



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**ANÁLISIS METODOLÓGICO PARA
DETERMINAR CAUDALES DE DILUCIÓN
EN ZONAS ESTUARINAS**

REALIZADO POR:

Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos

Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Chile

S.I.T. N° 189

SANTIAGO, SEPTIEMBRE 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Sr. Sergio Bitar Ch.**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.**

**Jefa Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Ingeniero Sra. Mesenia Atenas V.**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Sr. Fernando Aguirre Z.**

UNIVERSIDAD DE CHILE

**Jefe de Proyecto
Ingeniero Sr. Yarko Niño C.**

**Jefe de Proyecto Alterno
Ingeniero Sr. Aldo Tamburrino T.**

**Ingeniero de Proyecto
Ingeniero Sr. Luis Felipe Sandoval S.**

**Ingeniero de Proyecto
Ingeniero (e) Sr. Thomas Booth R.**

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO	2
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE TRABAJO	3
2.1. ESTRUCTURA Y CONTENIDO DEL INFORME	3
2.2. SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE CAUDAL DE DILUCIÓN EN ESTUARIOS	3
CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y ANÁLISIS TEÓRICO	5
3.1. DECRETO SUPREMO N°90/2000 Y CAUDAL DE DILUCIÓN	5
3.2. INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DE ESTUARIOS	6
3.2.1. EXTENSIÓN DEL ESTUARIO Y SUS LÍMITES	6
3.2.2. FENÓMENO DE MAREA EN ESTUARIOS	7
3.2.3. PROCESOS DE MEZCLA	8
3.2.4. GEOMORFOLOGÍA	11
3.3. MODELOS NUMÉRICOS	11
3.3.1. MODELO HIDRÁULICO IMPERMANENTE (ECUACIONES DE SAINT-VENANT)	12
3.3.2. RELACIONES PARA EL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN	12
3.3.3. MODELOS DE MEZCLA, CASO BIEN Y PARCIALMENTE MEZCLADO	13
3.3.4. MODELOS DE MEZCLA, CASO ESTRATIFICADO	15
3.3.5. ECUACIONES RELEVANTES	15
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA	18
4.1. INFORMACIÓN GENERAL	18
4.1.1. ESTRUCTURA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	19
4.1.2. ESTUDIO DE TERRENO	21
4.2. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN PARA OBTENER CAUDAL DE DILUCIÓN	21
4.2.1. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO	22
4.2.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA	22
4.2.2. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA	23
4.2.3. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL	24
4.2.4. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL	24
4.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN	25
4.3. RESUMEN	26
4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN TERRENO	26
4.4.1. PERFILES DE PROFUNDIDAD	27
4.4.2. PERFILES DE SALINIDAD	27

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

4.4.3. VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO	28
4.4.4. SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO.....	28
4.4.5. CAUDAL DEL RÍO.....	28
CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE TERRENO	29
5.1. METODOLOGÍA GENERAL	29
5.2. CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE ESTUARIOS	29
5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS RÍOS	30
5.3.1. RÍO TOLTÉN	30
5.3.2. RÍO LEBU	32
5.3.3. ESTERO TONGOY	34
5.4. FECHAS DE MEDICIÓN.....	34
5.5. RESULTADOS DE CAMPAÑAS DE TERRENO	37
5.5.1. RÍO TOLTÉN	37
5.5.2. RÍO LEBU	45
5.5.3. ESTERO TONGOY	54
5.6. RESUMEN DE RESULTADOS	60
CAPÍTULO 6: APLICACIÓN DE METODOLOGÍA.....	61
6.1. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA	61
6.2. RÍO TOLTÉN.....	61
6.2.1. LÍMITE DEL ESTUARIO CON EL RÍO	61
6.2.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA.....	61
6.2.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA	62
6.2.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	63
6.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	63
6.2.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN	63
6.2.7. RESUMEN	64
6.3. RÍO LEBU.....	64
6.3.1. LÍMITE DEL ESTUARIO CON EL RÍO	64
6.3.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA.....	65
6.3.1. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA	66
6.3.1. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	66
6.3.2. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	67
6.3.1. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN	68
6.3.2. RESUMEN	69
6.4. ESTERO TONGOY	69
CAPÍTULO 7: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA	71
7.1. VALIDACIÓN DE MÁXIMA INTRUSIÓN DE LA ONDA DE MAREA	71

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

7.2. VALIDACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN.....	71
7.2.1. TOLTÉN	72
7.2.1. LEBU	72
7.3. VALIDACIÓN DEL MODELO DE OLIVARES (2000)	73
7.3.1. TOLTÉN	73
7.3.2. LEBU	74
7.4. VALIDACIÓN DE MODELACIÓN DE HEC-RAS	74
7.5. ANÁLISIS DEL SUPUESTO DE UNIDIMENSIONALIDAD	75
7.5.1. TOLTÉN	75
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
8.1. SOBRE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO.....	77
8.2. ZONIFICACIÓN DEL ESTUARIO Y CAUDAL DE DILUCIÓN	77
8.2.1. DETERMINACIÓN DE $Q_{\text{LÍMITE}}$	77
8.3. CUERPOS DE AGUA SIN AFLUENTE SUPERFICIAL	77
8.4. RECOMENDACIONES	78
CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA.....	79
CAPÍTULO 10: GLOSARIO	81

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1: ESQUEMA DE ESTUARIO FUERTEMENTE ESTRATIFICADO. NIÑO Y TAMBURRINO (2002). ...	9
FIGURA 3.2: ESQUEMA DE ESTUARIO PARCIALMENTE MEZCLADO. BUSTOS (2007).....	10
FIGURA 3.3: ESQUEMA DE ESTUARIO BIEN MEZCLADO. BUSTOS (2007).....	10
FIGURA 4.1: ESQUEMA DE LA SUBDIVISIÓN DEL ESTUARIO.	18
FIGURA 4.2. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	22
FIGURA 4.3: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EXTENSIÓN DEL ESTUARIO Y CAUDAL DE DILUCIÓN. 26	
FIGURA 5.1: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.....	30
FIGURA 5.2: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.....	31
FIGURA 5.3: CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE CAUDAL RÍO TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.....	32
FIGURA 5.4: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO LEBU EN LOS ÁLAMOS.	33
FIGURA 5.5: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA LEBU EN LOS ÁLAMOS.	33
FIGURA 5.6: CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE CAUDAL RÍO LEBU EN LOS ÁLAMOS.	34
FIGURA 5.7: LUGARES DE ESTUDIO. (A) RÍO TOLTÉN, (B) RÍO LEBU Y (C) ESTERO TONGOY.....	37
FIGURA 5.8: UBICACIÓN DEL LUGAR DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE LA SALINIDAD Y DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA. RÍO TOLTÉN.	38
FIGURA 5.9: NIVEL DEL MAR MEDIDA EN TERRENO (MARCAS AZULES) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA ROJA) PARA TOLTÉN. (A) 21 DE ENERO, (B) 9 DE MARZO, (C) 14 DE JUNIO Y (D) 19 DE JUNIO.	40
FIGURA 5.10: BATIMETRÍA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	42
FIGURA 5.11: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	42
FIGURA 5.12: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	44
FIGURA 5.13: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL.	45
FIGURA 5.14: UBICACIÓN DEL LUGAR DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE LA SALINIDAD Y DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA. RÍO LEBU.	46
FIGURA 5.15: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS AZULES) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA ROJA) PARA LEBU. (A) 19 DE ENERO, (B) 11 DE MARZO, (C) 12 DE JUNIO Y (D) 22 DE JUNIO.....	48
FIGURA 5.16: BATIMETRÍA DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	50
FIGURA 5.17: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	50
FIGURA 5.18: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD.	52
FIGURA 5.19: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL.	54
FIGURA 5.20: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS AZULES) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA ROJA) PARA TONGOY. (A) 7 DE ABRIL Y (B) 7 DE JULIO.....	55
FIGURA 5.21: BATIMETRÍA DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 5.22: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.	57
FIGURA 5.23. PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.....	59
FIGURA 5.24: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL.	60
FIGURA 6.1. OBTENCIÓN DE MÁXIMA INTRUSIÓN DE ONDA DE MAREA.....	61
FIGURA 6.2. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.....	63
FIGURA 6.3. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.....	64
FIGURA 6.4. OBTENCIÓN DE MÁXIMA INTRUSIÓN DE ONDA DE MAREA.....	65
FIGURA 6.5. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL.	67
FIGURA 6.6. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	68
FIGURA 6.7. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	68
FIGURA 6.8. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 5.1: NIVEL DE ESTRATIFICACIÓN ESPERADO PARA ESTUARIOS ESCOGIDOS.....	29
TABLA 5.2: FECHAS DE CAMPAÑAS DE TERRENO REALIZADAS.	35
TABLA 5.3: CAUDAL DEL RÍO TOLTÉN PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.....	38
TABLA 5.4: AMPLITUD Y PERIODO DE LA MAREA SEGÚN CAMPAÑA.	40
TABLA 5.5: TIEMPO DE DESFASE DE LA ONDA DE MAREA.....	41
TABLA 5.6: PROFUNDIDAD Y ANCHO MEDIOS DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	42
TABLA 5.7: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.	43
TABLA 5.8: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO.....	43
TABLA 5.9: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	44
TABLA 5.10: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA.	45
TABLA 5.11: CAUDAL DEL RÍO LEBU PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.	46
TABLA 5.12: AMPLITUD Y PERIODO DE LA MAREA SEGÚN CAMPAÑA.	48
TABLA 5.13: TIEMPO DE DESFASE DE LA ONDA DE MAREA.....	49
TABLA 5.14: PROFUNDIDAD Y ANCHO MEDIOS DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	50
TABLA 5.15: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.	51
TABLA 5.16: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO.....	51
TABLA 5.17: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO.	52
TABLA 5.18: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA.	53
TABLA 5.19: CAUDAL DEL ESTERO TONGOY PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.....	54
TABLA 5.20: AMPLITUD Y PERIODO DE LA MAREA SEGÚN CAMPAÑA.	56
TABLA 5.21: TIEMPO DE DESFASE DE LA ONDA DE MAREA.....	56
TABLA 5.22: PROFUNDIDAD Y ANCHO MEDIO DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.	57
TABLA 5.23: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.	58
TABLA 5.24: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO.....	58
TABLA 5.25: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO.	59
TABLA 5.26: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA DESDE LA BOCA.	59
TABLA 5.27: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO TOLTÉN.	60
TABLA 5.28: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO LEBU.....	60
TABLA 5.29: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA ESTERO TONGOY.....	60
TABLA 6.1: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{LÍMITE}$	62
TABLA 6.2: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.....	62
TABLA 6.3: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO.....	64
TABLA 6.4: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{LÍMITE}$	65

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 6.5: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.....	66
TABLA 6.6: CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA VIRTUAL UTILIZADA.	67
TABLA 6.7: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO.....	69
TABLA 7.1: VARIACIÓN DEL NIVEL Y CAUDAL EN EL LÍMITE ESTUARIO/RÍO.	71
TABLA 7.2: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$	72
TABLA 7.3: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$	72
TABLA 7.4: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.....	73
TABLA 7.5: COMPARACIÓN ENTRE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y REAL.	73
TABLA 7.6: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.....	74
TABLA 7.7: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.	74
TABLA 7.8: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA EN FORMA DE MEZCLA PARCIAL.....	75
TABLA 7.9: DATOS PARA CÁLCULO DE EFECTO DE CORIOLIS.	76



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

El presente estudio tiene como objetivo establecer una metodología para la determinación de caudales de dilución en zonas estuarinas, en el marco de la revisión de la “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales” (Decreto Supremo N°90/2000).

Dentro del proceso de revisión del DS N°90/2000 se ha concluido que el comportamiento hidrodinámico de un estuario difiere en gran medida del de un río, por lo que se hace necesario establecer una metodología de estimación de caudales de dilución específica para este tipo de cuerpos de agua.

En este sentido, el presente estudio se concibió con la idea de desarrollar una metodología sencilla que permita establecer la capacidad de dilución en cuerpos de agua estuarinos chilenos de manera precisa.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo del estudio es desarrollar una metodología sencilla para estimar de manera precisa caudales de dilución asociados a cuerpos de agua estuarinos chilenos, en el marco de la revisión del Decreto Supremo N°90/2000.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar y analizar normativas extranjeras de descarga a cuerpos de agua estuarinos y contrastarlas con las definiciones establecidas en el Decreto Supremo N°90/2000, utilizando estas normativas como antecedentes para el estudio.
- Identificar y caracterizar la variedad de estuarios existentes en Chile. Utilizar la información obtenida para definir el tipo de estuarios que se incluirán en el análisis y de este modo determinar el alcance del estudio.
- Desarrollar una metodología para la determinación del caudal de dilución para los tipos de estuarios considerados, en el contexto del Decreto Supremo N° 90/2000.
- Aplicar la metodología a estuarios piloto representativos de los tipos de estuarios considerados para el presente estudio.



- Realizar una primera aproximación a la validación de los modelos utilizados.
- Concluir respecto a la metodología desarrollada y a los resultados obtenidos.

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO

Este estudio entregará una metodología para establecer caudales disponibles para la dilución en zonas estuarinas de acuerdo a sus características físicas y clasificación o tipo de estuario.

De esta manera, el presente estudio dotará a la DGA de metodologías claras con fundamentos técnicos y procedimientos para la determinación de caudales disponibles para la dilución en dichas zonas.



CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. ESTRUCTURA Y CONTENIDO DEL INFORME

El informe se divide en diez capítulos que presentan la metodología desarrollada para determinar caudales de dilución en estuarios, además de los antecedentes teóricos asociados a ésta y la información relacionada con las campañas de terreno realizadas durante el año 2009. Además se muestra la aplicación de la metodología a los estuarios estudiados en terreno, obteniendo para cada uno de ellos sus caudales de dilución. Finalmente se incluye un capítulo de validación de los modelos utilizados y otro capítulo con las conclusiones y recomendaciones del estudio.

A modo de introducción se presenta un resumen de los diez capítulos que conforman el informe. En el primer capítulo se explica la motivación del estudio y sus principales objetivos. En el segundo capítulo se muestra la estructura del informe, además de un resumen de la metodología de trabajo utilizada, con el fin de contextualizar la revisión de antecedentes mostrada en el tercer capítulo. El tercer capítulo entrega una revisión bibliográfica sobre los procesos físicos asociados a estuarios, sobre los diferentes tipos de modelación numérica existentes y sobre la normativa de emisión chilena DS N°90/2000. El cuarto capítulo explica la metodología propuesta para la determinación de caudales de dilución en estuarios, incluyendo el tipo de mediciones necesarias de realizar en terreno y la modelación numérica utilizada. El quinto capítulo incluye los resultados obtenidos de las campañas de terreno y una tabla resumen de la información necesaria para la aplicación de los modelos numéricos para cada estuario. El sexto capítulo muestra la manera de aplicar la metodología propuesta, a través del estudio de los estuarios incluidos en las campañas de terreno realizadas. El séptimo capítulo tiene como objetivo realizar una primera aproximación a la validación de los modelos utilizados, basándose en la información obtenida en las campañas de terreno. El octavo capítulo se encarga de concluir respecto del trabajo realizado, enfocándose en su precisión y alcance. Finalmente el noveno y décimo capítulo muestran la bibliografía consultada y un glosario de términos relevantes. Además se incluye un conjunto de anexos, entre los cuales están los datos de salinidad y profundidades medidos en las campañas de terreno, e información relacionada con los modelos numéricos utilizados.

2.2. SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE CAUDAL DE DILUCIÓN EN ESTUARIOS

Debido a las características de los procesos de mezcla propios de estuarios, se hace necesario proponer una metodología más compleja que la existente para el estudio de cuerpos de agua fluviales, establecida en la Minuta DGA N°143, “Criterios para la determinación de caudales disponibles para la dilución en cuerpos receptores superficiales”. En este sentido se desarrolla,



para el caso de estuarios, una metodología que combina mediciones en terreno e información hidrológica con modelación numérica. A lo largo del estudio se explica el tipo de mediciones necesarias a realizar, además de los modelos numéricos propuestos, de modo que el interesado en obtener el caudal de dilución asociado a un estuario pueda aplicar fácilmente la metodología desarrollada.



CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y ANÁLISIS TEÓRICO

En el presente capítulo se discute el concepto de caudal de dilución en estuarios mediante una revisión de la normativa chilena de emisión DS N°90/2000. Además se entregan nociones básicas acerca de los procesos hidrodinámicos asociados a zonas estuarinas, las cuales permiten comprender la metodología desarrollada para determinar caudales de dilución. Además se entregan una serie de modelos y fórmulas matemáticas relevantes para la aplicación de la metodología desarrollada, las cuales serán citadas a lo largo del informe.

3.1. DECRETO SUPREMO N°90/2000 Y CAUDAL DE DILUCIÓN

El principal objetivo del presente estudio es establecer una metodología para determinar caudales de dilución en zonas estuarinas. En este sentido, es la normativa de emisión DS N°90/2000 Norma para la Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales la que define el concepto de caudal de dilución y es la DGA la institución que tiene la tarea de desarrollar la metodología necesaria para su estimación tanto para el caso de ríos como para el caso de estuarios. En la actualidad la metodología para el caso de estuarios no ha sido desarrollada.

El caudal de dilución es un parámetro característico de un cuerpo de agua, introducido en la normativa de emisión DS N°90/2000 para dar cuenta de su capacidad de dilución y de este modo establecer la concentración máxima de descarga aceptada para cierto contaminante, dado el caudal efluente del emisor. La manera en que esto se realiza se detalla a continuación.

Para el caso de cuerpos de agua fluviales, las concentraciones máximas de descarga permitidas según tipo de contaminante quedan definidas por la Tabla N°1 del DS N°90/2000. Por otro lado, a las fuentes emisoras se les permite aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor, a través del parámetro caudal de dilución, incrementando la concentración establecida en la Tabla N°1 del DS N°90/2000 según la Ecuación (3.1), ateniéndose siempre a una concentración límite definida en la Tabla N°2 del DS N°90/2000.

$$C_{MaxDescarga} = T_1 \cdot (1 + d) \quad (3.1)$$

Donde $C_{MaxDescarga}$ corresponde a la concentración máxima permitida para la descarga considerando capacidad de dilución, T_1 corresponde a la concentración máxima permitida sin capacidad de dilución (Tabla N°1 del DS N°90/2000) y d representa a la tasa de dilución, definida por la Ecuación (3.2).



$$d = \frac{Q_{\text{CuerpoReceptor}}}{Q_{\text{Descarga}}} \quad (3.2)$$

Donde d corresponde a la tasa de dilución, $Q_{\text{CuerpoReceptor}}$ corresponde al caudal disponible del cuerpo receptor y Q_{Descarga} al caudal medio mensual del efluente vertido durante el mes de máxima producción de residuos líquidos. Cabe mencionar que $Q_{\text{CuerpoReceptor}}$ se define como “la cantidad de agua disponible expresada en volumen por unidad de tiempo para determinar la capacidad de dilución en un cuerpo receptor”.

Atendiendo a que los estuarios también pueden ser considerados como cuerpos receptores, surge la necesidad de establecer una metodología para la determinación de la capacidad de dilución en estas zonas.

3.2. INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DE ESTUARIOS

Los estuarios corresponden a cuerpos de agua costeros semicerrados, donde el agua dulce se mezcla con el agua marina (Dyer 1973, en Martin and McCutcheon, 1999), lo que determina la existencia de gradientes de salinidad, temperatura y densidad. Lo anterior, sumado al fenómeno de marea, hace que los procesos de mezcla en estuarios sean más complejos que los asociados a ríos, por lo que la metodología utilizada para determinar caudales de dilución también lo será.

3.2.1. EXTENSIÓN DEL ESTUARIO Y SUS LÍMITES

Una de las definiciones de estuario más aceptadas es la propuesta por Pritchard (1967), quien indica que los estuarios son “cuerpos de agua semicerrados que poseen una conexión libre con el mar, y en los cuáles el agua marina es diluida por el agua dulce proveniente de la escorrentía de la cuenca”. Por otro lado, la IUCN¹ los define como “masas de agua donde la desembocadura de un río se abre a un ecosistema marino, con una salinidad intermedia entre dulce y salada y en los que la acción de las mareas es un importante regulador biofísico”. Las definiciones presentadas dan un indicio de cómo establecer los límites de un estuario, tanto con la zona de protección litoral como con sus afluentes fluviales.

