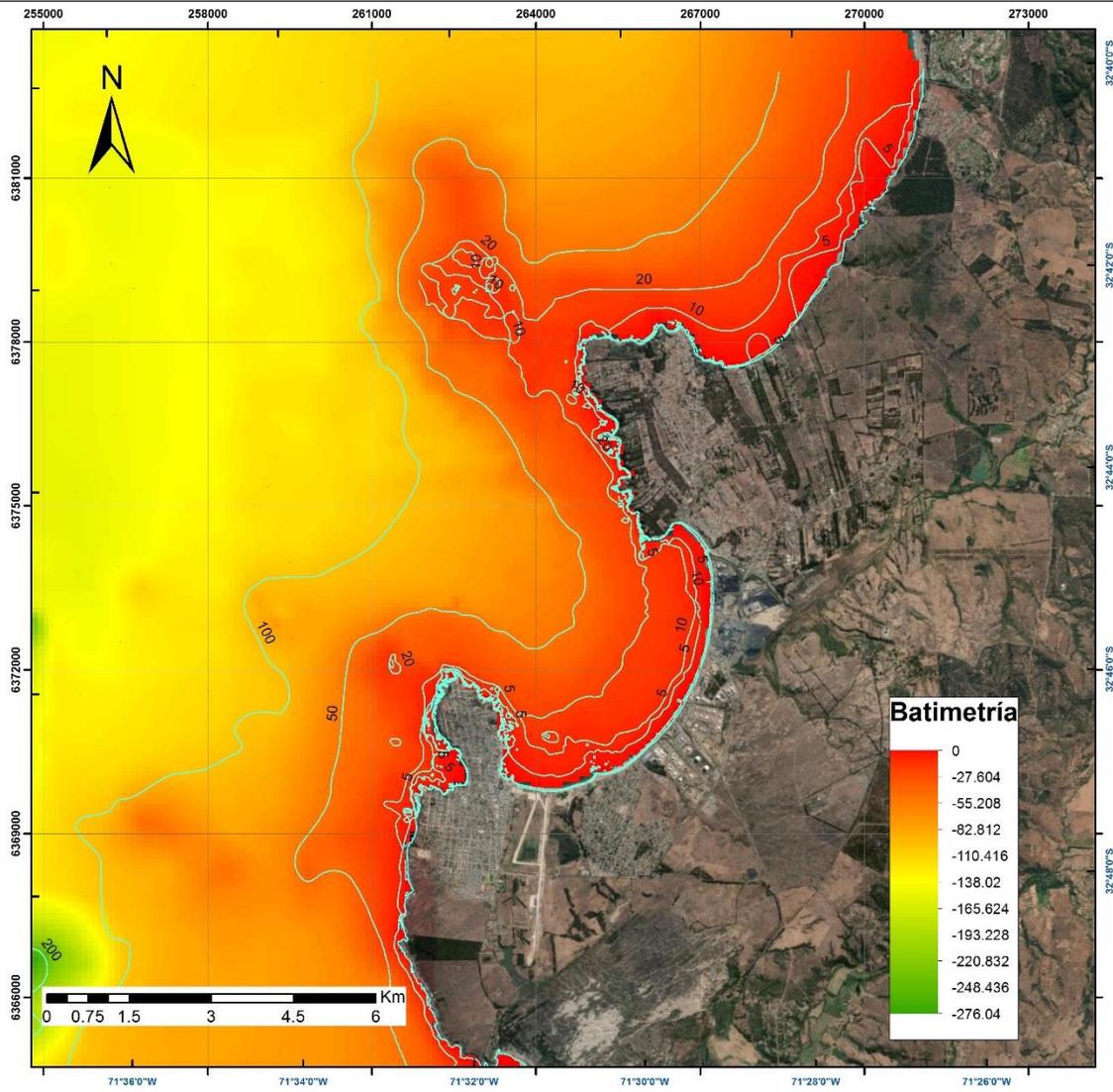


Figura 4-7: Batimetría interpolada a utilizar para el modelo Hidrodinámico

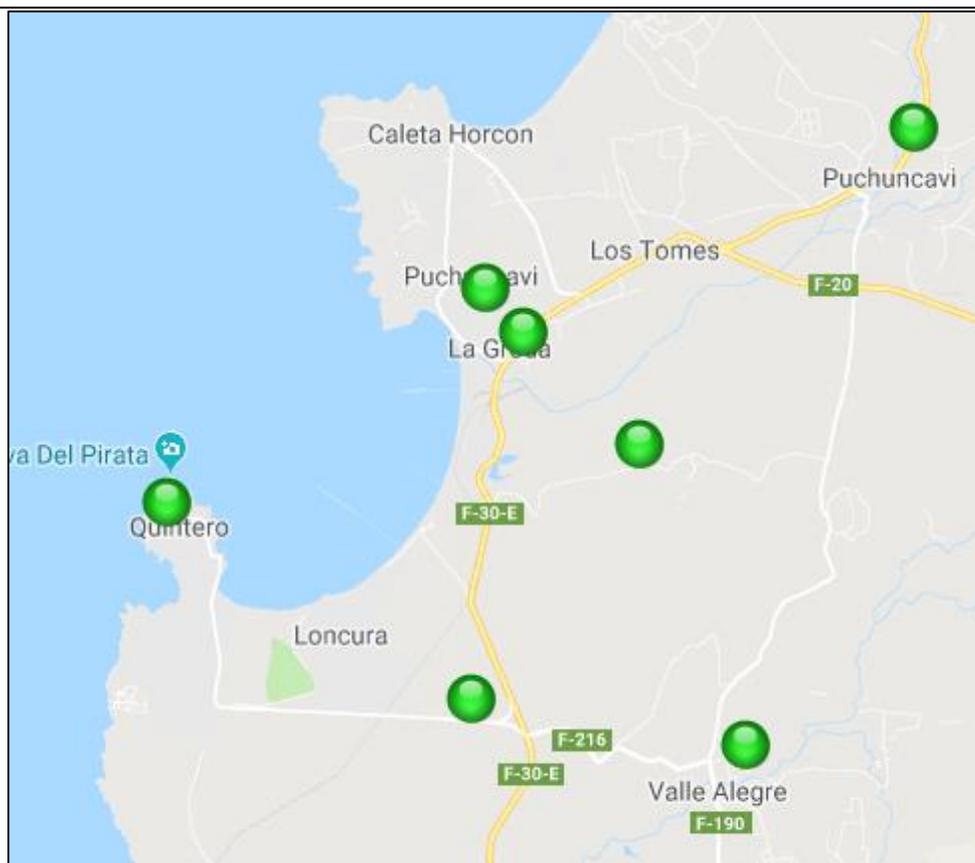
## 4.5 Viento

Para modelar de buena manera el efecto de los vientos sobre las corrientes de la bahía de Quintero, es importante contar con un base de datos de alta resolución temporal (horas idealmente), que este a nivel del mar y cercana o dentro de la bahía. La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) tiene tres estaciones meteorológicas que miden rapidez y dirección del viento en la zona de estudio (ver Tabla 4.7). Sin embargo, ninguna de las tres estaciones tiene registros en el periodo en que se pretende modelar.

**Tabla 4.7: Estaciones Meteorológicas de la DMC cercanas a la bahía de Quintero.**

Estación	Variable medida	Inicio registro	Fin registro
Quintero, Estación Aeronáutica	Dirección y Rapidez (10 m. de Altura)	1952	1982
Puchuncaví	Dirección y Rapidez (2 m. de Altura)	2019	2019
Quintero, Climatológica	Dirección y Rapidez (10 m. de Altura)	2018	2019

Con motivo del plan de descontaminación del complejo industrial Las Ventanas (DS N°252 1992 Ministerio de Minería), se instaló una red monitoreo de calidad del aire. La red está compuesta por siete estaciones: Quintero, Sur, Villa Alegre, Los Maitenes, La Greda, Ventanas y Puchuncaví (Ver Figura 4-8). Las estaciones miden una serie de variables de calidad del aire y meteorológicas, dentro de las cuales se encuentra la rapidez y dirección del viento, las que se miden de manera horaria. En el año 2018 se anunció que la red monitoreo dejará de ser operada por Codelco Ventanas y AES Gener y estará a cargo del Ministerio del Medio Ambiente, con el objetivo de ampliar y modernizar la red, además de asegurar transparencia.



**Figura 4-8 Ubicación estaciones Red de Monitoreo Complejo Industrial Las Ventanas.) Fuente:**  
<http://www.redmonitoreoventanas.cl>

Se realizó una búsqueda en el Sistema de Evaluación Ambiental de Evaluaciones y Declaraciones de Impacto Ambiental en las que se hayan medidos datos de rapidez y dirección del viento. Se encontró un total de nueve estudios, entre EIA y DIA, de los cuales siete utilizaron datos de la Red de Monitoreo del Complejo Industrial Las Ventanas. Solo dos de ellos realizaron mediciones nuevas: Implementación Puerto Multipropósito San José y Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N° 3 (ver Tabla 4.8)

Las fuentes de información disponibles para datos de viento en el área de estudio son resumidas en la Tabla 4.8. En esta se presenta el tipo de estudio en el que se enmarca y las fechas de mediciones realizadas.

**Tabla 4.8: Información Disponible de Vientos en el Área de Estudio**

Estudio	Tipo de Estudio	Inicio Medición	Término Medición	Estaciones	Comentarios
Central Termoeléctrica Campiche	EIA	01-01-2004	31-12-2006	Red Monitoreo Complejo Industrial Ventanas: Valle Alegre, Sur, Puchuncaví, Principal, Los Maitenes y La Greda. Puerto Ventanas: Campiche.	
Central Termoeléctrica Energía Minera	EIA	01-01-2007	31-12-2007	Red Monitoreo Complejo Industrial Ventanas: Principal	
Central Termoeléctrica Nueva Ventanas	EIA	01-01-2001	31-06-2004	Red de Monitoreo Complejo Industrial Ventanas, Puerto Ventanas y Planta ENAP Concón.	
Central Termoeléctrica Quintero	EIA	01-01-2006	31-12-2006	Red Monitoreo Complejo Industrial Ventanas: Sur, Greda, Los Maitenes, Valle Alegre, Puchuncaví y Estación Principal. Las Gaviotas (ENAP), La Calera (Cemento Melón), Nehuenco (Nehuenci-San Isidro) y Santo Domingo (Radiosondeos de Altura).	
Central Termoeléctrica RC Generación	EIA	01-01-2004	31-12-2006	Red Monitoreo Complejo Industrial Ventanas: Valle Alegre, Sur, Puchuncaví, Principal, Los Maitenes y La Greda. Puerto Ventanas: Campiche. Estación Concón (ENAP)	
ESVAL	EIA	-	-	-	Solo media página de texto
Implementación Puerto Multipropósito San José	EIA	01-09-2008	31-10-2008	Copec El Bato	
Terminal de Gas Natural Licuado Quintero	EIA	01-01-2002	31-12-2002	Red Monitoreo Complejo Industrial Ventanas: Principal	
Módulos de Desalación de Aguas de Mar, Ventana N°3	DIA	14-07-2016	24-08-2016	UTM: 6.371.901 m N, 267.238 m E, Datum WGS84, Zona 19 H	Datos en dos periodos: Invierno y Verano.
		09-02-2016	28-03-2016		

Finalmente, para la forzante de viento se utilizan los resultados de las campañas de terreno del estudio “Módulos de Desalación de Aguas de Mar, Ventana N°3.

## 4.6 Corriente

Para calibrar y validar un modelo hidrodinámico lo ideal sería contar con mediciones periódicas de las corrientes en el área de estudio. En el caso de la bahía de Quintero solo existen mediciones esporádicas, las cuales fueron hechas para Evaluaciones de Impacto Ambiental, Declaraciones de Impacto Ambiental o algún otro estudio sobre la hidrodinámica de la bahía, que no es lo ideal, pero es algo con lo que se puede trabajar. Se encontraron cinco EIA, un DIA y un estudio con mediciones de corrientes. Seis de los estudios realizaron correntometrías Eulerianas, que es cuando se mide en un punto fijo la velocidad y dirección de las corrientes, y cinco realizaron correntometrías Lagrangianas, que es cuando se mide la trayectoria de un objeto dejado a la deriva para caracterizar las corrientes. En la Tabla 4.9 se presenta información relevante de las mediciones de corriente realizadas en la bahía de Quintero.

**Tabla 4.9: Correntometría realizadas en la bahía de Quintero.**

Estudio	Tipo de estudio	Inicio medición	Termino medición	Lugar de medición	Tipo de medición
Central Termoeléctrica Energía Minera	EIA	07-2005	08-2005	Punto Ubicado en el centro de la bahía	Correntometría Euleriana
Central Termoeléctrica RC Generación	EIA	15-06-2007	15-07-2007	Sector costero ubicado entre los muelles de SOQUIMICH y Puerto Ventanas	Correntometría Euleriana
Planta de Tratamiento de Aguas Servidas y Emisario Submarino de Quintero	EIA	07-01-2003	11-02-2003	6373340 N 262678 E	Correntometría Euleriana Correntometría Lagrangiana
Implementación Puerto Multipropósito San José	EIA	07-10-2008		Sector Central de la Bahía	Correntometría Lagrangiana Cuadratura
		28-10-2008		Sector Central de la Bahía	Correntometría Lagrangiana Sicigia
Terminal de Gas Natural Licuado Quintero	EIA	15-08-1998	15-09-1998	6371736,78 N 265854,68 S	Correntometría Euleriana Correntometría Lagrangiana. Cinco mediciones.

Estudio	Tipo de estudio	Inicio medición	Termino medición	Lugar de medición	Tipo de medición
Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N° 3	DIA	14-07-2016	24-08-2016	6.373.818 N 266.526 S	Correntometría Euleriana y Lagrangiana (Sicigia y Cuadratura, 3 puntos). Mediciones durante invierno y verano.
		09-02-2016	28-03-2016	6.373.838 N 266.536 S	
Determinación de los Impactos en los Recursos Hidrobiológicos y en los Ecosistemas Marinos Presentes en el Área de Influencia del Derrame de Hidrocarburo de Bahía Quintero, V Región	Informe IFOP	21-08-15	25-09-15	32°44,820'LS - 71°29,972'LO	Correntometría Euleriana (Invierno)
		12-01-16	09-03-16	32°45,997'LS - 71°31,729'LO	Correntometría Euleriana (Verano)
		16-09-15 (Invierno)		32°44,820'LS - 71°29,972'LO	Correntometría Lagrangianas (Sicigia)
		22-01-16 (Verano)			
		05-09-15 (Invierno)		32°45,997'LS - 71°31,729'LO	Correntometría Lagrangianas (Cuadratura)
02-02-16 (Verano)					

Finalmente, para la calibración se utilizan los resultados de las campañas de terreno del estudio “Módulos de Desalación de Aguas de Mar, Ventana N°3.

#### 4.6.1 Corrientes eularianas

De la revisión de los antecedentes se encontró una campaña a terreno realizada por la Consultora ECOTECNOS para la Declaración de Impacto Ambiental “Módulos de Desalación de Agua de Mar Unidad Ventanas 3 – AES GENER S.A., Bahía de Quintero” S.A., con mediciones en invierno y verano del 2016 para corrientes Eulerianas y lagrangianas en el sector de estudio. Estas mediciones son de gran utilidad para la calibración y validación del terreno en su módulo hidrodinámico (Ver **ANEXO N°2**).

Se fondeó un equipo ADCP RDI modelo WHSW600 – I – V5174, número de serie 19611 cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 2.1.

**Tabla 4.10: Campañas de Medición de Corrientes (Invierno y Verano ECOTECNOS)**

Campaña	Equipo	WGS84 19H	
		UTM Norte (m)	UTM Este (m)
Verano	ADCP	6.373.838	266.536
Invierno		6.373.818	266.526

El instrumento ADCP tiene la particularidad de perfilar la columna de agua en capas de tamaño uniforme, por lo tanto, se obtuvo un registro desde la profundidad de blanqueo del sensor hasta la superficie del mar. Es importante mencionar que el equipo queda fondeado en una estructura de 1 m de altura, además la profundidad de blanqueo para este caso fue de 1,61 m, lo que hace que la primera celda de datos se ubique 2,61 m desde el fondo marino.

Cada una de las capas se analizó estadísticamente para determinar las características medias, máximas, mínimas, desviación estándar, coeficiente de variación y frecuencias de aparición; para el caso de las magnitudes, mientras que para las direcciones solamente se efectuó este último tipo de análisis.

Como acción conjunta de dirección-magnitud, se determinaron los vectores progresivos para tres niveles de la columna de agua (cerca del fondo, a media columna de agua y en las proximidades de la superficie).

Como análisis de series de tiempo, se determinó el espectro de frecuencias de tres capas de medición del ADCP (las mismas que para el diagrama de vector progresivo). Las capas seleccionadas se presentan en la Tabla 4.11 para la campaña de verano y Tabla 4.12 para la campaña de invierno.

**Tabla 4.11: Capas por ADCP. ELB Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N°3. AES GENER. Bahía Quintero, verano 2016.**

Capa ADCP	N° Capa	Profundidad [m] a la superficie
Capa cercana al fondo	1	11.9
Capa intermedia	12	6.4
Capa más cercana a la superficie	24	0.4

**Tabla 4.12: Capas por ADCP. ELB Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N°3. AES GENER. Bahía Quintero, invierno 2016.**

Capa ADCP	N° Capa	Profundidad [m] a la superficie
Capa cercana al fondo	1	11.53
Capa intermedia	11	6.53
Capa más cercana a la superficie	22	1.03

#### **4.6.1.1 Campaña invierno**

La estadística calculada para el registro de invierno indica magnitudes de corrientes promedio que varían entre los 4,83 cm/s (capa 1), los 5,19 cm/s (capa 11) y 8,88 cm/s (capa 22). Las magnitudes máximas van desde los 30,7 cm/s (capa 1), 37,6 cm/s (capa 11) y 33,4 cm/s (capa 22).

Las frecuencias relativas de las observaciones del ADCP indican el predominio de las intensidades entre 5 a 10 cm/s en todas las capas analizadas, con frecuencias que van desde el 31,98% al 42,00%, seguidas por las magnitudes de 3 a 5 cm/s con frecuencias que van desde los 13,93% a 31,50%.

En cuanto a las direcciones de las corrientes registradas indican que en toda la columna de agua la dirección predominante es E, con una ocurrencia promedio del 17,41%, seguida por la dirección W con un 16,89%. En la capa ubicada en el fondo la dirección que predomina es al W un 17,35% del tiempo, luego en la zona intermedia predomina el E con un 18,50% de las ocurrencias, finalmente para la capa superficial predomina las corrientes que se dirigen al SW con un 18,57% de las ocurrencias.

#### **4.6.1.2 Campaña verano**

La estadística calculada para el registro de verano indica magnitudes de corrientes promedio que varían entre los 4,89 cm/s (capa 1), los 4,79 cm/s (capa 11) y 9,91 cm/s (capa 22). Las magnitudes máximas van son 48,2 cm/s (capa 1), 47,2 cm/s (capa 11) y 45,4 cm/s (capa 22).

Las frecuencias relativas de las observaciones del ADCP indican el predominio de las intensidades entre 5 a 10 cm/s en todas las capas analizadas, con frecuencias que van desde el 31,43% al 40,17%, seguidas por las magnitudes de 3 a 5 cm/s con frecuencias que van desde los 14,37% a 33,69%.

En cuanto a las direcciones de las corrientes registradas, indican que en toda la columna de agua la dirección predominante es E, con frecuencias que varían desde los 12,36% al 35,67%, seguida por la dirección NE con frecuencias que van desde los 12,92% al 21,11%. Cabe destacar que en la capa superficial la dirección con mayor frecuencia relativa es E con el 35,67% de los datos registrados.

#### 4.6.2 Corrientes Lagrangianas

Las mediciones de corrientes lagrangianas bajo condiciones invernales fueron ejecutadas en los tres puntos indicados en la Tabla 4.13. En cada sector, se llevaron a cabo tres lances en condiciones de sicigia y cuadratura, considerando el régimen vaciante y llenante, respectivamente.

**Tabla 4.13: Coordenadas de lanzamiento de derivadores. ELB Módulos de desalación de agua de mar, Ventanas N°3. AES GENER. Bahía Quintero**

Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19S	
	Norte (m)	Este (m)
<b>Campaña Verano 2016</b>		
ROD - 1	266505	6374155
ROD - 2	266607	6373825
ROD - 3	266299	6373543
<b>Campaña Verano 2016</b>		
DER - 1	266505	6374154
DER - 2	266607	6373825
DER - 3	266299	6373543

En cada punto de lance se desplegaron derivadores del tipo veleta cruzada, a nivel superficial y 5 m de profundidad, ejecutándose un total de 6 experimentos (3 por cada capa), El recorrido de los derivadores fue seguido desde una embarcación y posicionado mediante sistema de DGPS diferencial. De esta manera, todos los traqueos de los derivadores fueron vinculadas a la red geodésica nacional en coordenadas UTM (Datum WGS84).

La información recopilada se procesó para visualizar las trayectorias de los derivadores y estimar la velocidad de desplazamiento neto y la dirección.

---

#### **4.6.2.1 Campaña Invierno**

El comportamiento de los derivadores mostró una mayor velocidad y desplazamientos en la superficie en ambas campañas, mientras que las direcciones variaron según la condición de marea del lugar, siendo la dirección SW y SE las más frecuentes. Cabe destacar que el comportamiento lagrangiano registrado en el presente estudio, sólo representa un instante de tiempo acotado y no el comportamiento medio temporal y/o espacial de la zona de estudio.

La dispersión de los trazadores químicos mostró un comportamiento muy similar para ambas fases lunares, con desplazamientos en dirección SW y W en todas las estaciones oceanográficas. Por lo tanto, la dispersión de estos trazadores químicos no está influenciada por las mareas.

El comportamiento de las derivas en la zona de rompiente, no mostró un comportamiento similar en los lances realizados a lo largo de la playa de Ventana, por lo que los fenómenos que ocurren en la zona de rompiente, no son afectados por las corrientes, mareas y/o vientos locales.

#### **4.6.2.2 Campaña Verano**

Durante la sicigia los derivadores superficiales se desplazan hacia fuera de la bahía durante la llenante, lo que estuvo directamente relacionado con las características del viento para el día. En la vaciante los experimentos realizados en las estaciones 1 y 2 se desplazan cortas distancias hacia el E, mientras que en la estación 3 es hacia el SW. Los instrumentos a 5 m se desplazan, en general, cortas distancias en llenante y vaciante con direcciones variables entre N y E para la estación 1 y 2; NW y E en la estación 3, respectivamente.

En el caso de la cuadratura, los derivadores se desplazan mayores distancias que en sicigia, siendo accionados por el viento que soplaba al momento del registro. Las direcciones fueron primordialmente hacia el tercer cuadrante en casi todos los experimentos, incluso aquellos que presentaron una interrupción.

Los trazadores químicos presentaron un comportamiento similar al obtenido por los instrumentos derivadores en cuanto a la trayectoria recorrida por efectos advectivos sobre la mancha. Por otro lado, respecto de la dispersión del agente utilizado para el ensayo, durante la llenante, alcanza mayores índices en el periodo de cuadratura que en sicigia, comportamiento que se replicó en la vaciante. Esto puede ser directamente una influencia de la capacidad de mezcla que inducen los vientos locales sobre la capa superficial del mar.

El comportamiento de la deriva litoral no es significativamente diferente en cuanto a las distancias recorridas por las botellas de cada experimento. Los lances 1 y 2 se desplazan hacia el sector abierto de la bahía, mientras que el lance 3 se mueve hacia la zona abrigada una menor distancia. Esto puede indicar un punto de convergencia en los desplazamientos litorales que normalmente se traducen en corrientes de retorno.

#### 4.7 Temperatura, Salinidad y Densidad

Se presenta a continuación los resultados de las campañas de invierno y verano desarrollados en el año 2016, por ECOTECNOS para el EIA “Módulos de Desalación de Agua de Mar Unidad Ventanas 3 – AES GENER S.A.” (ver estaciones de monitoreo CTDO en Tabla 4.14)

**Tabla 4.14: Ubicación de las estaciones CTDO campañas Verano e Invierno 2016 (Fuente: ECOTECNOS)**

Estación	Coordenadas UTM WGS84, H19S	
	Este (m)	Norte (m)
E-1	266.691	6.374.008
E-2	266.717	6.373.833
E-3	266.700	6.373.613
E-4	266.403	6.374.101
E-5	266.453	6.373.827
E-6	266.381	6.373.583
E-7	265.959	6.373.771
E-8	265.563	6.374.699
E-9	266.731	6.373.108
E-10	266.705	6.372.612
E-11	266.491	6.371.885
E-12	266.199	6.371.446
E-13	265.767	6.370.886
E-14	264.364	6.370.232
E-15	263.468	6.371.491
E-16	265.578	6.373.238
E-17	265.357	6.372.387
E-18	264.451	6.371.465

##### 4.7.1 Temperatura

###### Verano 2016

La temperatura presentó baja estratificación de la columna de agua, siendo difícil observar zonas de temperatura con diferencias marcadas. La zona superficial presenta los efectos de la insolación, por lo

que la temperatura es ligeramente superior en el primer estrato, observándose luego una termoclina (zona de alto gradiente térmico) entre los 3 y 7 m en las estaciones más profundas. La temperatura superficial del mar (TSM) presentó un promedio de 18,0° C en toda la bahía Quintero, valor comparativamente mayor en 2,4° C respecto del promedio histórico registrado para el mes de febrero en la bahía de Valparaíso (distante a 30 km al sur de la bahía de Quintero), utilizada como referencia.

#### **Invierno 2016**

La columna de agua presentó una muy baja estratificación, aun cuando algunas estaciones evidenciaron la incidencia de la insolación en el primer metro de profundidad (E-1 a E-7, E-10, E-14, E-16 y E17). Además, en algunas estaciones se presenta una estratificación térmica incipiente localizada cerca de los 5 m de profundidad (E-1, E-5, E-6, E-9, E-11, E-13 y E-18), mientras que no se observa una termoclina identificable, produciéndose un descenso monótono de la temperatura (estaciones E-8 y E15) Estas condiciones son típicas de la condición invernal, donde las bajas temperaturas y la alta energía de mezcla disminuyen la estratificación de la columna.

Bajo condiciones invernales, la TSM presentó un promedio de 13,5° C en el área de estudio, valor comparativamente mayor en 0,9° C respecto del promedio histórico registrado para el mes de septiembre en la bahía de Valparaíso (12,5° C) considerada como referente

#### **4.7.2 Salinidad**

##### **Verano 2016**

La salinidad registró baja variabilidad, lo que concuerda con una zona muy costera, donde no se espera encontrar masas de agua de distinto origen. Este parámetro se mantuvo estable alrededor de 34,4 psu en toda la bahía de Quintero, tanto en el estrato superficial como profundo.

##### **Invierno 2016**

Bajo condiciones invernales, la salinidad reveló para la mayoría de las estaciones una distribución vertical cuasi homogénea. En general, los registros no revelaron procesos de estratificación en la columna de agua, que sugirieran la presencia de aguas de distinto origen (i.e. aportes de aguas continentales naturales o residuales), como así tampoco el ingreso de aguas marinas con propiedades distintas a las costeras.

---

### 4.7.3 Densidad

#### Verano 2016

La densidad se encuentra directamente relacionada con la temperatura y la salinidad. Dado que esta última presentó escasa variación, la distribución vertical de la densidad estuvo determinada por la distribución de la temperatura, lo que en último término determina la estratificación de la columna de agua. Tal como se desprende de los perfiles de temperatura, la columna de agua presentó escasa estratificación, observándose algunas zonas de mayor gradiente relacionada con los gradientes de temperatura.

#### Invierno 2016

Este parámetro registró un aumento en sus valores desde la superficie al fondo de la columna de agua. Cabe señalar que la densidad está estrechamente vinculada con la distribución de la temperatura y la salinidad. Considerando que bajo condiciones invernales la salinidad presentó una baja variabilidad en su campo vertical, la distribución de la densidad dependió directamente de la distribución vertical de la temperatura.

## 4.8 Emisiones de metales pesados y nutrientes

Dentro de las actividades realizadas para dar fiel cumplimiento a lo estipulado en los objetivos de la presente Etapa, se realizó un análisis crítico de los antecedentes disponibles dentro del área de Estudio, para esto se elaboraron fichas de resumen las que se pueden revisar en el **ANEXO N° 3: Fichas de Resumen**.

En base al análisis y pruebas de campo para riesgo ecológico, mediante la realización de bioensayos agudos y crónicos en condiciones de laboratorio exponiendo a las especies locales a diferentes concentraciones de los metales pesados (Estudio realizados por el CEA, 2013 en la Bahía de Valparaíso Ref. 7), se identificaron preliminarmente los metales pesados de interés ambiental y mediante los criterios de frecuencia, concentración, interés público, se seleccionaron finalmente los siguientes metales: As, Cd, Cu y Hg. El Cr no se incorporará a este listado, a diferencia de lo establecido por el CEA 2013, puesto que no se siguió analizando este elemento en las aguas de la Bahía de Quintero, siendo la última medición el 14-11-2011.

Pero como se analizó en el Informe de Etapa 2, solo el cobre presenta en los últimos años valores cercanos al límite de peligrosidad crónica establecido por la EPA 2006 Criterio de Concentración Continua (CCC) para cobre disuelto ( $3 \mu\text{g/L}$ ).

#### **4.8.1 Datos de monitoreo y fiscalización reportados en el marco del cumplimiento del D.S. 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Republica**

A continuación, se muestran datos de concentración de contaminantes obtenidos de monitoreos y fiscalizaciones realizadas a efluentes de distintas fuentes emisoras que descargan a la bahía de Quintero y Puchuncaví y que fueron reportados a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). La Tabla 4.15 muestra un resumen de los datos obtenidos de los monitoreos y fiscalizaciones para los contaminantes que están considerados en el modelo de dispersión, lo que incluye fuente emisora, concentración promedio en el efluente, número de mediciones y el periodo de tiempo en que se realizaron las mediciones. Información con más detalle se puede encontrar en el **ANEXO N° 4**

En total se cuenta con información de 14 fuentes emisoras de contaminantes que descargan a la bahía de Quintero y Puchuncaví, 13 de ellas lo hacen manera directa y una, la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) Puchuncaví, descarga de manera indirecta a la bahía, ya que descarga al estero Campiche, el cual desemboca en la bahía. Todas las fuentes emisoras cuentan con datos recientes de los años 2017 y 2018. Sin embargo, solo una fuente emisora, ES-Quintero, cuenta con mediciones de concentración para todos los contaminantes que se incluirán en el modelo.

En 12 de las 14 descargas puntuales se cuenta con mediciones de concentración de Arsénico, con una concentración promedio  $7 \mu\text{g/l}$ , siendo el efluente de CODELCO Refinería Ventanas el de mayor concentración promedio con  $29 \mu\text{g/l}$ . Solo siete fuentes emisoras cuentan con mediciones de concentración de Cadmio en sus efluentes, con un promedio de  $3 \mu\text{g/l}$ , no encontrándose grandes variaciones entre los distintos efluentes. En el caso del Cobre total, existen mediciones de concentración en ocho fuentes emisoras, con una concentración promedio de  $7 \mu\text{g/l}$ , siendo CODELCO División Ventanas, ENAP Terminal Marítimo Quintero y PTAS Puchuncaví las con mayores concentraciones de cobre en sus efluentes, con valores mayores a  $100 \mu\text{g/l}$ . En seis de las 14 fuentes emisoras se han realizado mediciones de Mercurio, encontrándose concentraciones bajas, cercanas a  $1 \mu\text{g/l}$ . En cuanto a los nutrientes, se cuenta con información de concentración de Fósforo en tres efluentes y de concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl en cuatro, con una concentración media de

5,7 mg/l y 31,8 mg/l, respectivamente. Para el caso de los Coliformes Fecales, se cuenta con mediciones en cinco efluentes.

Se presenta en la Tabla 4.16 las cargas de contaminantes por descarga expresadas en gramos de por un periodo de 15 días.

### **Observaciones de la Data Analizada**

Las concentraciones de Coliformes Fecales reportados para ES-Quintero, Central Termoeléctrica Ventanas Unidades 1 y 2 y CODELCO Refinería Ventanas en el año 2017 presentan valores que podrían considerarse anómalos, del orden de los millones de NMP/100 ml, lo que está entre tres y cuatro órdenes de magnitud sobre la norma descarga (1000 NMP/100 ml), y de cinco a seis ordenes de magnitud sobre los valores reportados en el año 2018. Por lo tanto, es altamente probable que los valores de concentración de Coliformes Fecales, tengan un error. Lo mismo ocurre para la concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl en el efluente de CODELCO Refinería Ventanas en el año 2017.

Para el efluente de CODELCO División Ventanas se cuenta información entre los años 2006-2008, la que no se incluyó en el informe, porque las concentraciones reportadas en aquellos años son un par de ordenes magnitud más grande que las actuales. La gran diferencia entre las concentraciones de 10 años atrás y las actuales se debe a que CODELCO ha hecho inversiones en sus procesos para disminuir sus emisiones.