En lo que respecta al límite de aguas abajo del estuario, el DS N°90/2000 indica que la zona de protección litoral “corresponde a la franja de playa, agua y fondo de mar adyacente a la costa continental o insular, delimitada por una línea superficial imaginaria, medida desde la línea de baja marea de sicigia, que se orienta paralela a ésta y que se proyecta hasta el fondo del cuerpo de agua, fijada por la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina

¹ International Union for Conservation of Nature



Mercante...”. Debido a que la zona de protección litoral comienza donde termina el estuario, la definición anterior corresponde al límite entre el estuario y la zona de protección litoral, válida para la aplicación del DS N°90/2000.

Por otro lado, existen tres criterios clásicos para definir el límite de aguas arriba del estuario, los cuales determinan la extensión del mismo, para efectos de la metodología desarrollada:

- Límite basado en la salinidad: Pritchard (1967) señala que el estuario queda limitado por el área en el cual la salinidad se encuentra en el rango de 0.1 g/l a 30-35 g/l.
- Límite basado en la onda de marea: Fairbridge (1980) menciona que el límite de aguas arriba del estuario se encontraría en la zona hasta donde se percibe efecto de la marea.
- Límite basado en los sedimentos: Dalrymple (1992) define los límites del estuario en función del transporte de sedimentos, señalando que el estuario es toda el área inundada que recibe aporte sedimentario tanto de parte del río como del mar.

En el acápite 4.2.1. se discute cual de los criterios mencionados resulta ser el más conveniente para definir los límites entre el estuario y el río, teniendo en consideración el objetivo de establecer una metodología para estimar caudales de dilución en zonas estuarinas.

3.2.2. FENÓMENO DE MAREA EN ESTUARIOS

Se conoce como marea a la variación periódica del nivel del mar debido a fuerzas gravitacionales ejercidas por el Sol o la Luna (mareas astronómicas), o bien a cambios en la presión atmosférica (mareas barométricas).

Dependiendo del tipo de estuario analizado, es posible observar una pleamar¹ y una bajamar² por día (marea diurna) o dos pleamares y dos bajamares por día (marea semidiurna), las cuales pueden tener en general diferentes amplitudes³. Por otro lado, la amplitud de la marea generada por la presencia de la Luna varía a lo largo del mes debido a la traslación de la misma en torno a la Tierra. En este sentido se conocen como mareas vivas o de sicigia al máximo que alcanza la amplitud de marea para luna llena o nueva, y mareas muertas o de cuadratura al mínimo que alcanza para luna creciente o menguante.

La variación del nivel del mar en la boca del estuario, en conjunto con la magnitud del caudal afluente y la morfología del cauce, condicionan el escurrimiento en el estuario y por ende sus procesos de mezcla. En este sentido se considera crítica la condición de marea de sicigia, en el

¹ Máximo nivel del mar.

² Mínimo nivel del mar.

³ Amplitud de marea corresponde a la diferencia de altura entre el nivel de pleamar y bajamar.



sentido que implica un mayor alcance de la influencia del mar dentro del cauce del río, definiendo finalmente un estuario de mayor extensión, independiente de cuál de los criterios mencionados en el acápite 3.2.1 se utilice. Por otro lado, la condición de marea de cuadratura puede implicar una menor capacidad de mezcla por parte del mar, por lo cual también se considera crítica.

3.2.3. PROCESOS DE MEZCLA

Las características hidrodinámicas de los estuarios pueden cambiar a lo largo del año, dependiendo de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y de los afluentes fluviales. Debido a esto la capacidad de mezcla en ellos, estrechamente relacionada con las características hidrodinámicas, depende principalmente de los factores mencionados anteriormente (Fischer et al., 1979), tal como se explica a continuación:

- Efecto del viento: Este efecto es importante para el caso de estuarios anchos, en los cuales logra inducir corrientes de circulación. A diferencia de lo que sucede en lagos y océanos, en estuarios en general el viento no es una fuente importante de energía para el sistema.
- Efecto de la marea: La marea genera mezcla a través diferentes mecanismos. Por una parte, produce mezcla turbulenta debido a la interacción con el fondo del canal, mientras que por otra parte existe generación de corrientes por efecto de la interacción con la batimetría, distinguiéndose tres casos: la dispersión producida por efectos de corte por la oscilación de la marea; la circulación residual, que en la mayoría de los estuarios se genera por la batimetría irregular mientras que en estuarios amplios puede ser generada por el efecto de coriolis¹; y el efecto de la marea en zonas de aguas muertas.
- Efecto del río: El aporte de agua dulce, de menor densidad que el agua marina, provee un déficit de energía potencial al sistema definido por el estuario, produciendo corrientes gravitacionales o baroclínicas, que se originan por la tendencia natural de las isohalinas a la horizontalidad.

Dependiendo de la magnitud del caudal de agua dulce afluente, de las condiciones de marea y de la morfología del cauce, un estuario puede presentar diferentes niveles de mezcla o lo que es equivalente, grados de estratificación. En este sentido es posible identificar condiciones de estratificación fuerte, y de mezcla parcial o completa. El grado de estratificación se relaciona con la capacidad del estuario para mezclar sus aguas, por lo que está ligado al caudal de

¹ Aceleración perpendicular al movimiento de un cuerpo debida a la rotación de la Tierra.



dilución. De este modo, un estuario fuertemente estratificado tendrá menor capacidad de mezcla que uno bien mezclado, por lo que tiene asociado un caudal de dilución menor. Sin embargo, debido a la variabilidad del caudal de agua dulce afluente y de las condiciones de marea, un mismo estuario puede presentar diferentes grados de estratificación dependiendo de la fecha. Es por ello que se desarrolla una metodología que da cuenta de dicha variabilidad, al incorporar información hidrológica en el análisis.

Cabe mencionar que para modelar los procesos de mezcla en estuarios es fundamental conocer su grado de estratificación, de modo de poder determinar qué modelos numéricos utilizar. En este sentido se proponen modelos para condiciones de mezcla completa y parcial y para condiciones de alta estratificación. A continuación se muestran las características de cada tipo de estratificación.

- Estuarios fuertemente estratificados: La columna de agua se encuentra dividida en dos capas, las que presentan muy baja mezcla entre sí. La intrusión salina se da por medio del desarrollo de una cuña salina, cuya longitud depende en gran medida del caudal del río. Estos estuarios se caracterizan por ser angostos, además de tener amplitudes de marea bajas y afluentes de agua dulce relativamente altos. La cuña salina avanza hacia aguas arriba debido a la diferencia de densidad con su entorno, mientras que el río lo hace en dirección al océano, lo que genera que entre ambos se produzcan esfuerzos de corte que favorecen la mezcla. Sin embargo, debido a la baja velocidad de desplazamiento de la cuña y la gran diferencia entre las densidades de ambas capas, la mezcla es más bien baja. La cuña salina tiene un alto tiempo de retención debido a su lento movimiento y puede provocar que masas de sal queden atrapadas en depresiones del río, además de favorecer el fenómeno de sedimentación. En la Figura 3.1 se muestra una representación esquemática de este tipo de estuarios.

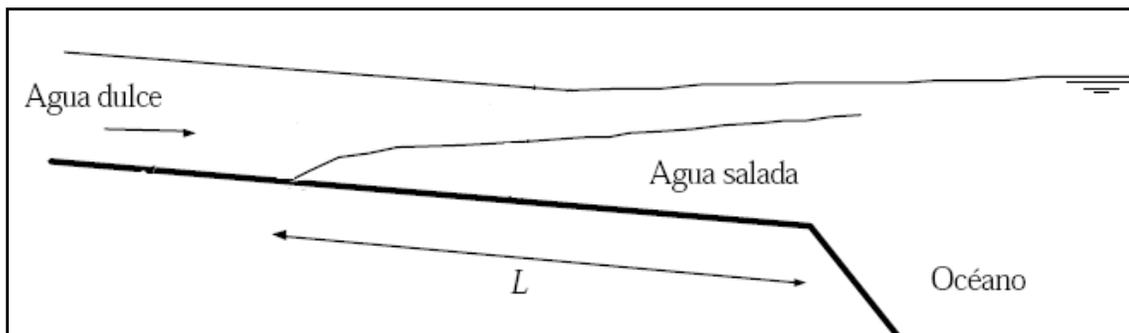


FIGURA 3.1: ESQUEMA DE ESTUARIO FUERTEMENTE ESTRATIFICADO. NIÑO Y TAMBURRINO (2002).

- Estuarios parcialmente mezclados: En este tipo de estuarios, las condiciones de mezcla producidas por el mayor efecto de la marea, generan que la salinidad de las capas

superiores sea mayor que para el caso de cuña salina, presentando el estuario una estratificación débil. Las isohalinas se presentan inclinadas hacia el océano, lo que genera una corriente conocida como circulación baroclínica, en la que las aguas superficiales tienden a moverse en dirección al fondo y hacia el océano, mientras que las del fondo suben y se mueven en dirección contraria, tal como se muestra en la Figura 3.2. Estos estuarios tienen en general un caudal afluente considerablemente menor que el asociado a estuarios fuertemente estratificados.

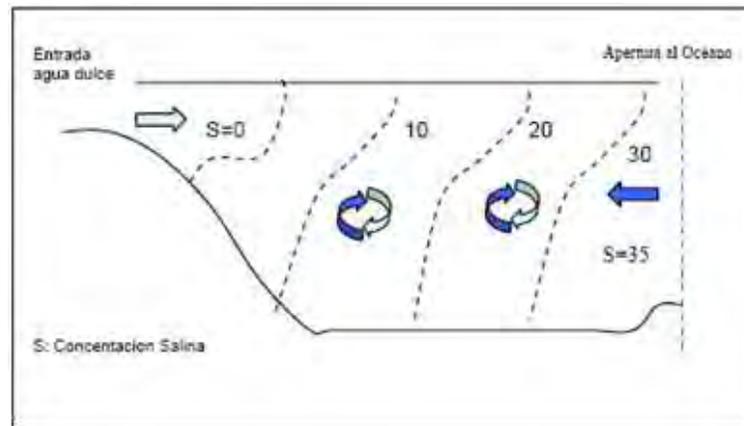


FIGURA 3.2: ESQUEMA DE ESTUARIO PARCIALMENTE MEZCLADO. BUSTOS (2007)

- Estuarios bien mezclados: Se dan en ríos con caudales muy bajos, por lo que la marea domina la mezcla en el estuario. Las isohalinas son verticales y aumentan a medida que se acercan al océano. Este tipo de estuario se encuentra generalmente en regiones con amplitudes de marea mayores a 2 m. Un esquema se presenta en la Figura 3.3.

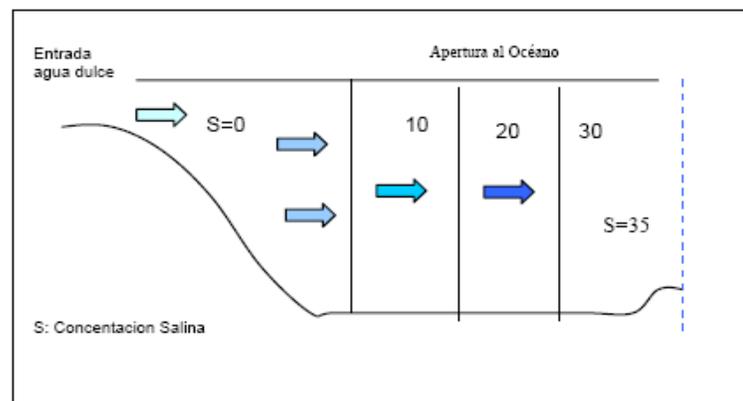


FIGURA 3.3: ESQUEMA DE ESTUARIO BIEN MEZCLADO. BUSTOS (2007).



3.2.4. GEOMORFOLOGÍA

Así como es posible identificar tipos de estuarios dependiendo de la estratificación, también es posible clasificarlos dependiendo de la morfología del cauce. Atendiendo a esta característica es posible identificar cuatro tipos de estuarios (Martin and McCutcheon, 1999):

- Valle inundado: Normalmente son amplios y presentan bajas profundidades, con pendientes de fondo que varían en forma moderada, incrementándose la profundidad en forma uniforme en dirección a la boca del estuario y existiendo amplias áreas de depósitos sedimentarios.
- De barrera: Corresponden a estuarios cerrados por la existencia de una barra de arena en la boca, a través de la cual uno o más canales angostos generan el intercambio con el mar. Normalmente presentan bajas profundidades. Se pueden considerar inestables, ya que están sujetos a bruscos cambios en su configuración. En la vertical están bien mezclados y tienen mucha influencia del viento. Debido a la evaporación y a la limitada mezcla entre las aguas, normalmente presentan alta salinidad. Dada la baja tasa de renovación de sus aguas, se consideran muy sensibles desde el punto de vista ambiental, pudiendo ocurrir acumulación de contaminantes y nutrientes en sus aguas y sedimentos.
- Fiordos: Se encuentran en zonas de latitud alta (Gang Ji, 2007). Normalmente son largos y estrechos, con profundidades superiores a los 200 m. Típicamente presentan fuerte estratificación y en la boca existen pequeñas gradas (sills) que limitan la mezcla de las aguas más profundas. Normalmente son formados por glaciación, encontrándose rodeados por montañas que nacen bajo el nivel del mar.
- Otro tipo de estuario no incluido en los 3 anteriores son aquellos generados por actividades tectónicas, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierras o bien fallas geológicas. Es posible encontrar este tipo de estuarios en las regiones de la Araucanía, de los Ríos y de los Lagos, debido principalmente a la ocurrencia del terremoto del 1960.

3.3. MODELOS NUMÉRICOS

Para aplicar la metodología que se desarrolla en el presente estudio es necesario modelar el escurrimiento a lo largo del estuario, además de sus procesos de mezcla, con el objetivo de cuantificar la capacidad de dilución, obteniendo como resultado el caudal de dilución según como está definido en el DS N°90/2000. En este sentido se entregan una serie de fórmulas y modelos numéricos que permiten llevar a cabo lo anterior. Cabe mencionar que la información



requerida para aplicar los modelos proviene de mediciones en terreno y de estadística hidrológica.

3.3.1. MODELO HIDRÁULICO IMPERMANENTE (ECUACIONES DE SAINT-VENANT)

Se dice que el flujo en un estuario es impermanente debido a que su velocidad puede experimentar grandes variaciones temporales debido al efecto de la marea, en periodos de tiempo considerablemente menores que los asociados a cambios hidrológicos. El efecto de marea se refleja además en variaciones de la cota de la superficie libre a lo largo del estuario. Una manera usual de modelar escurrimientos impermanentes en cuerpos de agua fluviales es mediante las ecuaciones de Saint-Venant, que se basan en la aplicación de los principios de conservación de masa y de momentum. La relación unidimensional que sale de la aplicación del principio de conservación de masa corresponde a la Ecuación (3.3), mientras que la que sale del principio de conservación de momentum corresponde a la Ecuación (3.4), considerando la ley friccional de Manning.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.3)$$

Donde A corresponde al área de escurrimiento, Q al caudal total y q a un posible caudal lateral.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -g \cdot A \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} - g \cdot \frac{n^2 \cdot Q \cdot |Q|}{A \cdot R_h^{4/3}} \quad (3.4)$$

Donde Q corresponde al caudal, A al área de escurrimiento, g a la aceleración de gravedad, Z a la cota de fondo, n al número de Manning y R_h al radio hidráulico.

Existen programas comerciales que permiten modelar escurrimientos en superficie libre, basados en la aplicación de las ecuaciones de Saint-Venant. Para el presente estudio fue utilizado el programa HEC-RAS, el cual se caracteriza por ser ampliamente utilizado en el área de la ingeniería hidráulica. En el Anexo II se entrega un manual de aplicación para la modelación de estuarios.

3.3.2. RELACIONES PARA EL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN

Para modelar los procesos de mezcla en estuarios es necesario conocer su grado de estratificación, concepto abordado anteriormente en el acápite 3.2.3. Para ello existen una serie



de indicadores, de los cuales se elige el *Número de Richardson de Estuarios*, por considerarse el más adecuado para los fines del estudio.

Fisher (1972) propone el *Número de Richardson de Estuarios* (N_R) definido por la Ecuación (3.5) que da cuenta de la razón entre la energía potencial aportada por el río y la cinética aportada por el mar.

$$N_R = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{Q}{W} \cdot \frac{1}{u_t^3} \begin{cases} \leq 0.08 & \text{Bien Mezclado} \\ \approx 0.4 & \text{Parcialmente Mezclado} \\ \geq 0.8 & \text{Altamente Estratificado} \end{cases} \quad (3.5)$$

Donde Q corresponde al caudal medio diario del río, W al ancho medio del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\Delta\rho/\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y dulce ($\Delta\rho/\rho=0.025$), y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca que se aproxima como 0.71 veces la máxima velocidad en la boca u_0 , obtenida de modelación en HEC-RAS.

3.3.3. MODELOS DE MEZCLA, CASO BIEN Y PARCIALMENTE MEZCLADO

Una vez modelada la hidráulica del estuario mediante las ecuaciones de Saint-Venant e identificado el nivel de estratificación del mismo, mediante el número de Richardson de Estuarios, es posible modelar los procesos de mezcla. En este sentido se presenta el modelo de advección-dispersión para el caso de estuario bien o parcialmente mezclado.

La Ecuación (3.6), conocida como la ecuación de advección-dispersión, describe la evolución espacial y temporal de la concentración de una sustancia disuelta en un flujo unidimensional e impermanente. Dada las características de la ecuación solo se encuentran soluciones analíticas para ciertas condiciones de borde, geometrías y escurrimientos, por lo que en general se resuelve numéricamente. En este sentido, el programa HEC-RAS incluye un módulo de calidad de aguas que utiliza la Ecuación (3.6) para modelar la concentración. Cabe mencionar que este modelo se puede aplicar solo cuando el estuario se encuentra bien o parcialmente mezclado. El caso de estuario estratificado se analiza en el acápite 3.3.4.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(x,t) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A(x)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(A(x) \cdot K_L(x,t) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3.6)$$

Donde C corresponde a la concentración de la sustancia analizada, $u(x,t)$ a la velocidad media de escurrimiento, $A(x)$ al área de escurrimiento y $K_L(x,t)$ al coeficiente de dispersión longitudinal, definido a continuación.



La mayor dificultad para aplicar la Ecuación (3.6) es conocer los coeficientes de dispersión K_L . Para estimar K_L se presentan las Ecuaciones (3.7) y (3.8), siendo la primera aplicable sólo en el tramo del estuario en que se tenga mediciones de salinidad, mientras que la segunda se dedujo para ríos por Fisher (1975) y se considera correcta para sectores del estuario que presenten muy baja influencia de marea.

$$K_L(x) = \frac{Q \cdot S(x)}{A(x) \cdot \partial S / \partial x} \quad (3.7)$$

Donde $K_L(x)$ corresponde al coeficiente de dispersión longitudinal para estuarios, Q al caudal del río, $S(x)$ a la salinidad medida en terreno y $A(x)$ al área de escurrimiento.

$$K_L = 0.01 \cdot u_* \cdot H \cdot \left(\frac{u}{u_*}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^2 \quad (3.8)$$

Donde K_L corresponde al coeficiente de dispersión longitudinal para ríos, H y B a la profundidad y anchos medios del río y u_* a la velocidad de corte en el fondo definida en la Ecuación (3.9).

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (3.9)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del fluido (1000 kg/m³ para agua) y τ_0 al esfuerzo de corte en el fondo, que se puede estimar por la Ecuación (3.10) que se deduce a partir de la ley de resistencia de Manning.

$$\tau_0 = \frac{g \cdot n^2}{R_h^{1/3}} \cdot \rho \cdot u^2 \quad (3.10)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del fluido, g a la aceleración de gravedad, n al número de Manning, u a la velocidad media de escurrimiento y R_h al radio hidráulico.

Es necesario mencionar que los coeficientes de dispersión obtenidos a partir de la aplicación de la Ecuación (3.7) a mediciones de salinidad de cierta campaña están asociados al caudal del río de dicha campaña y a su estado de mareas, por lo que si se desean determinar coeficientes de dispersión para un caudal diferente es necesario interpolar o extrapolar a partir de información de dos o más campañas, teniendo cuidado en considerar el estado de mareas pertinente. Por otro lado cabe mencionar que HEC-RAS ofrece la opción de computar



automáticamente los coeficientes de dispersión, aplicando la Ecuación (3.8) a las condiciones de escurrimiento obtenidas del modelo hidráulico.

3.3.4. MODELOS DE MEZCLA, CASO ESTRATIFICADO

Cuando se tiene alto grado de estratificación, los procesos de mezcla al interior de la cuña salina son poco eficientes, por lo que se propone considerar que dentro de la cuña salina no existe capacidad de mezcla. Lo anterior se traduce en imponer arbitrariamente un caudal de dilución nulo para el tramo del estuario en que se tenga alto grado de estratificación. Luego se hace necesario poder estimar la máxima extensión de la intrusión en forma de cuña salina, de modo de poder establecer en que sector del estuario se tendrá caudal de dilución nulo.