**Tabla 4.15: Datos de entrada por descarga de Residuos Líquidos**

ID	Fuente Emisora	Coordenada UTM WGS84 H19S		Caudal de diseño sistema de tratamiento (m <sup>3</sup> /día)	Arsénico (mg/l)	Cadmio (mg/l)	Cobre Total (mg/l)	Mercurio (mg/l)	Fósforo (mg/l)	Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/l)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)
		Norte (m)	Este (m)		Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
P1	AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1	267.146	6.373.530	266.400	0,006	0,002	0,025	0,0011	-	-	30.219.784
P2	AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 2	267.115	6.373.602	426.240	0,006	0,002	-	0,001	-	-	104.831.463
P3	Central Termoeléctrica Nueva Ventanas	266.348	6.373.673	1.032.000	0,006	-	-	-	-	-	-
P4	Central Termoeléctrica Campiche	267.036	6.373.842	1.032.000	-	-	0,01	-	-	-	-
P5	CODELCO - Refinería Ventanas	267.001	6.372.631	1.496	0,029	0,005	0,122	0,0005	-	3,5	10.434.785
P6	Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Quintero	265.826	6.371.216	360.007	0,006	-	-	-	-	-	-
P7	Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Baño Modular	265.204	6.371.599	1,8	0,002	-	-	-	-	-	-
P8	ENAP - Terminal Marítimo Quintero	266.392	6.371.798	500	0,006	0,005	0,135	-	-	-	-
P9	COPEC	265.554	6.370.759	60	-	-	-	-	-	-	-
P10	GASMAR - Descarga Bahía de Quintero Circuito 1200	266.510	6.372.160	139.240	0,003	0,002	0,016	0,001	-	-	-
P11	Pesquera Quintero	263.491	6.370.574	984,96	0,002	-	-	-	0,3	4,1	-
P12	Puerto Ventanas S.A. - Terminal Marítimo Puerto Ventanas S.A. (Muelle Mecanizado de Ventanas)	266.922	6.373.402	300							
P13	ESVAL - ES-Quintero	262.585	6.372.997	7.695,65	0,005	0,003	0,049	0	6,8	75,9	10.554.101
P14	Descarga directa aguas servidas-Puchuncaví *	265.902	6.374.491	1.600	0.05	0.01	1	0.00125	10	50	107

\* Se trata de una descarga directa de aguas servidas (sin tratamiento y no controlada) se estima su caudal y concentraciones en base al registro Censo 2017 para estimar la cantidad de población que utiliza esta descarga.

**Tabla 4.16: Carga de Contaminantes en 15 días**

ID	Fuente Emisora	Caudal de diseño sistema de tratamiento (l/día)	Arsénico (g/15d)	Cadmio (g/15d)	Cobre Total (g/15d)	Mercurio (g/15d)	Fósforo (g/15d)	Nitrógeno Total Kjeldahl (g/15d)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)
P1	AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1	266,400,000	1598.4	532.8	6660	293.04			8.0506E+12
P2	AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 2	426,240,000	2557.44	852.48		426.24			4.4683E+13
P3	Central Termoeléctrica Nueva Ventanas	1,032,000,000	6192						
P4	Central Termoeléctrica Campiche	1,032,000,000			10320				
P5	CODELCO - Refinería Ventanas	1,496,000	43.384	7.48	182.512	0.748		5236	1.561E+10
P6	Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Quintero	360,007,000	2160.042						
P7	Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Baño Modular	1,800	0.0036						
P8	ENAP - Terminal Marítimo Quintero	500,000	3	2.5	67.5				
P9	COPEC	60,000							
P10	GASMAR - Descarga Bahía de Quintero Circuito 1200	139,240,000	417.72	278.48	2227.84	139.24			
P11	Pesquera Quintero	984,960	1.96992				295.488	4038.336	
P12	Puerto Ventanas S.A. - Terminal Marítimo Puerto Ventanas S.A. (Muelle Mecanizado de Ventanas)	300,000							
P13	ESVAL - ES-Quintero	7,695,650	38.47825	23.08695	377.08685		52330.42	584099.835	8.1221E+10
P14	Descarga directa aguas servidas-Puchuncaví *	1,600,000	80	16	1600	2	16000	80000	171200

Para el caso de la “Descarga directa de aguas servidas de Puchuncaví” se trabajará bajo el supuesto que recibe las descargas de una población de 10.000 habitantes (suma aproximada de los habitantes en el registro de abastecimientos de los APRs existentes en la localidad de Puchuncaví), por otra parte, existe el registro de 17 mil habitantes (fuente del Censo 2017) pero para efectos del modelo se utilizará la primera cifra, debido al carácter de población flotante que posee esta localidad (personas que trabajan en otras comunas, veraneantes, etc.).

Para la estimación de las concentraciones se utilizará como base lo establecido en el D.S. 90, 2001, que estable concentraciones medias diarias por cada 100 habitantes, las que son presentadas en la Tabla 4.17:

**Tabla 4.17: Carga de contaminante media diaria (100 Hab/día) (Fuente: D.S. 90, 2001)**

Contaminante	Valor Característico	Unidad	Carga de contaminante media diaria (equivalente a 100 Hab/día) *	
PH	6-8			---
Temperatura **	20	°C		---
Sólidos suspendidos totales	220	mg/L	3520	g/d
Sólidos sedimentables **	6	ml/L 1h		---
Aceites y grasas	60	mg/L	960	g/d
Hidrocarburos fijos	10	mg/L	160	g/d
Hidrocarburos totales	11	mg/L	176	g/d
Hidrocarburos volátiles	1	mg/L	16	g/d
DBO5	250	mg O2/L	4000	g/d
Aluminio	1	mg/L	16	g/d
Arsénico	0.05	mg/L	0.8	g/d
Boro	0.75	mg/L	12.8	g/d
Cadmio	0.01	mg/L	0.16	g/d
Cianuro	0.2	mg/L	3.2	g/d
Cloruros	400	mg/L	6400	g/d
Cobre	1	mg/L	16	g/d
Cromo Total	0.1	mg/L	1.6	g/d
Cromo Hexavalente	0.05	mg/L	0.8	g/d
Estaño	0.5	mg/L	8	g/d
Fluoruro	1.5	mg/L	24	g/d
Fósforo total	10	mg/L	160	g/d
Hierro	1	mg/L	16	g/d

Contaminante	Valor Característico	Unidad	Carga de contaminante media diaria (equivalente a 100 Hab/día) *	
Manganeso	0.3	mg/L	4.8	g/d
Mercurio	0.001	mg/L	0.02	g/d
Molibdeno	0.07	mg/L	1.12	g/d
Níquel	0.1	mg/L	1.6	g/d
Nitrógeno total Kjeldahl	50	mg/L	800	g/d
Nitrito más Nitrato (lagos)	15	mg/L	240	g/d
Pentaclorofenol	0.009	mg/L	0.144	g/d
Plomo	0.2	mg/L	3.2	g/d
Selenio	0.01	mg/L	0.16	g/d
Sulfato	300	mg/L	4800	g/d
Sulfuro	3	mg/L	48	g/d
Tetracloroetano	0.04	mg/L	0.64	g/d
Tolueno	0.7	mg/L	11.2	g/d
Triclorometano	0.2	mg/L	3.2	g/d
Xileno	0.5	mg/L	8	g/d
Zinc	1	mg/L	16	g/d
Índice de Fenol	0.05	mg/L	0.8	g/d
Poder espumógeno	5	mm	5	mm
SAAM	10	mg/L	160	g/d
Coliformes Fecales o termotolerantes	107	NMP/100 ml	1.6e+12	coli/d

\* Se consideró una dotación de agua potable de 200 L/hab/día y un coeficiente de recuperación de 0,8.

Por lo que para una población de 10.000 habitantes se estima un caudal de 18.52 l/s y los valores de las concentraciones son presentadas en la Tabla 4.18 :

**Tabla 4.18: Carga de contaminantes para descarga directa de aguas servidas Puchuncaví**

Contaminante	Concentración (equivalente a 10.000)	Unidad	Carga de contaminante media diaria (equivalente a 10.000 Hab/día)	
PH	6-8			---
Temperatura	20	°C		---
DBO5	250	mg O2/L	400000	g/d
Arsénico	0.05	mg/L	80	g/d
Cadmio	0.01	mg/L	16	g/d
Cobre	1	mg/L	1600	g/d
Cromo Total	0.1	mg/L	160	g/d
Fósforo total	10	mg/L	16000	g/d
Mercurio	0.00125	mg/L	2	g/d
Nitrógeno total Kjeldahl	50	mg/L	80000	g/d
Nitrito más Nitrato (lagos)	15	mg/L	24000	g/d
Coliformes Fecales o termotolerantes	107	NMP/100 ml	1.6E+14	coli/d

#### 4.8.2 Planes de vigilancia y seguimiento de variables ambientales

En la bahía de Quintero existen 12 Unidades Fiscalizables (UF), de esta tabla se aprecia que la mayor cantidad de información se concentra entre los años 2012 al 2018, solo existiendo información para CT AES GENER U3 y U4 para extensiones temporales desde el 1995 en adelante.

**Tabla 4.19: Planes de Vigilancia o Seguimiento Ambiental en Unidades Fiscalizables (Fuente: MMA-HOLON, 2019)**

Unidades Fiscalizables	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	TOTAL
CT AES GENER U3																				2	4	4	4	4	5		23
CT AES GENER U4																				4	4	4	4	4	4		24
CT AES GENER U1U2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		48
TM VENTANAS																				4	4	3	3	3	2		19
CODELCO VENTANAS																			1	2	2	2	2	1	4		14
PTA GASMAR																										1	1
TM OXIQUIM		3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	1	71
TM ENAP																	2	2	2	2	2	2	2	2	2		18
TM GNL QUINTERO																				6	3	4	4	4	4	1	26
TM COPEC																			1	2	2	1	2	2	1		11
PESQ QUINTERO																						1		1			2
PTAS ESVAL																			2	1	1	2	1	3	1		11

En la Tabla 4.20: Variables de Monitoreo para las Unidades Fiscalizables (Fuente: MMA-HOLON, 2019) se observan los tipos de parámetros monitoreados por cada UF, cabe señalar que se cuenta con

registros de calidad de agua y sedimento para casi todas las UF mientras que los otros parámetros analizados solo se realizan en la minoría de estos.

**Tabla 4.20: Variables de Monitoreo para las Unidades Fiscalizables (Fuente: MMA-HOLON, 2019)**

Unidades Fiscalizables	Hidrografía	Corrientes	Aguas	Sedimentos	Organismos	Macrofauna	Fitoplancton	Zooplancton	Megafauna	Bioensayos	Total
CT AES GENER U3	1	1	1	1		1	1	1			7
CT AES GENER U4	1	1	1	1		1	1				6
CT AES GENER U1U2	1		1	1							3
TM VENTANAS	1		1	1		1					4
CODELCO VENTANAS				1	1	1					3
PTA GASMAR			1	1		1				1	4
TM OXIQUIM	1		1	1		1			1		5
TM ENAP	1		1	1		1					4
TM GNL QUINTERO	1		1	1		1	1	1	1	1	8
TM COPEC			1	1		1					3
PESQ QUINTERO	1		1	1		1					4
PTAS ESVAL	1	1	1	1		1			1		6

Por último, se presenta un resumen de los parámetros relevantes analizados por las UF en la Tabla 4.21, datos que serán presentados en el **ANEXO N° 4**.

**Tabla 4.21: Resumen de Parámetros Monitoreados por UF con Información relevante para el Estudio**

Unidades Fiscalizables	Corrientes	Aguas - Metales Pesados	Aguas - Nutrientes	Sedimentos - Metales Pesados	Sedimentos - Nutrientes	Estero Campiche - Metales Pesados	Estero Campiche - Nutrientes
CT AES GENER U3	x						
CT AES GENER U4	x						
CT AES GENER U1U2	x						
TM VENTANAS		x		x		x	
CODELCO VENTANAS				x			
PTA GASMAR							
TM OXIQUIM							
TM ENAP					x		
TM GNL QUINTERO							
TM COPEC		x		x			
PESQ QUINTERO			x				
PTAS ESVAL	x		x			x	x

Del análisis de las concentraciones totales del cobre, presentadas en la Tabla 4.22 para la capa inferior no es posible identificar una diferencia clara entre los puntos de monitoreo (fondo), mientras que para la capa superior en la estación GV-3-S presenta las mayores concentraciones y GV-6-S, las menores.

**Tabla 4.22: Análisis de Cobre Total del PVA en Matriz Acuosa**

	COBRE TOTAL ( $\mu\text{g/L}$ )					
	Columna de Agua Fondo					
	GV-1-F	GV-3-F	GV-4-F	GV-6-F	GV-10-F	GV-12-F
<b>Mínimo</b>	0,50	0,25	0,50	0,42	0,00	0,50
<b>Máximo</b>	70,00	70,00	60,00	60,00	60,00	70,00
<b>Promedio</b>	6,38	6,98	7,62	7,72	7,85	7,76
<b>Des. Est.</b>	10,29	11,02	9,76	9,23	9,62	11,04

	COBRE TOTAL ( $\mu\text{g/L}$ )					
	Columna de Agua Superficie					
	GV-1-S	GV-3-S	GV-4-S	GV-6-S	GV-10-S	GV-12-S
<b>Mínimo</b>	0,34	0,23	0,17	0,12	0,26	0,46
<b>Máximo</b>	28,00	43,60	26,20	21,60	29,50	25,30
<b>Promedio</b>	7,23	6,70	6,26	6,15	6,52	6,81
<b>Des. Est.</b>	6,81	7,52	6,01	5,01	6,80	6,14

Para el caso del arsénico total presenta una homogeneidad en sus resultados excepto para la estación GV-6-F cuyo máximo es un tercio de las demás, mientras que el promedio y los mínimos son similares.

**Tabla 4.23: Análisis de Arsénico Total del PVA en Matriz Acuosa**

	ARSÉNICO TOTAL ( $\mu\text{g/L}$ )					
	Columna de Agua Fondo					
	GV-1-F	GV-3-F	GV-4-F	GV-6-F	GV-10-F	GV-12-F
<b>Mínimo</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Máximo</b>	0,12	0,12	0,12	0,04	0,13	0,08
<b>Promedio</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Des. Est.</b>	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01

	ARSÉNICO TOTAL ( $\mu\text{g/L}$ )					
	Columna de Agua Superficie					
	GV-1-S	GV-3-S	GV-4-S	GV-6-S	GV-10-S	GV-12-S
<b>Mínimo</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Máximo</b>	0,12	0,08	0,12	0,11	0,12	0,11
<b>Promedio</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Des. Est.</b>	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

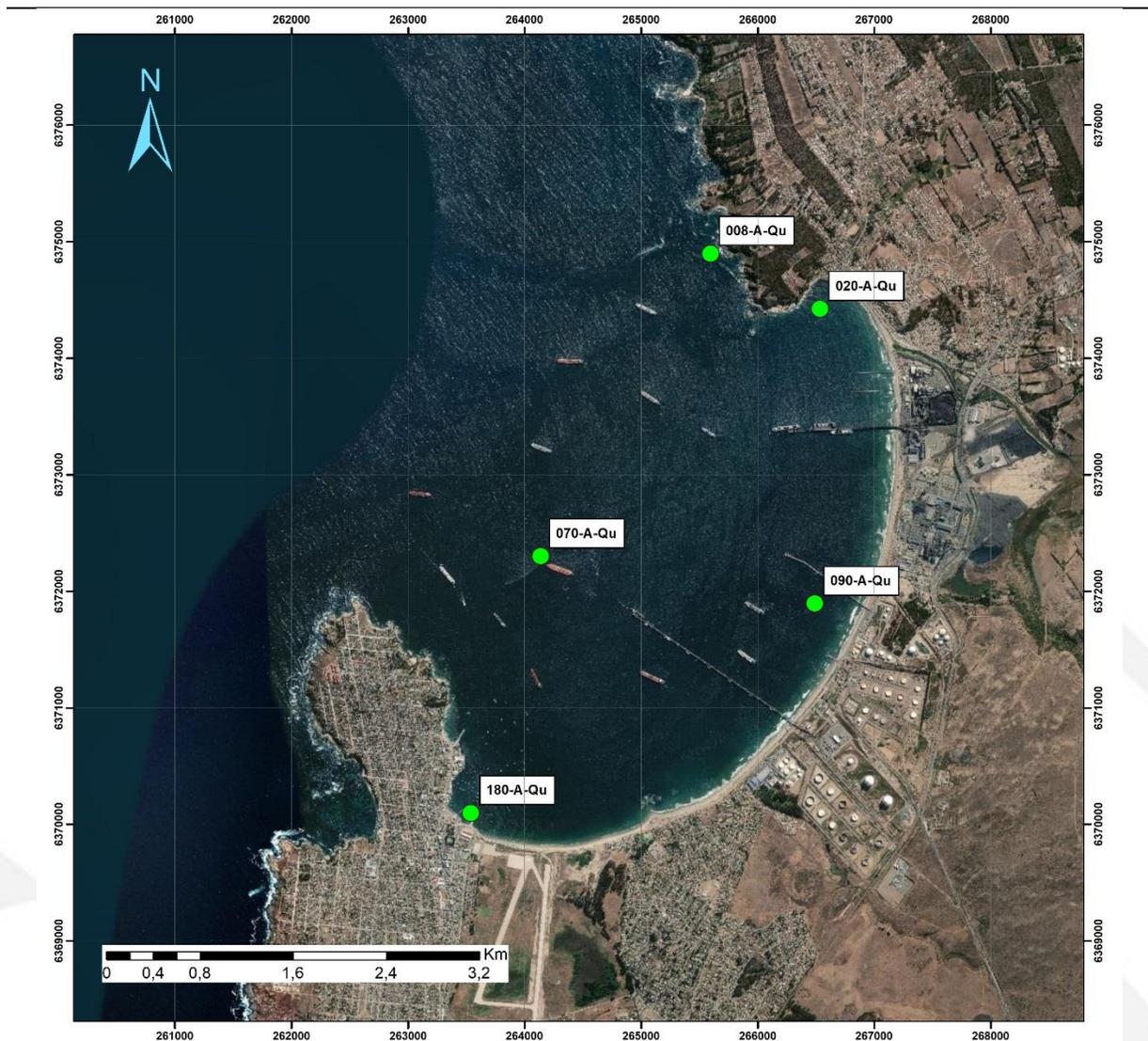
#### 4.8.3 Base de datos POAL

##### 4.8.3.1 Columna de agua

La Tabla 4.24 presenta las estaciones de monitoreo POAL con información hasta el año 2017. La Figura 4-9 presenta la distribución espacial de las estaciones de monitoreo de calidad de la columna de agua.

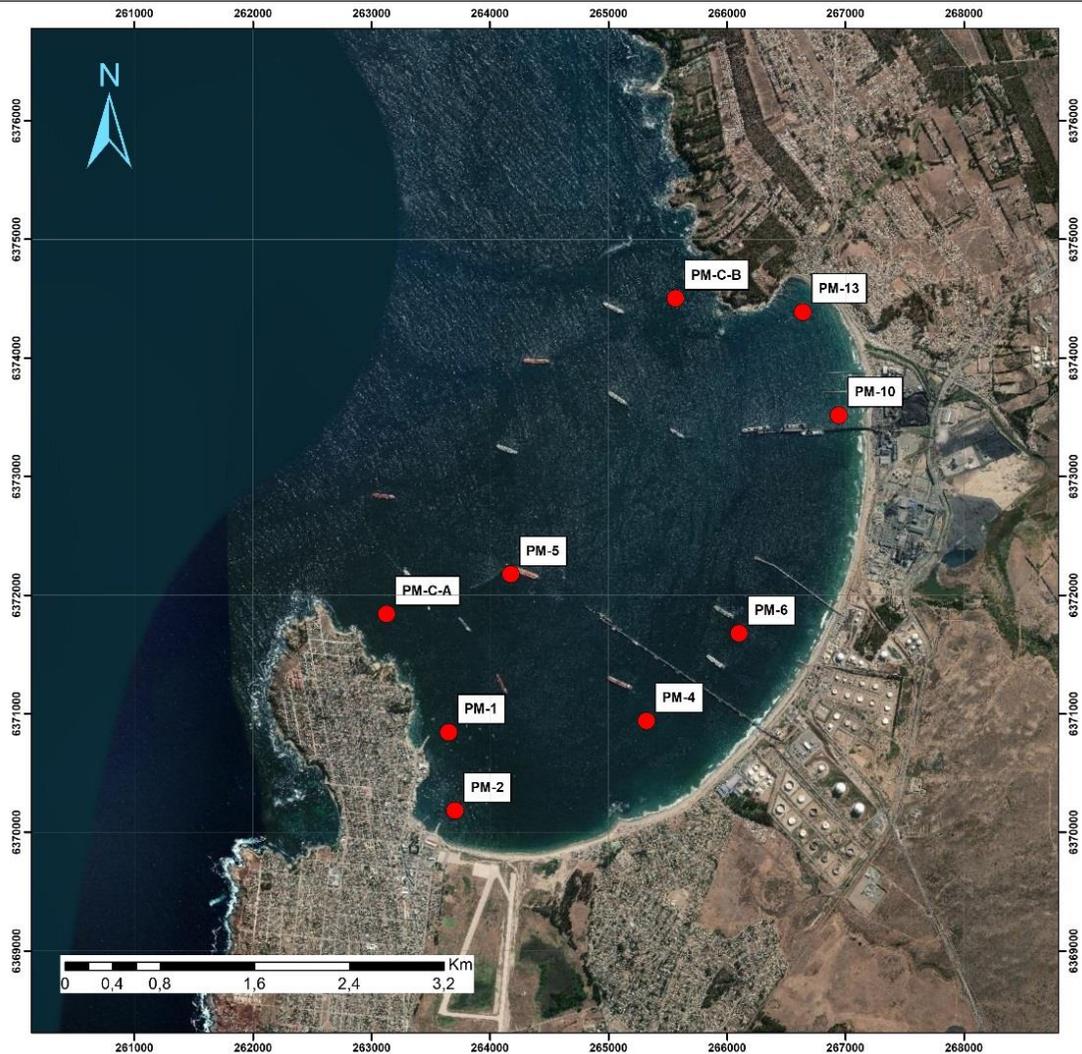
**Tabla 4.24: Estaciones de Monitoreo POAL Calidad de Columna de Agua**

Coordenada UTM WGS84 H19S		Estación	Inicio de monitoreo
Este (m)	Norte (m)		
265.596	6.374.894	008-A-Qu	27-11-2013
266.536	6.374.420	020-A-Qu	26-03-2001
264.138	6.372.298	070-A-Qu	01-10-1993
266.492	6.371.891	090-A-Qu	01-10-1993
263.540	6.370.094	180-A-Qu	26-03-2001



**Figura 4-9: Estaciones de Monitoreo POAL Columna de Agua**

El año 2018 hubo una modificación en la metodología de mediciones de calidad de la POAL, primero cambiando la distribución en planta y en la vertical de las toma de muestras la columna de aguas (ver Figura 4-10 y Tabla 4.25), y segundo no se realizaron mediciones en la vertical en al menos tres puntos (superficial, al medio y fondo) solo tomando muestras superficiales. Esta nueva distribución vendría a mejorar la representación espacial las concentraciones de la Bahía, como también permitir la trazabilidad de los contaminantes. Esta no es aún representativa dada la corta extensión de su medición.



**Figura 4-10: Ubicación Estaciones de Monitoreo POAL Columna de Agua 2018**

La Tabla 4.26 muestra los resultados de las estaciones de POAL 2018, se puede observar que solo las concentraciones para el Arsénico Disuelto presentan dispersión en las distintas estaciones de monitoreo, esto se puede deber al método de análisis utilizado para el análisis de las muestras en laboratorio, truncando el límite de detección, y asumiendo este como el valor de la concentración.

**Tabla 4.25: Estaciones POAL 2018**

Coordenada UTM WGS84 H19S		Estación
Este (m)	Norte (m)	
264.175,0	6.372.173,0	PM-5
266.101,7	6.371.674,4	PM-6
266.944,3	6.373.514,6	PM-10
265.565,4	6.374.499,5	PM-C-B
266.640,0	6.374.385,2	PM-13
265.321,8	6.370.937,1	PM-4
263.705,6	6.370.179,6	PM-2
263.652,8	6.370.841,4	PM-1
263.127,7	6.371.838,6	PM-C-A

**Tabla 4.26: Valores Metales presentes en columna de agua POAL 2018**

METAL	ESTACIONES POAL 2018 (µg/L)								
	PM-1	PM-2	PM-4	PM-5	PM-6	PM-10	PM-13	PM-C-A	PM-C-B
Cadmio Disuelto	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Cobre Disuelto	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Mercurio Disuelto	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Plomo Disuelto	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Arsénico Disuelto	0,5	15	1	0,5	0,5	0,5	3	0,5	8

La Tabla 4.27 presenta un resumen de los principales metales pesados en la Bahía de Quintero-Puchuncaví con sus respectivos límites de concentración máximas de las normativas nacionales e internacionales, se destacan las diferencias entre la normativa nacional versus las recomendaciones internacionales. En particular las concentraciones máximas del Cobre (Cu) superan el límite establecido por la CCC de la EPA (2006), que fija en 3,1 µg/L para el Cobre.

**Tabla 4.27: Metales Prioritarios en Comparación a las Normativas Nacionales e Internacionales**

Metales Disueltos	Expresión	Mediciones			Normativas de Calidad			
		POAL (2005-2017)			EPA 2006		Nueva Zelanda $\mu\text{g/L}^*$	NCh 1.333 $\mu\text{g/L}$
		Rango $\mu\text{g/L}$	Media $\mu\text{g/L}$	Desv. Estándar	CMC $\mu\text{g/L}$	CCC $\mu\text{g/L}$		
Arsénico(1)	As	0,25 - 2,4	1,14	0,62	69	36		100
Cadmio	Cd	0,025 - 0,5	0,23	0,22	40	8,8	0,7	10
Cobre	Cu	0,025 - 5,88	1,72	1,44	4,8	3,1	0,3	200
Cromo(2)	Cr	0,25 - 0,63	0,12	0,178	1100	50		100
Mercurio	Hg	0,00025 - 1	0,39	0,33	1,8	0,94	0,1	5

(1) Mediciones desde 2013

(2) El Cromo se dejó de medir el 14-11-2011

\* Valores basados en Australian and New Zealand Guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1 de la National Water Quality Management Strategy para la protección del 99% de las especies.

CMC: Criterio Máximo Concentración es la concentración más alta a la que una comunidad acuática puede estar expuesta brevemente sin resultar efectos inaceptables.

CCC: Criterio Continuo Concentración es la más alta concentración a la que una comunidad acuática puede estar expuesta sin resultar efectos inaceptables.

#### 4.8.3.2 Sedimentos

Los sedimentos de los ecosistemas marinos son una memoria de los impactos de descargas de materiales que sedimentaban tanto en el pasado como en la actualidad. En consecuencia, los distintos componentes del ecosistema de la bahía o el sistema ambiental formado con las industrias de larga data pueden estar reflejando en las concentraciones presentes en los sedimentos de la Bahía.

Se analizaron las 13 estaciones de monitoreo de calidad química de sedimentos dispuestas por el POAL, las que son presentadas en la Figura 4-11. Del cual se puede comentar que sólo el Cobre presenta valores medios excedidos a las normativas internacionales.

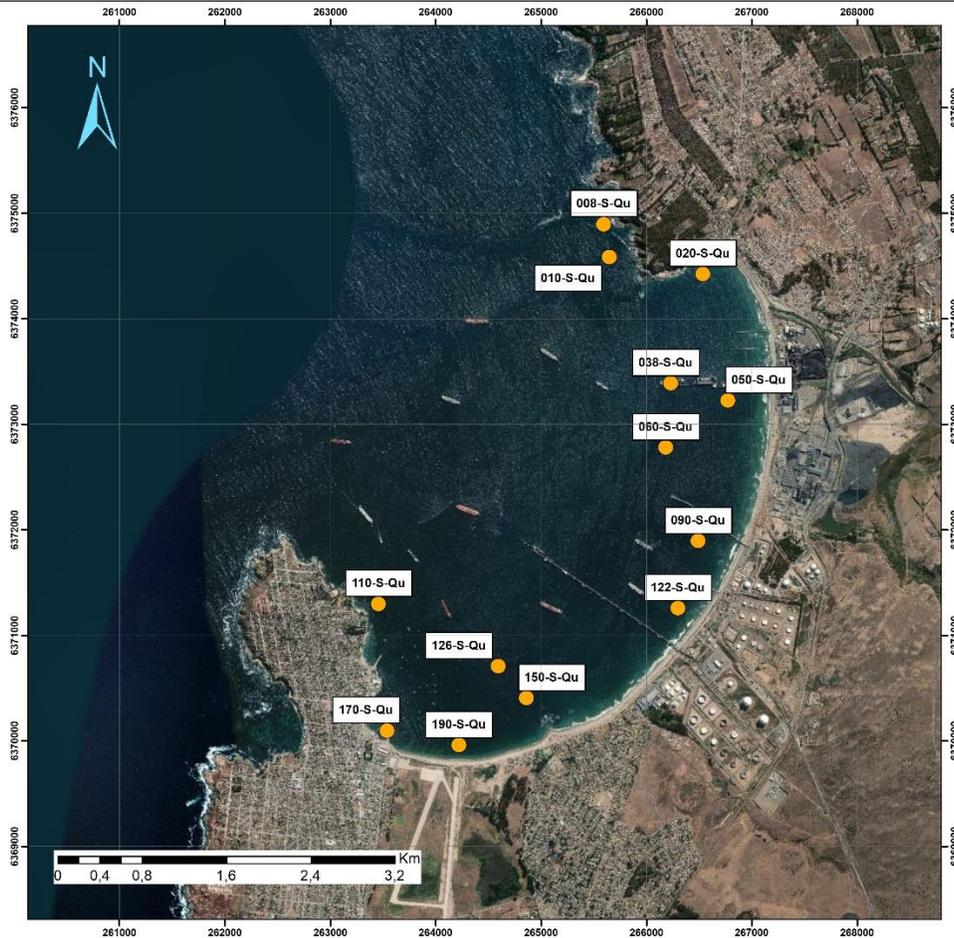


Figura 4-11: Estaciones Calidad Química de Sedimentos POAL

Tabla 4.28: Resumen metales pesados prioritarios en sedimentos y normativa internacional

Metales Totales	Expresión	Concentraciones (mg/kg)						
		Mediciones			Normas de Calidad Internacional para Sedimentos			
		POAL			Canadá ISQG (1)	Canadá PEL (2)	Nueva Zelanda ISQG Bajo (3)	Nueva Zelanda ISQG Alto (4)
Media	Rango	Des. Estándar						
Cobre	Cu	46,0	0,175 - 600,6	58,29	18,7	108	65	270
Cromo	Cr*	14,51	0,25 -123	12,47			80	370
Cadmio	Cd	0,46	0,05 -15,5	1,81	0,7	4,2	1,5	10
Mercurio	Hg	0,056	0,005 -2,14	0.125	0,13	0,7	0,15	1
Arsénico	As**	3,4	0,2 -9,2	2,18	7,24	41,6	20	70

\* Cr fue monitoreado hasta el 14-11-2011

\*\* As fue monitoreado desde el 2013

- (1) (Interim Freshwater Sediment Quality Guideline, ISQG) el límite donde los efectos dentro del cual rara vez ocurren los efectos adversos en el ecosistema marino.
- (2) (Probable Effect Level, PEL) Niveles con probables efectos sobre el ecosistema marino.
- (3) Valores basados en Australian and New Zealand Guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1 de la National Water Quality Management Strategy (Valor más estricto).
- (4) Valores basados en Australian and New Zealand Guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1 de la National Water Quality Management Strategy (2018) para la protección del 99% de las especies (Valor más permisivo).

#### **4.8.4 Nutrientes en la bahía de Quintero y Puchuncaví**

En el “INFORME DE DIAGNÓSTICO AMBIENTAL” desarrollado por la DIRECTEMAR se desprenden las siguientes conclusiones respecto al análisis de los nutrientes en la Bahía de Quintero:

- La matriz sedimentaria submareal presenta un enriquecimiento progresivo de nutrientes en todas las estaciones de monitoreo, específicamente por Fósforo que podría estar ligado a descargas de aguas servidas.
- La matriz acuosa presenta concentraciones de fósforo y nitrógeno en las estaciones POAL oficiales y en las complementarias del 2018. Esto refleja que los nutrientes se encuentran presentes en toda la bahía y no solo en las fuentes puntuales de descargas de aguas servidas.

#### 4.8.5 Fuente difusa: Material Particulado Sedimentable (MPS) en la bahía de Quintero y Puchuncaví

Los valores del material particulado sedimentable (MPS) se extrajeron del estudio elaborado por el CEA, 2013 y monitoreado por CENMA, a los que se les analizó químicamente y que serán utilizados como emisiones atmosféricas en el modelo de dispersión de contaminantes, son los presentados en la Tabla 4.29:

**Tabla 4.29: Fuente difusa, Emisiones atmosféricas utilizadas en el modelo de dispersión de contaminantes**

Concentraciones MPS	As	Cd	Cu
Promedio fracción insoluble ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )	2e-04	2e-05	5e-03
Promedio fracción soluble ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )	LD	LD	LD

LD: Límite de detección

La presente Tabla 4.30 la carga de contaminantes en un periodo de 15 días.

**Tabla 4.30: Carga de Contaminantes en 15 días**

Concentraciones MPS	As	Cd	Cu
Carga ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/15\text{d}$ )	216	22	5400

---

## 5 MODELO HIDRODINÁMICO Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES DELFT3D

La dispersión de los contaminantes puede ser estudiada mediante un modelo de dispersión tridimensional constituido por una base de un modelo hidrodinámico el cual considera de forma dinámica la interacción de los diferentes elementos, para actualizar la morfología costera de forma iterativa, con lo que podemos simular comportamientos en periodos desde horas hasta décadas.

### 5.1 Consideraciones a tener en cuenta para la modelación

La exactitud de los resultados calculados para las características del flujo y la dinámica de dispersión de contaminantes depende de los parámetros físicos y numéricos elegidos durante la construcción del modelo. Los parámetros físicos están relacionados con la naturaleza del área y pueden ser medidos directamente en campo o calculados indirectamente en función a otros parámetros de campo. Los parámetros numéricos son usados para el modelamiento, como el tamaño de grilla, intervalos de tiempo, etc.

Los modelos hidrodinámicos y de calidad química requieren de buena información de oleaje, corrientes, batimetría, concentraciones de contaminantes y tipo de sedimento. Además, es necesario conocer si la batimetría es llana o abrupta, si se tiene información en el tiempo del comportamiento de olas para la calibración y posteriores simulaciones, si hay actividad animal en el área que pueda mezclar la capa superficial del sedimento, si hay otras fuentes que podrían cubrir al sedimento contaminado (descarga de residuos de perforaciones, sedimentos de los ríos, erosión costera, etc.). Para mayor información sobre principios de calidad química del modelo Delft 3D ver

#### **ANEXO N° 5.**

Se presenta en la Figura 5-1 el esquema de la modelación de dispersión de contaminantes.

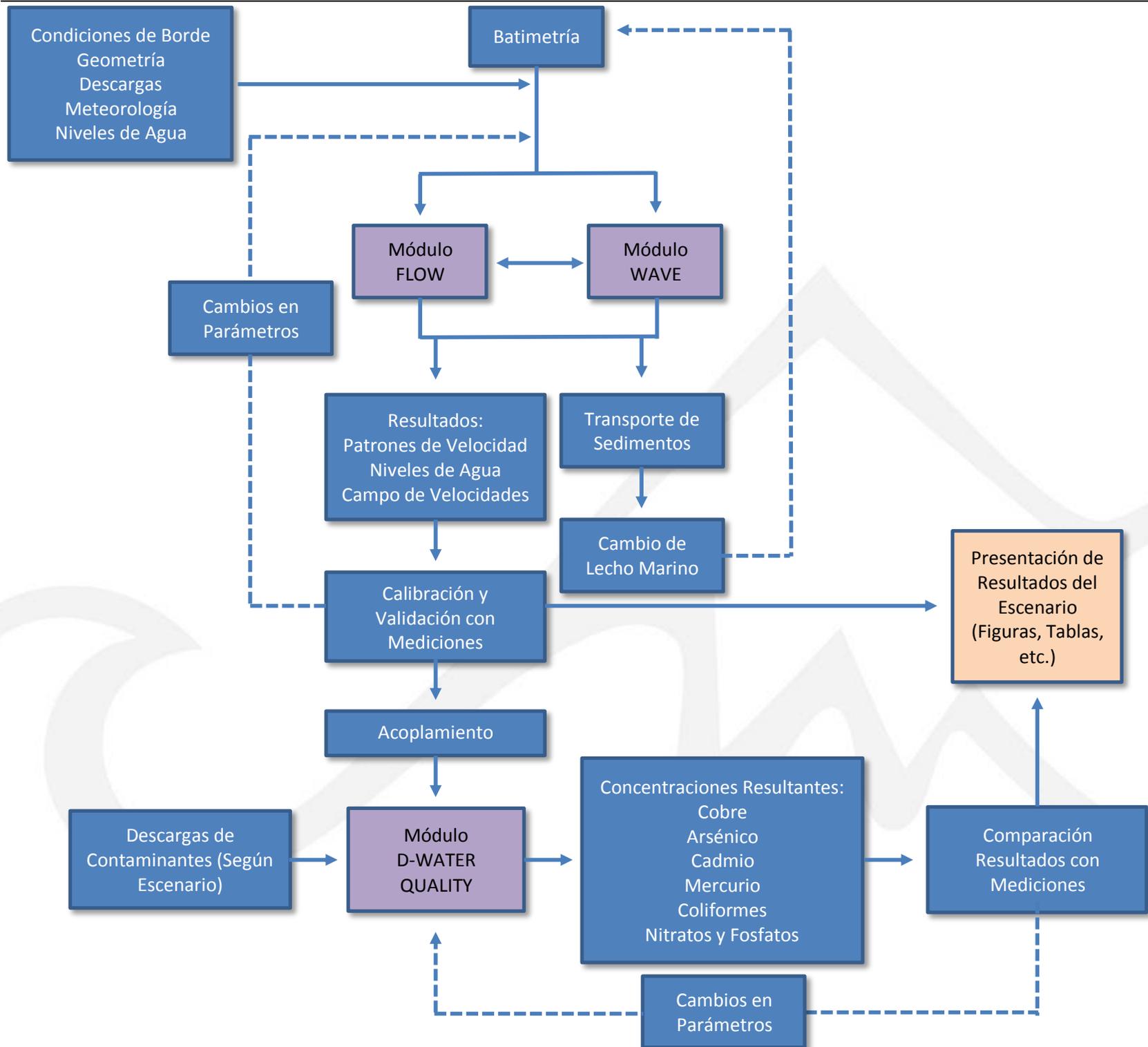


Figura 5-1: Diagrama de la Modelación de Dispersión de Contaminantes

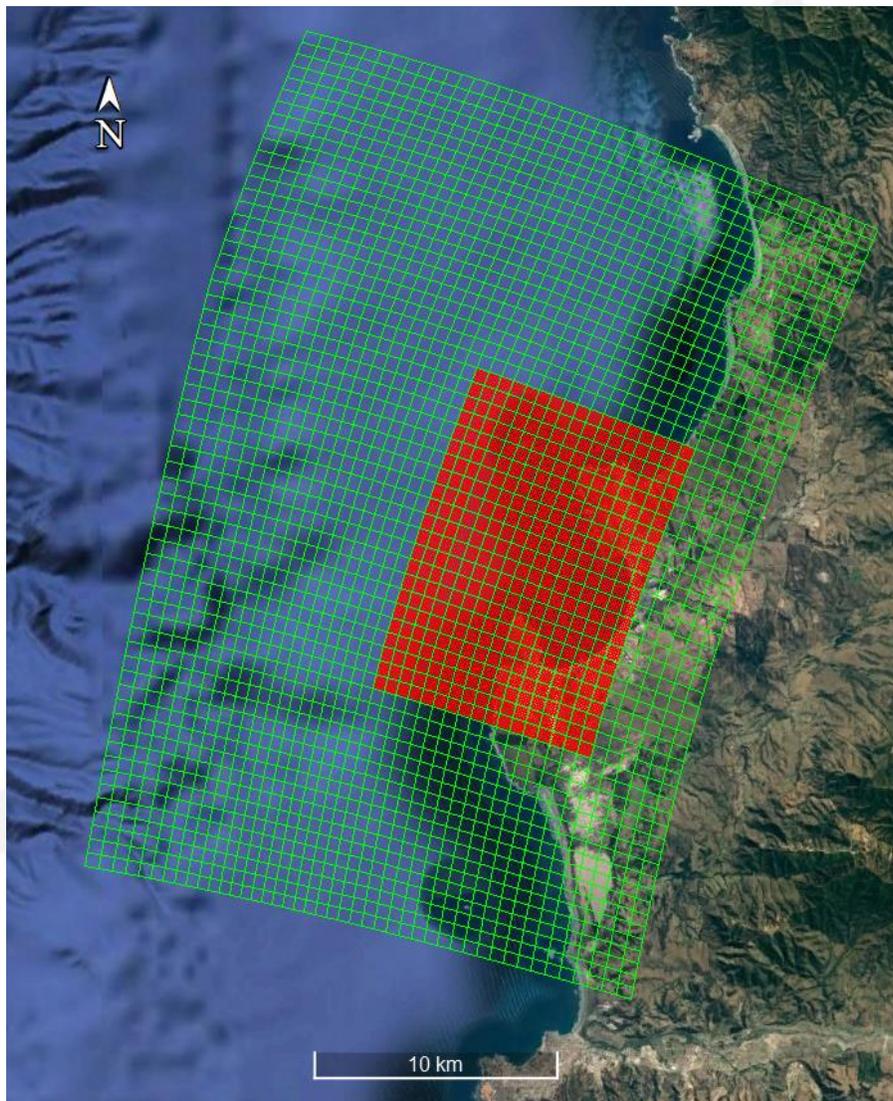
---

## 5.2 Periodo de modelación

En base a la información disponible de las principales variables que intervienen en un modelo del tipo hidrodinámico con las componente de dispersión de contaminantes, se propone establecer una ventana temporal para los efectos de la modelación hidrodinámica, fijando un año tipo característico de oleaje espectral en aguas profundas para el nodo de Valparaíso, mientras que para los efectos de calibración del modelo se utilizará la información obtenida del Informe de ECOTECNOS para la DIA “Módulos de Desalación de Agua de Mar Unidad Ventanas 3 – AES GENER S.A., Bahía de Quintero” S.A para los periodos de invierno y verano del 2016, que posee información de mediciones corrientes (Eulerianas y Lagrangianas), mareas, viento y oleaje.

## 6 RESULTADOS

Para definir el área de estudio y con la finalidad de optimizar los tiempos de cómputo del modelo, se construyen dos grillas para el módulo de oleaje la primera con una dimensión promedio entre sus elementos de 550 x 550 m (grilla verde), mientras que, la grilla de detalle anidada tiene una medida de 50 x 50 m (grilla roja) (ver Figura 6-1). En tanto a las condiciones de borde son ingresadas a todo el límite W de la grilla gruesa (grilla verde), y es propagada hasta la grilla anidada de detalle (grilla roja).



**Figura 6-1: Grillas de modelación de oleaje (oleajes en aguas profundas y detalle en el área cercana a la costa)**

Luego para la modelación de los módulos hidrodinámico y de dispersión de contaminantes se construye una tercera grilla la cual es presentada en la Figura 6-2. Esta grilla posee un sector de mayor refinamiento correspondiente al sector de la bahía de Quintero, donde el espaciamiento promedio entre sus elementos es de 50 x 50 m. Se definió una condición de borde (borde Oeste completo) y como formante se utilizaron serie de tiempo de la marea.



**Figura 6-2: Grilla de modelación modelo hidrodinámico y de dispersión de contaminantes.**

Se utilizó una ventana de tiempo de 30 días para la modelación con todos sus módulos acoplados (Hidrodinámico, oleaje y calidad) los datos utilizados para la calibración del modelo son los de la campaña a terreno en verano y para la validación se utiliza los datos de la campaña de invierno del 2016 realizado por ECOTECNOS.

Por otra parte, para lograr la estabilización del modelo, se utilizó un paso de tiempo de 0,5 minutos, lo que significa un tiempo efectivo de modelación de 2 días, considerando las siguientes características del ordenador presentadas en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1: Características del PC de Modelación**

Procesador	Intel(R) Core™ i7-39030K CPU 3,2 GHz
Memoria RAM	32 GB
Disco Duro	2 TB 7200 rpm
Tarjeta de Video	NVIDIA GeForce GTX760

### 6.1 Calibración, validación e indicador de sensibilidad del modelo numérico

Para lograr la calibración y validación del modelo se ajustaron los siguientes parámetros: Rugosidad (el Manning) la viscosidad y difusión horizontal (Eddy viscosity y eddy diffusivity).

Para estimar la calibración y validación del modelo se utilizará el siguiente indicador de sensibilidad. Un indicador de la sensibilidad del modelo es necesario para determinar si puede usarse o no como una herramienta predictiva significativamente útil. Una medida de su habilidad en la predicción, dada por McCall *et al.* (2010). El indicador es expresado a continuación:

$$\text{Indicador} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Valor}_{\text{medido}, i} - \text{Valor}_{\text{modelo}, i})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Valor}_{\text{medido}, i})^2}$$

En la formulación,  $n$  representa el número de puntos medidos;  $\text{Valor}_{\text{medido}, i}$  y  $\text{Valor}_{\text{modelo}, i}$ . Si el indicador es igual a 1, la simulación es perfecta; si el valor es 0, la simulación no es buena.

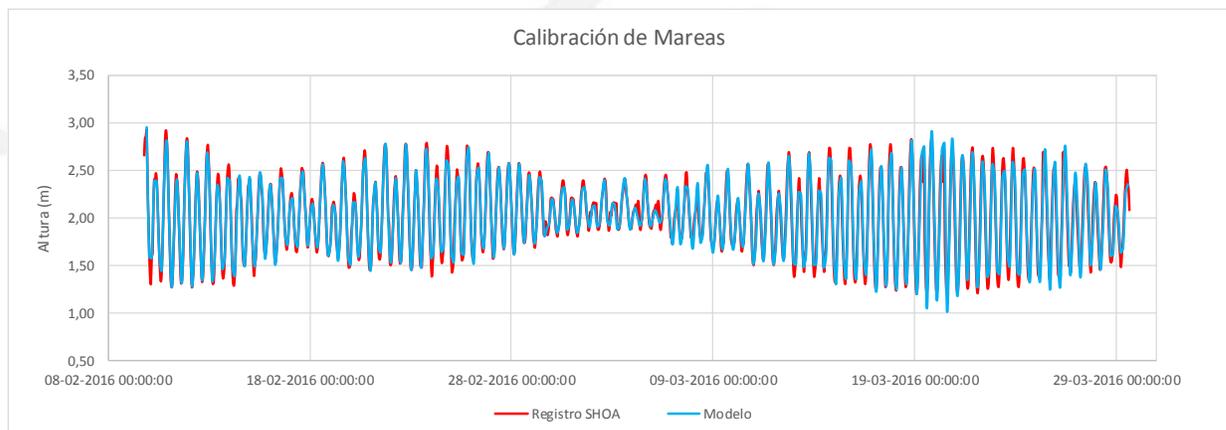
El modelo hidrodinámico fue construido en tres capas (Superficial, Intermedia y Fondo) a las que se les introdujeron condiciones iniciales de salinidad y temperatura. El cuadro, presentado en la Tabla 6.2, muestra un resumen de los resultados de la calibración de las magnitudes de la corriente en el punto donde se tiene información de un ADCP instalado por ECOTECNOS 2016 para medición de las corrientes.

**Tabla 6.2: Resumen de calibración del módulo hidrodinámico, para magnitudes de la corriente**

Fuente	Indicador Estadístico	Fondo	Intermedia	Superficial
		cm/s	cm/s	cm/s
Terreno	Promedio	4,8	5,2	8,9
	Des. Estand.	3,1	10,4	4,8
<b>Modelo</b>	<b>Promedio</b>	<b>4,2</b>	<b>6,7</b>	<b>10,3</b>
	<b>Des. Estand.</b>	<b>1,8</b>	<b>5,3</b>	<b>6,8</b>

Al comparar la serie de marea modelada versus la registrada por mareógrafo SHOA, resulta un índice de calibración del 90% de ajuste, por lo que para los efectos del modelo se considera calibrado y validado.

Por otra parte, analizando ambas series se puede apreciar que la marea modela subestima las pleas por lo que su amplitud mareal es menor en la mayoría de los casos al del registrado (Figura 6-3), esto implica que esto también se ve reflejado en la velocidad de llenante y vaciante y por consiguiente la adecuada representación de los tiempos de residencia de los contaminantes asociados a puntos de descarta de contaminante en la Bahía.



**Figura 6-3: Calibración Mareas**

## 6.2 Hidrodinámica de la bahía de Quintero-Puchuncaví

El modelo hidrodinámico estudia el patrón de circulación de la bahía de Quintero, mediante las distintas forzantes que interactúan en los procesos de mezcla, como lo son el oleaje, las mareas y el viento. Por otra parte, al sistema hidrodinámico de la bahía se le incorporan las descargas puntuales que se identificaron en las etapas anteriores y que son presentadas en la Figura 6-4.

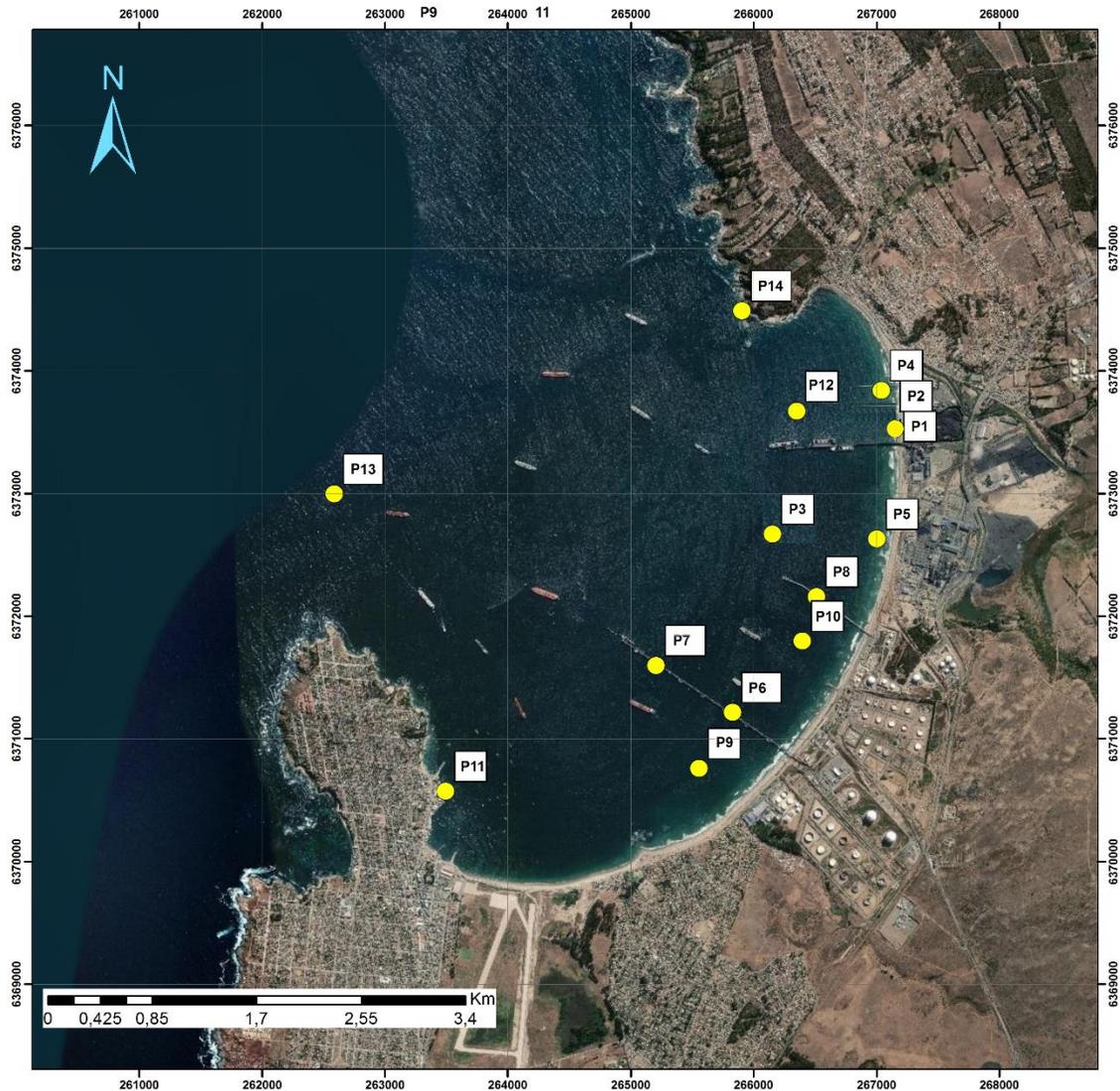
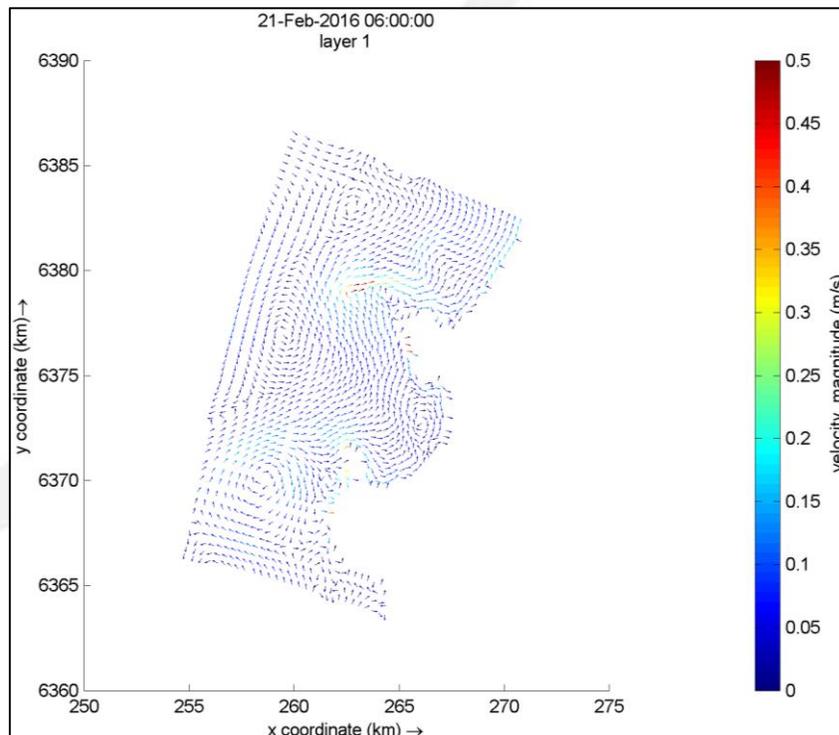


Figura 6-4: Descargas incorporadas en la construcción del Modelo

Se presenta el patrón de circulación de la Bahía en condiciones de oleaje reinante, tanto para condiciones de sicigia como cuadratura (ver Figura 6-5 y Figura 6-6 respectivamente), se observa una recirculación en la corriente en la bahía, con velocidades promedio a los 0,15 m/s en la capa superficial, propiciado la acumulación de contaminantes. Los sectores del extremo norte y sur presentan zonas protegidas al oleaje, que ingresa predominantemente desde el SW y WSW, lo que implica velocidades muy bajas, por lo que se podría esperar mayores concentraciones en los contaminantes particularmente en sedimentos en estos sectores

Por otra parte, los patrones de circulación de la Bahía en condiciones de oleaje dominante, tanto para condiciones de sicigia como cuadratura (ver Figura 6-8 y Figura 6-9 respectivamente), se observa que, para eventos con alta energía del oleaje (marejadas) el patrón de circulación tiene un comportamiento de flujos que ingresan por los extremos y desaguas por el centro de la Bahía a corriente en la bahía, con rango de velocidades entre los 0,2 a 0,6 m/s en la capa superficial, lo propiciado la auto limpieza de los contaminante.



**Figura 6-5: Patrón de circulación, oleaje reinante fase lunar en sicigia**

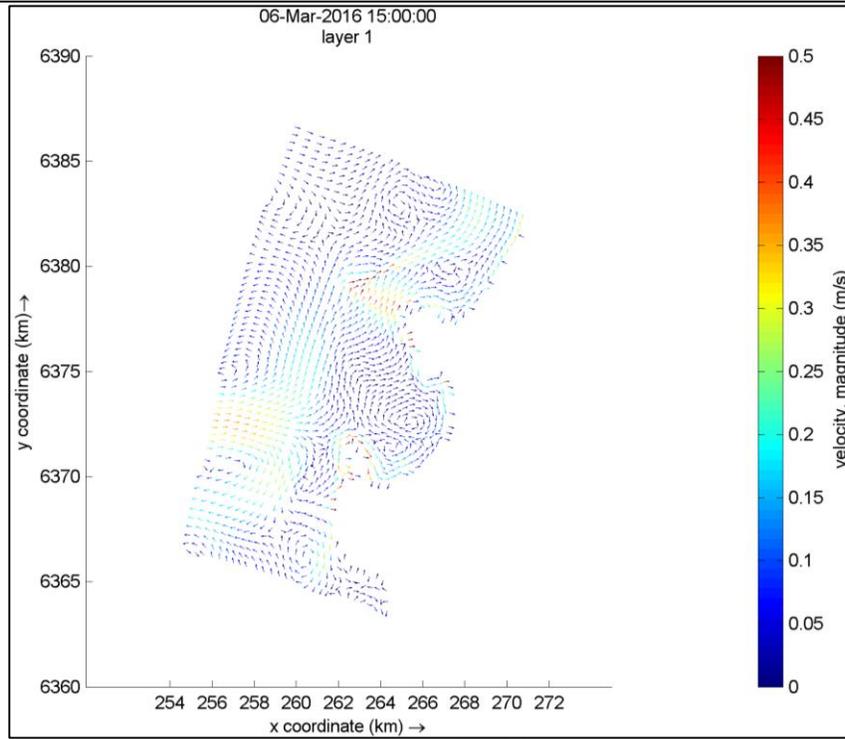


Figura 6-6: Patrón de circulación, oleaje reinante fase lunar en cuadratura

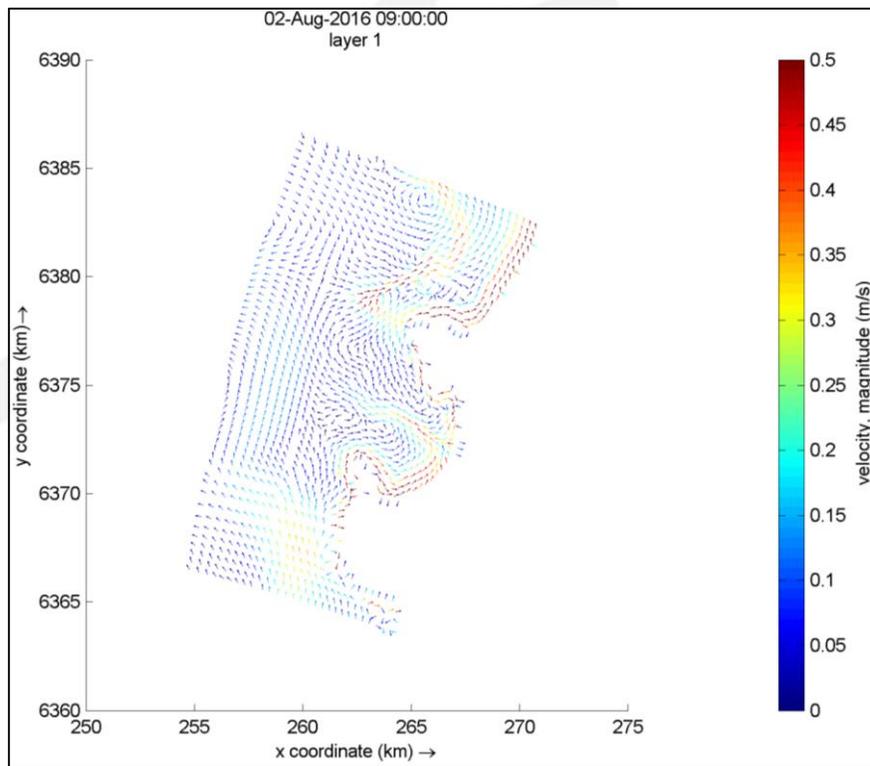


Figura 6-7: Patrón de circulación, oleaje dominante fase lunar en sicigia

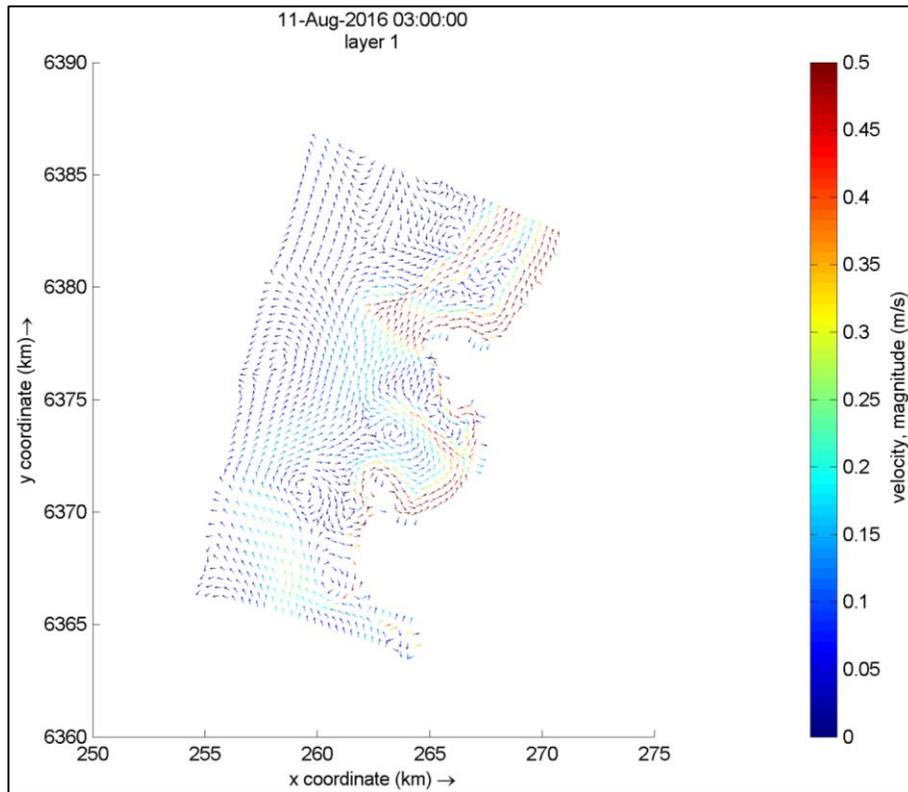


Figura 6-8: Patrón de circulación, oleaje dominante fase lunar en cuadratura

---

### 6.3 Análisis de dispersión de contaminantes

Para determinar la real interacción de todas las fuentes de descarga de contaminantes al área de estudio se incorporan los 13 puntos de unidades fiscalizables más la descarga directa de aguas servidas de Puchuncaví que se presentan en la Tabla 4.15.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos por el modelo de calidad química para dispersión de contaminantes no pueden ser calibrados ni validados de manera convencional y se debe comparar los resultados obtenidos del modelo y los análisis de campo solo en ordenes de magnitud, puesto que la información para la comparación es puntual, con mediciones semestrales, lo que implica una escasa fuente de información para lograr un ajuste adecuado del modelo.

En general la dispersión de los contaminantes tiende a derivar hacia el centro de la Bahía, mientras que las máximas concentraciones se presentan en el sector de Ventana. El patrón de dispersión de metales pesados y nutrientes, es coincidente con la dinámica de los patrones de circulación de la Bahía. Por otra parte, en tiempo de oleaje dominante ocurre una limpieza dada la energía se provoca aceleración en las velocidades de la corriente generando patrones de circulación entrante desde los extremos y saliendo por el centro de la Bahía.