Para estimar dicha extensión se propone utilizar el modelo de Olivares (2000), el cual se explica en el Anexo I. Dicho modelo requiere como información de entrada la batimetría del estuario, el caudal de agua dulce y el nivel del mar.

3.3.5. ECUACIONES RELEVANTES

En esta sección se muestran ecuaciones importantes para la aplicación de los modelos de mezcla de contaminantes mostrados anteriormente.

COEFICIENTE DE INTERCAMBIO

Se sabe que cierta fracción del agua que sale del estuario en el periodo de vaciante puede regresar en el periodo de llenante, devolviéndose de este modo parte de los contaminantes provenientes del estuario. Dicha fracción depende de los procesos de mezcla de la zona litoral, los cuales se relacionan con las corrientes marinas costeras, el oleaje, la marea y las características de la descarga del estuario. Es necesario conocer dicha fracción para poder modelar correctamente cualquier proceso de mezcla al interior de un estuario.

Utilizando a la sal proveniente del mar como un trazador natural es posible estimar qué parte del caudal de la llenante corresponde a agua renovada proveniente exclusivamente del océano. En este sentido se entrega la Ecuación (3.11) propuesta por Fisher et al. (1979).

$$R = \frac{S_{Llenante} - S_{Vaciante}}{S_{Océano} - S_{Vaciante}} \quad (3.11)$$

Donde R corresponde a la fracción de agua nueva que entra al estuario, $S_{Océano}$ a la salinidad del océano obtenida a partir de mediciones de conductividad (generalmente 35 g/l) y $S_{Llenante}$ y



$S_{Vaciante}$ a las salinidades medias de los periodos de llenante y vaciante obtenidas de mediciones en terreno en la boca del estuario.

El caudal de agua renovada se obtiene a partir de la Ecuación (3.12).

$$Q_O = R \cdot Q_{Llenante} \quad (3.12)$$

Donde Q_O corresponde al caudal de agua renovada de la llenante, R al coeficiente de intercambio y $Q_{Llenante}$ al caudal de la llenante, el cual se obtiene de la modelación de HEC-RAS.

A partir de las relaciones anteriores se concluye que la fracción del caudal de la llenante que corresponde a agua proveniente del estuario queda dada por la Ecuación (3.13). Por otro lado, si al interior del estuario existe una descarga de cierta sustancia conservativa, cuya única fuente es dicha descarga, la concentración con que ésta es devuelta al estuario se puede estimar utilizando la Ecuación (3.14).

$$Q_E = (1 - R) \cdot Q_{Llenante} \quad (3.13)$$

Donde Q_E corresponde al caudal de agua de la llenante que corresponde a agua estuarina, R al coeficiente de intercambio y $Q_{Llenante}$ al caudal de la llenante, el cual se obtiene de la modelación de HEC-RAS.

$$C_{Llenante} = (1 - R) \cdot \frac{Q_{Descarga}}{Q_{Descarga} + Q_{Rio}} \cdot C_{Descarga} \quad (3.14)$$

Donde $C_{Llenante}$ corresponde a la concentración de la sustancia descargada asociada al caudal de la llenante, $Q_{Descarga}$ al caudal de la descarga de dicha sustancia, Q_{Rio} al caudal del río para la situación de análisis y $C_{Descarga}$ a la concentración de la descarga de dicha sustancia.

El intercambio de aguas entre el estuario y el océano está condicionado por diversos factores como lo son las corrientes litorales, el oleaje, la marea y el caudal efluente del estuario. Para efectos de la metodología desarrollada se considera la relación existente entre el coeficiente de intercambio R y el caudal del río y la marea. En este sentido, si se desea conocer el coeficiente de intercambio asociado a cierto caudal y a ciertas condiciones de marea, se propone interpolar o extrapolar el valor a partir de pares (R, Q_{Rio}) que se hayan medido en terreno para la condición de marea deseada.



EXCURSIÓN

La excursión se define como la distancia horizontal que viaja un elemento de agua durante un periodo completo de marea, es decir la suma de la distancia que recorre hacia aguas arriba durante la llenante y la que recorre de regreso durante la vaciante. La Ecuación (3.15) sirve para estimar la excursión en la boca del estuario.

$$E_0 = \frac{u_0 \cdot T}{\pi} \quad (3.15)$$

Donde E_0 corresponde a la excursión en la boca del estuario, T al periodo de marea¹ y u_0 amplitud de la velocidad en la boca, obtenida de modelación en HEC-RAS.

¹ Periodo de marea corresponde a la diferencia de tiempo entre pleamares (o bien bajamares) consecutivas. Se obtiene directamente de la información del nivel del mar medida en terreno.



CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1. INFORMACIÓN GENERAL

En el presente capítulo se entrega la metodología desarrollada para determinar los límites del estuario y el caudal de dilución a lo largo de su extensión. Para obtener el caudal de dilución en zonas estuarinas se propone una metodología que combina información hidrológica y de mediciones en terreno con modelación numérica. Básicamente se propone subdividir el estuario estudiado en zonas definidas en función de su capacidad para diluir contaminantes. Un esquema de la subdivisión se presenta en la Figura 4.1.

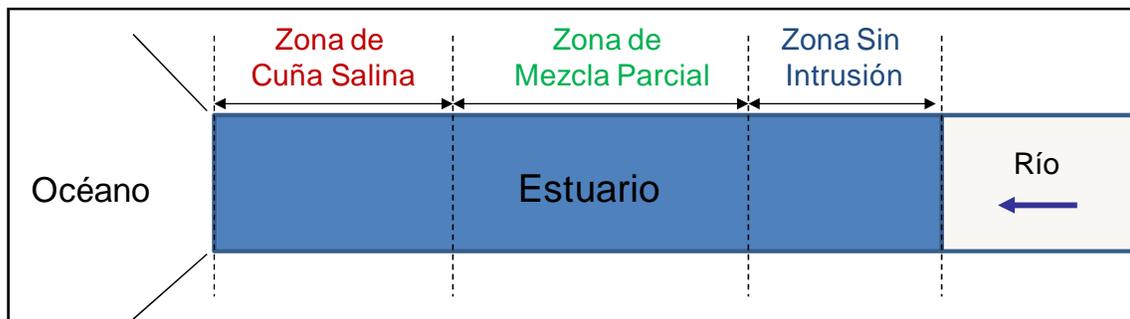


FIGURA 4.1: ESQUEMA DE LA SUBDIVISIÓN DEL ESTUARIO.

Para cada una de las zonas se propone una metodología para estimar el caudal de dilución. El criterio adoptado para la subdivisión se basa principalmente en la información sobre los procesos de mezcla en estuarios entregada en la revisión de antecedentes, específicamente en el acápite 3.2.3. A continuación se presenta una caracterización de las zonas en que se subdividió el estuario.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE CUÑA SALINA

La baja capacidad de mezcla existente al interior de la cuña salina obliga a tomar la decisión de considerar un caudal de dilución nulo para esta zona. La extensión de la intrusión en forma de cuña salina depende principalmente de la morfología del cauce, del caudal de agua dulce afluente y del nivel del mar. Para obtener dicha extensión se propone utilizar el modelo de Olivares (2000) incluido en el Anexo I.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Debido a la variación del nivel del mar, el caudal de esta zona fluctúa en torno al caudal del río, pudiéndose observar incluso flujo desde el océano en ciertos momentos del día. El caudal



adicional proveniente desde el océano puede aumentar la capacidad de mezcla en el estuario, por lo que es posible tener un caudal de dilución mayor al del río.

Dado que la estratificación en esta zona es considerablemente menor que la observada en la *Zona de Cuña Salina*, se considera que los procesos de mezcla son lo suficientemente eficientes como para suponer válido un modelo de mezcla completa en la transversal, por lo que es posible ocupar el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS, que se discute en el Anexo II.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Promediado sobre la marea el caudal disponible para diluir en esta zona es el mismo que el del río, ya que no existe aporte de agua desde el océano. Sin embargo, durante el día existen momentos en los que el caudal disminuye por efecto de la variación del nivel del mar, alcanzándose valores inferiores al caudal del río. Se considera válido un supuesto de mezcla completa en la transversal, por lo que es posible ocupar el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS.

4.1.1. ESTRUCTURA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Debido a la complejidad de los procesos físicos involucrados en la mezcla de contaminantes en estuarios, es necesario recurrir a modelación numérica para obtener el caudal de dilución. En este sentido se utilizan modelos numéricos para definir la batimetría del estuario, una zonificación del mismo y para obtener el caudal de dilución en cada una de las zonas definidas.

Antes de aplicar la metodología es necesario recopilar la información requerida por los modelos utilizados. Esto implica la realización de campañas de terreno y el análisis de información hidrológica en estaciones fluviométricas cercanas a la desembocadura del cauce analizado. A modo de introducción se muestran las etapas que conforman la metodología desarrollada. El detalle de cada etapa se incluye en el acápite 4.2.

1. Definir la máxima extensión del estuario, la cual depende mayormente de la batimetría y del nivel del mar.
2. Determinar qué tipo de estratificación es posible observar en el estuario durante el año, dada la variabilidad del caudal del río, reflejada en la estadística hidrológica. De esta etapa se obtiene el caudal límite por sobre el cual la intrusión comienza a ser en forma de cuña salina. Para caudales superiores a dicho límite la intrusión será en forma de cuña salina, mientras que para valores inferiores se tendrá mezcla parcial. Es necesario



considerar condiciones de marea de sicigia, dado que implican la máxima extensión de la intrusión salina. En el caso de que el caudal límite sea menor al caudal con probabilidad de excedencia del 95%, se considerará a éste como el nuevo caudal límite.

3. Utilizando el caudal límite obtenido anteriormente se determina la extensión de la intrusión en forma de cuña salina, la cual define lo que se denomina *Zona de Cuña Salina* en la Figura 4.1. Para determinar dicha extensión se utiliza el modelo de Olivares (2000), descrito en el Anexo I. Dado que los procesos de mezcla al interior de la cuña salina son poco eficientes, se impone arbitrariamente un caudal de dilución nulo para esta zona. Luego, si el interesado en descargar se ubica en esta zona, debe considerar un caudal de dilución nulo, y dar por terminado el proceso de obtención del caudal de dilución. En caso contrario debe continuar con los siguientes pasos.
4. Utilizando el caudal con probabilidad de excedencia del 95% se determina la extensión de la intrusión en forma de mezcla parcial, ocupando el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS para condición de marea de sicigia, de modo de obtener la máxima extensión posible. La extensión obtenida es siempre mayor a la longitud de la intrusión en forma de cuña salina. El tramo comprendido entre el límite superior de la *Zona de Cuña Salina* y la extensión obtenida con HEC-RAS se denomina *Zona de Mezcla Parcial* en la Figura 4.1.
5. Si el interesado en descargar se ubica dentro de la *Zona de Mezcla Parcial*, debe utilizar el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS para obtener el caudal de dilución del lugar de descarga, considerando nuevamente como caudal afluente el de probabilidad de excedencia del 95%, pero esta vez condiciones de marea de cuadratura, las cuales implican la mínima capacidad de mezcla posible.
6. Si el interesado en descargar no se ubica en la *Zona de Cuña Salina* ni en la *Zona de Mezcla Parcial*, se encuentra necesariamente en el tramo final denominado *Zona Sin Intrusión*, indicado en la Figura 4.1. Este tramo del estuario se ve afectado por la marea, pero que no recibe aporte desde océano. Para obtener el caudal de dilución asociado a esta zona se ocupa el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS, considerando un caudal con probabilidad de excedencia del 95% y condición de marea de sicigia.

Las etapas mencionadas son descritas con mayor detalle en el acápite 4.2.



4.1.2. ESTUDIO DE TERRENO

Para utilizar los modelos numéricos es necesario conocer cierta información de terreno para fechas que se consideran críticas para los procesos de mezcla. En este sentido se requiere conocer:

- Batimetría del estuario.
- Perfiles transversales de salinidad a lo largo del estuario.
- Variación del nivel del mar en la boca del estuario.
- Variación de la salinidad en la boca del estuario.
- Caudal de agua dulce de los afluentes al estuario.

Las fechas de las campañas de terreno dependen del comportamiento del caudal afluente a lo largo del año y de la variación del nivel del mar en la boca del estuario. En este sentido se propone realizar mediciones para condiciones de marea de sicigia y de cuadratura y para caudales bajos del río, cercanos al caudal con probabilidad de excedencia del 95%. Como parte de la metodología desarrollada se considera necesario llevar a cabo cuatro campañas de medición, dos de las cuales se deben realizar en el mes con menor caudal medio mensual del año y las otras dos en el segundo mes con menor caudal medio mensual. Por otro lado, dentro de cada mes se debe realizar una campaña para condiciones de marea de sicigia y otra con marea de cuadratura.

El detalle de la metodología de medición se encuentra en el acápite 4.4.

4.2. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN PARA OBTENER CAUDAL DE DILUCIÓN

En el presente capítulo se explica en detalle cada uno de los pasos necesarios para obtener el caudal de dilución en estuarios, mencionados anteriormente en el acápite 4.1.1, listados a continuación:

1. Determinación de la extensión del estuario.
2. Determinación del caudal límite para tener cuña salina.
3. Extensión de la cuña salina.
4. Extensión de la zona de mezcla parcial.
5. Caudal de dilución en la zona de mezcla parcial.



6. Caudal de dilución en la zona sin intrusión.

Al final del capítulo se muestra un esquema de la metodología desarrollada para obtener caudales de dilución en zonas estuarinas.

4.2.1. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO

En el acápite 3.2.1 fueron mencionados tres criterios para establecer el límite entre el estuario y el río, que dependen del alcance de la onda de marea, de la extensión de la intrusión salina o bien de la intrusión de los sedimentos marinos. Debido a que el caudal varía con el efecto de marea y a que el alcance de la onda de marea es mayor que el alcance de la salinidad y de los sedimentos marinos, se considera al criterio del efecto de marea como el más adecuado para definir la extensión del estuario. De este modo el límite entre el estuario y el río queda definido por el lugar en que el efecto de marea deja de percibirse.

Una manera sencilla de estimar el máximo alcance de la onda de marea, es considerar que éste queda definido por el lugar del río cuya cota de terreno es similar a la cota del nivel del mar para una pleamar de sicigia. En otras palabras, se debe trazar una horizontal desde el nivel máximo de la marea de sicigia hasta donde se intercepte la cota de fondo del río, como se muestra en el ejemplo de la Figura 4.2, para el que se obtiene una extensión de 13 km. La información de mareas y la batimetría deben ser medidas en terreno.

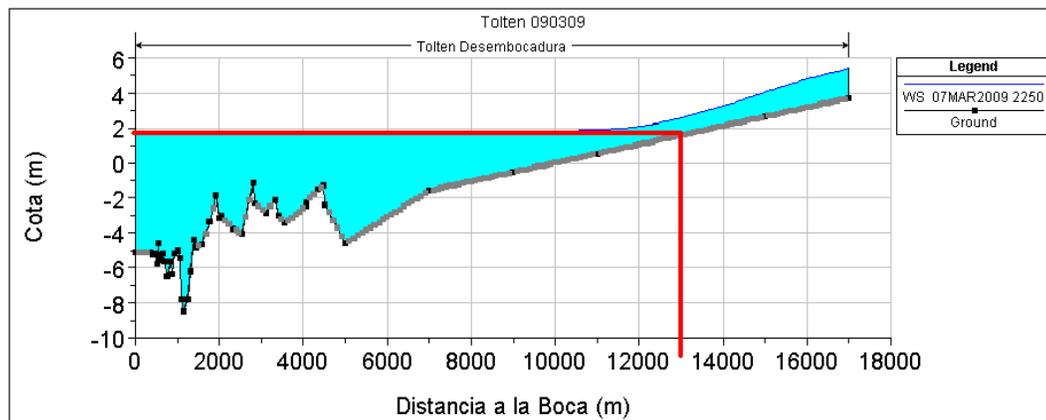


FIGURA 4.2. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

4.2.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA

Para determinar el caudal límite por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina se propone utilizar la Ecuación (4.1), que se dedujo a partir del Número de Richardson de Estuarios, descrito en el Capítulo 3.3.2.



$$Q_{Límite} = 0.8 \cdot \frac{W \cdot u_t^3}{\Delta\rho/\rho \cdot g} \quad (4.1)$$

Donde $Q_{Límite}$ corresponde al mínimo caudal del río para que exista cuña salina, W al ancho medio del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\Delta\rho/\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y del agua dulce ($\Delta\rho/\rho = 0.025$) y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca del estuario que se puede aproximar por $0.71 \cdot u_0$, donde u_0 corresponde a la máxima velocidad en la boca del estuario, obtenida de modelación en HEC-RAS.

Para obtener u_t se debe realizar una modelación del régimen impermanente de la hidráulica del sistema en HEC-RAS, considerando condiciones de marea de sicigia. Para ello se incluye una guía en el Anexo II. El caudal de agua dulce afluente a utilizar en la modelación es desconocido, debido a que es $Q_{Límite}$, por lo que se debe obtener iterando. Básicamente se debe correr el modelo HEC-RAS con un caudal afluente supuesto. HEC-RAS entregará, dentro de los resultados de la modelación, la máxima velocidad en la boca del estuario u_0 , valor que multiplicado por 0.71 corresponde a u_t . El valor de u_t obtenido se reemplaza en (4.1) para obtener $Q_{Límite}$. Luego se procede a correr nuevamente HEC-RAS, considerando esta vez a $Q_{Límite}$ como caudal afluente. HEC-RAS entregará un nuevo valor para u_0 , con el cual se obtiene un nuevo valor de u_t , que permitirá obtener un nuevo valor para $Q_{Límite}$, el cual a su vez permitirá correr nuevamente HEC-RAS. El proceso se repite hasta que $Q_{Límite}$ converja a un valor final.

En el caso de que el caudal límite sea menor al caudal con probabilidad de excedencia del 95%, se considerará a éste como el nuevo caudal límite.

4.2.2. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA

Utilizando el caudal límite obtenido, se procede a estimar la extensión de la intrusión en forma de cuña salina, mediante la aplicación del modelo de Olivares (2000), explicado en el Anexo I. Dicho modelo requiere como información de entrada la batimetría del estuario, el caudal límite obtenido anteriormente y el nivel medio del mar para condiciones de marea de sicigia. El modelo de Olivares fue programado en una planilla Excel, mediante un código VBA.

Cabe recordar que dada la baja capacidad de mezcla existente al interior de la cuña salina, se decide imponer arbitrariamente un caudal de dilución nulo en toda su extensión. Luego, si el interesado en descargar se ubica en esta zona, debe considerar un caudal de dilución nulo, y dar por terminado el proceso de obtención del caudal de dilución. En caso contrario debe continuar con los siguientes pasos.



4.2.3. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Considerando que la norma chilena de calidad de agua NCh409/1.Of.84 señala que la concentración máxima de cloruros en el agua potable debe ser inferior a 0.2 g/l, se define la salinidad límite para determinar la máxima extensión de la intrusión salina como 0.2 g/l. Es decir, se supondrá el fin de la intrusión salina cuando se tengan salinidades inferiores a 0.2 g/l.

Para determinar la extensión de la *Zona de Mezcla Parcial* se propone utilizar el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS para modelar la salinidad al interior del estuario y de este modo conocer el punto en que la salinidad disminuye por debajo de 0.2 g/l. Dicho módulo requiere tener modelada la hidráulica del estuario, lo cual corresponde a la etapa anterior. En el modelo de calidad de aguas se debe utilizar como caudal afluente el de probabilidad de excedencia del 95% y como salinidad del río 0.1 g/l y del océano 35 g/l. Sin embargo, dado que parte del caudal de la llenante corresponde a agua dulce proveniente del estuario, la salinidad proveniente del océano debe obtenerse a partir de la aplicación de la Ecuación (3.14). Además se debe considerar una marea típica de sicigia, de modo de obtener la máxima extensión de intrusión posible. Los coeficientes de dispersión utilizados deben obtenerse a partir de la aplicación de la Ecuación (3.7) a las mediciones de salinidad realizadas para marea de sicigia. En el Anexo II se incluye una guía para modelar procesos de mezcla en estuarios en HEC-RAS.

Cabe notar que si se tiene un caudal con probabilidad de excedencia del 95% mayor a $Q_{Límite}$, no se tendrá intrusión en forma de mezcla parcial, debido a que los altos caudales del río generarán siempre intrusión en forma de cuña salina.

4.2.4. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Si el interesado en descargar se ubica dentro de la *Zona de Mezcla Parcial*, debe obtener el caudal de dilución del lugar de descarga como se explica a continuación.