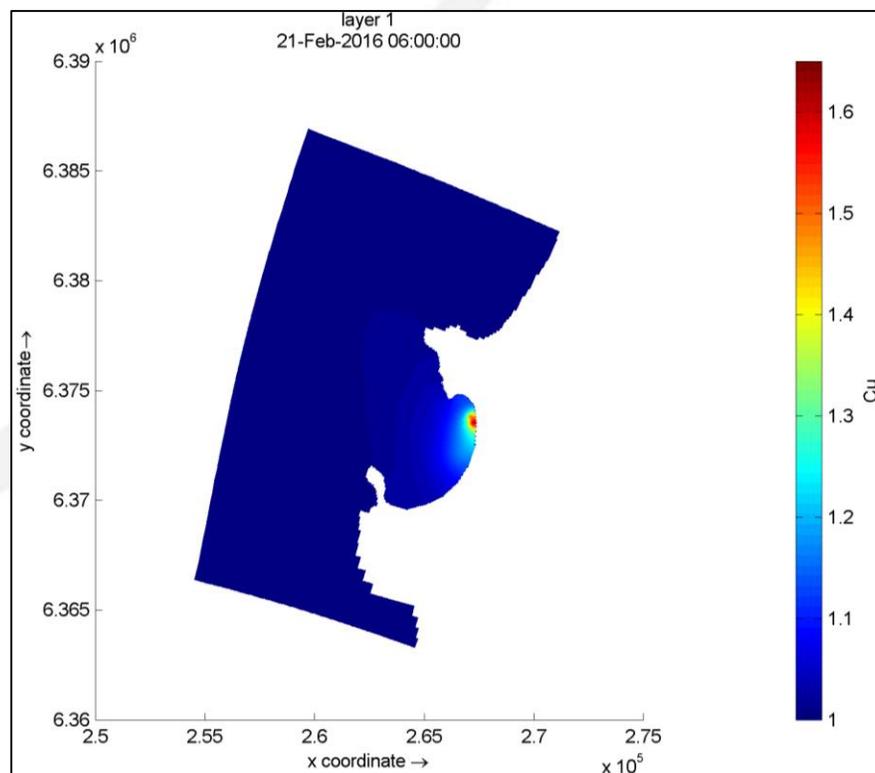
Los resultados serán presentados en los dos escenarios esperable en la dinámica de las corrientes en el sector de estudios, estos son: condición de oleaje reinante (oleaje presente la mayor parte del tiempo) y oleaje dominante ( oleaje presente en condiciones de mal tiempo e en periodos de marejadas), esto debido a que la acumulación de los contaminantes es favorable en la época de oleaje reinante en la bahía, mientras que para la condición de oleaje dominante se tiende a producir una limpieza de los contaminante producto de la aceleración de la corriente y cambios en los patrones de circulación de la Bahía.

### 6.3.1 Cobre

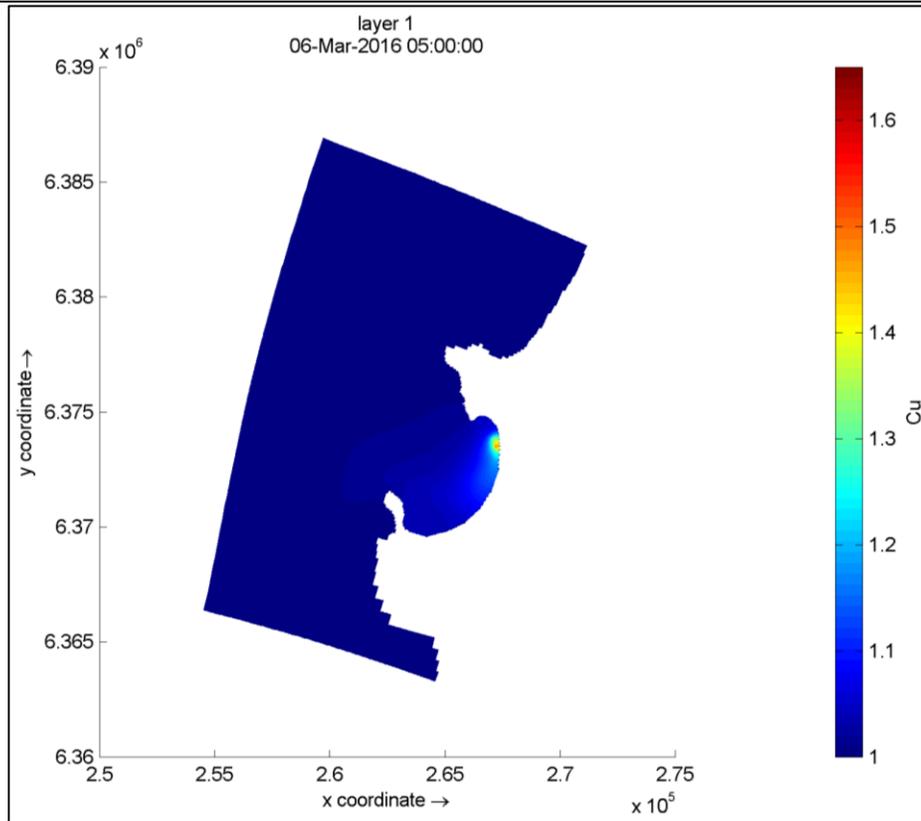
#### 6.3.1.1 Oleaje reinante para Dispersión de Cu

El cobre es uno de los principales metales pesado detectado en los análisis realizados en la bahía de Quintero, sus principales descargas provienen del sector de Ventanas. En particular las fuentes de descarga Central Termoeléctrica de Campiche unidad 4 y AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1. En cuanto a los efectos sinérgicos (sumatoria de las concentraciones dadas por las distintas descargas) se aprecia que para los contaminantes de Cobre la sinergia está dada por las descargas AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 y la Central Termoeléctrica de Campiche, siendo la primera con mayores cargas en concentración del contaminante.

La Figura 6-9 y Figura 6-10, presenta la dispersión de las concentraciones de cobre en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 1,6  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas.

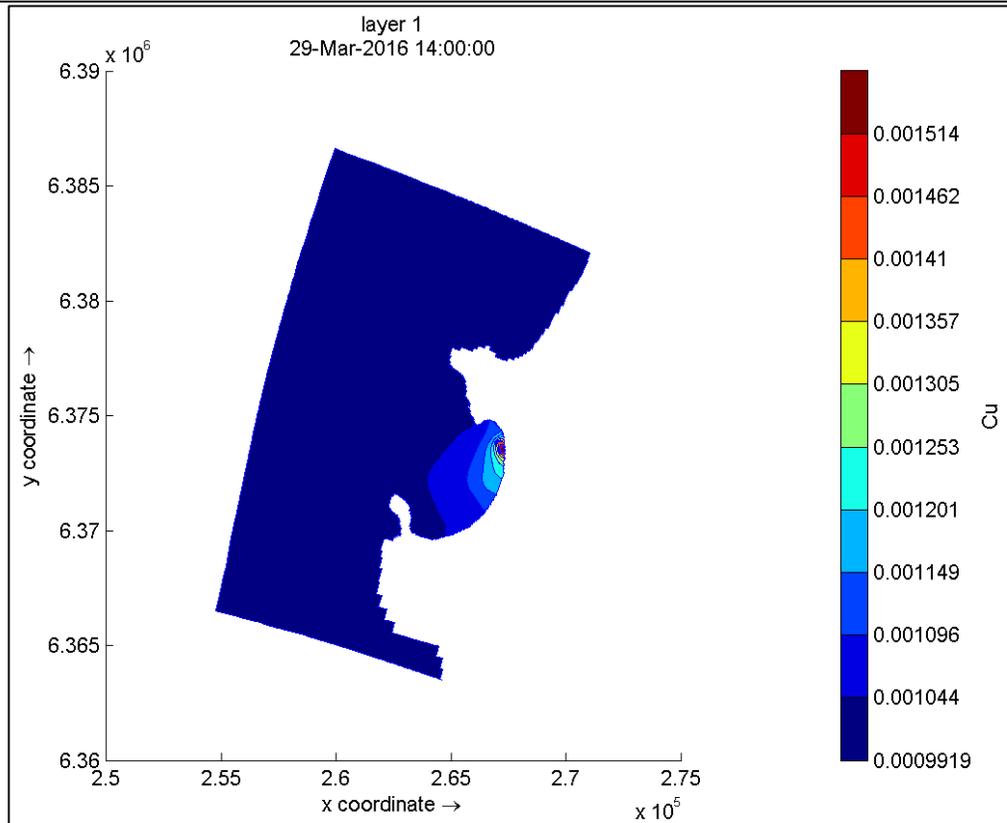


**Figura 6-9: Dispersión de concentraciones de Cobre ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)**



**Figura 6-10: Dispersión de concentraciones de Cobre ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)**

Se extrajeron resultados de las concentraciones del cobre y se compararon con las mediciones en terreno efectuadas por la POAL para el mismo periodo, donde las concentraciones obtenidas en el modelo resultan en promedio  $2,07 \mu\text{g/L}$  con una desviación estándar de  $0,4 \mu\text{g/L}$ , mientras que la estación POAL 90-A-Qu (sector centro de la bahía) presenta valores entre  $0,5$  a  $2,0 \mu\text{g/L}$ . Otra comparación resulta en la Estación POAL 180-A-Qu (sector sur de la bahía) el modelo presenta concentraciones en promedio  $1,003 \mu\text{g/L}$  con una desviación estándar de  $4,5 \cdot 10^{-6} \mu\text{g/L}$ , mientras que los valores en terreno presentan concentraciones entre  $0,5$  a  $1,0 \mu\text{g/L}$ , lo que representa un indicador de validación de  $0,8$ . Por lo que en base a los resultados obtenidos se considera que el modelo ha sido validado para la dispersión de concentraciones de cobre en la bahía de Quintero.



**Figura 6-11: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cu con oleaje reinante**

### **6.3.1.2 Oleaje dominante para dispersión de Cu**

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de concentración del Cobre se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías asociadas a este tipo de oleaje.

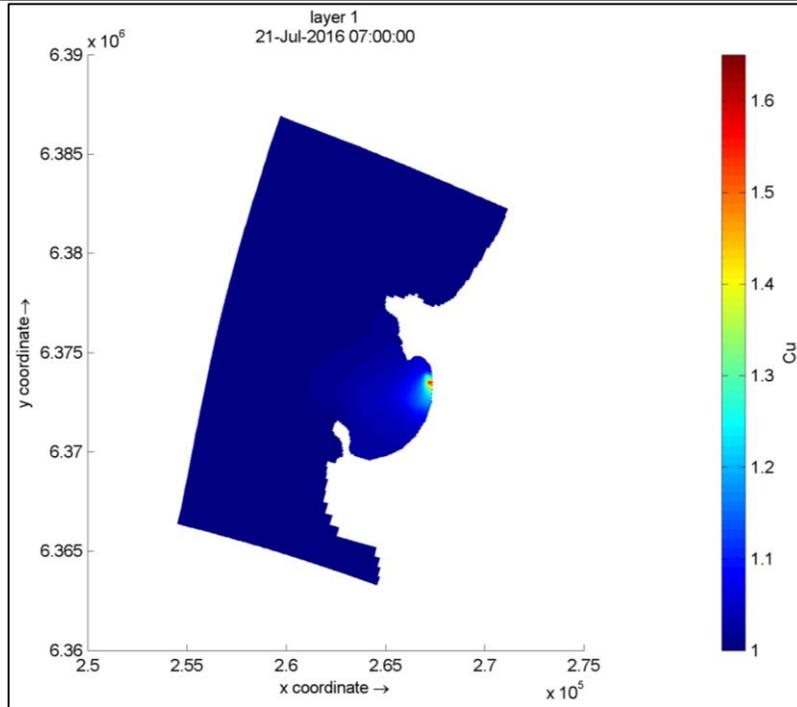


Figura 6-12: Dispersión de concentraciones de Cu ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia)

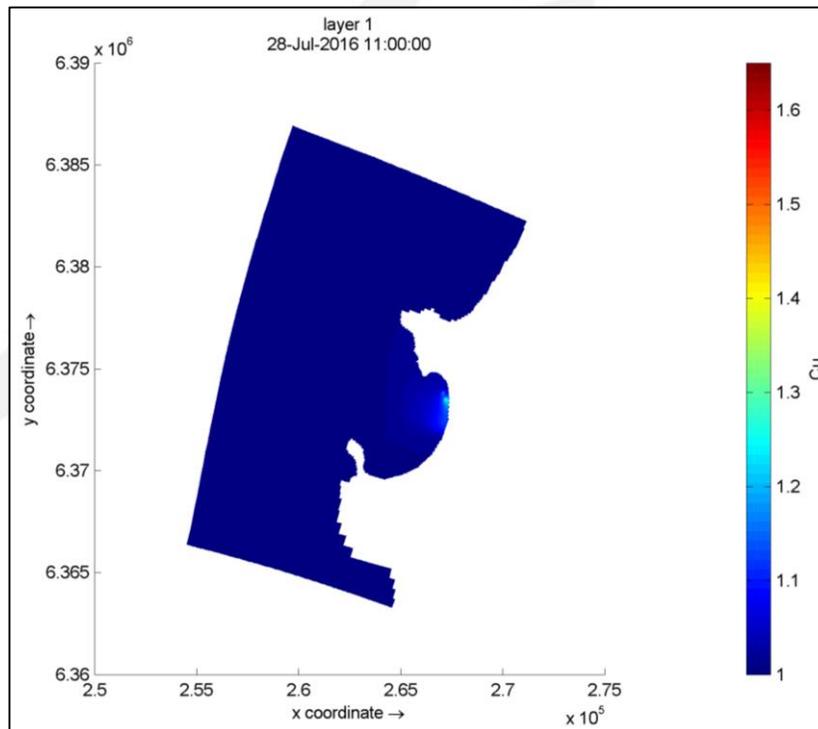
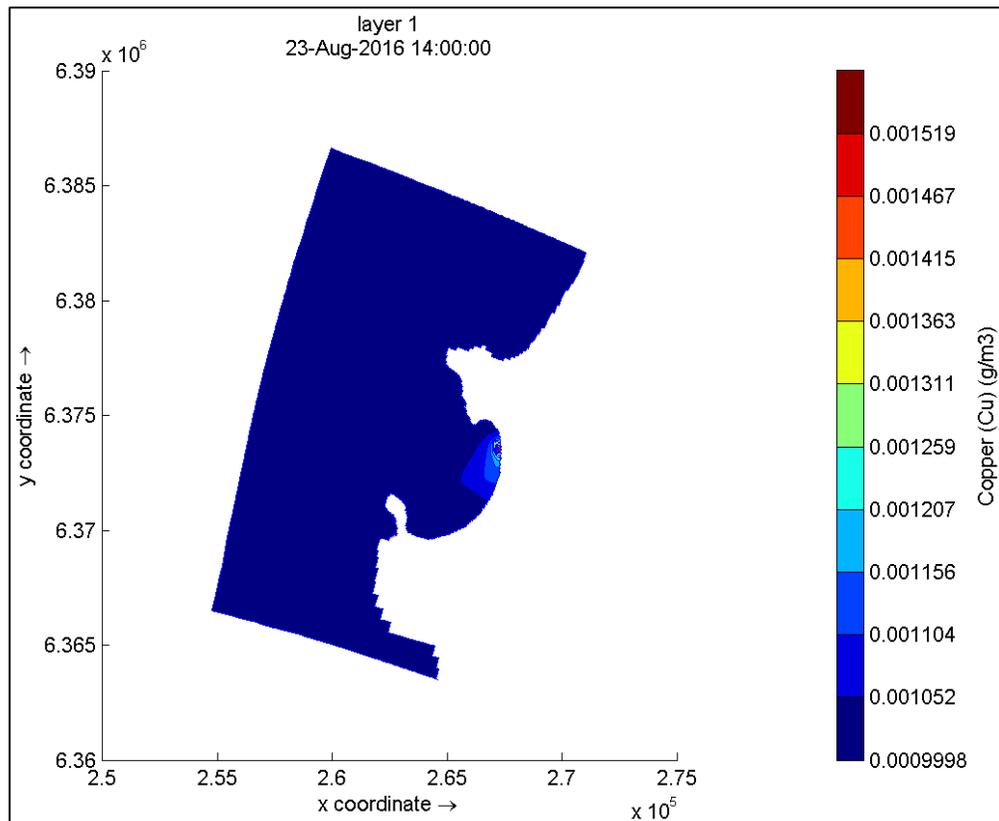


Figura 6-13: Dispersión de concentraciones de Cu ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura)



**Figura 6-14: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cu con oleaje dominante**

### 6.3.2 Arsénico

Los efectos sinérgicos (sumatoria de las concentraciones dadas por las distintas descargas) dados para los contaminantes se presentan en el sector de Ventana por las descargas de AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 y 2, Central Termoeléctrica Nueva Ventanas y CODELCO - Refinería Ventanas, siendo la Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 la que mayor aporte en concentraciones del contaminante.

#### 6.3.2.1 Oleaje reinante para dispersión de As

La Figura 6-15 y Figura 6-16, presenta la dispersión de las concentraciones de arsénico en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 1,76  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas.

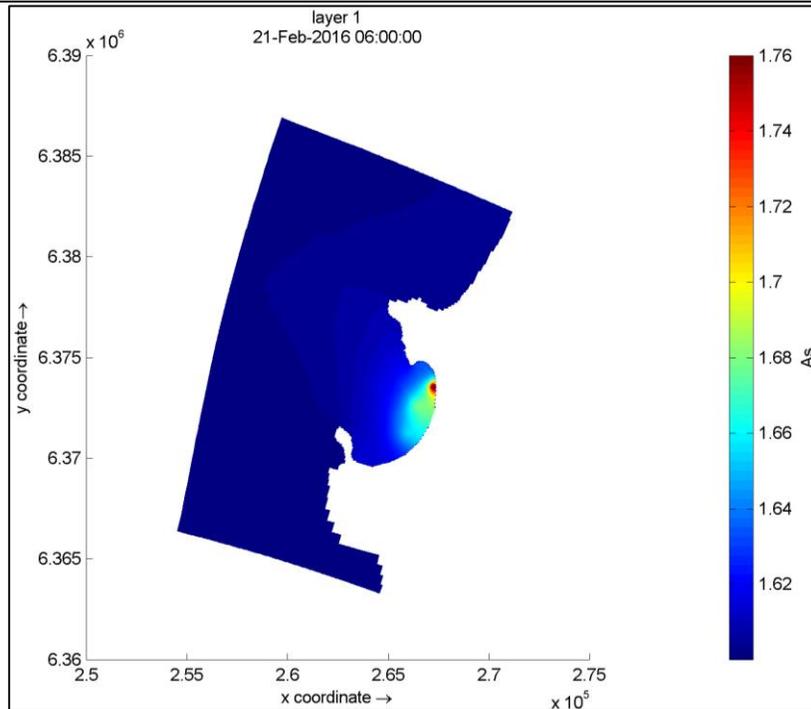


Figura 6-15: Dispersión de concentraciones de Arsénico ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)

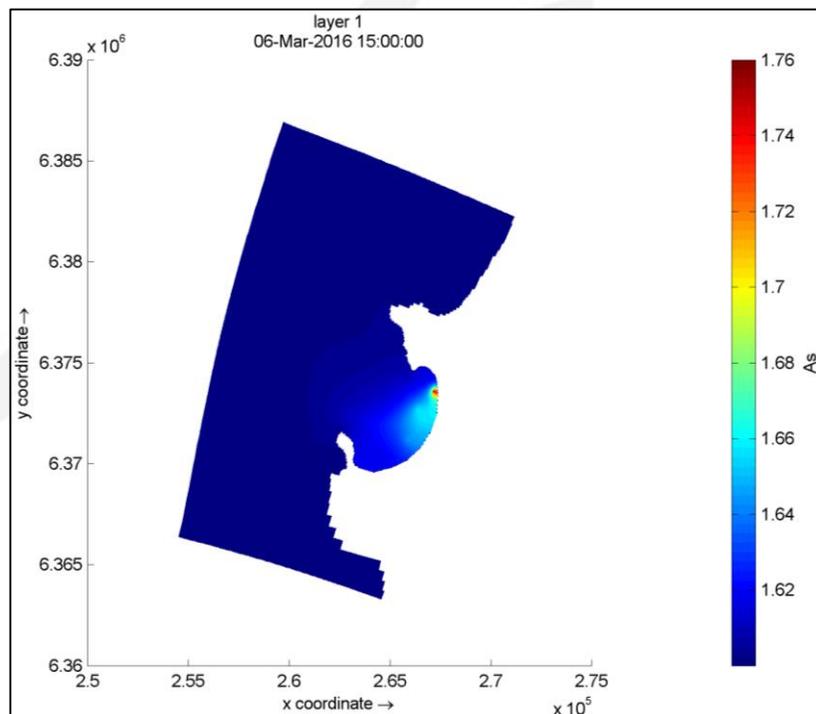
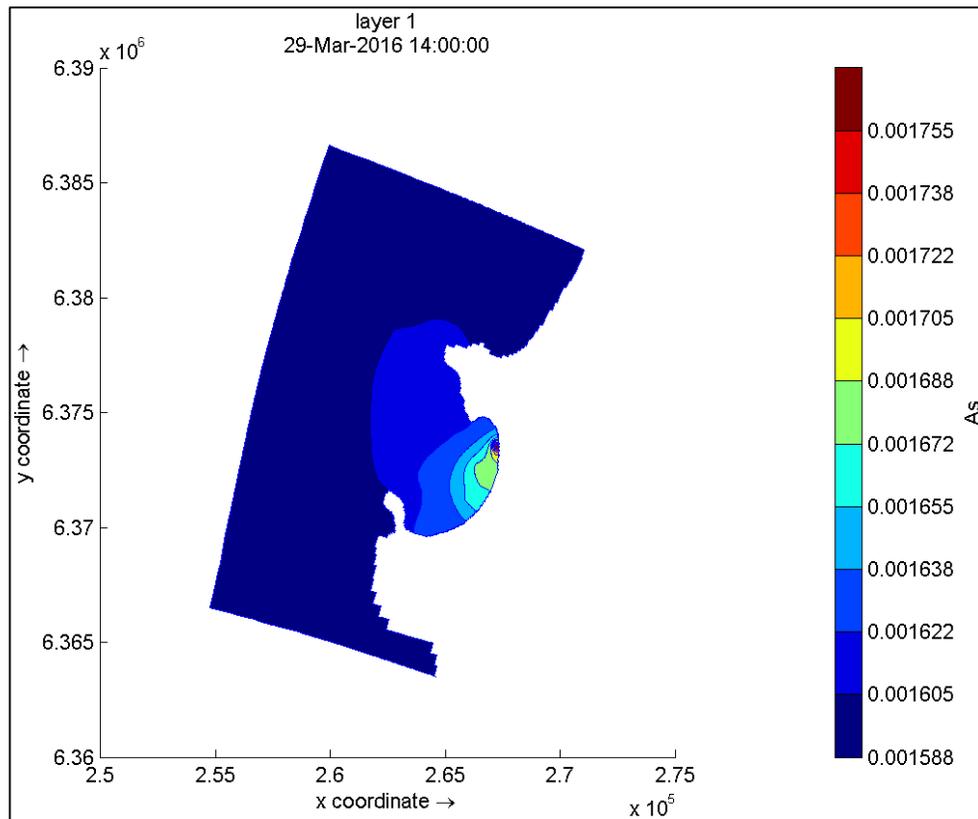


Figura 6-16: Dispersión de concentraciones de Arsénico ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)

Se extrajeron resultados de las concentraciones del arsénico y se compararon con las mediciones en terreno efectuadas por la POAL para el mismo periodo, donde las concentraciones obtenidas en el modelo resultan en promedio 1,96  $\mu\text{g/L}$  con una desviación estándar de 0,17  $\mu\text{g/L}$ , mientras que la estación POAL 90-A-Qu (sector centro de la bahía) presenta valores entre 0,6 a 1,8  $\mu\text{g/L}$ , lo que representa un indicador de validación de 0,85. Por lo que en base a los resultados obtenidos se considera que el modelo ha sido validado para la dispersión de concentraciones de arsénico en la bahía de Quintero.



**Figura 6-17: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de As en Bahía de Quintero**

### **6.3.2.2 Oleaje dominante para dispersión de As**

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de concentración del Arsénico se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías asociadas a este tipo de oleaje.

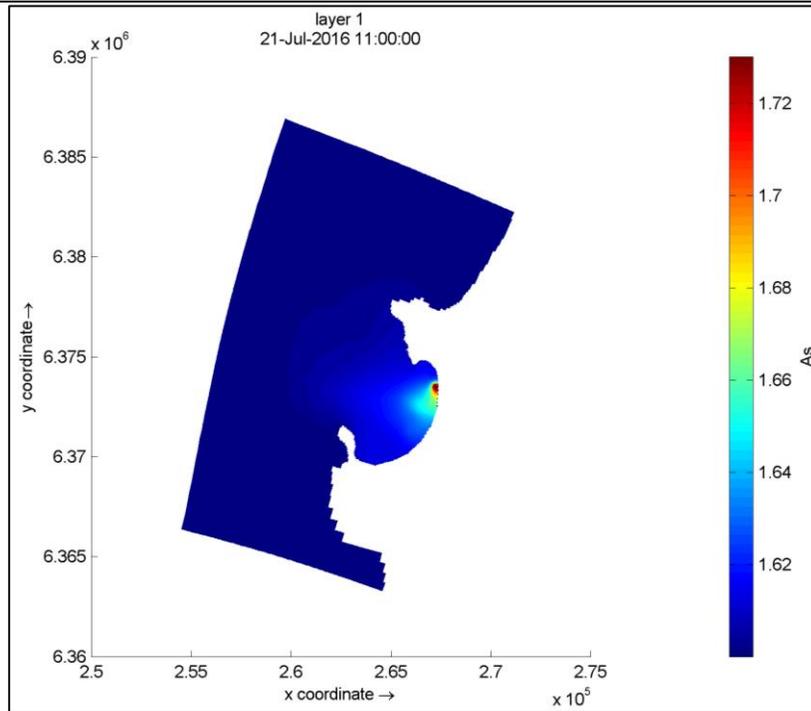


Figura 6-18: Dispersión de concentraciones de As ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)

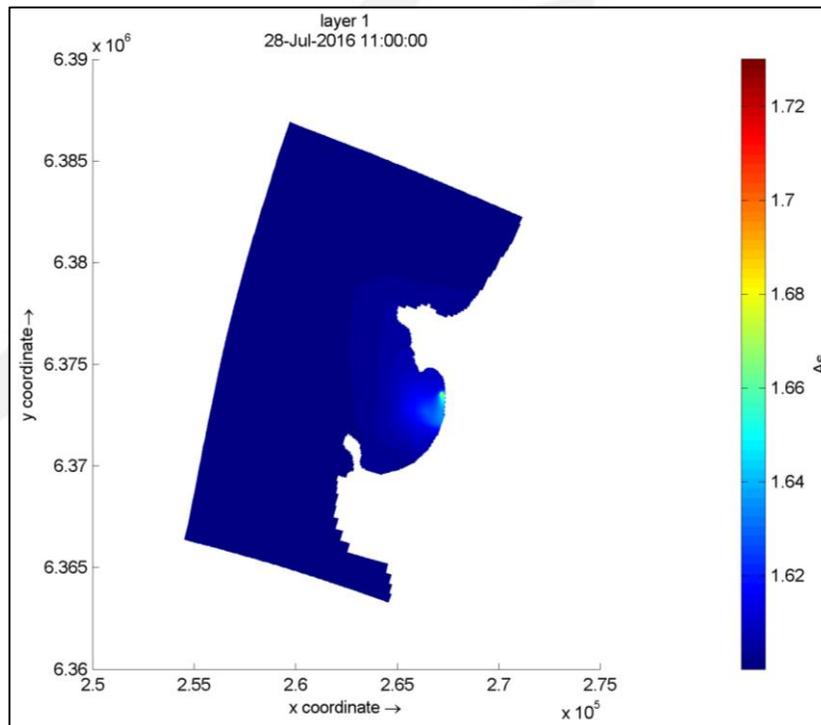
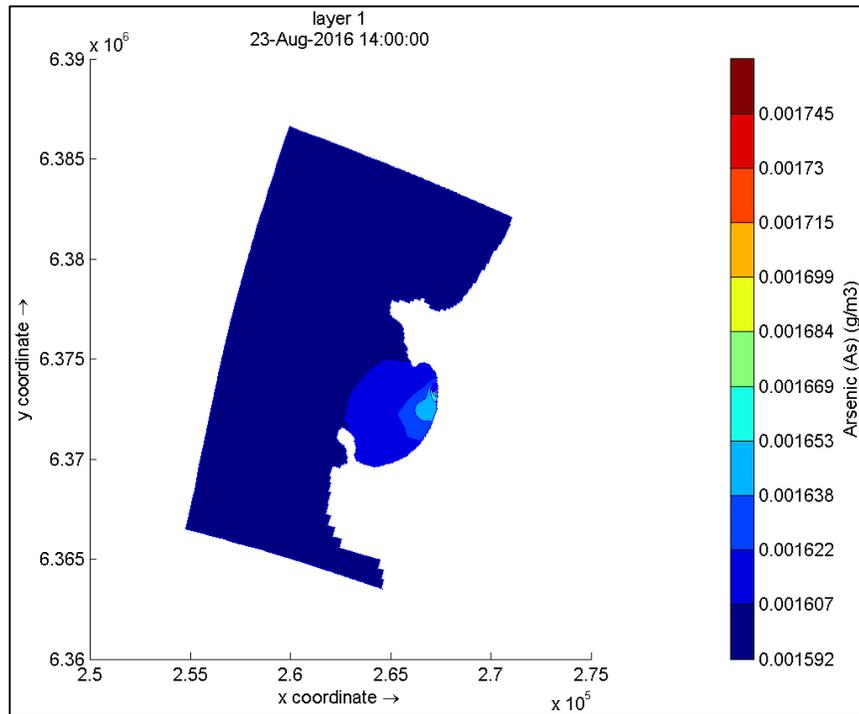


Figura 6-19: Dispersión de concentraciones de As ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)



**Figura 6-20: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de As con oleaje dominante**

### 6.3.3 Cadmio

Los efectos sinérgicos (sumatoria de las concentraciones dadas por las distintas descargas) dados para los contaminantes se presentan en el sector de Ventana por las descargas de AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 y 2, siendo la Unidad 1 la que mayores cargas de concentraciones del contaminante aporta al medio.

#### 6.3.3.1 Oleaje reinante para dispersión de Cd

La Figura 6-21 y Figura 6-22, presenta la dispersión de las concentraciones de cadmio en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 0,56  $\mu g/L$  en el sector de Ventanas.

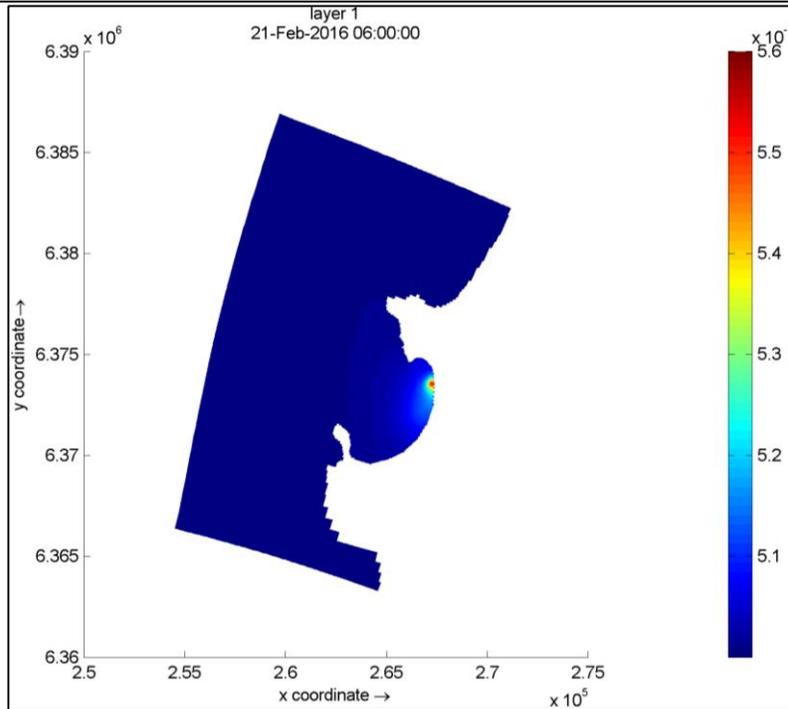


Figura 6-21: Dispersión de concentraciones de Cadmio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicgia)

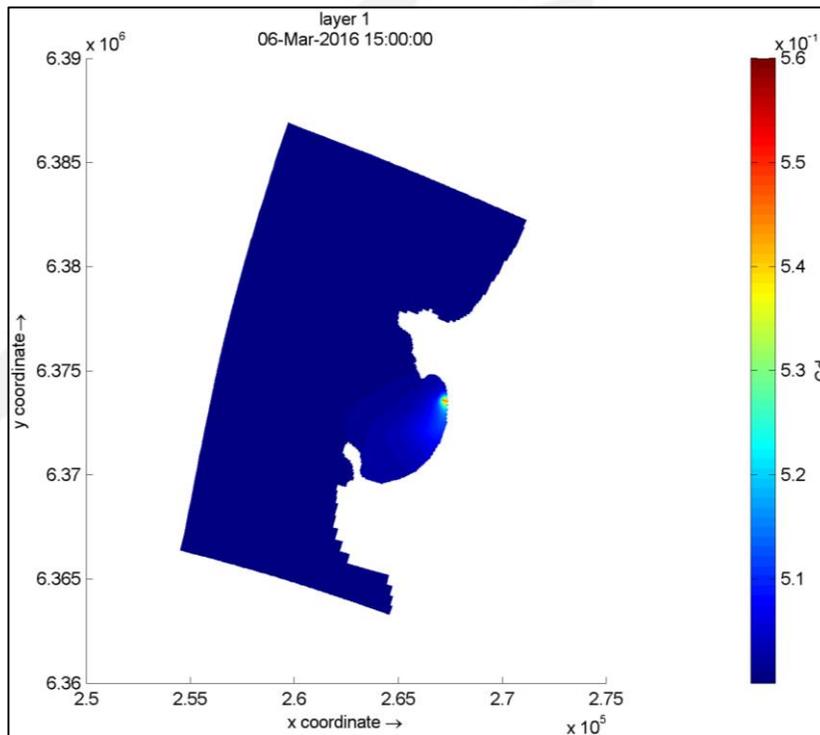
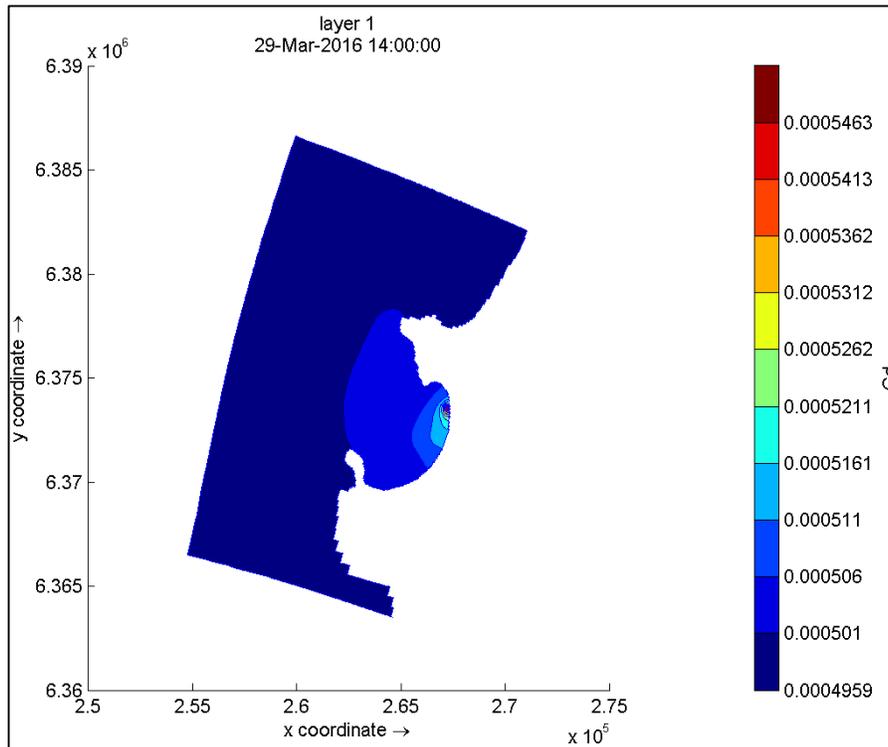


Figura 6-22: Dispersión de concentraciones de Cadmio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Caudratura)

En relación a los resultados de la Estación POAL 90-A-Qu (sector sur de la bahía) el modelo presenta concentraciones en promedio  $0,55 \mu\text{g/L}$  con una desviación estándar de  $1,7 \cdot 10^{-5} \mu\text{g/L}$ , mientras que los valores en terreno presentan concentraciones son de  $0,5 \mu\text{g/L}$ , lo que representa un indicador de validación de 0,75. Por lo que en base a los resultados obtenidos se considera que el modelo ha sido validado para la dispersión de concentraciones de cadmio en la bahía de Quintero.



**Figura 6-23: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cd en Bahía de Quintero**

### 6.3.3.2 Oleaje dominante para dispersión de Cd

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de concentración del Cadmio se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías asociadas a este tipo de oleaje. Mientras que, para el caso de oleaje reinante, presentado anteriormente, el campo de concentración en el espacio es mayor puesto que la energía del oleaje es menor implicando un patrón de recirculación en la bahía no permitiendo la limpieza natural de la misma.

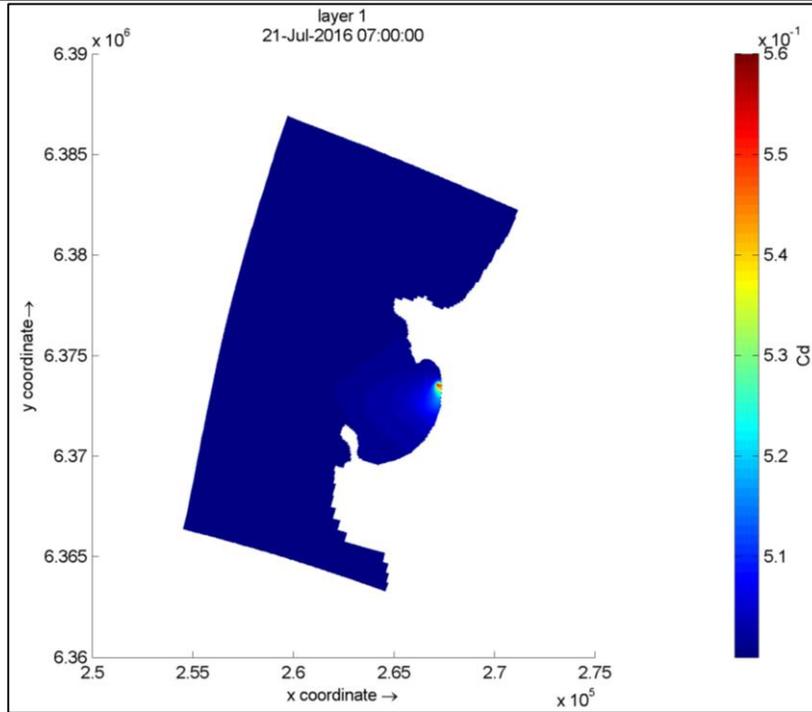


Figura 6-24: Dispersión de concentraciones de Cd ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)

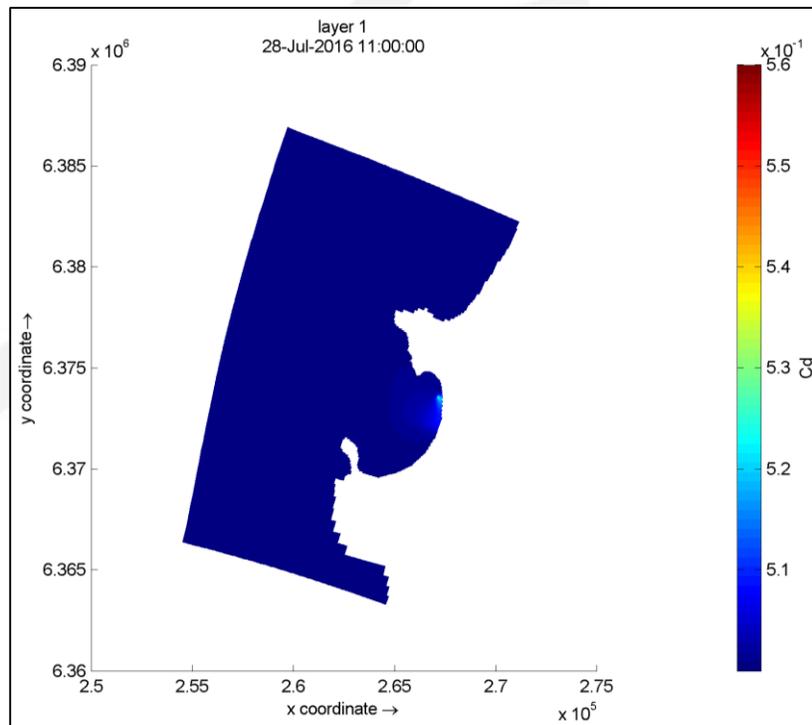
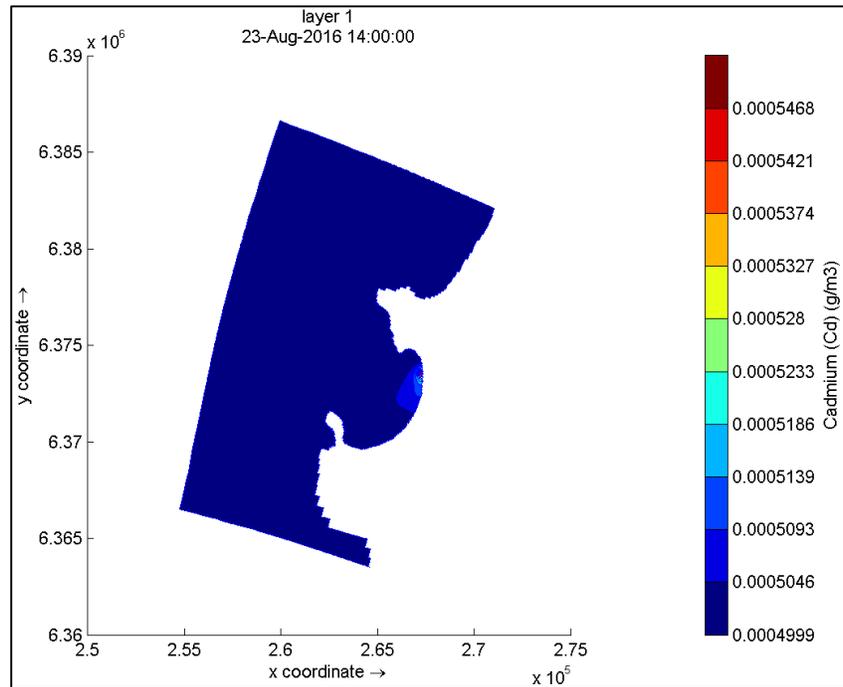


Figura 6-25: Dispersión de concentraciones de Cd ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)



**Figura 6-26: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Cd con oleaje dominante**

### 6.3.4 Mercurio

Los efectos sinérgicos (sumatoria de las concentraciones dadas por las distintas descargas) dados para los contaminantes de Mercurio se presentan en el sector de Ventana por las descargas de AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 y 2, y CODELCO - Refinería Ventanas, siendo la Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 la que mayor aporte en concentraciones del contaminante presenta.

#### 6.3.4.1 Oleaje reinante para dispersión de Hg

La Figura 6-27 y Figura 6-28, presenta la dispersión de las concentraciones de Mercurio en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 0,035  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas.

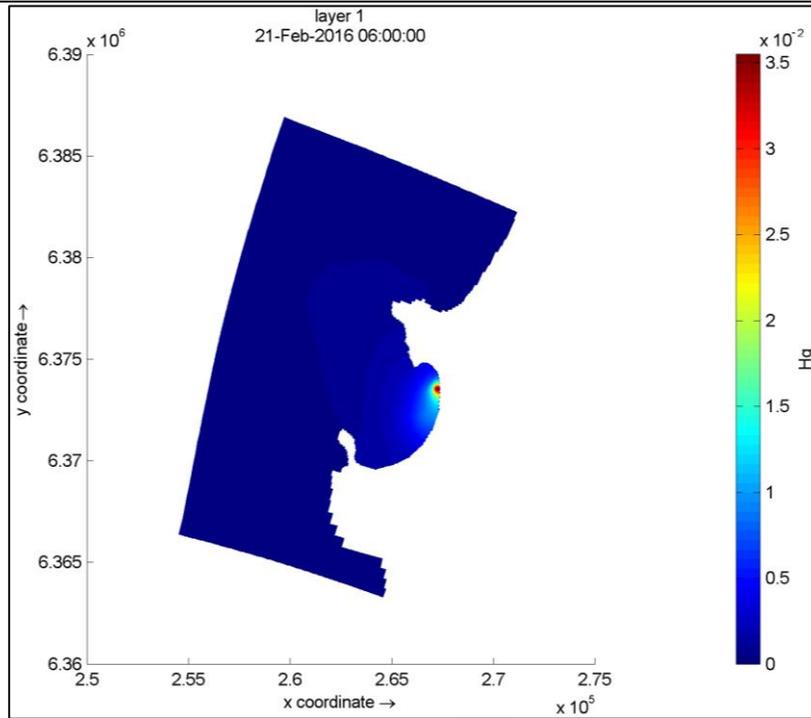


Figura 6-27: Dispersión de concentraciones de Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)

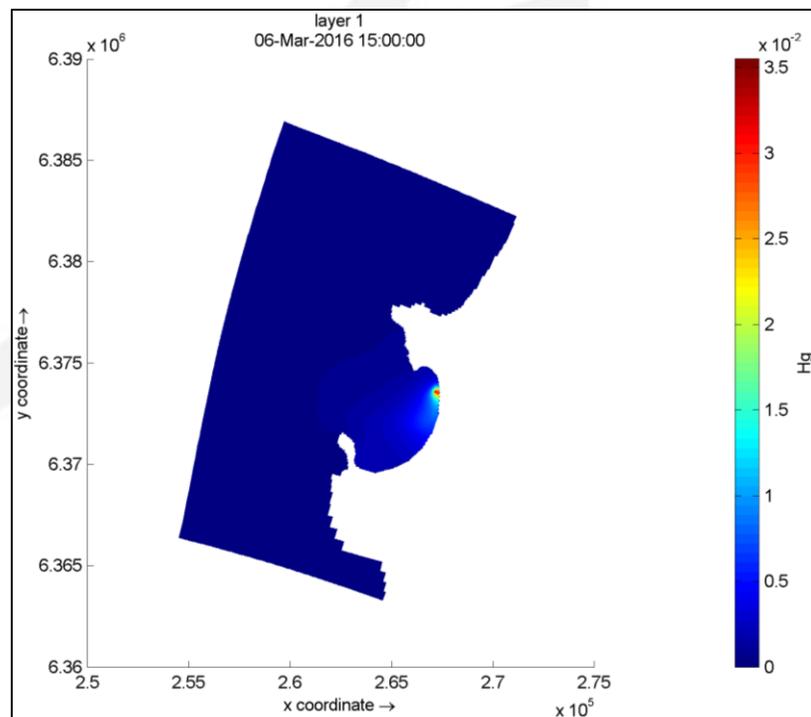
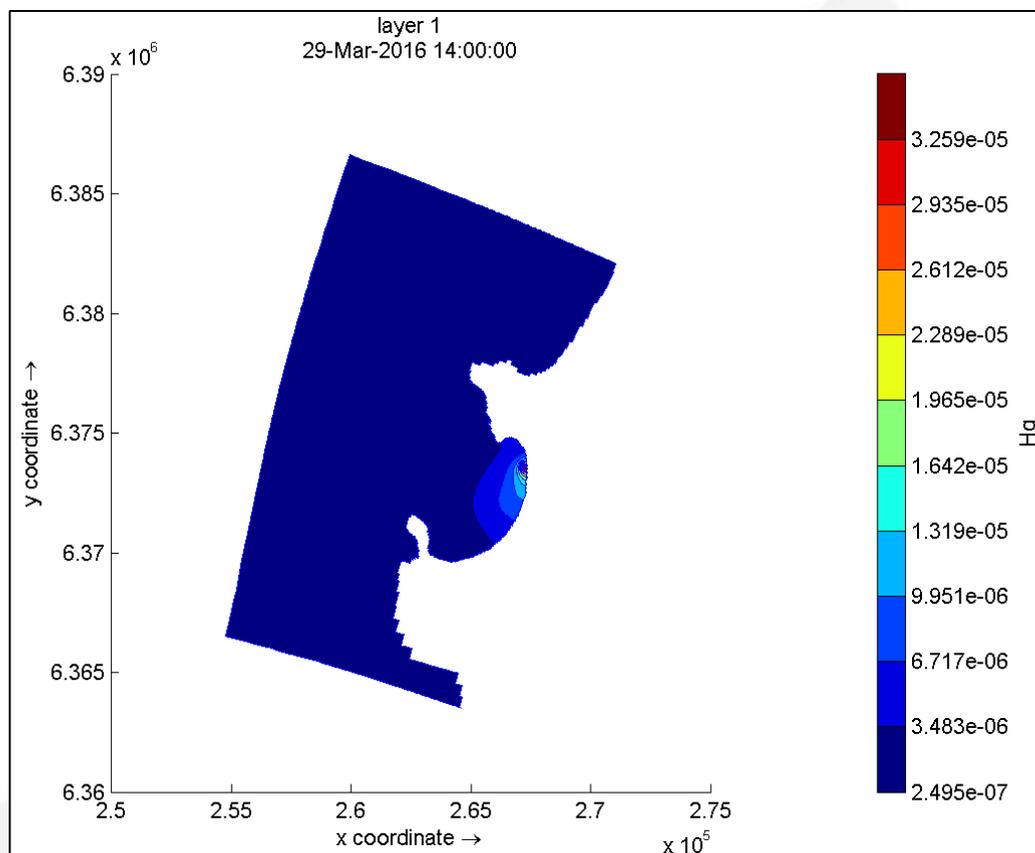


Figura 6-28: Dispersión de concentraciones de Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)

En relación a los resultados de la Estación POAL 90-A-Qu (sector sur de la bahía) el modelo presenta concentraciones en promedio 0,067  $\mu\text{g/L}$  con una desviación estándar de 0,024  $\mu\text{g/L}$ , mientras que los valores en terreno presentan concentraciones son de 0,005  $\mu\text{g/L}$  (correspondiente al límite de detección. Si bien los resultados presentan una diferencia en un orden de magnitud, el modelo estaría sobre estimando las concentraciones de mercurio lo que corresponde a un criterio conservador del análisis. Por otra parte, estos valores están muy por debajo de las recomendaciones internacionales para concentraciones disueltas de mercurio en agua marina que establece un límite de 0,94  $\mu\text{g/L}$  (EPA 2006, criterio CCC)

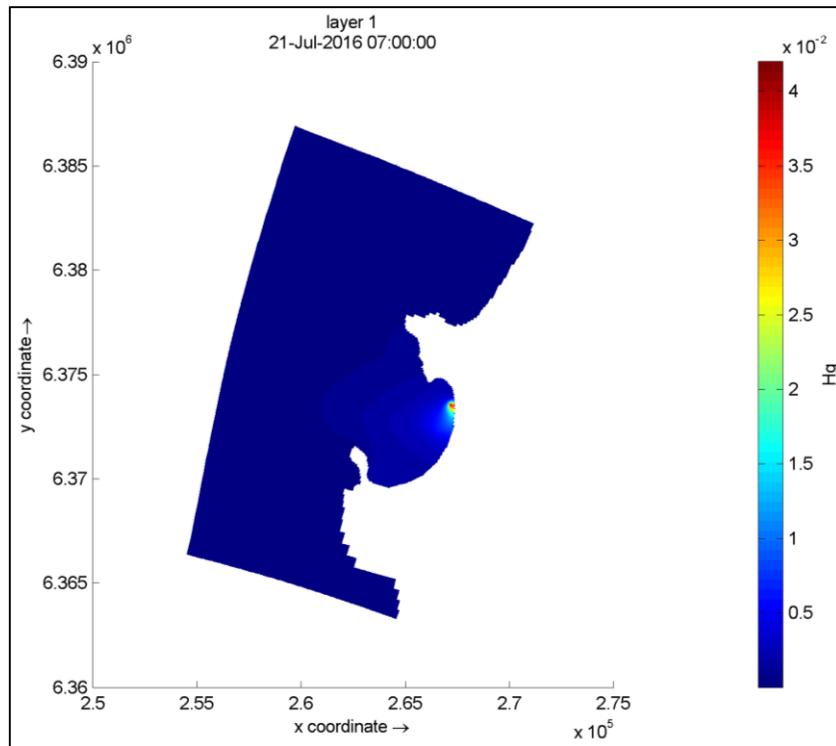


**Figura 6-29: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Hg en Bahía de Quintero**

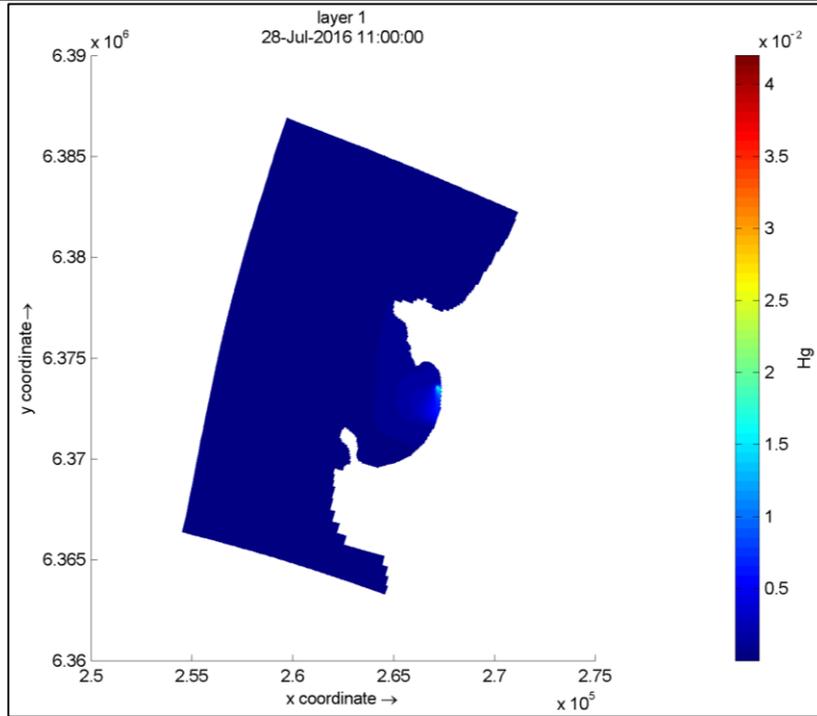
#### **6.3.4.2 Oleaje dominante para dispersión de Hg**

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de concentración del Mercurio se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías

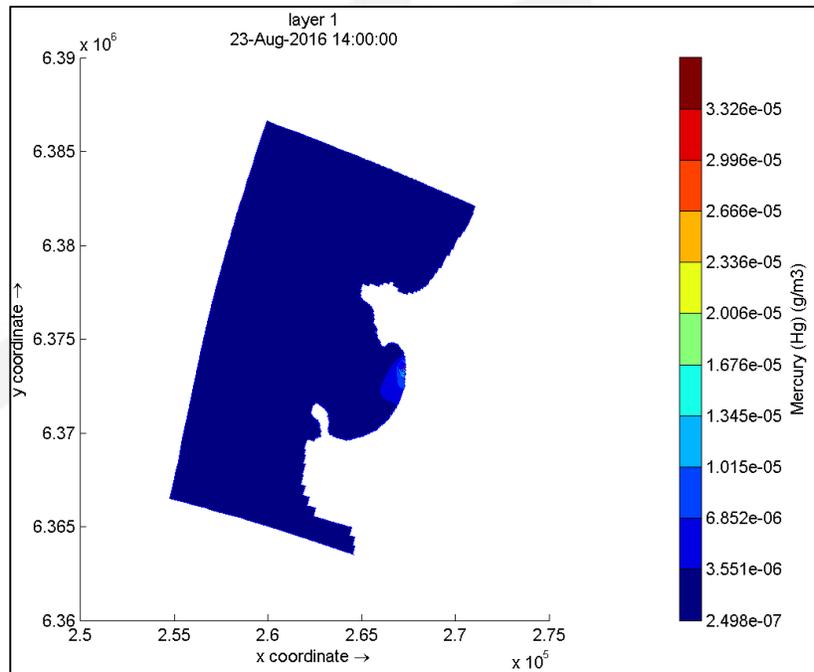
asociadas a este tipo de oleaje. La Figura 6-30 y Figura 6-31, presentan la dispersión de las concentraciones de Mercurio en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 0,04  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas.



**Figura 6-30: Dispersión de concentraciones de Hg ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia)**



**Figura 6-31: Dispersión de concentraciones de Hg ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura)**

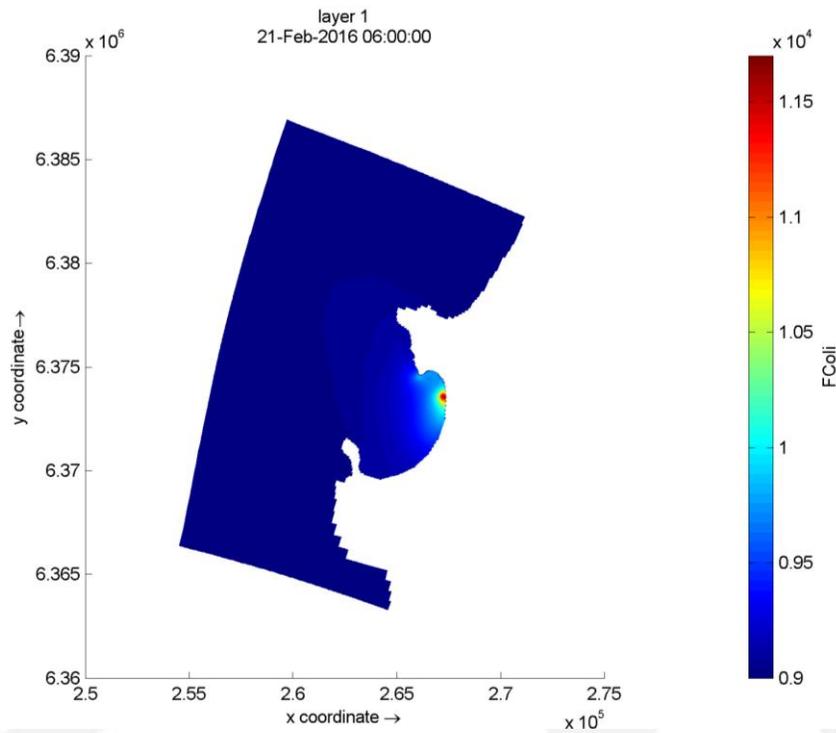


**Figura 6-32: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Hg con oleaje dominante**

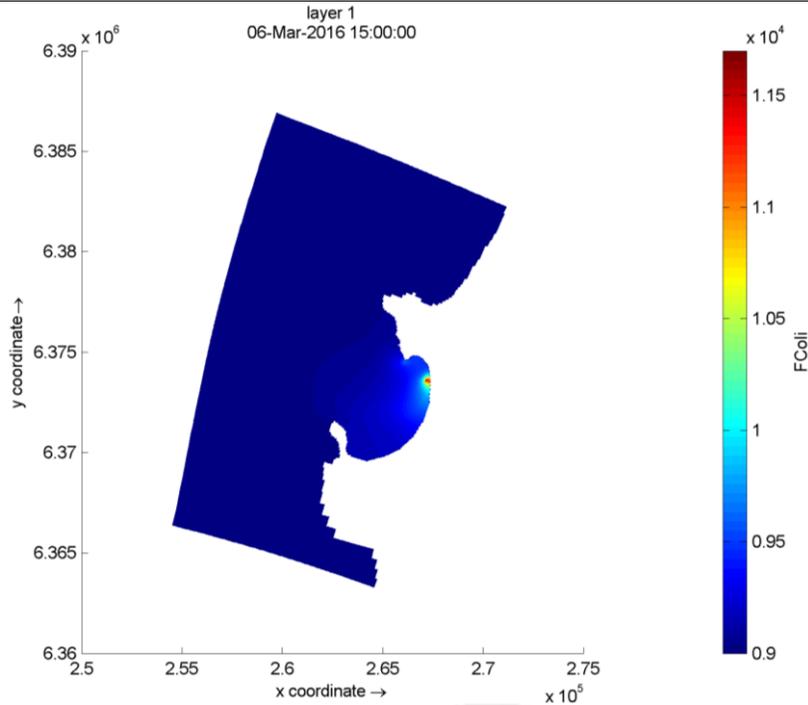
### 6.3.5 Coliformes Fecales

#### 6.3.5.1 Oleaje reinante para dispersión de Coliformes Fecales

La Figura 6-33y Figura 6-34, presenta la dispersión de las concentraciones de Coliformes fecales en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de  $1.17 \times 10^4$  NMP/m<sup>3</sup> en el sector de Ventanas.



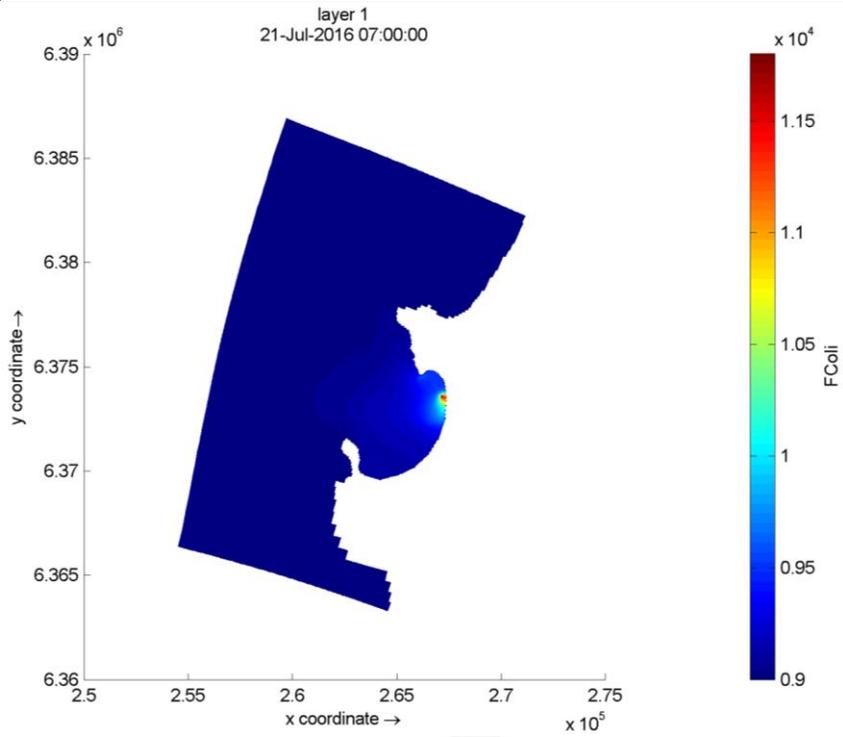
**Figura 6-33: Dispersión de concentraciones de Coliformes Fecales NMP/m<sup>3</sup> en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)**



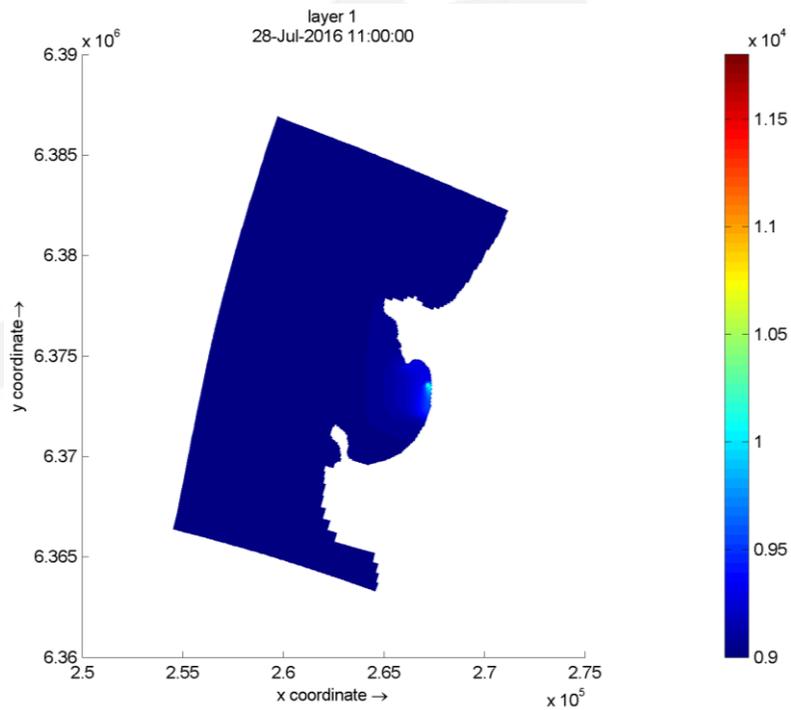
**Figura 6-34: Dispersión de concentraciones de Coliformes fecales (NMP/m<sup>3</sup>) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)**

### **6.3.5.2 Oleaje dominante para dispersión de Coliformes fecales**

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de concentración del Coliformes fecales se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías asociadas a este tipo de oleaje. La Figura 6-35 y Figura 6-36, presentan la dispersión de las concentraciones de Coliformes fecales en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de  $1.18 \times 10^4$  NMP/m<sup>3</sup> en el sector de Ventanas.