Para determinar el caudal de dilución en la *Zona de Mezcla Parcial* se debe utilizar el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS, pero considerando una descarga lateral de una sustancia contaminante ficticia. HEC-RAS permite incluir descargas laterales en cualquier punto del estuario, por lo que es posible modelar una descarga virtual de contaminante, caracterizada por una concentración y un caudal arbitrarios. En el modelo de calidad de aguas se debe utilizar como caudal afluente del río el de probabilidad de excedencia del 95% y condición de marea de cuadratura, que implican la menor capacidad de mezcla posible. Como condiciones de borde del contaminante se debe considerar concentración nula desde aguas arriba y cierta concentración de retorno desde aguas abajo. Dicha concentración de retorno se obtiene de la aplicación de la Ecuación (3.14) a las mediciones de salinidad realizadas en la boca del



estuario. Los coeficientes de dispersión utilizados deben obtenerse a partir de la Ecuación (3.7) en el tramo del río donde existan mediciones de salinidad, y con la Ecuación (3.8) en el tramo final del estuario, donde no existen mediciones de salinidad.

HEC-RAS entrega como resultado de la modelación la variación temporal de la concentración a lo largo del estuario. Utilizando la Ecuación (4.2) y considerando la máxima concentración entregada por HEC-RAS en el sector de la descarga y las características de la descarga virtual modelada, se obtiene el caudal de dilución del lugar en que se impuso la descarga virtual.

$$Q_{Dilución} = Q_{Descarga} \cdot \left(\frac{C_{Descarga}}{C_{Máx}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Donde $Q_{Dilución}$ corresponde al caudal de dilución del sector analizado, $Q_{Descarga}$ al caudal arbitrario de la descarga virtual modelada, $C_{Descarga}$ a la concentración arbitraria de la descarga virtual modelada y $C_{Máx}$ a la máxima concentración del contaminante entregada por HEC-RAS.

Cabe mencionar que como valores para la concentración y para el caudal de la descarga virtual incluida en HEC-RAS se recomienda utilizar aquellos asociados a la descarga que se requiere analizar proyectados por el interesado en descargar. Sin embargo, el valor del caudal de dilución entregado por la Ecuación (4.2) es independiente de los valores arbitrarios asignados a la descarga virtual, en la medida que ésta sea despreciable respecto al caudal del río.

4.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Si el interesado en descargar se ubica dentro de la *Zona Sin Intrusión*, debe obtener el caudal de dilución del lugar de descarga como se explica a continuación.

El proceso es análogo al de la obtención del caudal de dilución en la *Zona de Mezcla Parcial*, con la diferencia de que se debe considerar condiciones de marea de sicigia en vez de cuadratura. Cabe mencionar que el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS tiene la opción de calcular automáticamente el coeficiente de dispersión utilizando la Ecuación (3.7), lo cual se explica en el Anexo II.



4.3. RESUMEN

En la Figura 4.3 se presenta un esquema que resume la metodología definida.

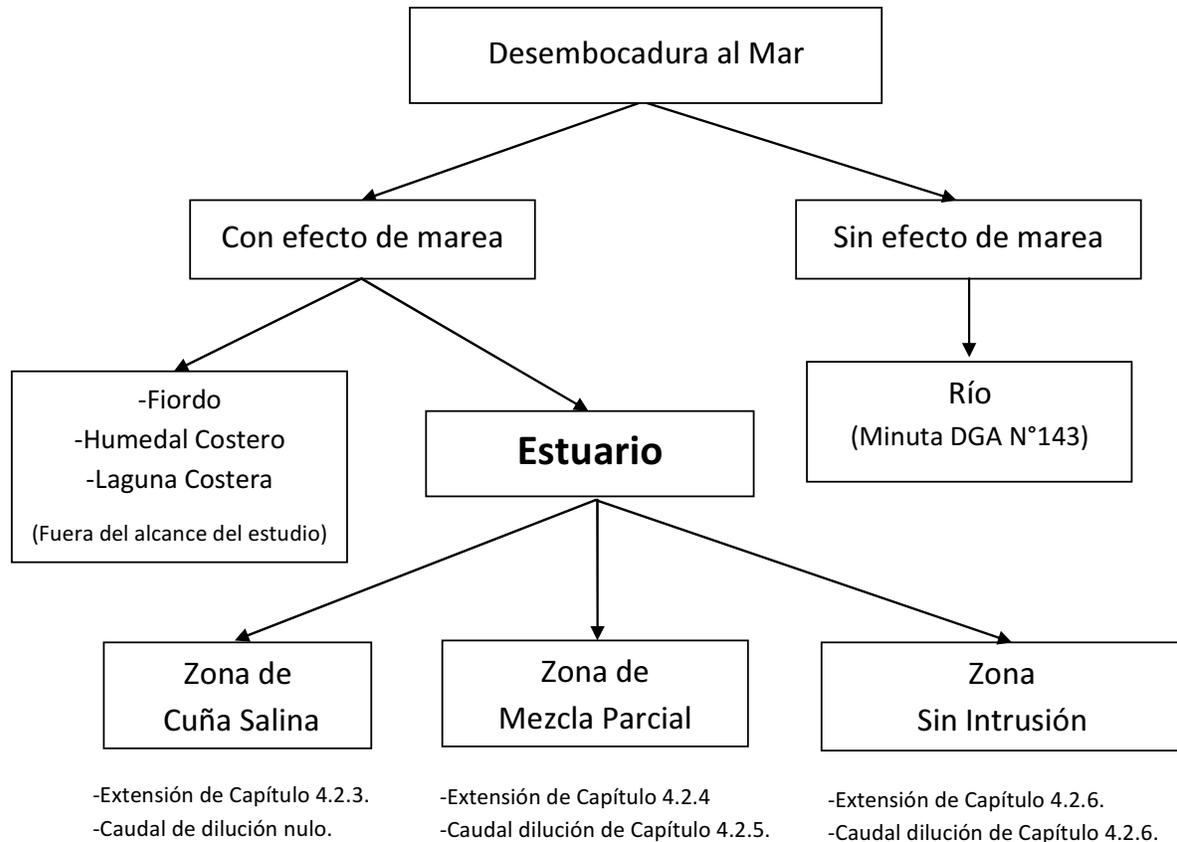


FIGURA 4.3: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EXTENSIÓN DEL ESTUARIO Y CAUDAL DE DILUCIÓN.

4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN TERRENO

Considerando las variables de entrada de los modelos numéricos se hace necesario medir perfiles transversales de profundidad y salinidad a lo largo del estuario, el caudal de agua dulce afluente y la variación del nivel del mar y de la salinidad en la boca del estuario.

Debido a la variabilidad temporal de los parámetros requeridos, se deben realizar las mediciones tanto durante el periodo de llenante como el de vaciante. A continuación se detalla la forma en que deben llevarse a cabo las mediciones.



4.4.1. PERFILES DE PROFUNDIDAD

Una manera sencilla de obtener la batimetría de un estuario es a través de mediciones de profundidad en secciones transversales a lo largo de éste. Para ello es necesario utilizar un sensor de profundidad, además de un GPS para conocer las coordenadas del punto de medición. La cantidad de mediciones en la transversal debe ser tal que la sección quede correctamente descrita. Se recomienda realizar mediciones en secciones separadas por un máximo de 50 m en la longitudinal, valor que puede variar dependiendo de las características del estuario. Las mediciones deben ser realizadas desde la boca del estuario, hasta donde se detecte variación de nivel debido al efecto de la marea, considerando mareas de sicigia.

Debido a que la profundidad está siempre referida al nivel de la superficie libre y a que dicho nivel varía en el tiempo producto del efecto de la onda de marea, es necesario corregir las mediciones de profundidad. Con ese fin se propone utilizar HEC-RAS, según las indicaciones del Anexo II.

4.4.2. PERFILES DE SALINIDAD

Para modelar procesos de mezcla en estuarios es necesario conocer la variación en la longitudinal de la salinidad y el grado de estratificación presente en la vertical. Ambos fenómenos dependen de las condiciones particulares de marea y caudal afluente al momento de medición.

Para realizar las mediciones de salinidad es necesario utilizar un sensor de conductividad, además de un GPS para conocer las coordenadas del punto de medición. En general lo que se desea conocer para cada sección transversal es la distribución de salinidad a lo ancho y alto. En consecuencia, para cada sección se debe medir la salinidad a diferentes profundidades y a diferentes distancias de la orilla. La cantidad de mediciones debe ser la adecuada como para poder estimar correctamente la salinidad media de la sección y la profundidad a la cual se tiene los mayores gradientes de concentración. Se establece que las mediciones en la vertical deben ser realizadas por lo menos cada 1 m, con un mínimo de cinco mediciones equiespaciadas. A lo ancho se establece que deben ser realizadas por lo menos cada 50 m, con un mínimo de tres mediciones. En la longitudinal deben realizarse perfiles por lo menos cada 100 m.

Se recomienda realizar las mediciones de salinidad en conjunto con las de batimetría.



4.4.3. VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO

Como se mencionó en el acápite 4.4.1, para obtener la batimetría del estuario es necesario corregir las mediciones de profundidad realizando una modelación en HEC-RAS. En este sentido, la variación del nivel del mar en la boca del estuario corresponde a una condición de borde del sistema, la cual se debe conocer si se desea modelar el estuario.

La medición del nivel del mar debe realizarse en el sector del estuario más cercano a la boca en el que se siga teniendo flujo unidireccional, es decir un comportamiento similar al de un canal. Su medición debe realizarse con la ayuda de una regleta, recordando registrar el lugar de medición mediante el uso de un GPS. Además de la variación del nivel durante el día de muestro, se debe tener información de los dos días anteriores. Dicha información debe ser medida en terreno.

4.4.4. SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

Para poder estimar el intercambio de contaminantes entre el estuario y el océano es necesario conocer la variación temporal de la salinidad en la boca, tanto en el periodo de llenante como en el de vaciante. Básicamente se utiliza sal como trazador, para dar cuenta de los procesos de mezcla de la zona litoral. La información obtenida es utilizada en la Ecuación (3.11) del acápite 3.3.5.

La salinidad debe medirse en el mismo lugar en que se registra la variación del nivel por efecto de la marea, es decir en el sector del estuario más cercano a la boca en el que se siga teniendo flujo unidireccional. Lo anterior debido a que ambas variables corresponden a condiciones de borde, la primera para modelos de mezcla de sustancias disueltas y la segunda para modelos hidráulicos. Debido a esto, la medición debe ser representativa de la salinidad media de la sección.

4.4.5. CAUDAL DEL RÍO

El caudal del río debe ser aforado el día de muestreo en una sección del cauce en que no se observe influencia de marea. El lugar exacto de aforo debe ser registrado con ayuda de un GPS.

Cabe recordar que para ciertas etapas de la metodología es necesario recurrir a estadísticas de caudales, por lo que es necesario tener información de estaciones fluviométricas cercanas a la desembocadura del cauce analizado.



CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE TERRENO

5.1. METODOLOGÍA GENERAL

Para complementar el análisis teórico se realizaron campañas de terreno que proporcionaron información útil para comprender la física del problema, además de permitir clasificar los estuarios estudiados y calibrar y validar los modelos propuestos. Dichas campañas se llevaron a cabo en tres estuarios de características hidrodinámicas notoriamente diferentes: río Toltén, río Lebu y estero Tongoy.

Para dar cuenta de la influencia de las principales forzantes de los procesos de mezcla se planificaron las campañas para condiciones de alto y bajo caudal, y para mareas de sicigia y de cuadratura. Cabe mencionar que la metodología desarrollada no requiere realizar mediciones para condición de alto caudal.

5.2. CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE ESTUARIOS

Con el objetivo de obtener información de terreno representativa de la diversidad de estuarios presentes en las costas de las zonas centro y sur del país, y considerando los diferentes grados de estratificación posibles de observar en zonas estuarinas, se propuso realizar campañas de medición en estuarios caracterizados por presentar mezcla completa o parcial en la vertical, o bien intrusión en forma de cuña salina. Por otro lado, para representar a los estuarios de la zona norte, se decidió escoger uno con bajo aporte de agua dulce.

En base a información de estudios realizados con anterioridad (Niño, 1999; Stuardo, 1989) se escogieron los estuarios de los ríos Toltén y Lebu y del estero Tongoy, ubicados en la Región de la Araucanía, Región del Bío Bío y Región de Coquimbo, respectivamente. Para cada uno de ellos se supuso encontrar el nivel de estratificación mostrado en la Tabla 5.1, dependiendo del caudal de agua dulce afluente. Dichos supuestos fueron verificados a partir de los resultados de las mediciones de salinidad, como se observa en la Figura 5.13, Figura 5.19 y Figura 5.24. Las mediciones de salinidad se adjuntan en el Anexo VI.

TABLA 5.1: NIVEL DE ESTRATIFICACIÓN ESPERADO PARA ESTUARIOS ESCOGIDOS.

Estuario	Escenario 1: Bajo Caudal Río	Escenario 2: Alto Caudal Río
Río Toltén	Cuña Salina	Sin Intrusión
Río Lebu	Parcialmente Mezclado	Cuña Salina
Esteros Tongoy	Bien Mezclado	



5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS RÍOS

5.3.1. RÍO TOLTÉN

El río Toltén se ubica en la Región de la Araucanía. Su origen se encuentra en el Lago Villarrica y se extiende por 120 km hasta su desembocadura en punta Nilhue (Aquambiente Ltda., 2006). El estuario del río Toltén se desarrolla en las cercanías del poblado de Nueva Toltén, encontrándose su desembocadura en Boca Toltén, coordenadas UTM: 653209E, 5653362S (Huso 18S), zona en la que el río presenta un ancho superior a los 500 m (DGA, 2004).

De acuerdo a la subdivisión territorial de las zonas hidrográficas en Chile (Aquambiente LTDA., 2006) el río Toltén se encuentra en la zona número 4, la que se caracteriza por tener ríos tranquilos con regulación lacustre.

En la Figura 5.1 se presenta la curva de variación estacional del río Toltén en la estación fluviométrica Teodoro Schmidt, la que se encuentra ubicada alrededor de 40 km de la desembocadura del Toltén, marcada en la Figura 5.2. De la figura se puede concluir un comportamiento pluvial del río en las cercanías de su estuario. Los mayores caudales ocurren entre junio y agosto, debido a las lluvias de invierno, mientras que el período de estiaje se presenta entre enero y abril.

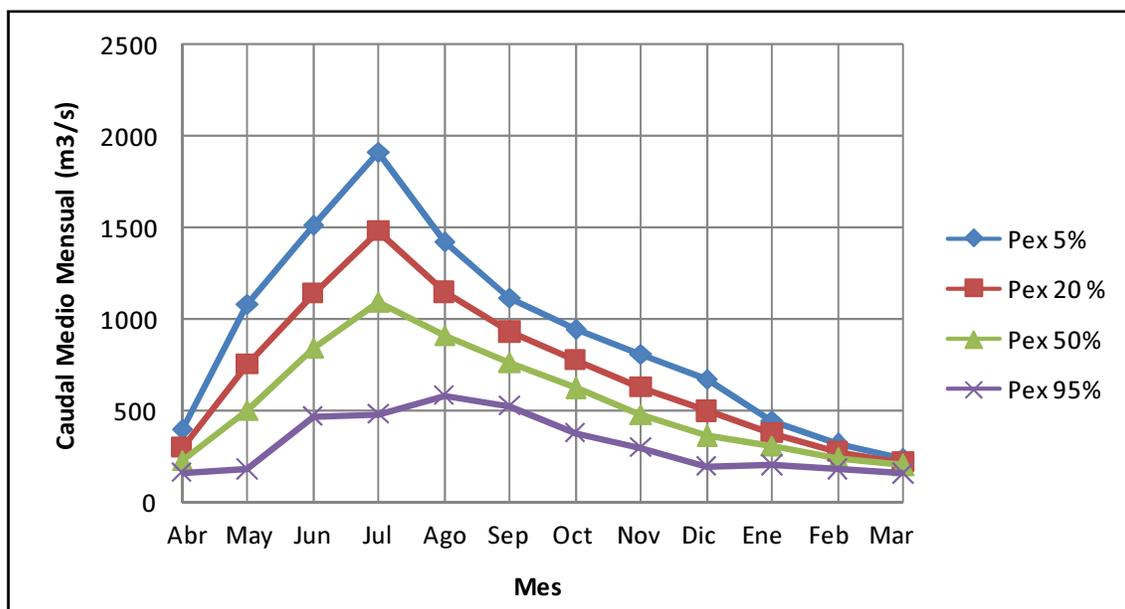


FIGURA 5.1: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.

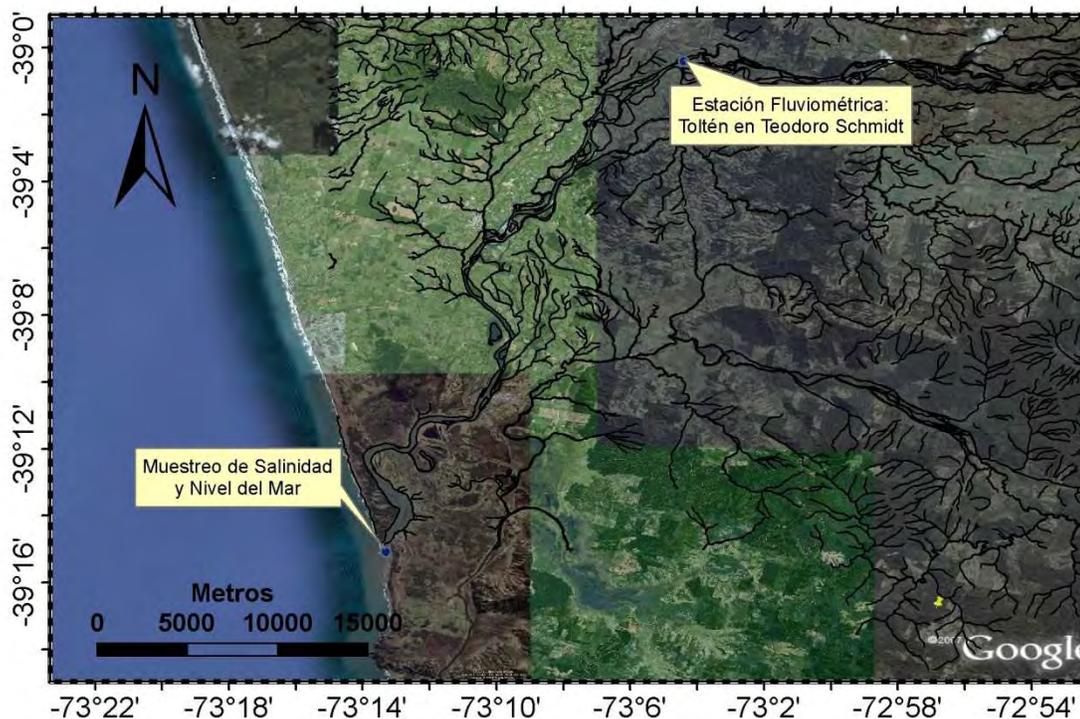


FIGURA 5.2: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.

La relación entre el caudal medio mensual máximo y el mínimo para un año de probabilidad de excedencia del 50% es superior a 5:1, la que aumenta para menores probabilidades de excedencia.

En la Figura 5.3 se muestra la curva de probabilidad de excedencia de caudales obtenida a partir de la información hidrológica dada por la estación fluviométrica de Teodoro Schmidt.

De acuerdo a observaciones de estudios anteriores (Stuardo, 1989), el río Toltén presentaría condiciones estuarinas solo fuera de su desembocadura para caudales altos e intrusión en forma de cuña salina para caudales de estiaje.

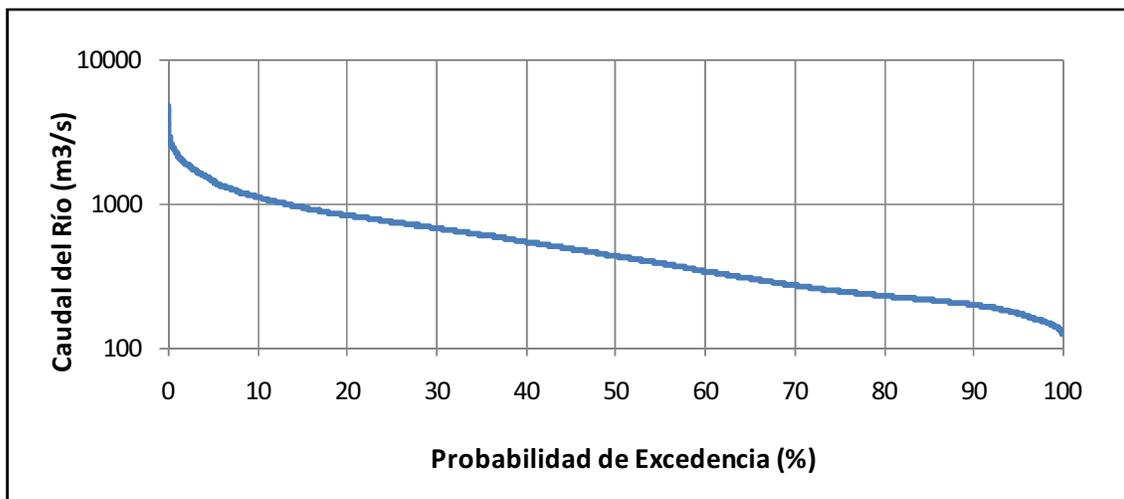


FIGURA 5.3: CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE CAUDAL RÍO TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.