**Figura 6-35: Dispersión de concentraciones de Coliformes fecales (NMP/m<sup>3</sup>) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia)**



**Figura 6-36: Dispersión de concentraciones de Coliformes fecales (NMP/m<sup>3</sup>) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura)**

---

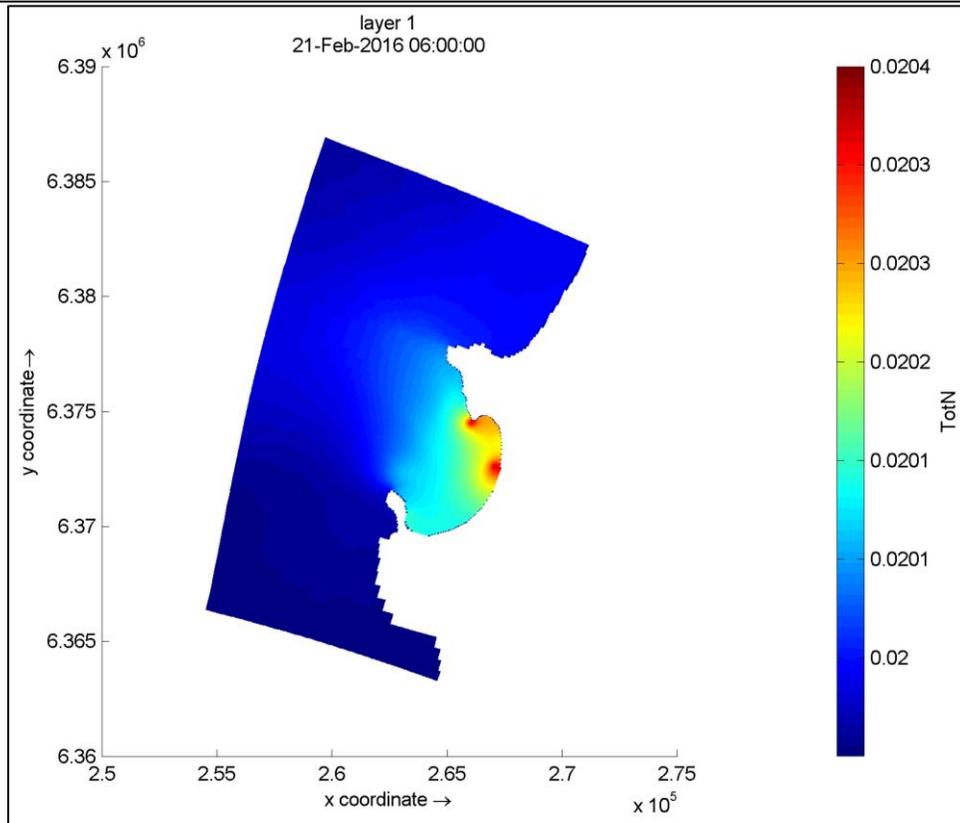
### 6.3.6 Nutrientes – Nitrógeno y Fosfato

Los nutrientes particularmente presentan sinergia entre las descargas de Codelco Refinería Ventanas y la Descarga directa de aguas servidas para el caso del Nitrógeno, siendo esta última la que mayores cargas de contaminante aportan al medio.

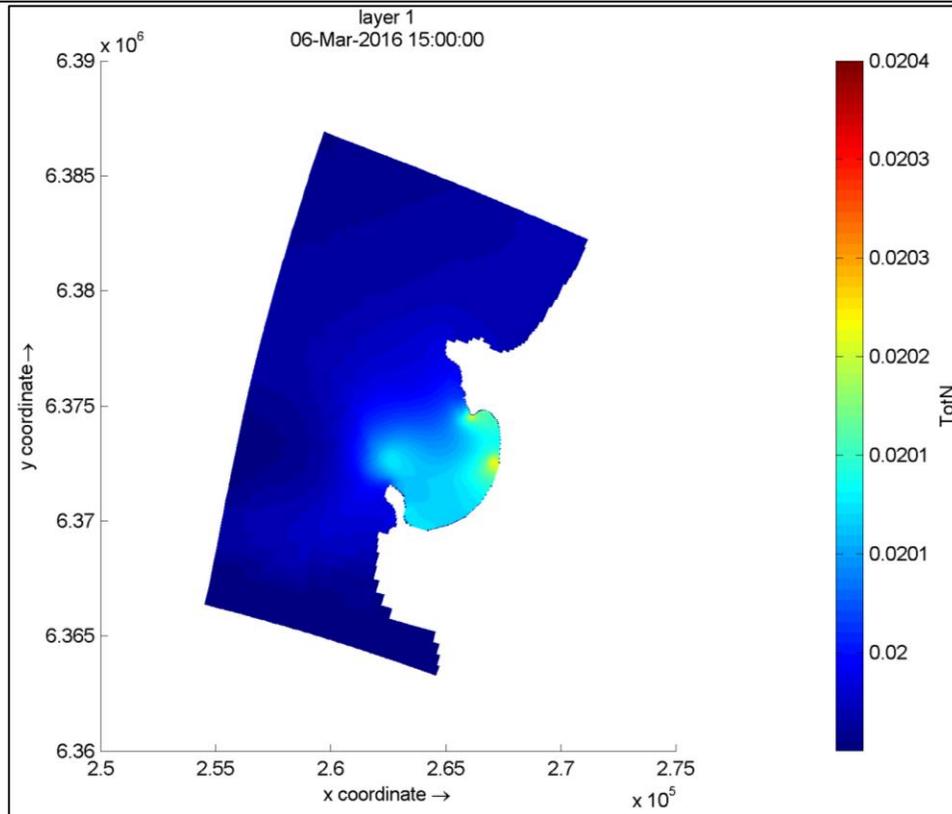
#### 6.3.6.1 *Oleaje reinante para dispersión de Nitrógeno y Fosfato*

Tanto los nitratos y fosfatos están dentro del orden de magnitud de los datos medidos en terreno, por lo que se considera calibrado y validado para los efectos del estudio, en este caso no es posible aplicar algún indicador matemático debido a la escasa información en particular de estos parámetros en la bahía de Quintero.

La Figura 6-37 y Figura 6-38, presenta la dispersión de las concentraciones de Nitrógeno total en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 200 µg/L en el sector de Ventanas. Si bien las concentraciones de nutrientes en la descarga del Emisario submarino de ESVAL Quintero es importante, estas quedan opacadas por el caudal aportante de las descargas del sector de Ventana y la descarga de aguas servidas sin tratamiento de Puchuncaví.



**Figura 6-37: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total (mg/L) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)**



**Figura 6-38: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total (mg/L) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)**

La Figura 6-39 y Figura 6-40, presenta la dispersión de las concentraciones de Fosfatos en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 0.14  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas. Si bien las concentraciones de nutrientes en la descarga del Emisario submarino de ESVAL Quintero es importante, estas quedan opacadas por el caudal aportante de las descargas del sector de Ventana y la descarga de aguas servidas sin tratamiento de Puchuncaví.

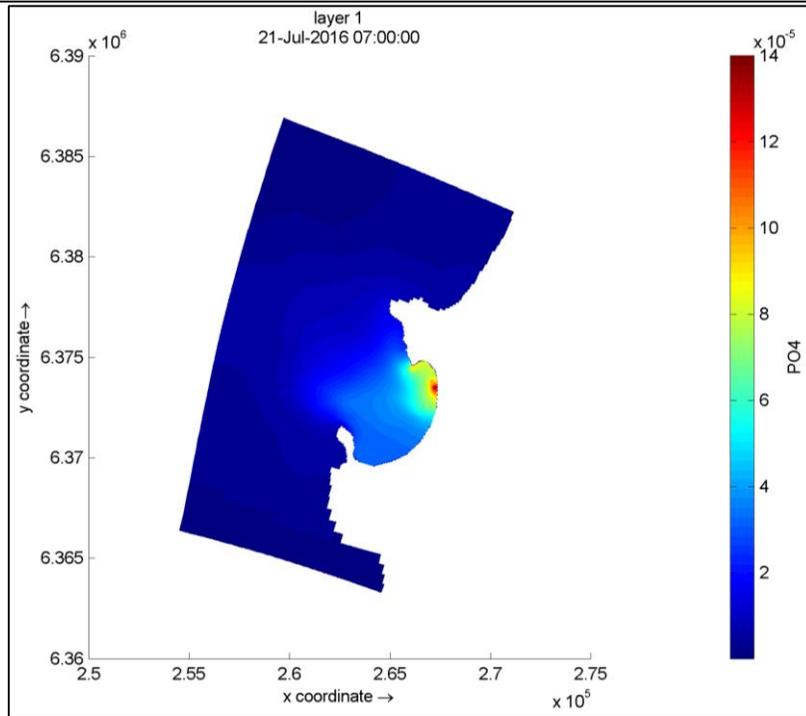


Figura 6-39: Dispersión de concentraciones de Fosfato ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Sicigia)

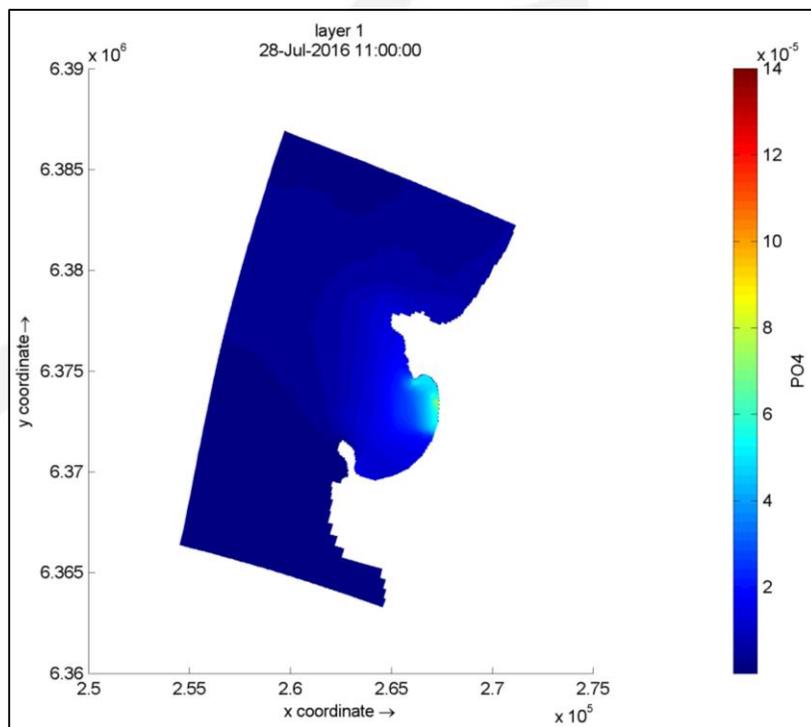
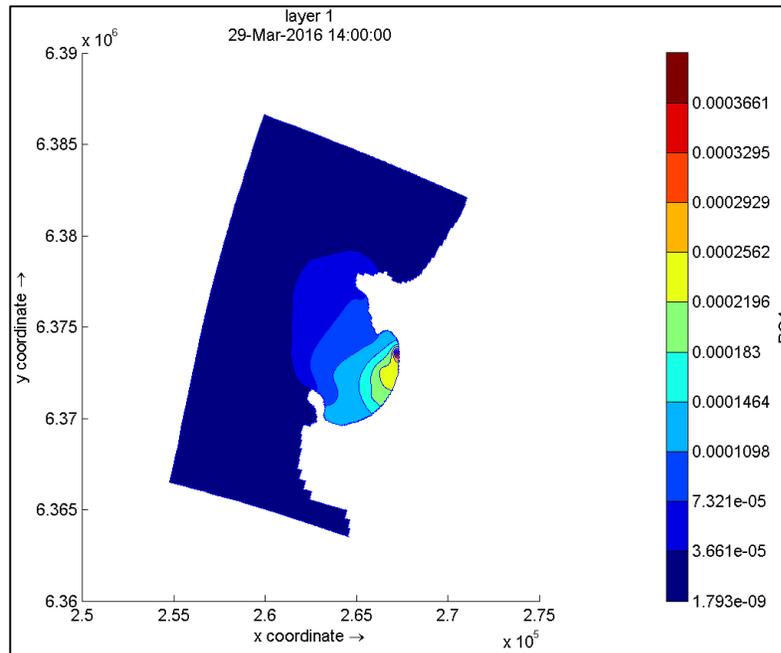
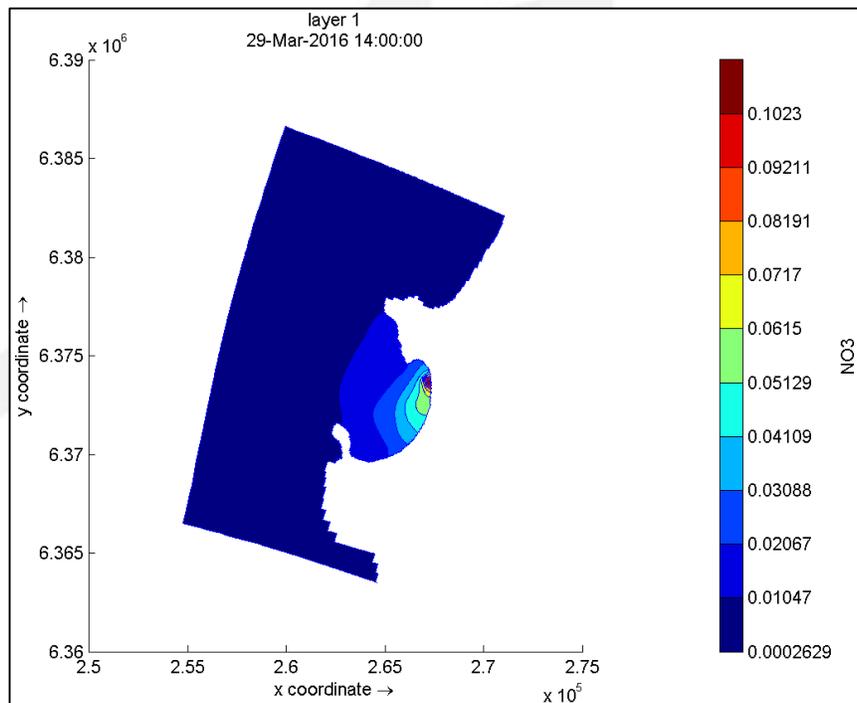


Figura 6-40: Dispersión de concentraciones de Fosfato ( $\mu\text{g/L}$ ) en capa superficial con oleaje reinante (Cuadratura)



**Figura 6-41: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Fosfato en Bahía de Quintero**

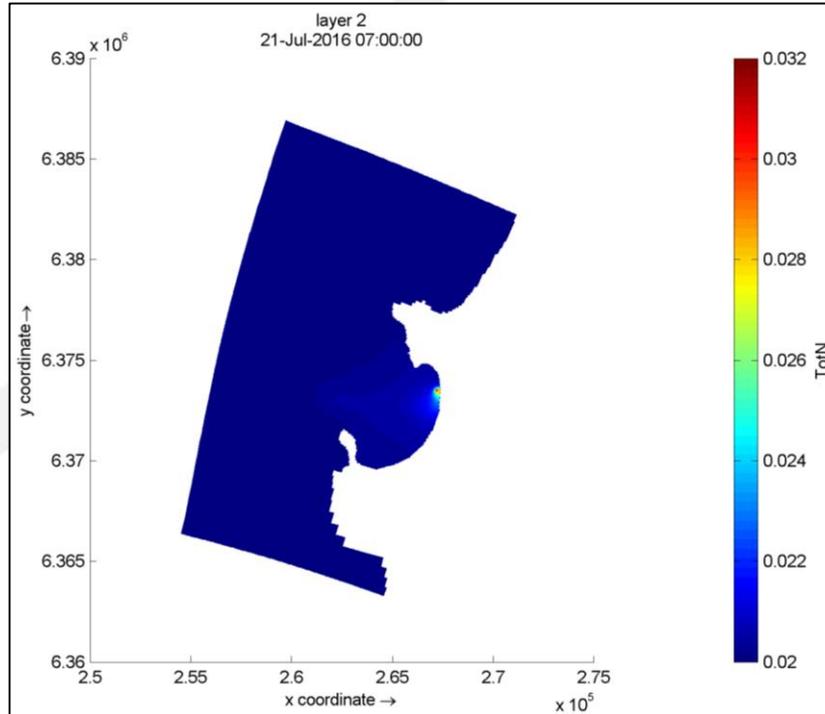


**Figura 6-42: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Nitrato en Bahía de Quintero**

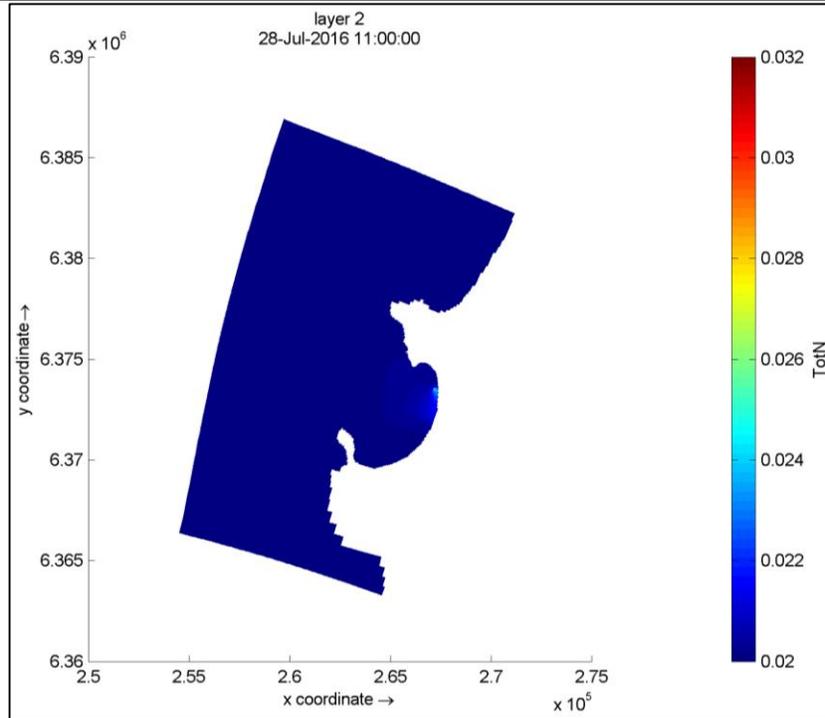
### 6.3.6.2 Oleaje dominante para dispersión de Nitratos y Fosfatos

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de concentraciones Nitrógeno y Fosfato se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías asociadas a este tipo de oleaje. Mientras que, para el caso de oleaje reinante, presentado anteriormente, el campo de concentración en el espacio es mayor puesto que la energía del oleaje es menor implicando un patrón de recirculación en la bahía no permitiendo la limpieza natural de la misma.

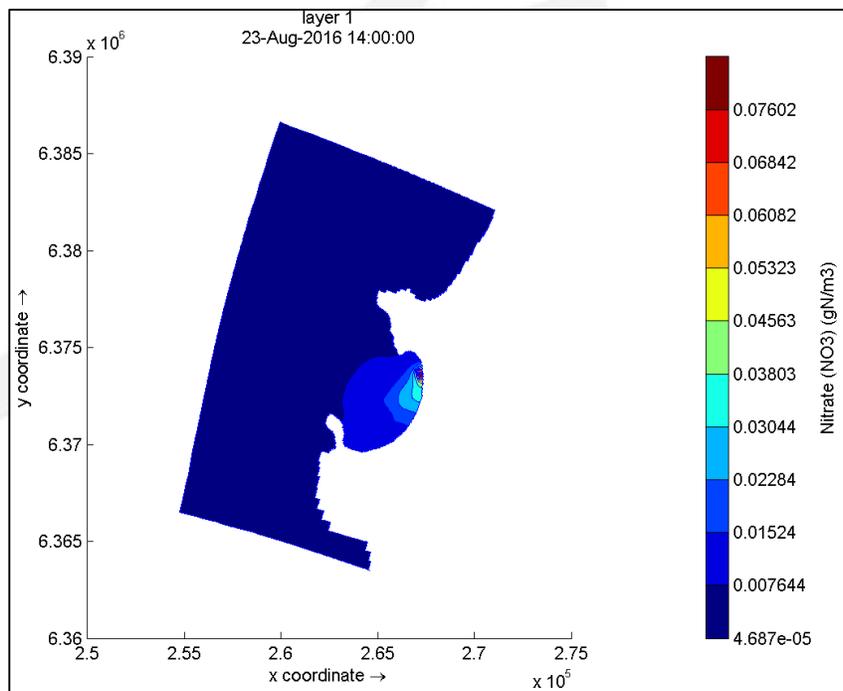
La Figura 6-43y Figura 6-44, presenta la dispersión de las concentraciones de Nitrógeno en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 32  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas. Si bien las concentraciones de nutrientes en la descarga del Emisario submarino de ESVAL Quintero es importante, estas quedan opacadas por el caudal aportante de las descargas del sector de Ventana y la descarga de aguas servidas sin tratamiento de Puchuncaví.



**Figura 6-43: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia)**

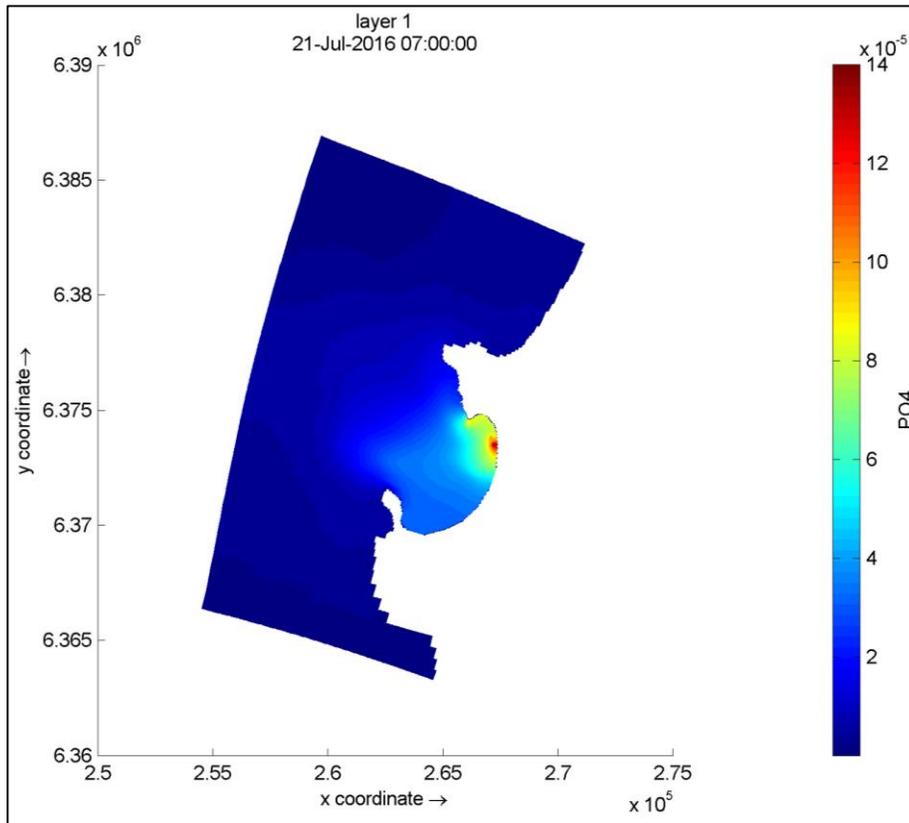


**Figura 6-44: Dispersión de concentraciones de Nitrógeno Total (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura)**

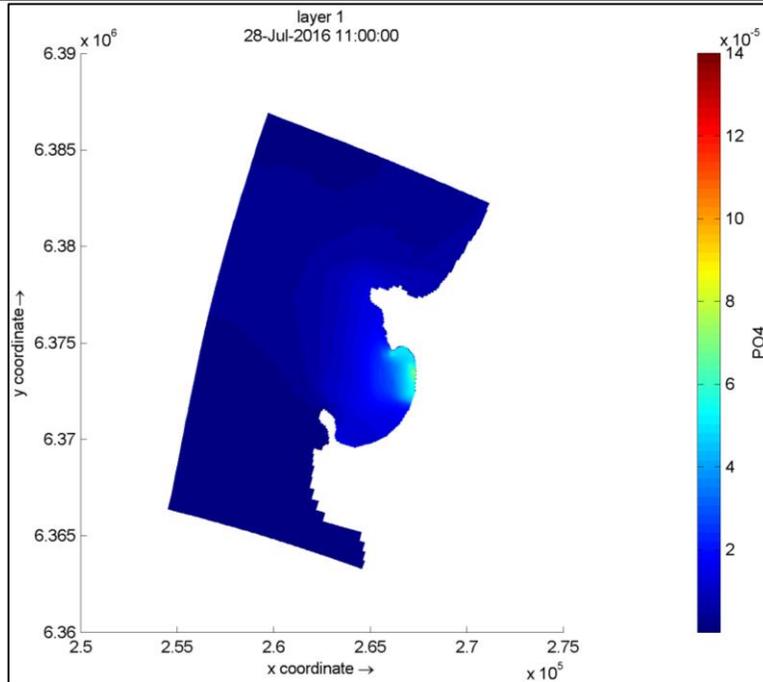


**Figura 6-45: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Nitrato con Oleaje dominante**

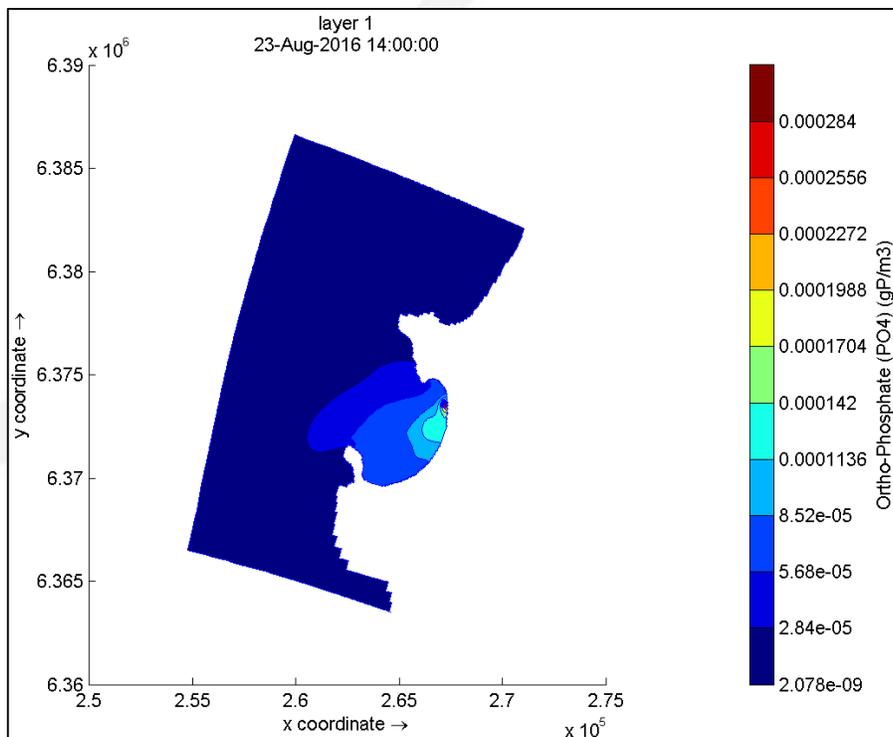
La Figura 6-46y Figura 6-47, presenta la dispersión de las concentraciones de Fosfatos en las fase lunares de sicigia y cuadratura respectivamente en la bahía de Quintero, con concentraciones máximas para estos instantes de tiempo de 0.14  $\mu\text{g/L}$  en el sector de Ventanas. Si bien las concentraciones de nutrientes en la descarga del Emisario submarino de ESVAl Quintero es importante, estas quedan opacadas por el caudal aportante de las descargas del sector de Ventana y la descarga de aguas servidas sin tratamiento de Puchuncaví.



**Figura 6-46: Dispersión de concentraciones de Fosfato (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Sicigia)**



**Figura 6-47: Dispersión de concentraciones de Nitrato (mg/L) en capa superficial con oleaje dominante (Cuadratura)**



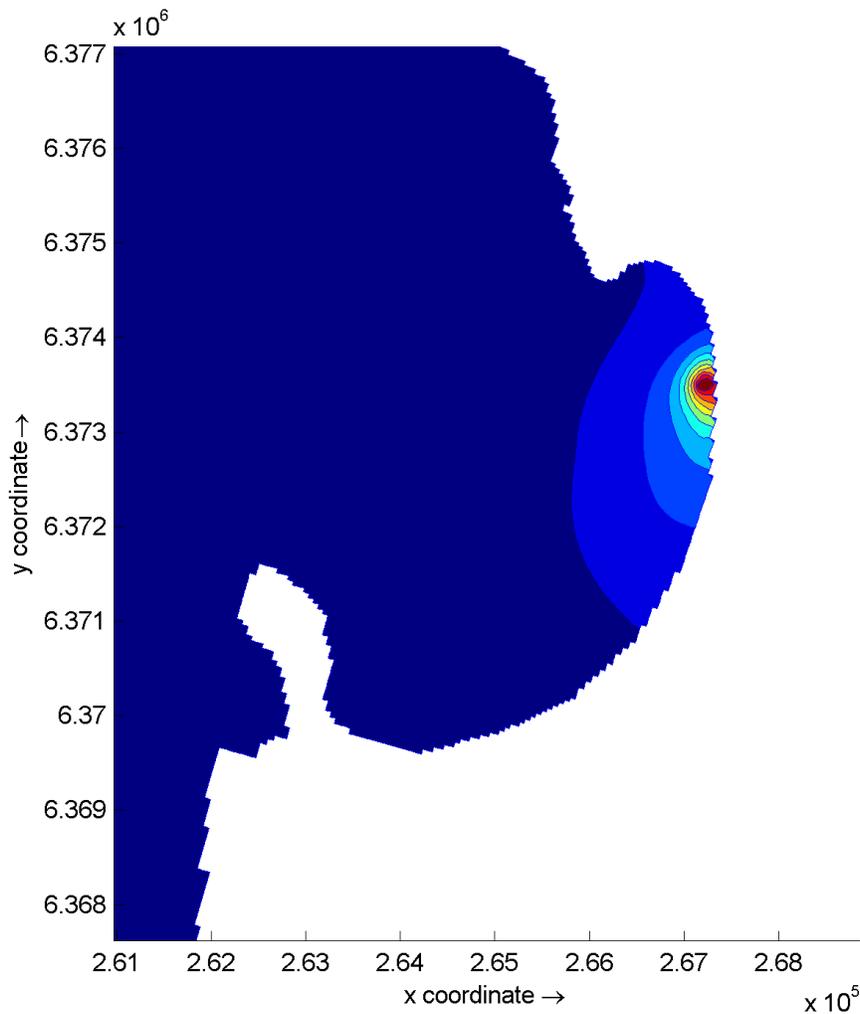
**Figura 6-48: Resultados discretizados para la dispersión de contaminantes de Fosfato con oleaje dominante**

## 6.4 Resultados de los efectos individuales en la bahía por fuente en la “situación actual”

A continuación, se presentan los resultados por cada una de las descargas que presenten emisiones de los contaminantes prioritarios seleccionados.

Origen y trayectoria (presentadas en áreas de concentración, donde el color rojo representa las máximas concentraciones del contaminante) habitual para pluma para cada Descarga son presentadas en las Figuras a continuación.