5.3.2. RÍO LEBU

El río Lebu se encuentra en la Región del Bío Bío. Su origen se ubica en la Cordillera de Nahuelbuta, mientras que su desembocadura está en la ciudad de Lebu, específicamente en las coordenadas UTM 618049E, 5837964S (Huso 18S).

De acuerdo a datos obtenidos de la estación Lebu en Los Álamos entre los años 1966 y 1982, el río Lebu presenta un régimen pluvial, caracterizado por caudales máximos durante julio y mínimos entre diciembre y abril, lo cual se aprecia en la curva de variación estacional presentada en la Figura 5.4. La ubicación de dicha estación fluviométrica se muestra en la Figura 5.5. Durante el estiaje los caudales presentan valores medios mensuales inferiores a los $10 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en invierno son del orden de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (González, 1994).

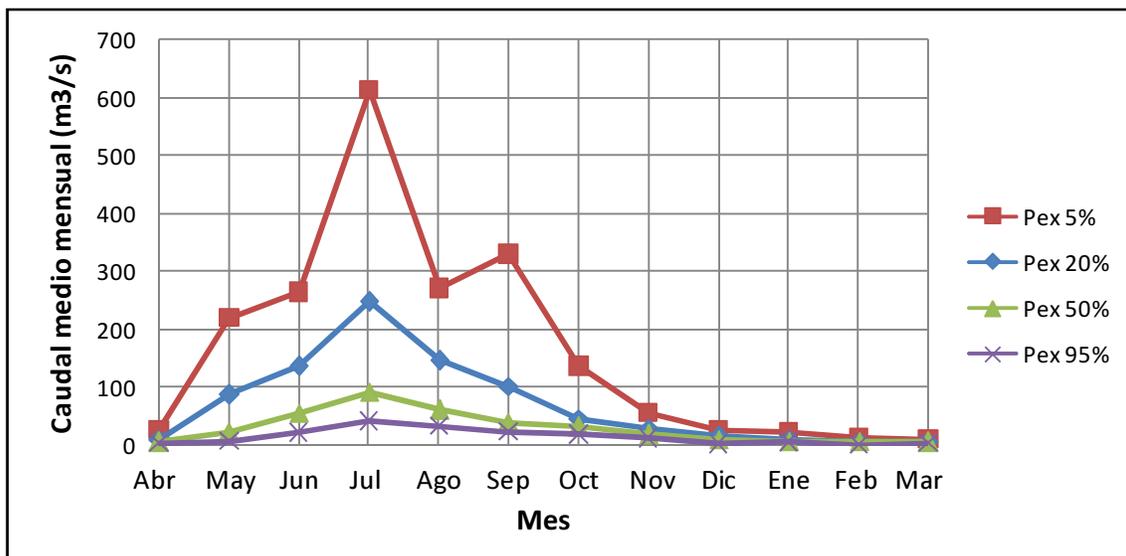


FIGURA 5.4: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO LEBU EN LOS ÁLAMOS.

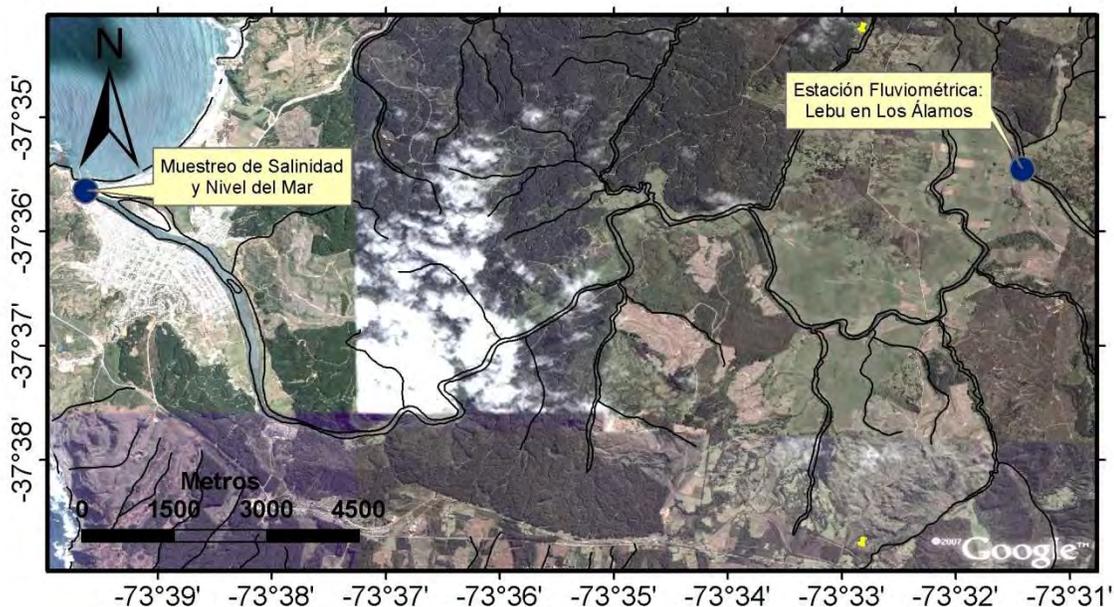


FIGURA 5.5: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA LEBU EN LOS ÁLAMOS.

En la Figura 5.6 se muestra la curva de probabilidad de excedencia de caudales obtenida a partir de información hidrológica de la estación fluviométrica de Los Álamos.

De acuerdo a mediciones realizadas en el estuario del río Lebu, en este existiría mezcla parcial o completa, dependiendo del caudal de agua dulce afluente (Niño, 1999; González, 1994).

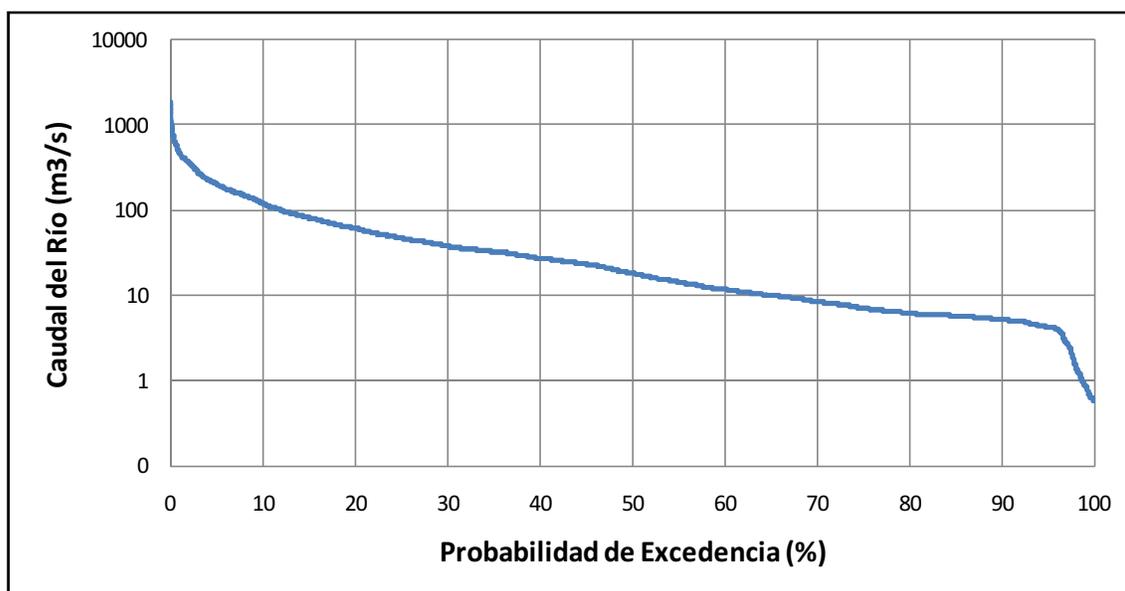


FIGURA 5.6: CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE CAUDAL RÍO LEBU EN LOS ÁLAMOS.

5.3.3. ESTERO TONGOY

El estero Tongoy está ubicado en la Región de Coquimbo. Su origen se ubica en la Cordillera de la Costa, mientras que su desembocadura se encuentra en la ciudad de Tongoy, específicamente en las coordenadas UTM 260060E, 6650513S (Huso 19S). Su principal fuente de agua dulce es de origen subterráneo durante la mayor parte del año.

Acorde a lo que muestra la imagen presentada en la Figura 5.7C, el estero se extendería una distancia de 3 km desde su desembocadura hacia aguas arriba. En base a una serie de fotografías satelitales tomadas para diferentes fechas, se puede asumir que dicha longitud se mantiene constante en el transcurso del año. Estimaciones del tiempo de concentración de la cuenca, en conjunto con información de precipitaciones amparan dicho supuesto.

Los bajos aportes de agua dulce que recibe el estero permiten suponer que gran parte del volumen de agua del estuario proviene del mar.

5.4. FECHAS DE MEDICIÓN

Debido a la variación temporal de las principales forzantes de los procesos de mezcla en estuarios, las fechas escogidas para realizar las campañas quedan determinadas por el estado de marea y la variación estacional del caudal afluente al estuario.

En este sentido se definen cuatro escenarios de medición, que corresponden a las diferentes combinaciones de las forzantes:



- Caudal alto y marea muerta:

Corresponde al caso de menor intrusión salina. Respecto a los otros escenarios, se espera que aumente el grado de estratificación del estuario, pudiéndose observar presencia de cuña salina. Para caudales afluentes muy altos puede que no se observe intrusión salina, produciéndose la mezcla de aguas costa afuera.

- Caudal bajo y marea viva:

Corresponde al caso de mayor intrusión salina. Respecto a los otros escenarios, se espera bajo nivel de estratificación del estuario, y por lo tanto bajo grado de estratificación. La longitud de la intrusión salina sería máxima.

- Caudal alto y marea viva.
- Caudal bajo y marea muerta.

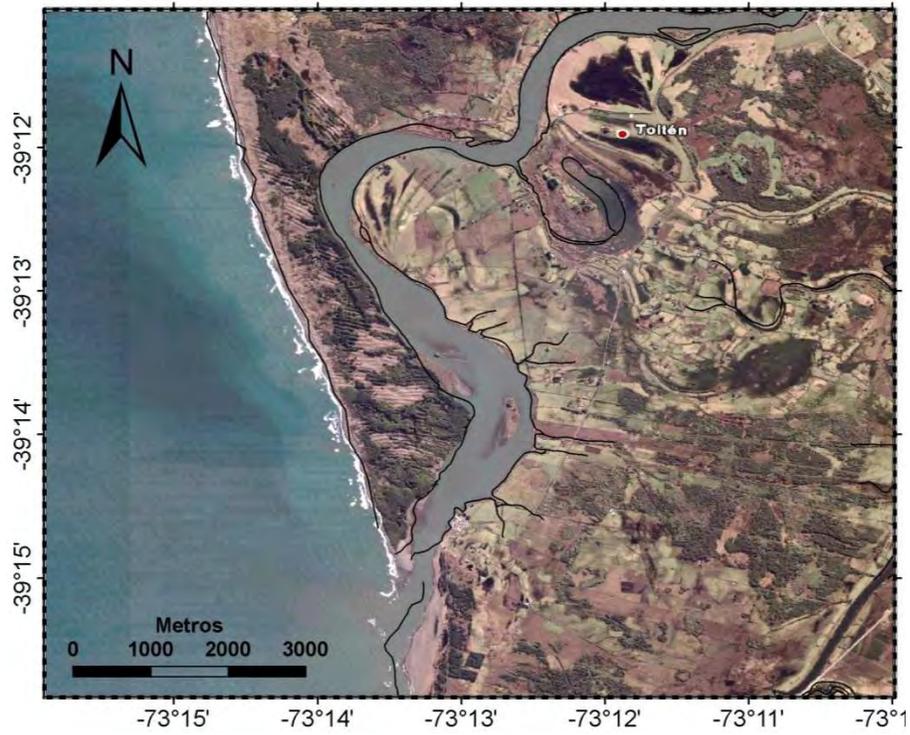
En total se realizaron seis campañas de terreno, cuyas fechas y lugares se detallan en la Tabla 5.2. Las fechas de medición se determinaron en base al calendario lunar, considerando que condiciones de marea de sicigia ocurren para luna llena/nueva y condiciones de marea de cuadratura para luna creciente/menguante. Además se consideró medir para caudales con probabilidad de excedencia del 95% para el escenario de bajo caudal y del 10% para los escenarios de alto caudal.

TABLA 5.2: FECHAS DE CAMPAÑAS DE TERRENO REALIZADAS.

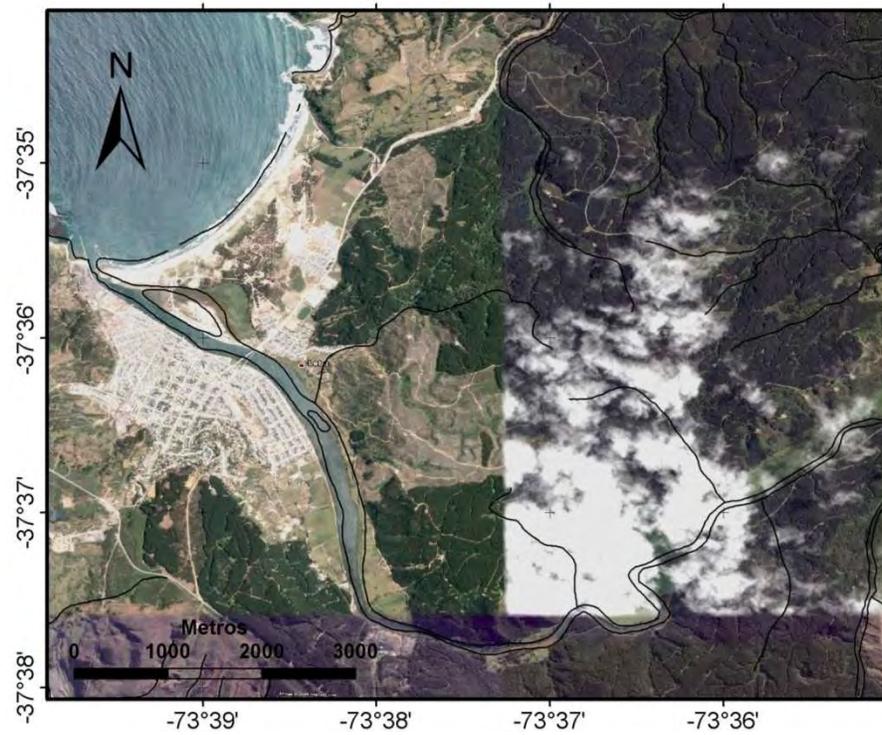
Estuario	Alto Caudal Marea Muerta	Bajo Caudal Marea Viva	Alto Caudal Marea Viva	Bajo Caudal Marea Muerta
Río Toltén	14 de Junio	9 de Marzo	19 de Junio	21 de Enero
Río Lebu	12 de Junio	11 de Marzo	22 de Junio	19 de Enero
Estero Tongoy	----	7 de Abril	7 de Julio	----

Cabe mencionar que dadas las características del estero Tongoy, se decidió realizar mediciones solo para mareas vivas, debido principalmente a la dificultad del mar para ingresar al estuario, dadas las cotas de fondo de su lecho.

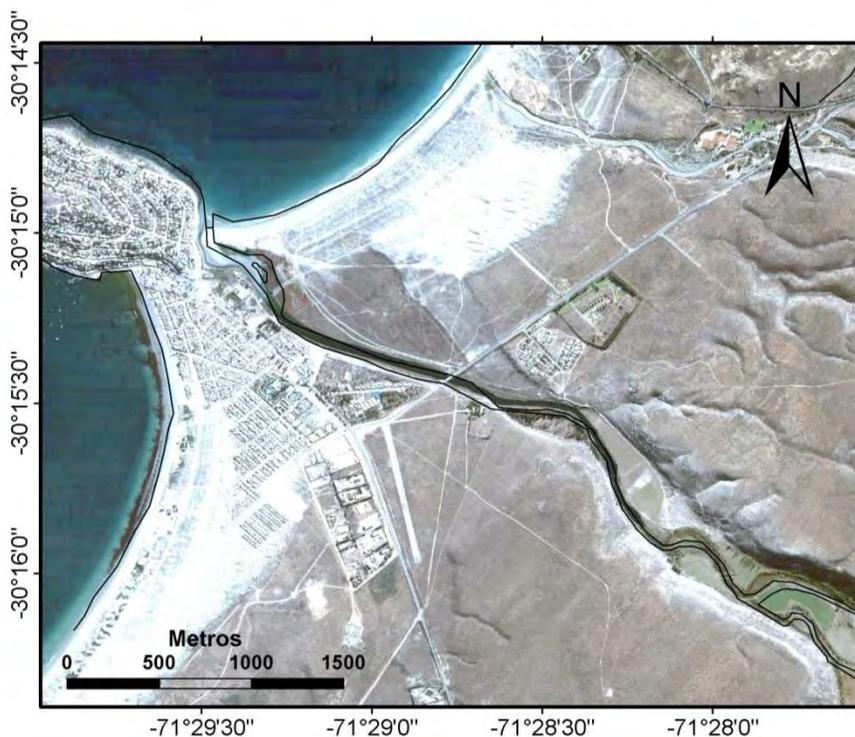
En la Figura 5.7 se muestran imágenes satelitales de las desembocaduras de los ríos estudiados.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 5.7: LUGARES DE ESTUDIO. (A) RÍO TOLTÉN, (B) RÍO LEBU Y (C) ESTERO TONGOY.

5.5. RESULTADOS DE CAMPAÑAS DE TERRENO

A continuación se muestran las mediciones obtenidas en terreno y los resultados de cálculos simples a partir de dicha información, como son los promedios temporales y espaciales de las variables medidas. Las mediciones de salinidad, profundidad y nivel del mar se adjuntan en el Anexo VI.

5.5.1. RÍO TOLTÉN

CAUDAL DEL RÍO

Los aforos del caudal del río Toltén fueron realizados por la oficina regional de la DGA de la ciudad de Temuco en el puente Peule ubicado a 17 km de la boca del estuario, en las coordenadas UTM: 658829E, 5665027S (Huso 18S). Los resultados se muestran en la Tabla 5.3. La Figura 5.8 muestra el lugar en que se realizaron los aforos del caudal y las mediciones del nivel del mar y de la salinidad en la boca del estuario.



Tabla 5.3: Caudal del río Toltén para los días de medición.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)
21 de Enero	187
9 de Marzo	186
14 de Junio	608
19 de Junio	1110

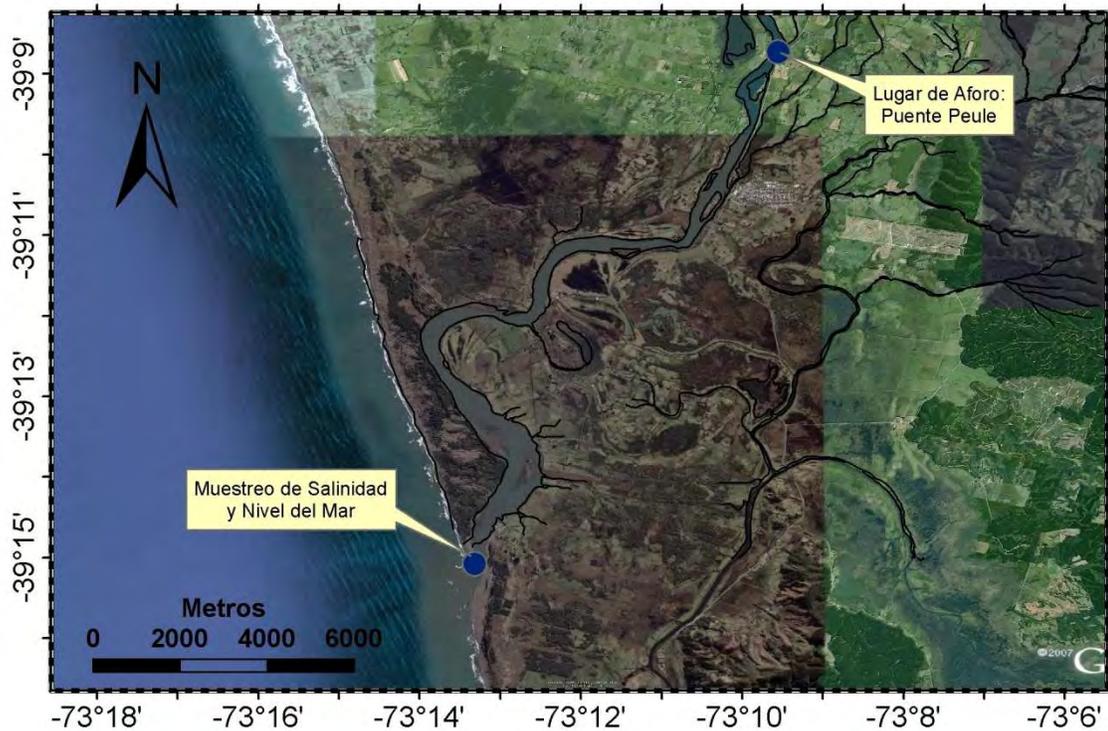


Figura 5.8: Ubicación del lugar de aforo y de medición de la salinidad y del nivel del mar en la boca. Río Toltén.

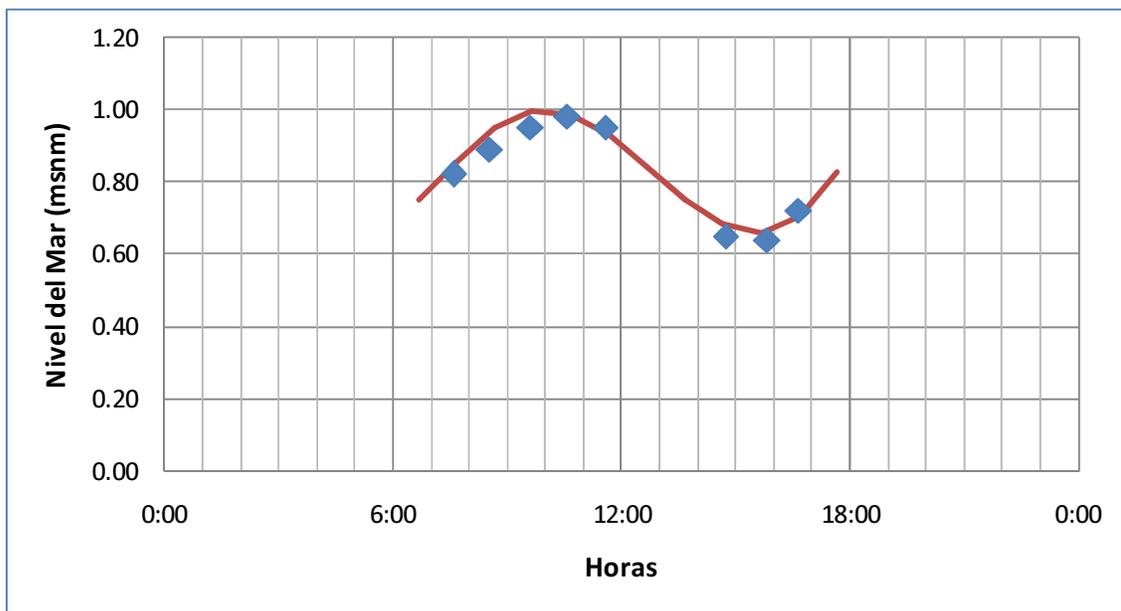
Las diferencias en los caudales existentes entre las campañas de verano y de invierno fueron adecuadas para el análisis de la hidrodinámica del sistema, pudiéndose observar grandes cambios en la estratificación del sistema entre campañas, acorde al comportamiento supuesto en la Tabla 5.1 para este estuario.

La similitud entre los caudales existentes en la primera y segunda campaña de terreno permitió atribuir las diferencias observadas en la intrusión salina exclusivamente al efecto de la marea, dado que en la primera campaña se midió con mareas muertas y en la segunda con mareas vivas.

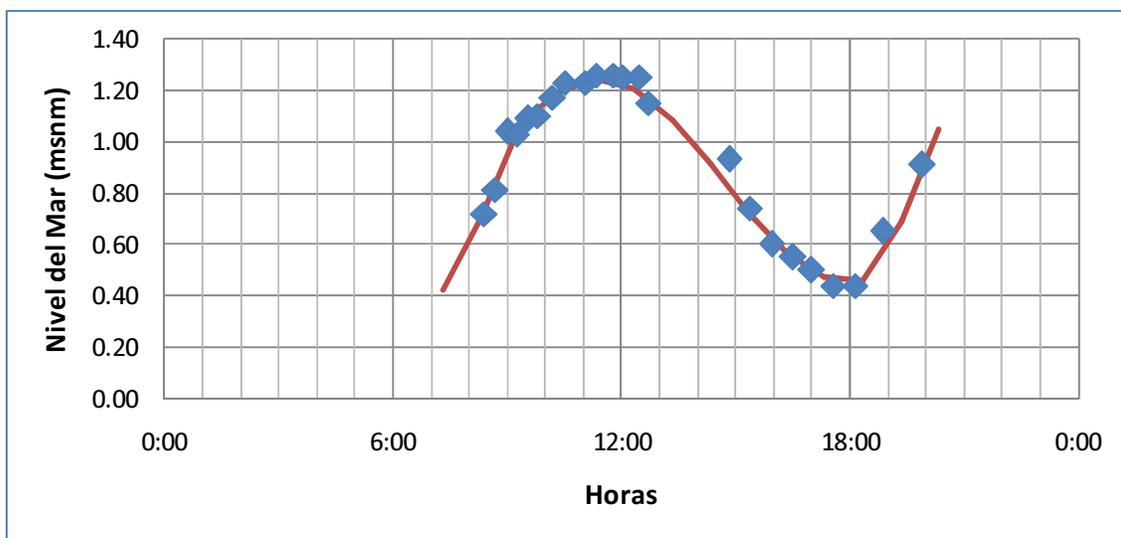


ESTADO DE MAREAS

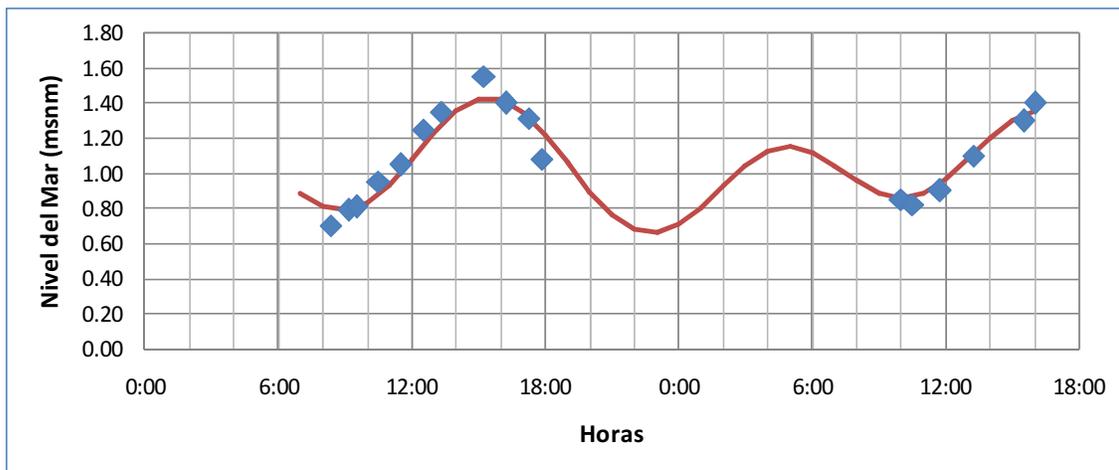
Las Figura 5.9A a la Figura 5.9D muestran la variación del nivel del mar medida en la boca del estuario, coordenadas UTM: 653209E, 5653362S (Huso 18S), comparadas con la información entregada por el SHOA obtenida en Bahía Corral para las cuatro campañas. Dicha información fue corregida, desfasándose en el tiempo, de modo que coincidiera con la serie de datos medida en terreno. Las cotas están referidas al nivel de reducción de sonda (NRS).



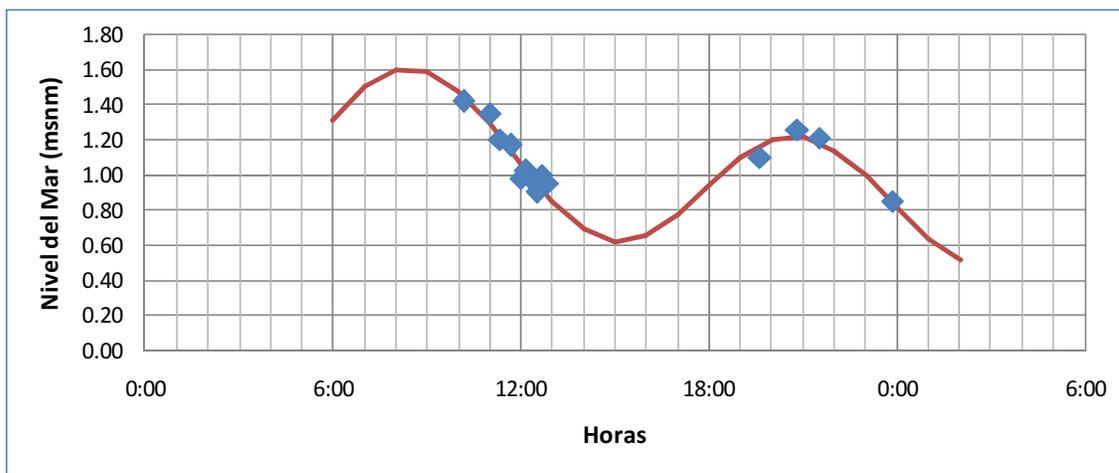
(A)



(B)



(C)



(D)

FIGURA 5.9: NIVEL DEL MAR MEDIDA EN TERRENO (MARCAS AZULES) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA ROJA) PARA TOLTÉN. (A) 21 DE ENERO, (B) 9 DE MARZO, (C) 14 DE JUNIO Y (D) 19 DE JUNIO.

La Tabla 5.4 muestra la amplitud y el periodo de la marea para los días de medición.

TABLA 5.4: AMPLITUD Y PERIODO DE LA MAREA SEGÚN CAMPAÑA.

Fecha	Amplitud (m)	Periodo (hrs)
21 de Enero	0.30	11.7
9 de Marzo	0.70	11.9
14 de Junio	0.27	12.9
19 de Junio	0.41	12.9



En la Tabla 5.5 se muestra la magnitud del tiempo en que se encontró desfasada la onda de marea entre Bahía Corral y la desembocadura del río Toltén para las fechas de medición, obtenida mediante el ajuste de la serie de datos del SHOA a partir de la medida en terreno.

Tabla 5.5: Tiempo de desfase de la onda de marea.

Fecha	Tiempo de Desfase de la Onda (min)
21 de Enero	40
9 de Marzo	20
14 de Junio	0
19 de Junio	0

MORFOLOGÍA

En la Figura 5.10 y Figura 5.11 se muestra el perfil longitudinal de la batimetría (profundidad máxima de la transversal) y del ancho superficial del río Toltén, luego de haber procesado y corregido la información de las cuatro campañas realizadas.

Se observan dos singularidades en la batimetría del estuario. La primera corresponde a la existencia de una isla en la mitad del cauce, alrededor de 2 km aguas arriba de la boca. La segunda es la existencia de una fosa de 9 m de profundidad máxima, ubicada en el borde sur del cauce del río a 1.3 km de la boca. A partir de las mediciones de salinidad se observó gran influencia de ambos accidentes batimétricos en los procesos de mezcla del estuario. Por un lado, en la fosa se tiende a acumular cierto volumen de agua marina, el cual es liberado solo para caudales afluentes altos, como se pudo apreciar en las campañas de junio. Por otro lado, la isla se comporta como una barrera para el ingreso del agua marina, frenando el avance de la intrusión salina, como se pudo observar en las campañas de enero y marzo.

La existencia de una barrera en la boca del estuario hace disminuir el ancho del río y por lo tanto aumentar la velocidad de escurrimiento del agua dulce, lo cual dificulta el ingreso de agua marina hacia el estuario.

Notamos además que la cota de fondo presenta cierta correlación con el ancho del cauce.

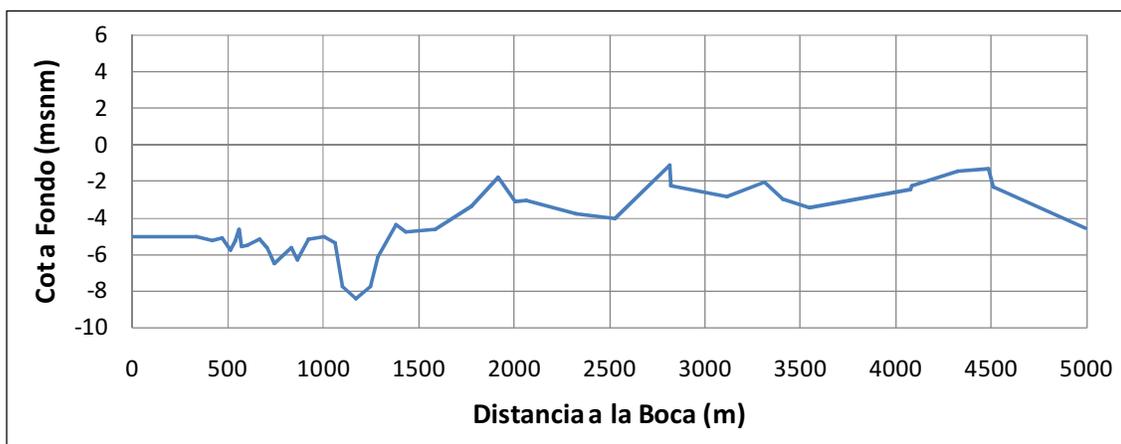


FIGURA 5.10: BATIMETRÍA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

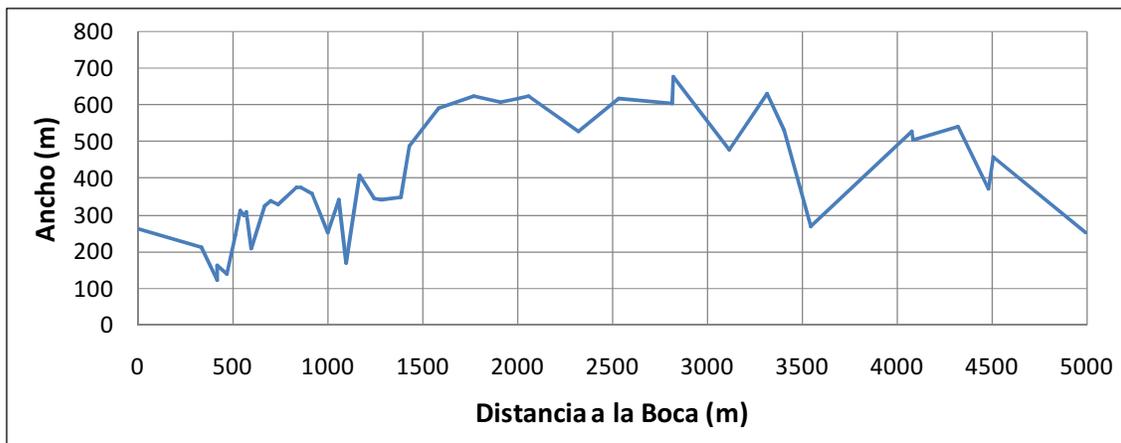


FIGURA 5.11: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

En la Tabla 5.6 se muestran los valores medios de la cota de fondo, ancho y pendiente estimados desde la boca hasta 5 km aguas arriba de ella.

TABLA 5.6: PROFUNDIDAD Y ANCHO MEDIOS DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

Cota de Fondo Media (msnm)	Ancho Medio (m)	Pendiente (°)
-4.4	403	0.0009

SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

En la Tabla 5.7 se muestra la salinidad en la boca asociada al periodo de llenante y la vaciante. La información corresponde al promedio temporal en el periodo de medición y se obtuvo a



partir de mediciones en la orilla del cauce, que se supusieron representativas de la salinidad en la sección.

Tabla 5.7: Salinidad en la boca del estuario durante la llenante y vaciante.

Fecha	Salinidad Llenante (g/l)	Salinidad Vaciante (g/l)
21 de Enero	14	6
9 de Marzo	12	4
14 de Junio	3	2
19 de Junio	0	0

En base a los valores de la tabla anterior y utilizando la Ecuación (3.11) es posible encontrar la fracción de agua marina renovada que entra al estuario en el periodo de llenante para cada campaña de medición, mostradas en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Coeficiente de intercambio.

Fecha	Coeficiente de Intercambio (%)
21 de Enero	26
9 de Marzo	27
14 de Junio	3
19 de Junio	0

SALINIDAD AL INTERIOR DEL ESTUARIO

La Figura 5.12 muestra la variación de la salinidad media de la sección en la longitudinal para los terrenos en que se detectó intrusión salina, es decir para los de enero y marzo.

Se puede observar que las salinidades medidas en enero son menores a las de marzo, siendo siempre inferiores a la salinidad del mar, que se puede considerar cercana a 35 g/l. El caudal de agua dulce afluente al estuario fue similar para ambas campañas, por lo que las diferencias observadas se deben principalmente al cambio en el estado de mareas. En este sentido la intrusión salina fue mucho mayor en la campaña de marzo, para la que se tuvo mareas de sicigia, a diferencia de la campaña de enero en que se midió con mareas de cuadratura. Para ambas campañas, la salinidad tiende a aumentar hacia la boca del estuario.

Además de estar condicionada por la marea y por el caudal de agua dulce, la intrusión salina depende en gran medida de la morfología del cauce, siendo limitada por cotas de fondo altas.



En este sentido, la isla ubicada a 2 km de la boca del estuario corresponde a la primera barrera que debe superar el agua marina. Vemos que para la campaña de enero, se midió siempre salinidad nula aguas arriba de la isla. Para la campaña de marzo la intrusión logra superar los 2 km, pero experimentando una fuerte disminución de su salinidad aguas arriba de la isla. En la Figura 5.10 se puede apreciar que a partir del kilómetro 2 la cota del lecho tiende a aumentar paulatinamente hacia aguas arriba, lo cual dificulta el ingreso de agua marina.

Para las campañas de junio, el caudal de agua dulce fue de tal magnitud que independiente del estado de mareas no se tuvo intrusión salina.

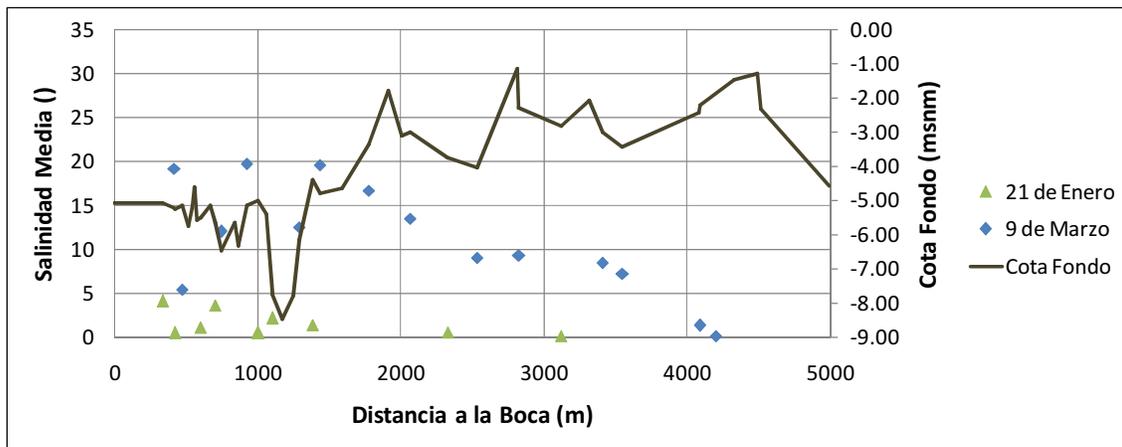


FIGURA 5.12: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

En la Tabla 5.9 se muestra la salinidad media del estuario para el día de la medición. La información fue promediada temporalmente en el periodo de medición y espacialmente desde la boca hasta la sección en que se midió salinidad de río (<0.2 g/l), es decir una distancia igual a la longitud de la intrusión mostrada en la Tabla 5.10 para cada campaña.

TABLA 5.9: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

Fecha	Salinidad Media (g/l)
21 de Enero	1.0
9 de Marzo	11.0
14 de Junio	0.0
19 de Junio	0.0

En la Tabla 5.10 se muestra la extensión de la intrusión salina, medida desde la boca hacia aguas arriba, considerando como límite el punto dónde se midió salinidad de río.