### 6.4.1 Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1



**Figura 6-49: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1**

### 6.4.2 Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 2

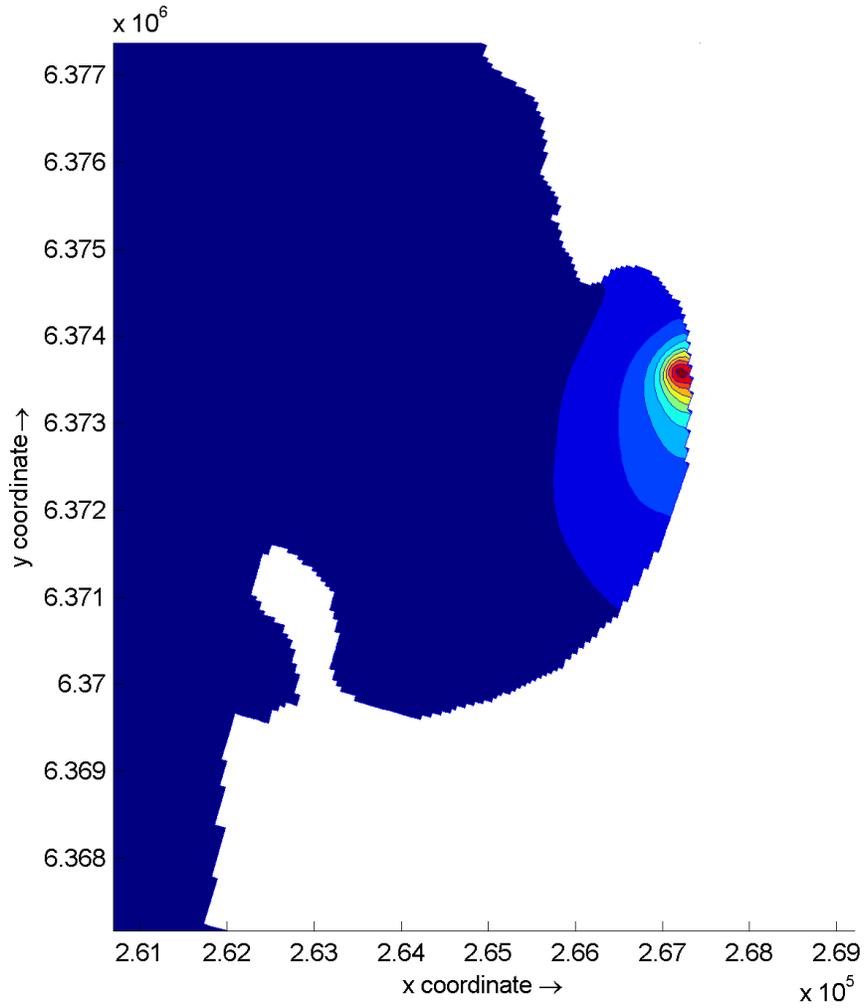


Figura 6-50: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 2

### 6.4.3 Descarga Central Termoeléctrica Nueva Ventanas

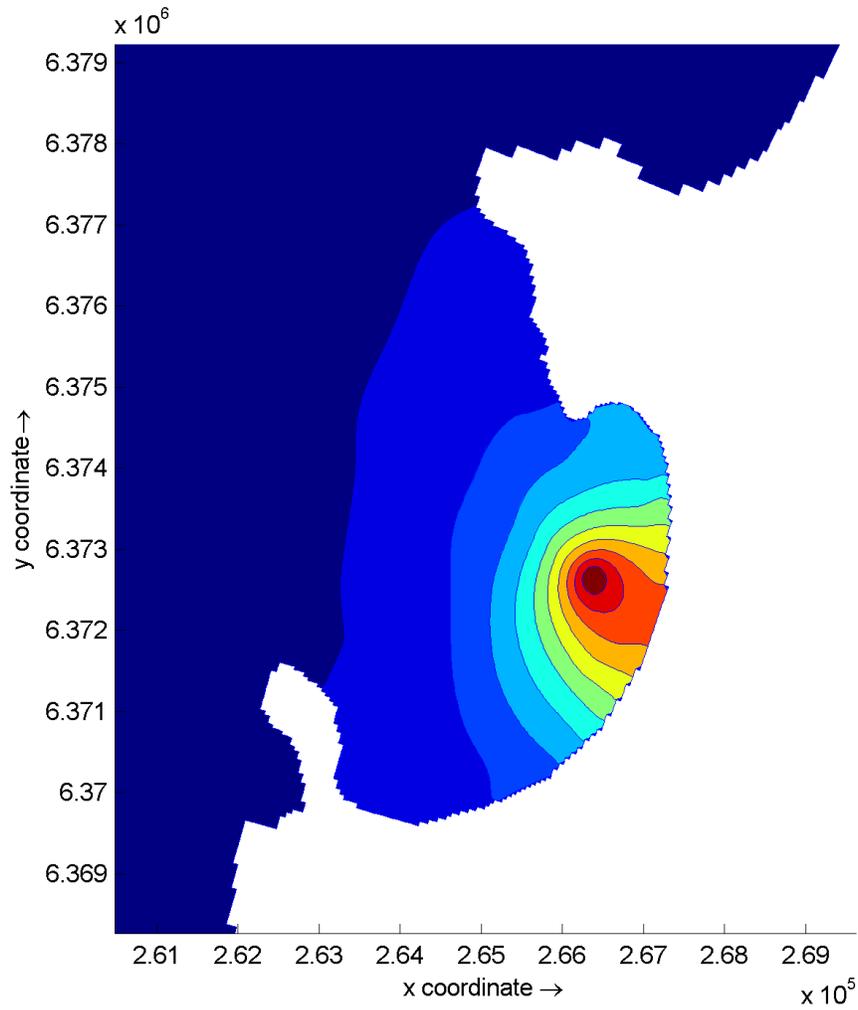


Figura 6-51: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Central Termoeléctrica Nueva Ventanas

#### 6.4.4 Descarga Central Termoeléctrica Campiche

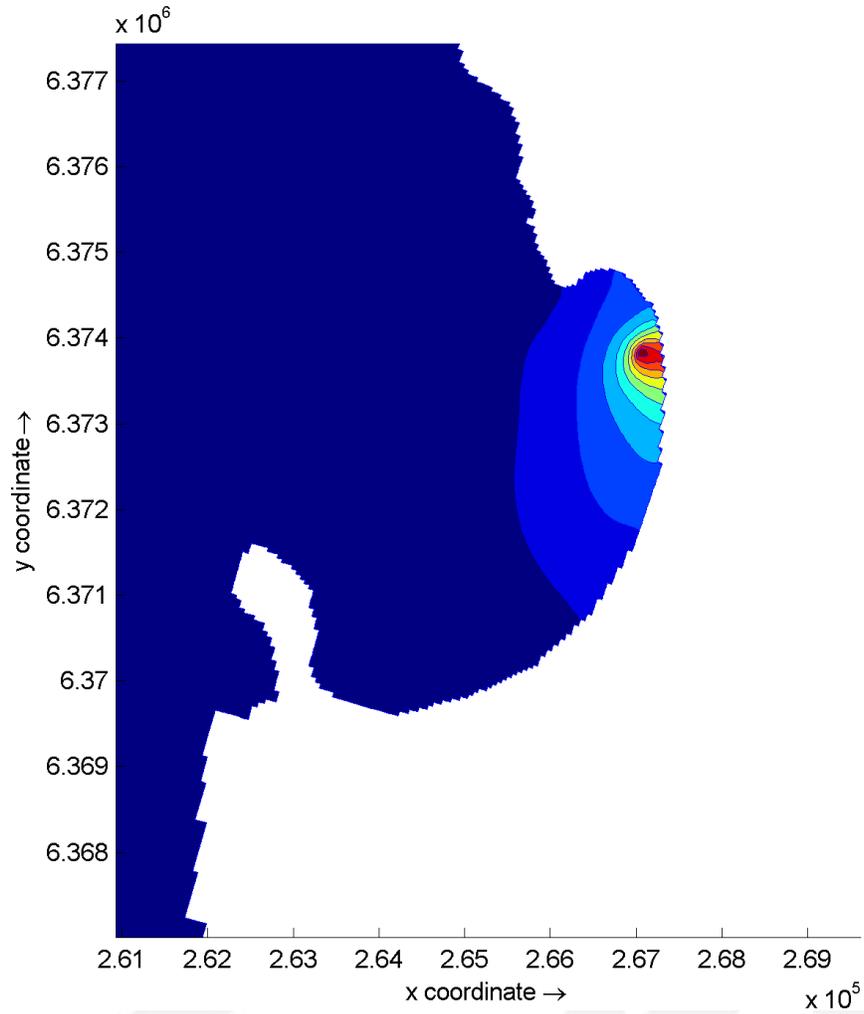
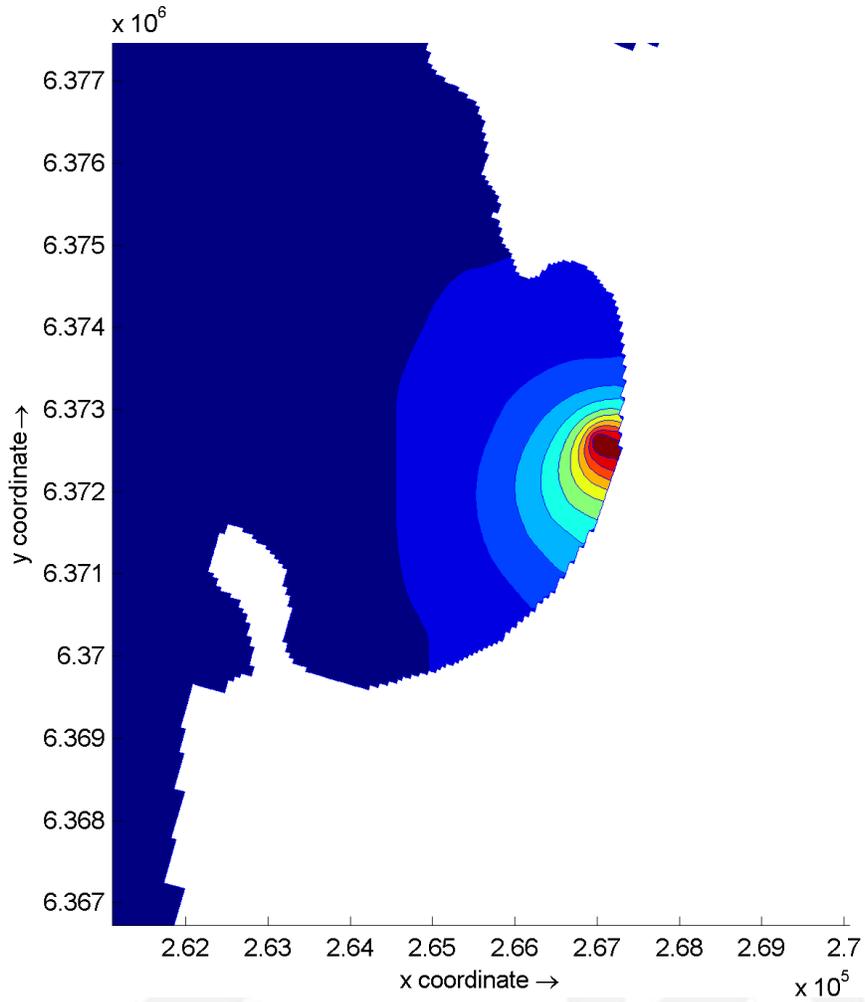


Figura 6-52: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Central Termoeléctrica Campiche

### 6.4.5 Descarga CODELCO - Refinería Ventanas



**Figura 6-53: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga CODELCO - Refinería Ventanas**

#### 6.4.6 Descarga Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Quintero

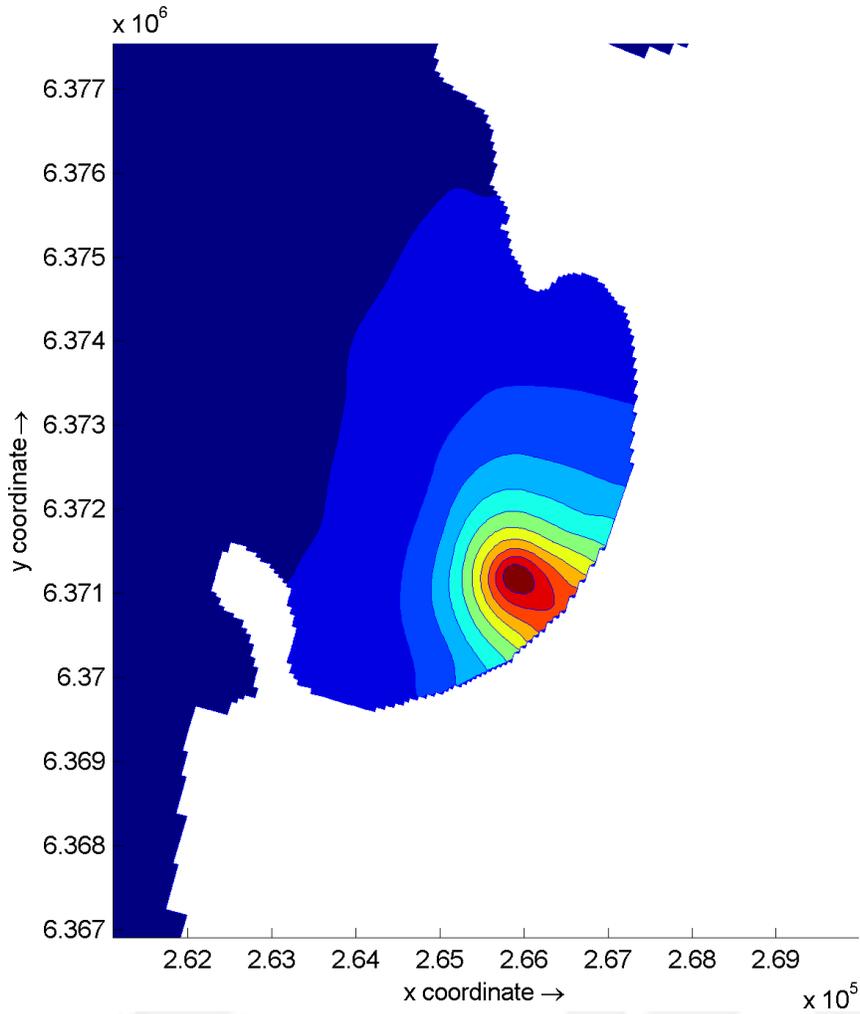


Figura 6-54: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Quintero

#### 6.4.7 Descarga Terminal Marítimo GNL Quintero - Descarga Baño Modular

La descarga solo presenta concentraciones de arsénico, pero debido a que su caudal es tan bajo esta no se evidencia en los resultados de la modelación.

#### 6.4.8 Descarga ENAP - Terminal Marítimo Quintero

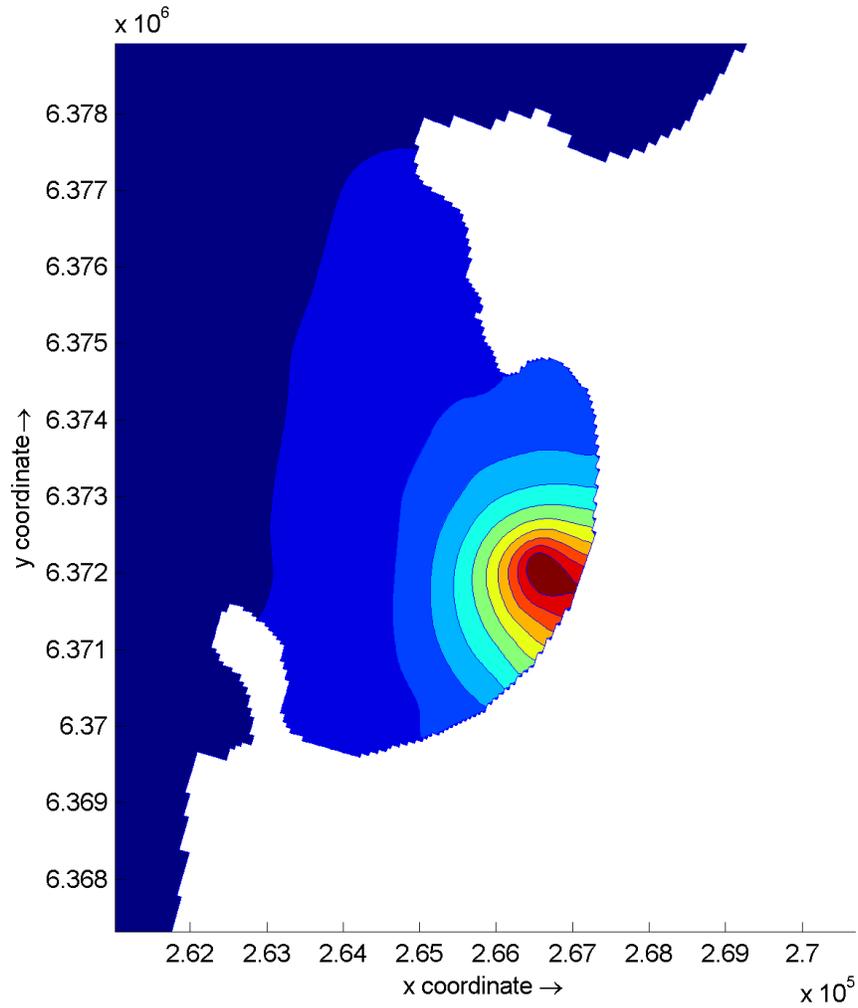


Figura 6-55: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga ENAP - Terminal Marítimo Quintero

#### 6.4.9 Descarga COPEC

La descarga no presenta emisiones de contaminantes de metales pesados ni nutrientes, en base al criterio de selección de contaminantes peligrosos prioritarios en la bahía de Quintero.

6.4.10 Descarga GASMAR - Descarga Bahía de Quintero Circuito 1200

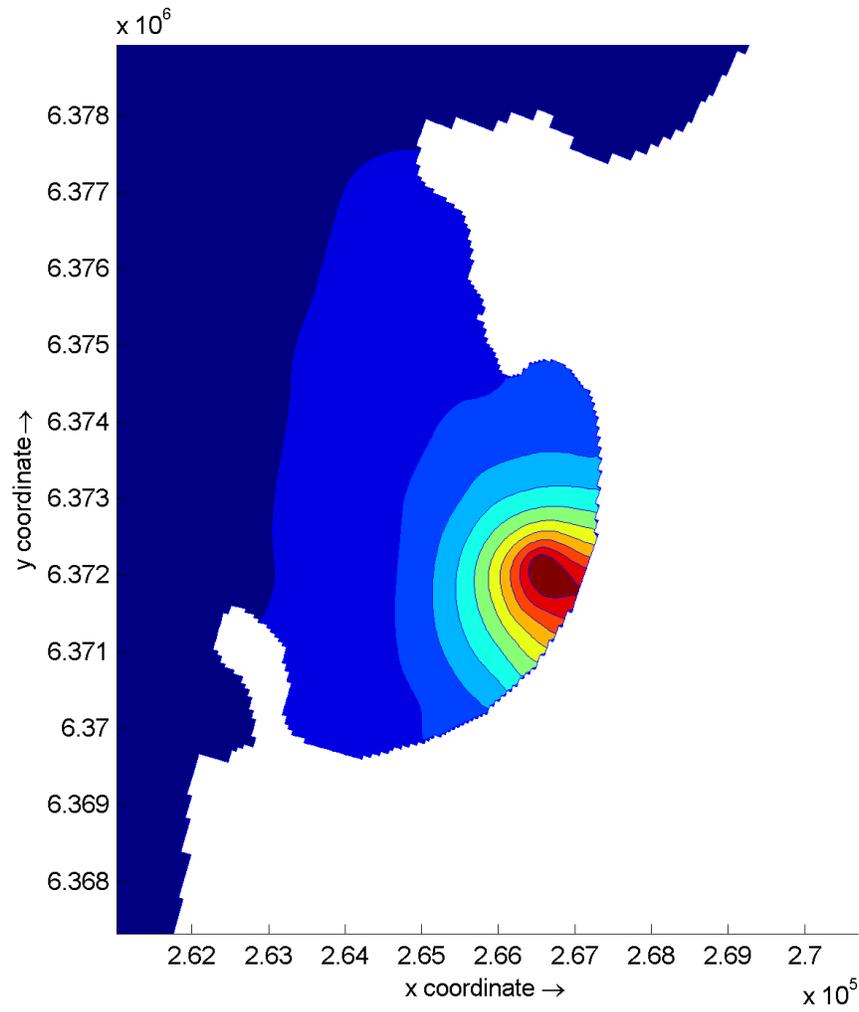


Figura 6-56: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga GASMAR - Descarga Bahía de Quintero Circuito 1200

#### 6.4.11 Descarga Pesquera Quintero

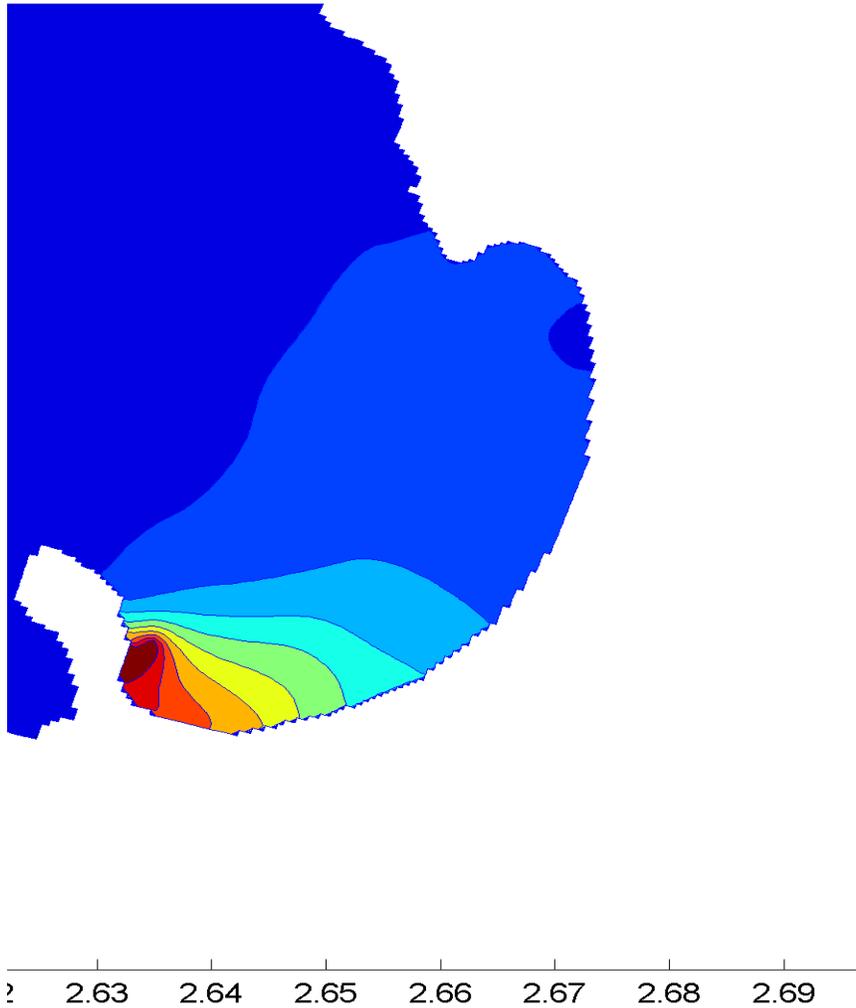


Figura 6-57: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga Pesquera Quintero

#### 6.4.12 Descarga Puerto Ventanas S.A. - Terminal Marítimo Puerto Ventanas S.A. (Muelle Mecanizado de Ventanas)

La descarga no presenta emisiones de contaminantes de metales pesados ni nutrientes, en base al criterio de selección de contaminantes peligrosos prioritarios en la bahía de Quintero.

### 6.4.13 Descarga ESVAL - ES-Quintero

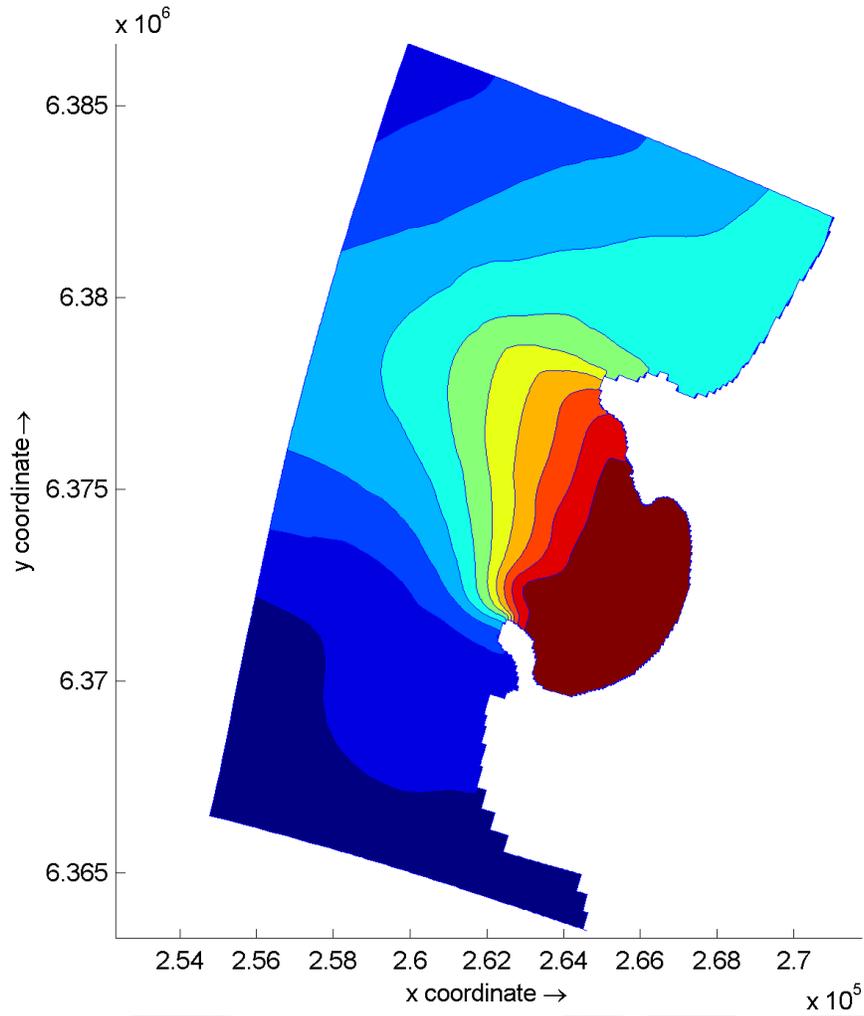


Figura 6-58: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga ESVAL - ES-Quintero

#### 6.4.14 Descarga directa aguas servidas-Puchuncaví

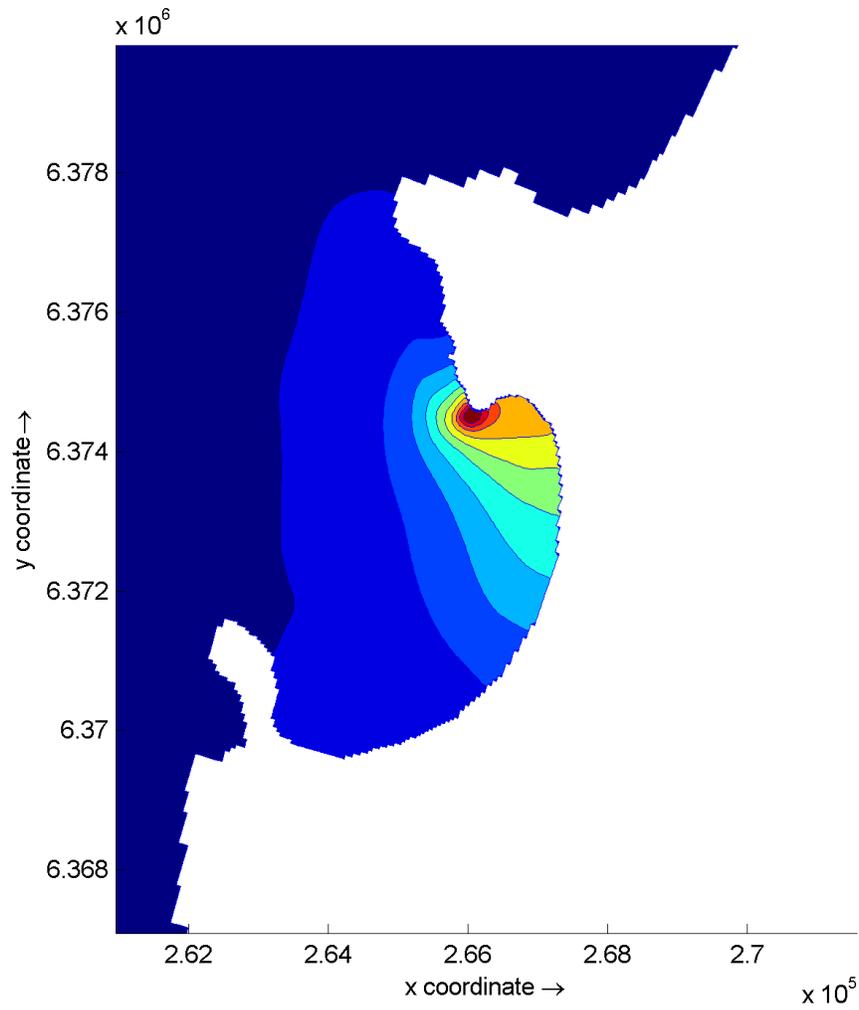
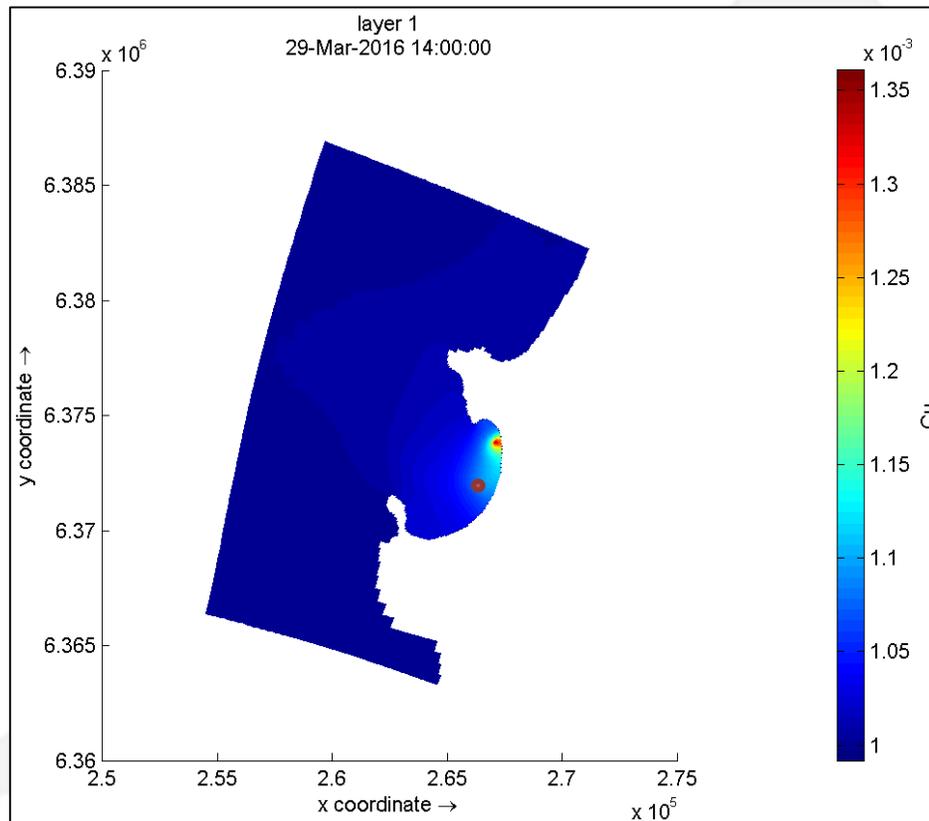


Figura 6-59: Origen y trayectoria habitual para pluma de la Descarga directa aguas servidas-Puchuncaví

## 6.5 Escenario de modelación N° 1: (Cese de funcionamiento Unidades de Ventana 1 y 2)

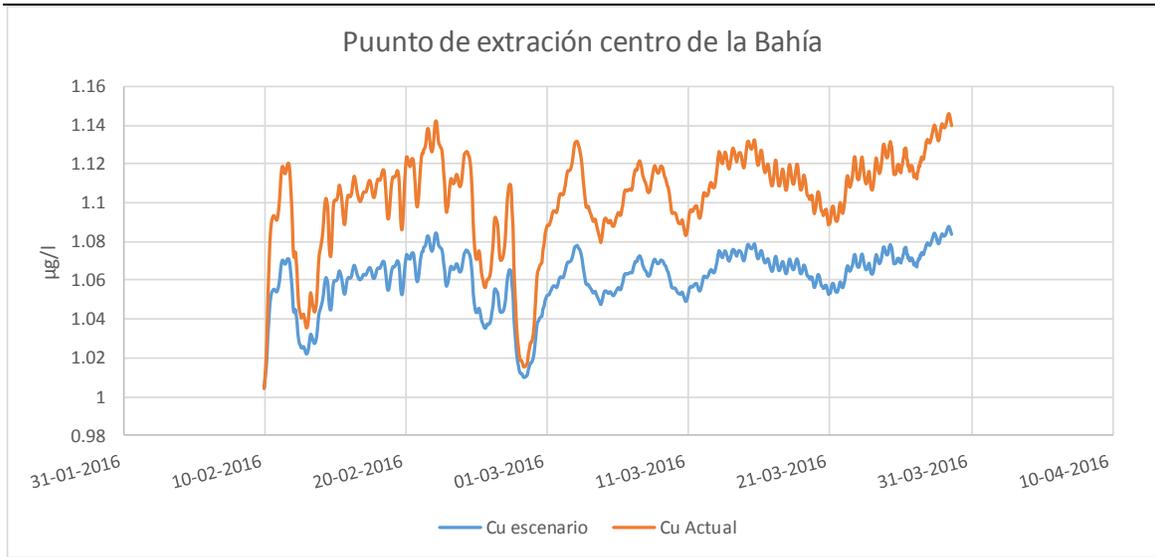
Los escenarios de modelación serán presentados en condiciones de oleaje reinante (estación de verano) dada que se presentan las condiciones menos propicias de auto-limpieza en la Bahía.

Al eliminar las descargas de las Unidades 1 y 2 del complejo de Ventana del modelo se obtiene una mejora en la concentración de contaminantes, puntualmente en el caso del Cobre se utiliza un punto de extracción de datos en el centro de la bahía de manera de poder cuantificar esta mejora en la calidades (ver Figura 6-60), la que es presentada en la Figura 6-61.