TABLA 5.10: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA.

Fecha	Extensión Intrusión (km)
21 de Enero	3.1
9 de Marzo	4.2
14 de Junio	0.0
19 de Junio	0.0

En la Figura 5.13 se muestra la variación del grado de estratificación de la columna de agua en la longitudinal para los terrenos en que se observó intrusión salina, es decir para la campaña del 21 de enero y del 9 de marzo. El grado de estratificación se define como la diferencia entre la salinidad de la superficie y la del fondo, sobre la salinidad media de la columna. Cabe añadir que un bajo grado de estratificación no implica baja salinidad, sino alta mezcla en la vertical.

De la figura se concluye que el estuario se encontró estratificado desde su boca hasta el límite de la intrusión para ambas campañas. El nivel de estratificación de la campaña de marzo fue levemente menor que el de enero, producto que en marzo se tuvo mareas de mayor amplitud, para caudales de agua dulce similares, lo cual implica mayor capacidad de mezcla en el estuario.

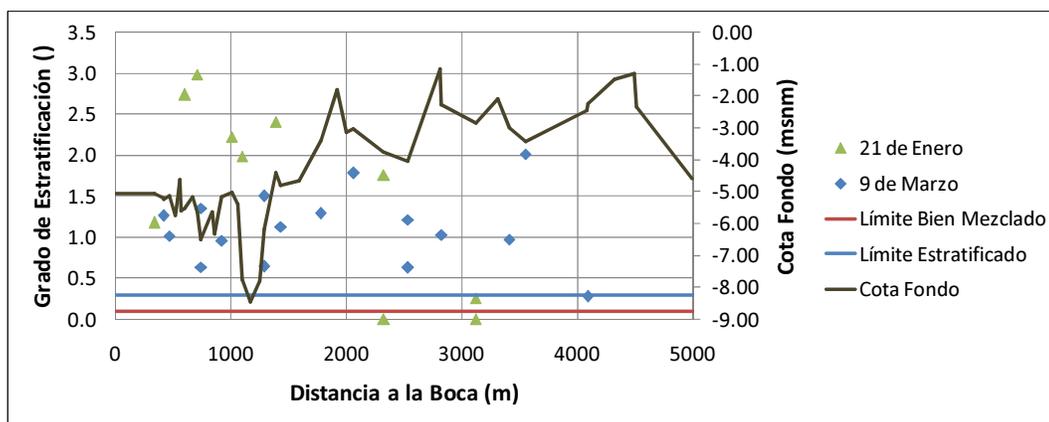


FIGURA 5.13: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL.

5.5.2. RÍO LEBU

CAUDAL DEL RÍO

Los aforos del caudal del río Lebu fueron realizados por la oficina regional de la DGA de la ciudad de Concepción en el puente Curíco ubicado a 30 km de la boca del estuario, en las



coordenadas UTM: 628871E, 5835692S (Huso 18S). Los resultados se muestran en la Tabla 5.11. La Figura 5.14 muestra el lugar en que se realizaron los aforos del caudal y las mediciones del nivel del mar y de la salinidad en la boca del estuario.

Tabla 5.11: Caudal del río Lebu para los días de medición.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)
19 de Enero	5.6
11 de Marzo	4.0
12 de Junio	4.3
22 de Junio	35.4

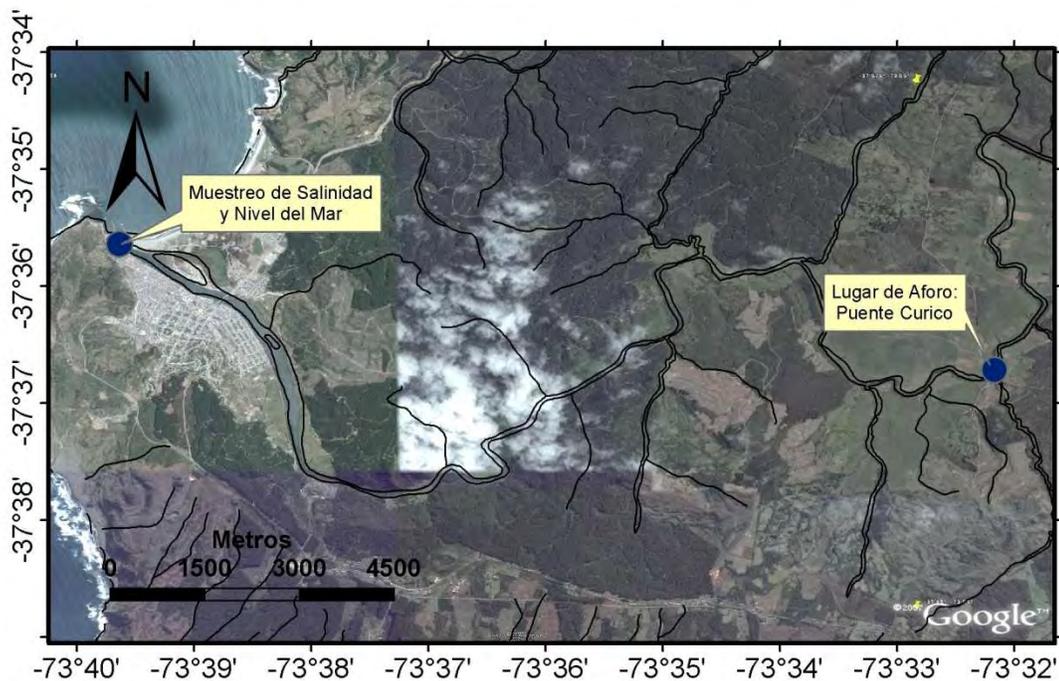


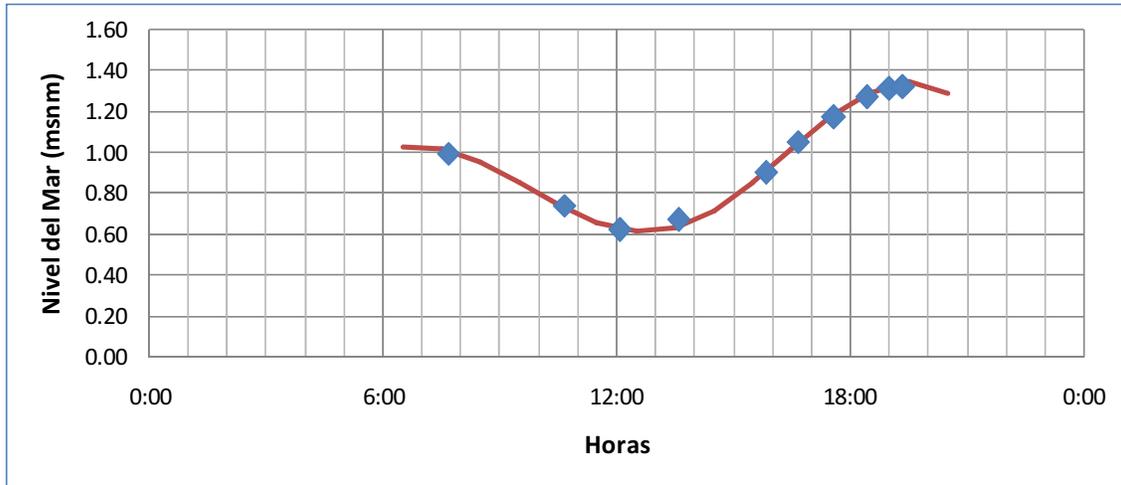
Figura 5.14: Ubicación del lugar de aforo y de medición de la salinidad y del nivel del mar en la boca. Río Lebu.

La similitud entre los caudales medidos en las tres primeras campañas fue de algún modo perjudicial para el estudio, debido a que no se pudo observar grandes cambios en la estratificación del estuario, salvo para la última campaña, teniéndose en ésta intrusión en forma de cuña salina. Sin embargo, el haber medido para caudales similares fue de utilidad para observar la influencia de la marea en el sistema.

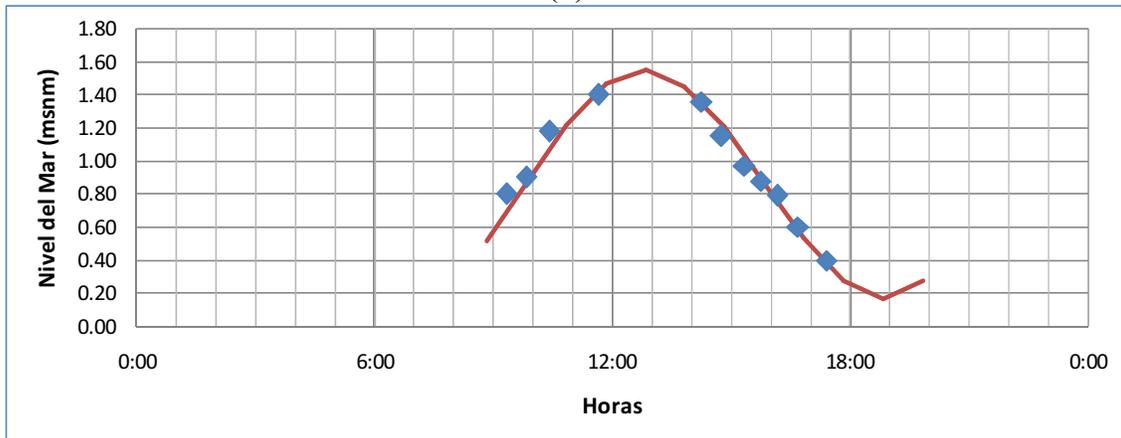


ESTADO DE MAREAS

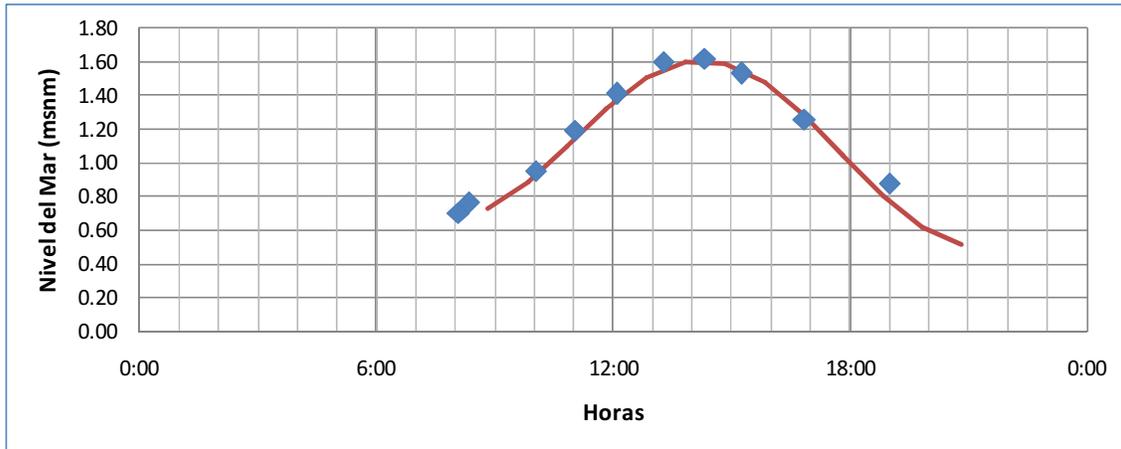
La Figura 5.15A a la Figura 5.15D muestran la variación del nivel del mar medida en la boca del estuario, coordenadas UTM: 618049E, 5837964S (Huso 18S), comparadas con la información entregada por el SHOA obtenida en Talcahuano, para las cuatro campañas. Dicha información fue corregida, desfasándose en el tiempo, de modo que coincidiera con la serie de datos medida en terreno. Las cotas están referidas al nivel de reducción de sonda (NRS).



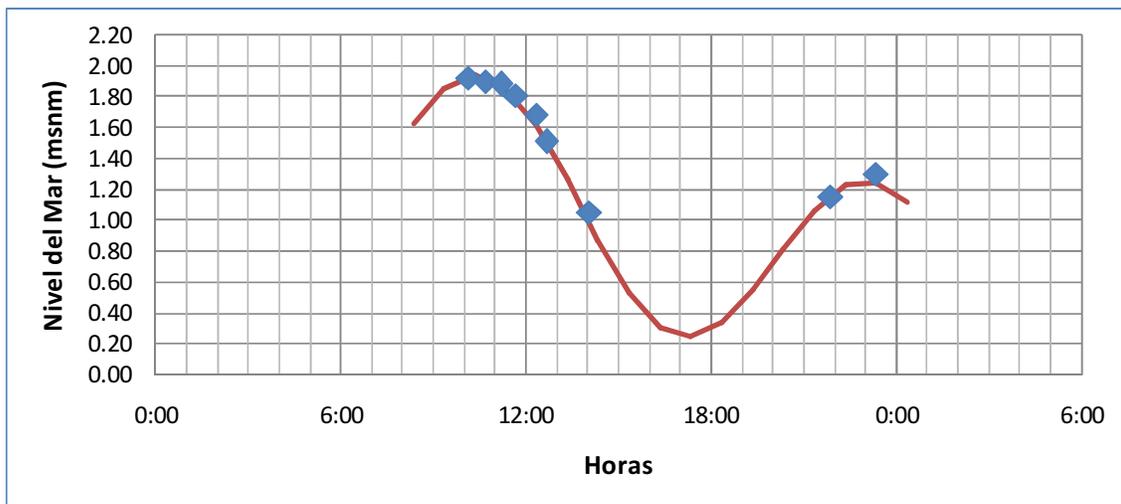
(A)



(B)



(C)



(D)

FIGURA 5.15: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS AZULES) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA ROJA) PARA LEBU. (A) 19 DE ENERO, (B) 11 DE MARZO, (C) 12 DE JUNIO Y (D) 22 DE JUNIO.

La Tabla 5.12 muestra la amplitud y el periodo de la marea para los días de medición.

TABLA 5.12: AMPLITUD Y PERIODO DE LA MAREA SEGÚN CAMPAÑA.

Fecha	Amplitud (m)	Periodo (hrs)
19 de Enero	0.27	12.2
11 de Marzo	0.62	12.2
12 de Junio	0.40	12.7
22 de Junio	0.64	13.1



En la Tabla 5.13 se muestra la magnitud del tiempo en que se encontró desfasada la onda de marea, entre Talcahuano y la desembocadura del río Lebu para las fechas de medición, obtenida mediante el ajuste de la serie datos del SHOA a partir de la medida en terreno.

TABLA 5.13: TIEMPO DE DESFASE DE LA ONDA DE MAREA.

Fecha	Tiempo de Desfase de la Onda (min)
19 de Enero	30
11 de Marzo	50
12 de Junio	50
22 de Junio	20

MORFOLOGÍA

En la Figura 5.16 y Figura 5.17 se muestra el perfil longitudinal de la batimetría y del ancho superficial del río Lebu, luego de haber procesado y corregido la información de las cuatro campañas realizadas.

El río Lebu se encuentra canalizado desde su boca hasta tres kilómetros aguas arriba. Entre los kilómetros 2 y 4 se observa la existencia de un depósito de sedimentos, el cual existe debido a las bajas velocidades de dicho tramo. Aguas abajo de dicho tramo se tienen mayores velocidades debido al intercambio de aguas con el mar y a un menor ancho del estuario. La cota de fondo de dicho depósito es cercana al nivel medio del mar, por lo que para mareas bajas y caudales de estiaje amplios sectores del cauce se secan.

Como se puede apreciar en la Figura 5.17, a una distancia de 4 km de la desembocadura se produce un fuerte cambio en el ancho del río, tendiendo a aumentar desde dicho punto hasta que comienza la canalización.

Al igual que para el río Toltén, se observa cierta correlación entre la cota de fondo y el ancho superficial del cauce.

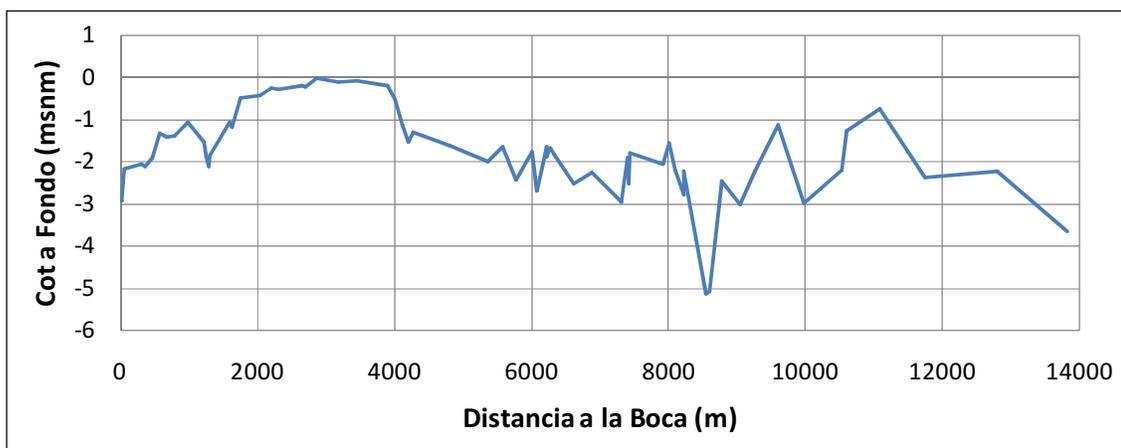


FIGURA 5.16: BATIMETRÍA DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

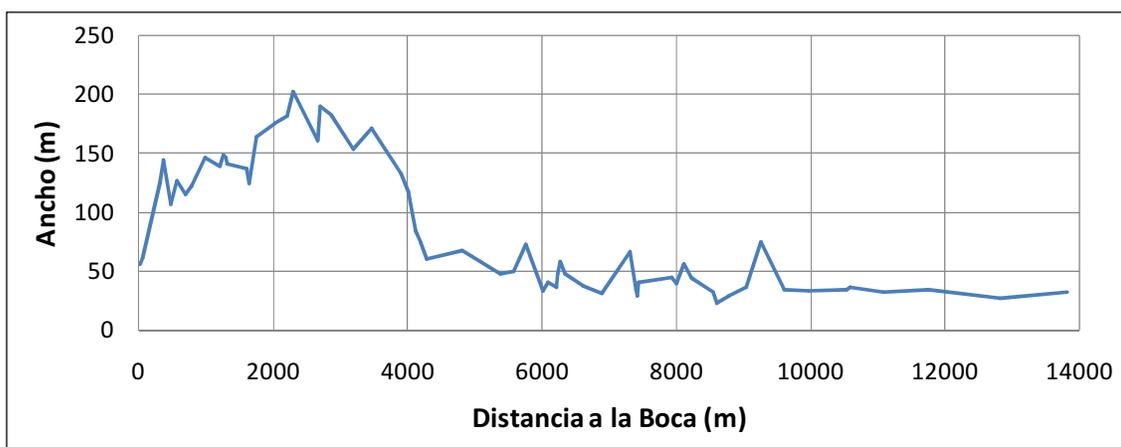


FIGURA 5.17: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

En la Tabla 5.14 se muestran los valores medios de la cota de fondo, ancho y pendiente estimados desde la boca hasta 13.8 km aguas arriba de ella.

TABLA 5.14: PROFUNDIDAD Y ANCHO MEDIOS DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

Cota de Fondo Media (msnm)	Ancho Medio (m)	Pendiente (°)
-1.8	85	-0.0001

SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

En la Tabla 5.15 se muestra la salinidad en la boca asociada al periodo de llenante y de vaciante. La información corresponde al promedio temporal en el periodo de medición y se



obtuvo a partir de mediciones en la orilla del cauce, que se supusieron representativas de la salinidad en la sección.

Tabla 5.15: Salinidad en la boca del estuario durante la llenante y vaciante.

Fecha	Salinidad Llenante (g/l)	Salinidad Vaciante (g/l)
19 de Enero	31	21
11 de Marzo	32	32
12 de Junio	34	27
22 de Junio	6	4

En base a los valores de la tabla anterior y utilizando la Ecuación (3.11) es posible encontrar la fracción de agua marina renovada que entra al estuario en el periodo de llenante para cada campaña de medición.

Tabla 5.16: Coeficiente de intercambio.

Fecha	Coeficiente de Intercambio (%)
19 de Enero	78
11 de Marzo	17
12 de Junio	100
22 de Junio	8

SALINIDAD AL INTERIOR DEL ESTUARIO

La Figura 5.18 muestra la variación de la salinidad en la longitudinal para todos los terrenos.

Para todas las campañas se detectó intrusión salina, lo cual se debió a la baja capacidad del flujo de agua dulce para impedir el ingreso de agua marina.

Los caudales de agua dulce asociados a las tres primeras campañas fueron muy parecidos, por lo que las diferencias observadas en la estratificación se debieron principalmente al cambio en el estado de mareas. En este sentido, los resultados obtenidos para las campañas del 11 de marzo y del 12 de junio fueron muy parecidos, debido a que se tuvo mareas de sicigia para ambas fechas y caudales afluentes similares. En cambio en la campaña de enero se midió en condiciones de mareas de cuadratura, por lo que se tuvo salinidades menores a las medidas el 11 de marzo y 12 de junio. Sin embargo, la longitud de la intrusión salina fue semejante para



las tres campañas, lo cual se puede deber a la incapacidad del caudal de estiaje del río para remover volúmenes de agua marina alejados de la boca.

Para la campaña del 22 de junio se tuvo una intrusión salina mucho menor tanto en extensión como en magnitud de las salinidades medidas, fenómeno asociado al aumento del caudal del río.

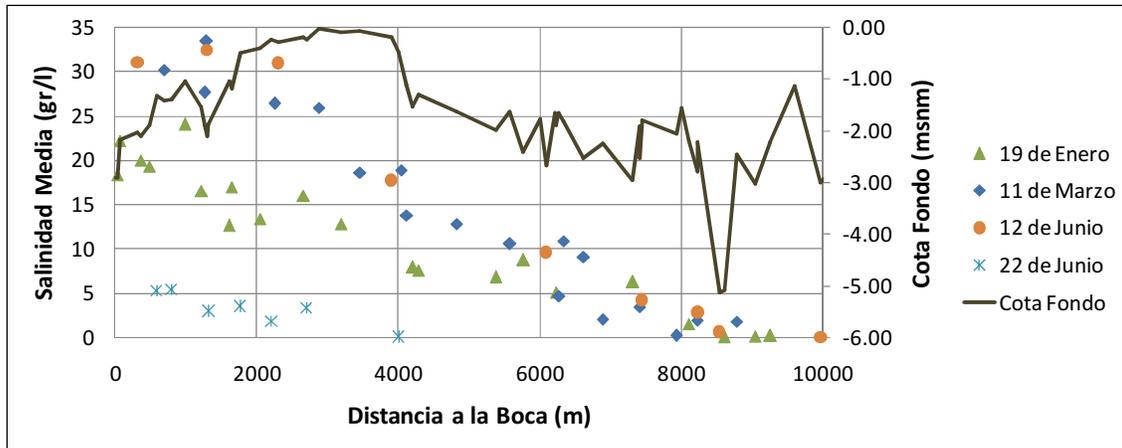


FIGURA 5.18: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD.

En la Tabla 5.17 se muestra la salinidad media del estuario para el día de muestreo. La información fue promediada temporalmente en el periodo de medición y espacialmente desde la boca hasta la sección en que se midió salinidad de río (<0.2 g/l), es decir una distancia igual a la longitud de la intrusión mostrada en la Tabla 5.18 para cada campaña.

TABLA 5.17: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO.

Fecha	Salinidad Media (g/l)
19 de Enero	9.6
11 de Marzo	14.8
12 de Junio	18.0
22 de Junio	2.7

En la Tabla 5.18 se muestra la extensión de la intrusión salina, medida desde la boca hacia aguas arriba, considerando como límite el punto dónde se midió salinidad de río.



TABLA 5.18: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA.

Fecha	Extensión Intrusión (km)
19 de Enero	9.3
11 de Marzo	9.4
12 de Junio	9.2
22 de Junio	3.5

En la Figura 5.19 se muestra la variación del grado de estratificación de la columna de agua en la longitudinal para cada campaña de medición. El grado de estratificación se define como la diferencia entre la salinidad de la superficie y la del fondo, sobre la salinidad media de la columna. Cabe añadir que un bajo grado de estratificación no implica baja salinidad, sino alta mezcla en la vertical.

Para la campaña del 19 de enero se tuvo alto grado de estratificación en toda la extensión de la intrusión, incrementándose hacia aguas arriba, siendo máximo a una distancia de 8 km de la boca del estuario. La estratificación observada en el tramo comprendido entre los cuatro y ocho kilómetros se debe a que el bajo caudal del río asociado al periodo de estiaje fue incapaz de remover el agua marina estancada en dicho tramo, producto de la contrapendiente presente en el sector observable en la Figura 5.16.

La estratificación observada para la campaña del 11 de marzo fue menor que la observada para enero, debido a que en la segunda campaña se tuvo mareas de sicigia, mientras que en la primera de cuadratura, para caudales de agua dulce similares. Al igual que para la campaña de enero, se tuvo gran estratificación en el tramo comprendido entre los 4 y 8 kilómetros, observable en la Figura 5.19.

Los resultados obtenidos para la campaña del 12 de junio fueron muy parecidos a los obtenidos para la campaña de enero, debido a que las condiciones de medición fueron similares en lo que respecta a caudal y a estado de marea. La amplitud de la marea para el 12 de junio fue levemente mayor a la de enero, lo cual se reflejó en una disminución de la estratificación en la cercanía de la boca, producto de la mayor capacidad de mezcla inducida por el mar.

En la campaña del 22 de junio se observó mucha estratificación en la cercanía de la boca del estuario, la cual disminuye rápidamente hacia aguas arriba. Los resultados obtenidos indican la existencia de una cuña salina, lo cual guarda relación con el caudal de agua dulce aforado, el cual fue bastante mayor al del resto de las campañas.

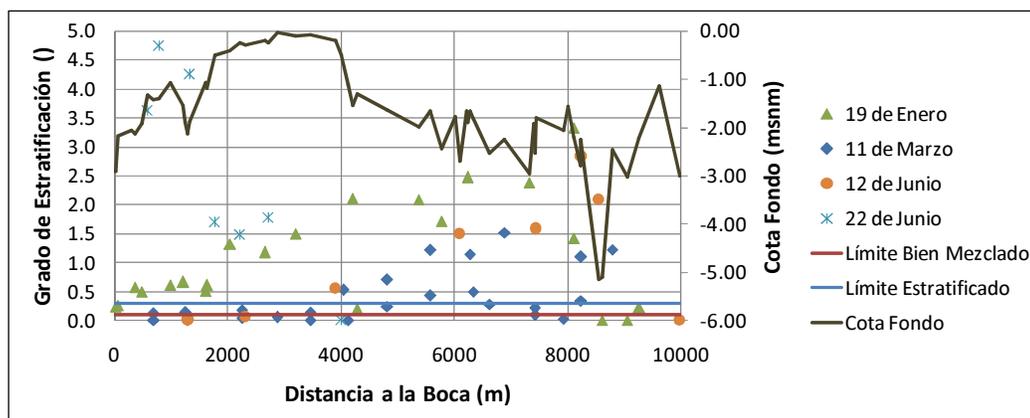


FIGURA 5.19: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL.

5.5.3. ESTERO TONGOY

CAUDAL DEL RÍO

Para las dos campañas realizadas no se observó aporte de escorrentía superficial al estero Tongoy, debido a lo cual no fue necesario realizar aforos.

TABLA 5.19: CAUDAL DEL ESTERO TONGOY PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.

Fecha	Caudal del Estero (m ³ /s)
7 de Abril	0
7 de Julio	0

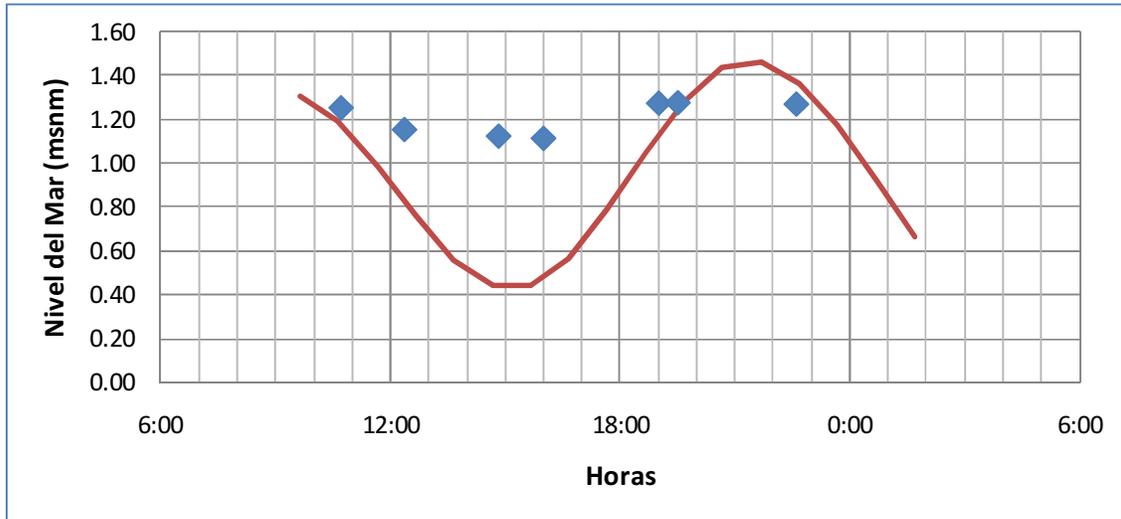
La falta de escorrentía superficial para los días de muestreo fue de algún modo perjudicial para el análisis de la hidrodinámica del sistema, en el sentido de que no se pudo observar claramente el efecto de la mezcla de agua dulce con agua de mar. Sin embargo se considera útil la información obtenida, dado que el comportamiento de este estero es representativo de otros cursos de agua de la zona norte.

ESTADO DE MAREAS

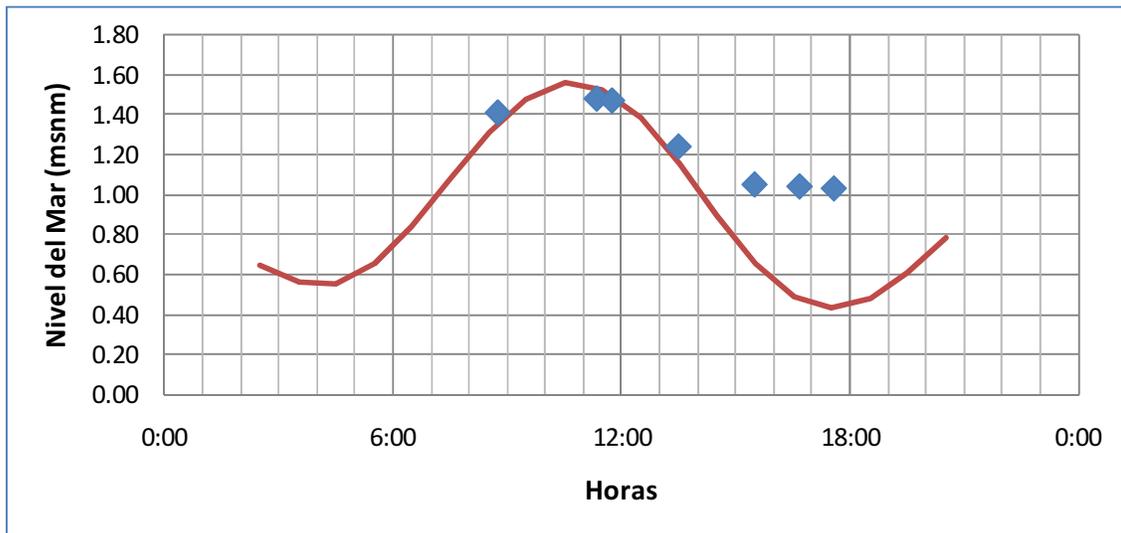
La Figura 5.20A y la Figura 5.20B muestran la variación del nivel del mar medida en la boca del estuario, coordenadas UTM: 260060E, 6650513S (Huso 19S), comparadas con la información entregada por el SHOA obtenida en Coquimbo, para las dos campañas. Dicha información fue corregida, desfasándose en el tiempo, de modo que coincidiera con la serie de datos medida en terreno. Las cotas están referidas al nivel de reducción de sonda (NRS).



Cabe añadir que para las fechas de medición, el mar solo lograba ingresar para niveles altos de marea y con ayuda del oleaje. Esto se vio reflejado en las diferencias observadas entre la serie medida y la obtenida del SHOA.



(A)



(B)

FIGURA 5.20: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS AZULES) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA ROJA) PARA TONGOY. (A) 7 DE ABRIL Y (B) 7 DE JULIO.



La Tabla 5.20 muestra la amplitud y el periodo del nivel del estuario en su boca para los días de medición.

TABLA 5.20: AMPLITUD Y PERIODO DE LA MAREA SEGÚN CAMPAÑA.

Fecha	Amplitud (m)	Periodo (hrs)
7 de Abril	0.08	12.1
7 de Julio	0.23	12.9

En la Tabla 5.21 se muestra la magnitud del tiempo en que se encontró desfasada la onda de marea, entre Coquimbo y la desembocadura del estero Tongoy para las fechas de medición, obtenida mediante el ajuste de la serie datos del SHOA a partir de la medida en terreno.

TABLA 5.21: TIEMPO DE DESFASE DE LA ONDA DE MAREA.

Fecha	Tiempo de Desfase de la Onda (min)
7 de Abril	40
7 de Julio	30

MORFOLOGÍA

En la Figura 5.21 y Figura 5.22 se muestra el perfil longitudinal de la batimetría (cota de fondo mínima en la transversal) y del ancho superficial del estero Tongoy, luego de haber procesado y corregido la información de las dos campañas realizadas.

En general no se observa gran variación de la cota de fondo en la longitudinal, salvo en el extremo de aguas arriba del estuario, en dónde se ubica una fosa de gran profundidad.

Desde la boca hasta alrededor de 700 m aguas arriba, se tiene una cota de fondo mayor al nivel medio del mar, lo cual permite el ingreso de aguas desde éste solo para condiciones de alto nivel de marea y oleaje.

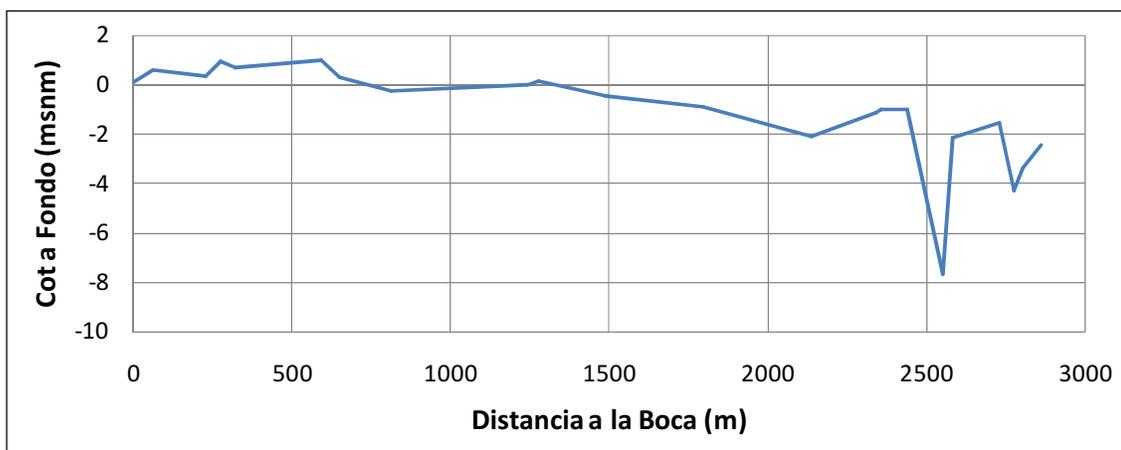


FIGURA 5.21: BATIMETRÍA DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

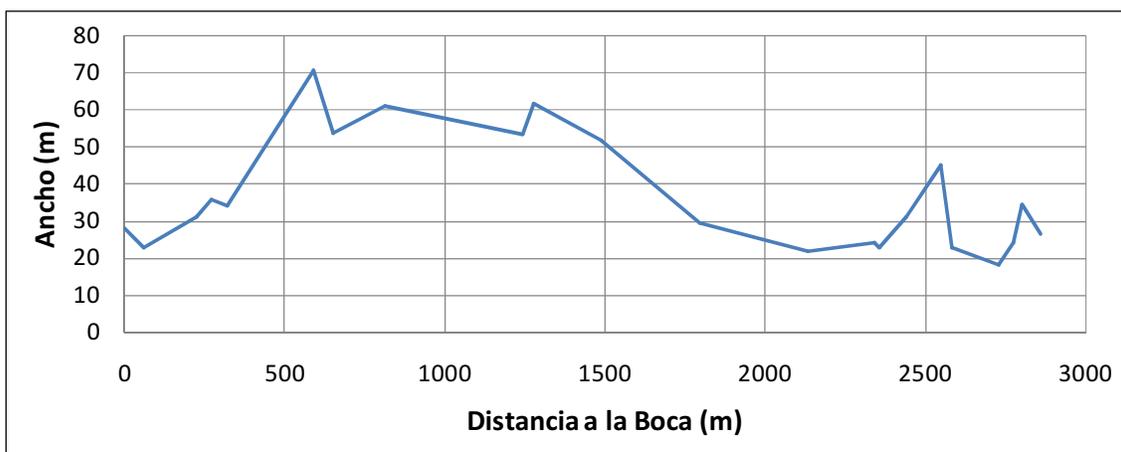


FIGURA 5.22: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

En la Tabla 5.22 se muestran los valores medios de la cota de fondo, ancho y pendiente estimados desde la boca hasta 2.9 km aguas arriba de ella.

TABLA 5.22: PROFUNDIDAD Y ANCHO MEDIO DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

Cota de Fondo Media (msnm)	Ancho Medio (m)	Pendiente (°)
-1.1	37	-0.0014

SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

En la Tabla 5.23 se muestra la salinidad en la boca asociada al periodo de llenante y la vaciante. La información corresponde al promedio temporal en el periodo de medición y se



obtuvo a partir de mediciones en la orilla del cauce, que se supusieron representativas de la salinidad en la sección.

TABLA 5.23: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.

Fecha	Salinidad Llenante (g/l)	Salinidad Vaciante (g/l)
7 de Abril	32	27
7 de Julio	34	28

En base a los valores de la tabla anterior y utilizando la Ecuación (3.11) es posible encontrar la fracción de agua marina renovada que entra al estuario en el periodo de llenante para cada campaña de medición, mostrada en la Tabla 5.24.

TABLA 5.24: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO.

Fecha	Coefficiente de Intercambio, R (%)
7 de Abril	71
7 de Julio	100

SALINIDAD AL INTERIOR DEL ESTUARIO

La Figura 5.23 muestra la variación de la salinidad en la longitudinal para todos los terrenos.

Para ambos terrenos se midió salinidad cercana a la del mar a lo largo de todo el estero, el cual tenía una extensión total de 3 km en las fechas de medición. En general no se observaron gradientes longitudinales de salinidad, ni estratificación en la vertical. En base a las mediciones se concluye que gran parte del volumen de agua del estero es de procedencia marina.

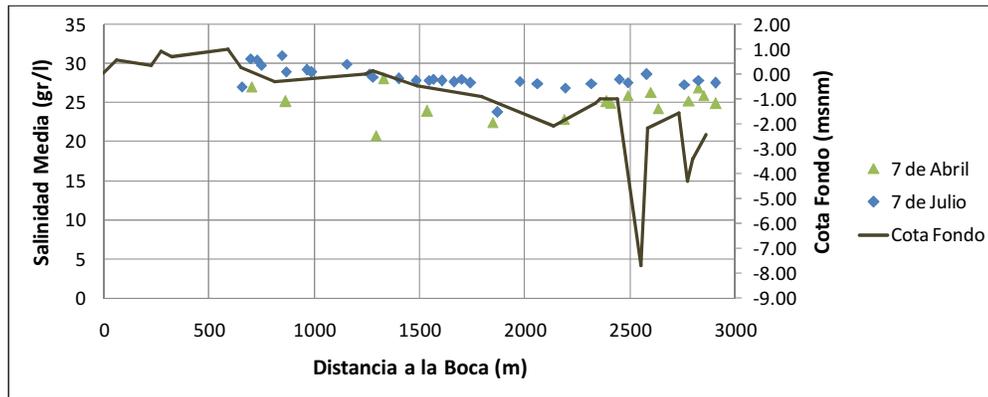


FIGURA 5.23. PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

En la Tabla 5.25 se muestra la salinidad media del estuario para el día de la medición. La información fue promediada temporalmente en el periodo de medición y espacialmente desde la boca hasta el final del estero, distancia que se muestra en la Tabla 5.26.

TABLA 5.25: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO.

Fecha	Salinidad Media (g/l)
7 de Abril	24.2
7 de Julio	28.0

En la Tabla 5.26 se muestra la extensión de la intrusión salina, medida desde la boca hacia aguas arriba. Para las fechas de medición, la intrusión salina abarcó todo el estero.