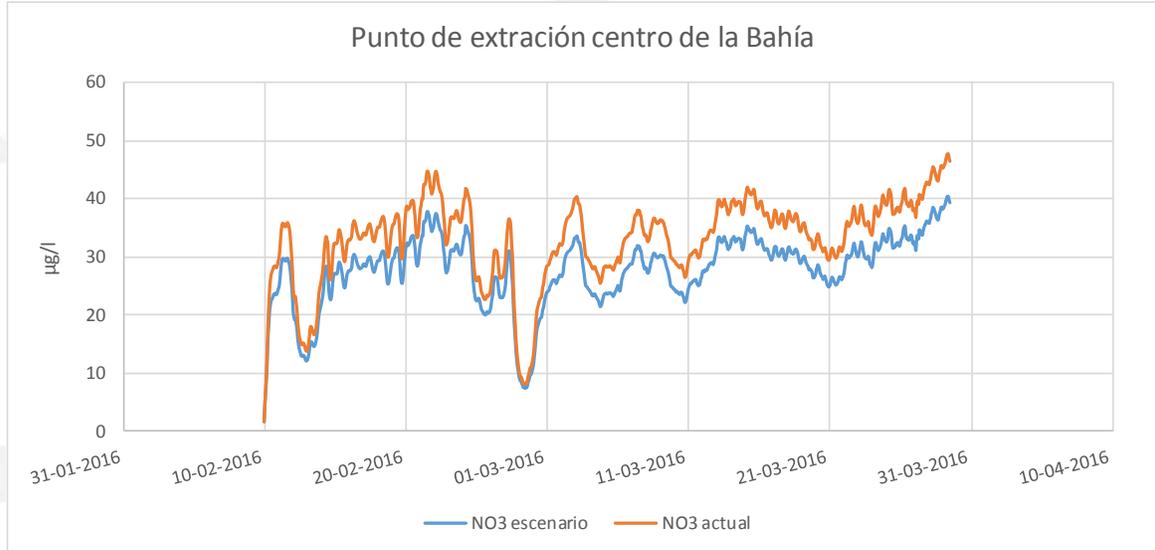
**Figura 6-60: Dispersión del Cu para Escenario sin funcionamiento de Ventana 1 y 2. Punto rojo en el mapa representa el punto de extracción de datos**

De la gráfica de comparación se obtiene que la mejora en promedio de las concentraciones de Cobre para este punto en particular es del 4%. Los grandes valles que se aprecian en la gráfica se debe principalmente a efectos de limpieza natural de la bahía provocado por eventos puntuales de marejadas.



**Figura 6-61: Gráfica de comparación de concentraciones de Cobre para el punto de extracción en el centro de la bahía**

Por otra parte, si replicamos el mismo ejercicio para el Nitrato, este tiene una mejora en promedio para este punto de de 16%.



**Figura 6-62: Gráfica de comparación de concentraciones de Nitrato para el punto de extracción en el centro de la bahía**

## 6.6 Escenario de modelación N° 2: (Reducciones en las concentraciones de contaminantes en 25%)

Este caso presenta el escenario que, en base a una mejora tecnológica para el tratamiento en los Residuos líquidos o la regulación de una normativa de descargas a cuerpos marítimos más estricta, las concentraciones de contaminantes disminuyan un 25% (Escenario tiene incorporado el cese de operaciones de las Unidades 1 y 2 de la Termoeléctrica Ventanas).

Debido al cese de las operaciones en las Unidades 1 y 2 de la Termoeléctrica de Ventana se puede apreciar como las descargas de Refinería Codelco y ENAP - Terminal Marítimo Quintero, para el caso del Arsénico (ver Figura 6-63) toman protagonismo produciendo una sinergia entre sí, con la mayor concentraciones aportadas por la Refinería de Codelco.

Se puede observar que la principal fuente de descarga de cobre bajo este escenario es Central Termoeléctrica Campiche con una concentración máxima para el instante de tiempo en sicigia 1,3 µg/L. (ver Figura 6-65)

A continuación, se presentan los mejores porcentuales promedios entre el escenario 2 y la línea base.

- Para el caso del Cobre se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 19%.
- Para el caso del Mercurio se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 60%.
- Para el caso del Arsénico se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 30%.
- Para el caso del Cadmio se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 27%.

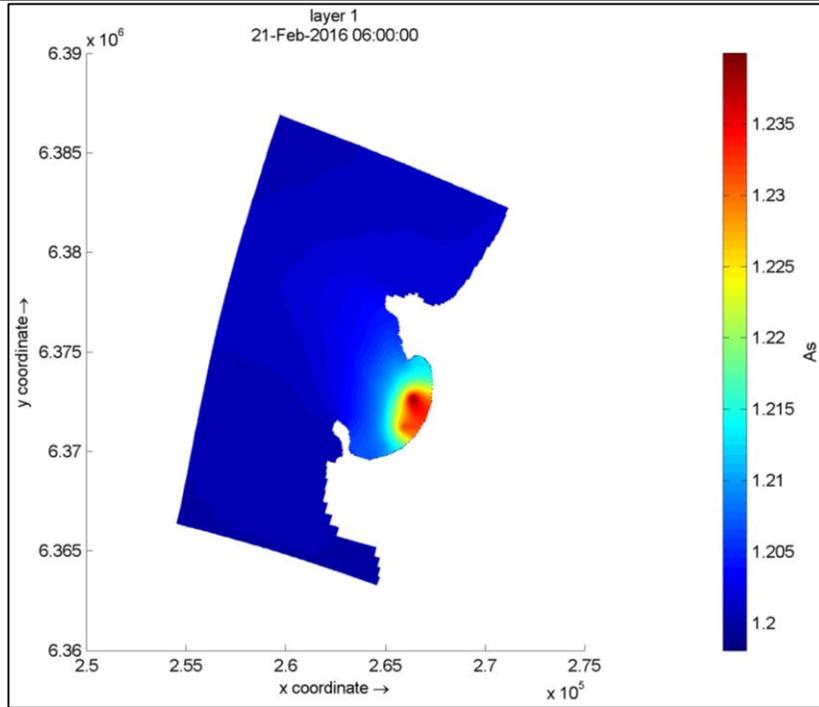


Figura 6-63: Dispersión de contaminantes de Arsénico para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en ( $\mu\text{g/L}$ )

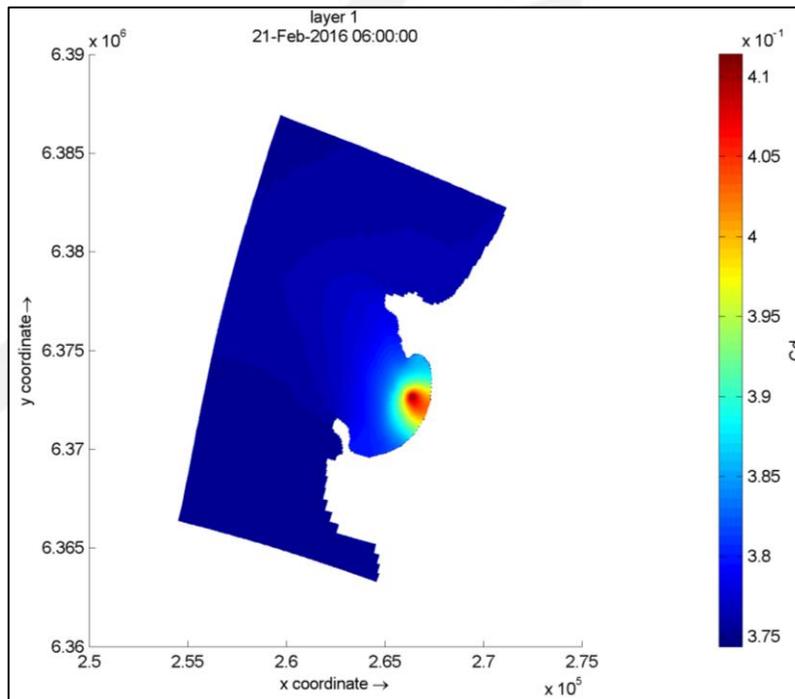


Figura 6-64: Dispersión de contaminantes de Cadmio para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en ( $\mu\text{g/L}$ )

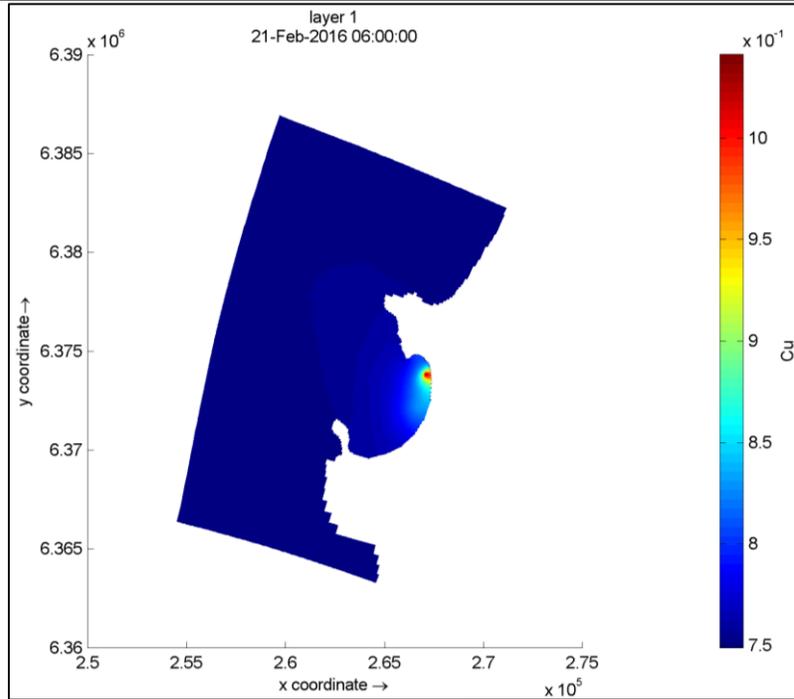


Figura 6-65: Dispersión de contaminantes de Cobre para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en ( $\mu\text{g/L}$ )

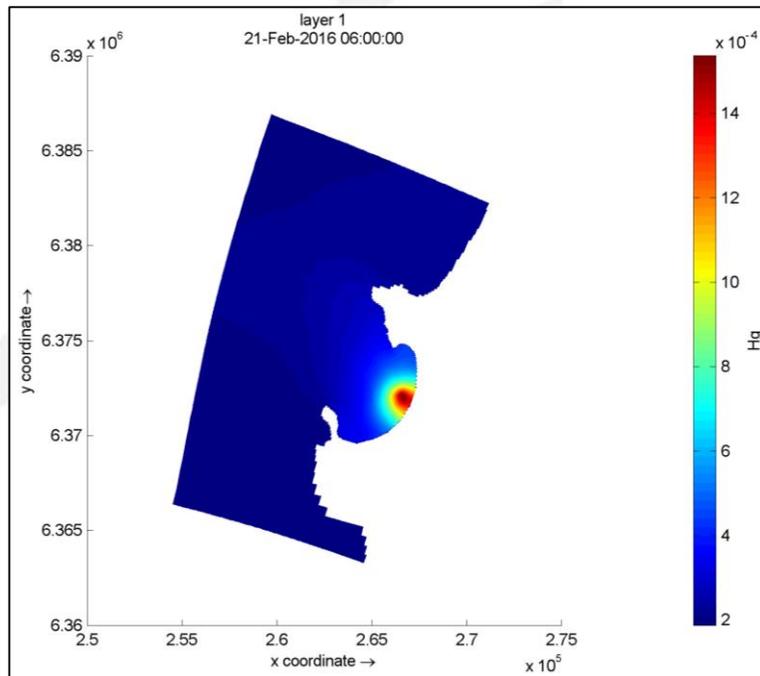


Figura 6-66: Dispersión de contaminantes de Mercurio para escenario de reducción de emisiones en un 25%. Valores presentados en ( $\mu\text{g/L}$ )

## 6.7 Escenario de modelación N° 3: (Cese de funcionamiento Refinería Codelco Ventana)

El escenario de modelación será presentado en condiciones de oleaje reinante (estación de verano) dada que se presentan las condiciones menos propicias de auto-limpieza en la Bahía.

Se realiza el escenario bajo el supuesto que también cesan las descargas de las Unidades 1 y 2 de la Termoeléctrica de Ventana del modelo, dado que es un escenario altamente probable de que suceda.

Los resultados de este escenario no difieren mucho a los presentados en el Escenario de Modelación N° 1 con respecto al escenario Línea Base, dado que la descarga puntual de la Refinería Codelco Ventana tiene un comportamiento más bien local, por lo que las diferencias en las concentraciones solo se evidencian en el área cercana de la descarga, a Continuación, se presenta las mejoras, en concentraciones de contaminantes, respecto al Escenario N° 1 (Ver Tabla 6.3).

**Tabla 6.3: Disminución de las concentraciones de contaminantes**

Comparación Escenarios 1 y 3	
Contaminante	Disminución de la concentración
Cu	0.33%
As	0.05%
Cd	0.03%
Hg	1.7%
Nitrógeno	0.2%

---

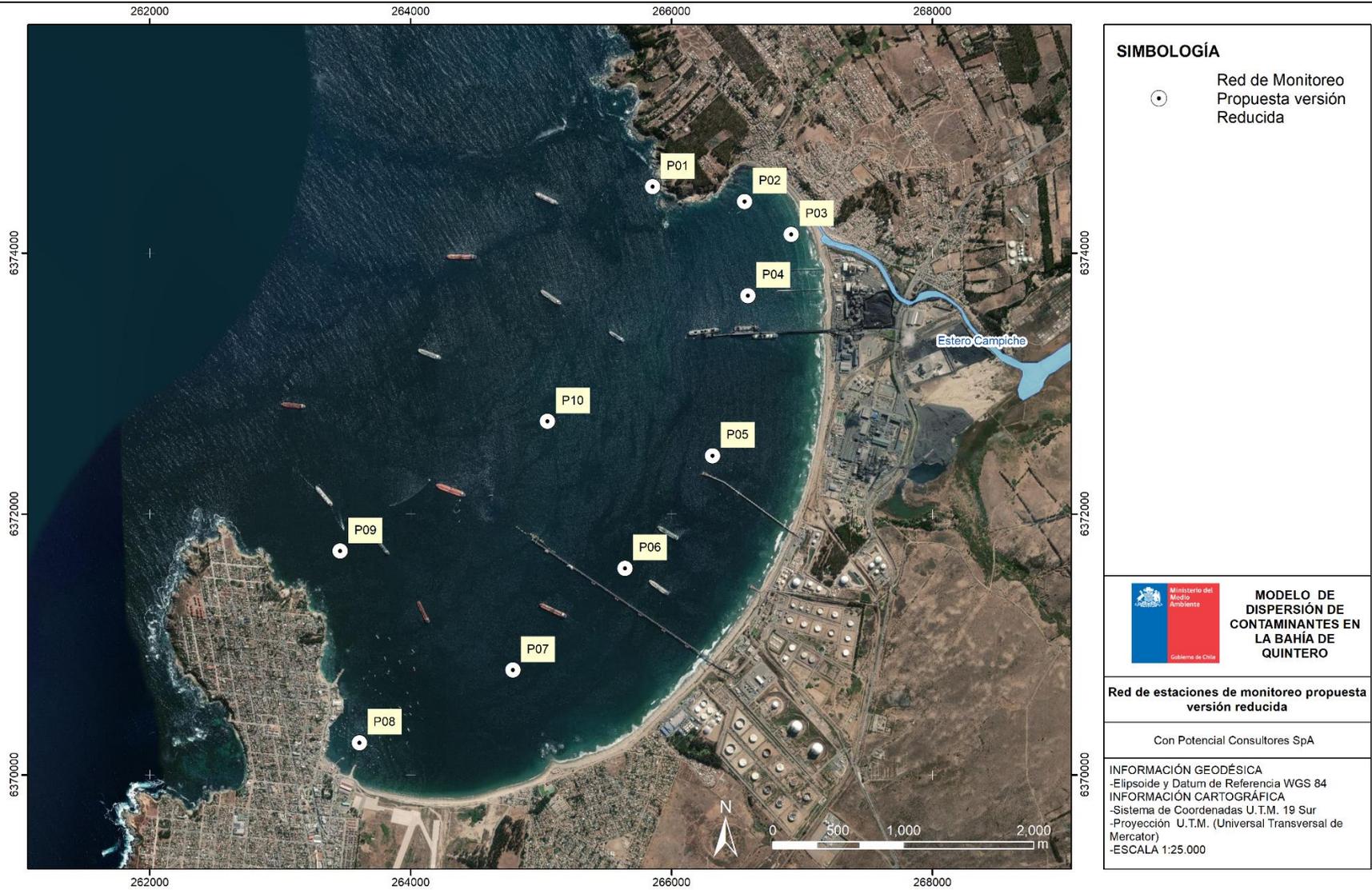
## 7 PROPUESTA ÁREAS DE VIGILANCIA Y RED DE MONITOREO

Se presenta en las Figura 7-1 y Figura 7-2 la distribución espacial en la bahía de Quintero-Puchuncaví de las estaciones de monitoreo de calidad química de aguas, con esto se logrará representar de manera adecuada la variabilidad espacial de la dispersión de contaminantes aportadas por los residuos líquidos. Por otra parte, se recomienda mediciones periódicas, de al menos cada 2 meses (actualmente se realizan 2 campañas en el año) en condiciones normales, además se deben realizar mediciones de seguimiento de contaminantes cuando se constate eventos de contaminación extraordinaria (por ejemplo, derrames).

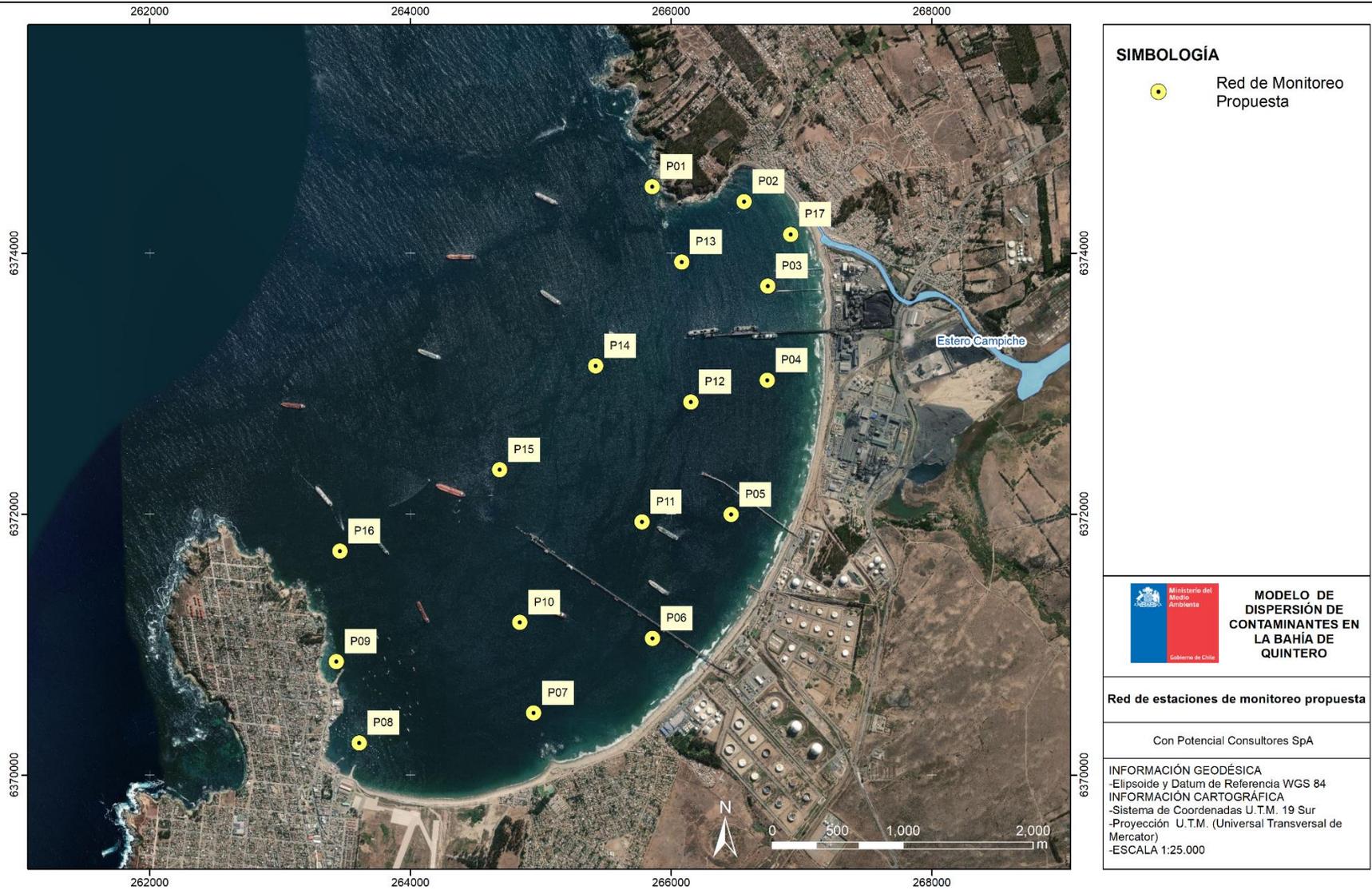
Se presentan dos alternativas de monitoreo, la primera es considerando el óptimo de estaciones de monitoreo para abarcar toda la extensión de la bahía de Quintero, mientras que la segunda es considerando las mínimas estaciones que permitan caracterizar el campo de concentraciones de contaminantes tanto en la matriz acuosa como sedimentaria de la Bahía.

Otro punto importante es el monitoreo de los parámetros físico químicos que aporta el estero Campiche, como también su caudal aportante a la Bahía, para esto se recomienda aforos en crecida y avenidas del estero y mediciones periódicas de su calidad química aguas y sedimentos.

Finalmente, con toda la información recopilada y los resultados de la modelación de contaminantes de la Bahía de Quintero se propone el área de Vigilancia expuesta en la Figura 7-3.



**Figura 7-1: Red de monitoreo propuesta reducida**



**Figura 7-2: Red de monitoreo propuesta reducida**

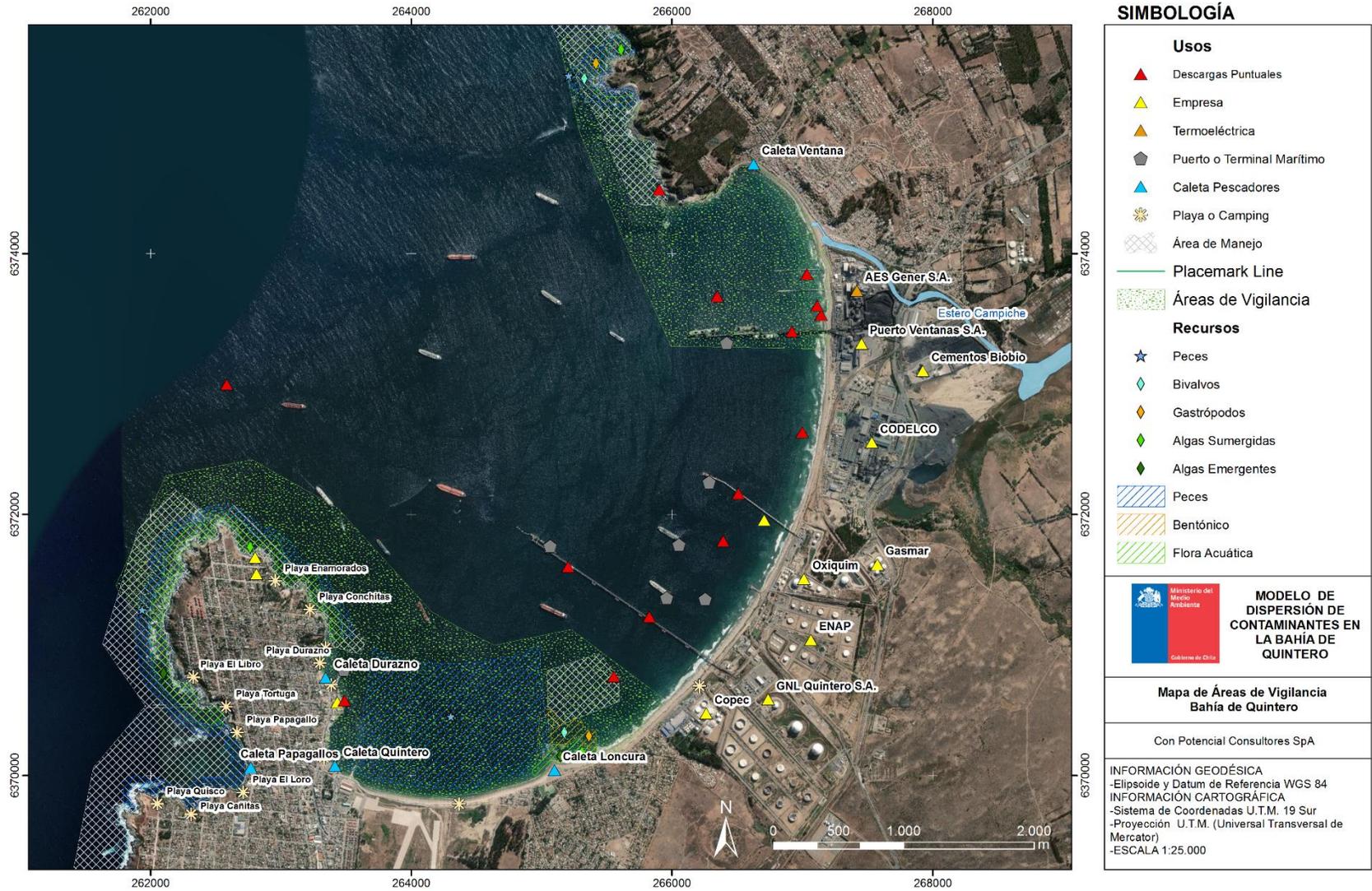


Figura 7-3: Propuesta de Áreas de Vigilancia

## 8 CAPACITACIÓN FUNCIONARIOS DEL MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

En cumplimiento con lo solicitados en las Bases Técnicas, se realizó una capacitación a los funcionarios del Ministerio del Medio Ambiente, esta capacitación fue realizada en formato de Video conferencias (debido a la emergencia sanitaria provocada por la pandemia COVID-19) y con ejercicios prácticos de la utilización, configuración y extracción de resultados del modelo numérico Delft3. Las actividades tuvieron una duración total de 16 horas distribuidas en los días 05 y 06 de mayo del 2020.

Se adjunta en anexos las presentaciones expuestas en la presentación, cápsulas de videos (ver Figura 8-1) y material utilizado para los ejercicios de configuración del modelo DELFT3D.



**Figura 8-1: Portada de Video N° 1 de las Creación y configuración de grilla y batimetría del modelo Delft3D**

---

## 9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

De la revisión de antecedentes disponibles en el área de estudio, tanto de EIA-DIA, planes de vigilancia ambiental, estudios ambientales, etc., se determinaron los datos a utilizar de entrada para el modelo numérico, entre estos parámetros se pueden señalar particularmente, viento, corrientes (Eulerianas y Lagrangianas de unas campañas realizadas en el año 2016 para Invierno y Verano), y oleaje en aguas someras, mareas obtenidas del Servicios Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y aportes de datos de oleaje espectral para el nodo ubicado frente a las costas de Valparaíso, del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) y la batimetría del sector de estudio obtenido de las cartas náuticas del SHOA.

Se utilizó el modelo numérico DELFT3D, el cual posee una base matemática robusta, y un ambiente amigable en la interfaz, además cuenta con un foro activo y una red internacional dispuesta prestar ayuda en la resolución de problemas, posee las herramientas necesarias para la modelación de la bahía de Quintero tanto su parte hidrodinámica como la dispersión de contaminantes en ella presentes.

Se realizó la modelación de la situación actual de la bahía de Quintero, logrando la calibración y validación para los parámetros de corrientes, niveles de marea y dispersión en la concentración de contaminantes (el periodo utilizado como situación actual es el año 2016, debido a que se dispone de una mejor calidad de la información para la calibración del modelo en este año).

Se incluye en la modelación los aportes difusos de contaminantes (Emisiones atmosféricas) por medio de la incorporación de concentraciones aportadas por el material particulado sedimentable MPS (datos extraídos del informe del CEA, 2013).

En presencia de oleaje dominante (marejadas, oleaje de tormenta) se observa claramente que los campos de concentración y dispersión de contaminante, tanto en metales pesados, como en nutrientes, se enfocan casi únicamente en la salida de las fuentes de descarga, debido a la limpieza natural que generan las altas energías asociadas a este tipo de oleaje. Mientras que, para el caso de oleaje reinante, el campo de concentración en el espacio es mayor puesto que la energía del oleaje es menor implicando un patrón de recirculación en la bahía no permitiendo la limpieza natural de la misma.

De manera general para condiciones de oleaje reinante se observa que los contaminantes tienden a depositarse en el sector norte a centro de la Bahía, con recirculación de los contaminantes en este sector debido a los patrones de circulación de la corriente.

En cuanto a los efectos sinérgicos (sumatoria de las concentraciones dadas por las distintas descargas se aprecia que para los contaminantes de As, Cd y Hg existe una clara interacción en el sector de Ventana por las descargas de AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 y 2. Mientras que para las concentraciones de Cobre la sinergia está dada por las descargas AES GENER - Central Termoeléctrica Ventanas Unidad 1 y la Central Termoeléctrica de Campiche. Por último, en cuanto a los nutrientes particularmente existe sinergia entre las descargas de Codelco Refinería Ventanas y la Descarga directa de aguas servidas para el caso de Fósforo.

El escenario 1, donde las Plantas 1 y 2 de Ventana dejen de operar, de acuerdo a lo establecido en los compromisos de la COP25 para el cierre de las dos plantas para los años 2020 y 2022 respectivamente. Se observa una mejora en las concentraciones de contaminantes tanto para metales pesados como para nutrientes, es en este último caso en donde se observan las mayores disminuciones llegando a un 16% en el caso del Nitrato.

A continuación, se presentan los mejores porcentuales promedios entre el escenario 2 y la línea base.

- Para el caso del Cobre se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 19%.
- Para el caso del Mercurio se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 60%.
- Para el caso del Arsénico se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 30%.
- Para el caso del Cadmio se obtiene una mejora de los contaminantes en promedio de 27%.

Por último, el escenario de modelación N° 3, que considera el supuesto del cese de operaciones de la Refinería de Codelco Ventana, más el escenario 1 con el cese de operaciones de las Unidades 1 y 2 de la Central Termoeléctrica de Ventana. Sus resultados no evidencian una mejora significativa respecto de los resultados obtenidos en el Escenario N°1, las disminuciones solo son identificadas en el área directa de la descarga donde se observa la mayor disminución en las concentraciones para el Mercurio de 1.7%.

---

Además, se realizó una capacitación a los funcionarios del Ministerio del Medio Ambiente, esta capacitación fue realizada en formato de Video conferencias (debido a la emergencia sanitaria provocada por la pandemia COVID-19) y con ejercicios prácticos de la utilización, configuración y extracción de resultados del modelo numérico Delft3. Las actividades tuvieron una duración total de 16 horas distribuidas en los días 05 y 06 de mayo del 2020.

---

## 10 REFERENCIAS

1. 2019 Deltares - D-Water Quality User Manual, Versatile water quality modelling in Delta Shell.
2. 2019 HOLON, MMA, Análisis Crítico de los Informes de Seguimiento Ambiental y de los Planes de Vigilancia Ambiental de los Establecimientos que Descargan Residuos Líquidos a la Bahía de Quintero, Región de Valparaíso
3. 2010 Instituto Nacional de Hidráulica – Modelos Matemáticos Hidrodinámicos de Calidad de Aguas.
4. 2001 U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) - Nutrient Criteria Technical Guidance - Manual Estuarine and Coastal Marine Waters.
5. 2018, Australian and New Zealand Guidelines for fresh and marine water quality. Of the National Water Quality Management Strategy, <https://www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/guideline-values/default/sediment-quality-toxicants>
6. 2007 Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) - Canadian Guidance Framework for the Management of Nutrients in Nearshore Marine Systems.
7. 2013 CEA - Análisis de riesgo ecológico por sustancias potencialmente contaminantes en el aire, suelo y agua, en las comunas de Condón, Quintero y Puchuncaví.
8. 2013 CENMA - Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
9. 2014 UCT - Levantamiento de información sobre sedimentos para llevar a cabo un proceso de evaluación de riesgo ecológico en la bahía de Quintero, Región de Valparaíso.
10. 2015 UCT - Aplicación de los lineamientos metodológicos en la evaluación de riesgo ecológico en la bahía Quintero. Región de Valparaíso.
11. 2016 IFOP Determinación de los impactos en los recursos hidrobiológicos y en los ecosistemas marinos presentes en el área de influencia del derrame de hidrocarburo de Bahía Quintero, Región de Valparaíso.
12. 2016 ECOTECNOS, Estudio de línea base marina campañas verano e invierno 2016, módulos de desalación de agua de mar unidad ventanas 3 – AES GENER S.A. bahía Quintero, región de Valparaíso
13. 2018 PRAS Quintero - Puchuncaví - Programa para la recuperación ambiental y social Quintero y Puchuncaví.

- 
14. 2019 DIRINMAR, Informe de Diagnóstico Ambiental Análisis Data POAL Bahía de Quintero (2005-2018) y Unidades Fiscalizables Controladas por la Autoridad Marítima.
  15. 2016 Kenia Hernández-Valdés Luis F. Córdova-López, Technol. cienc. agua vol.7 no.3 Jiutepec may./jun. 2016. Calibración y validación de un modelo matemático para la simulación de los cambios morfológicos durante eventos extremos en una playa del Caribe.
  16. 2001 D.S. 90 Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales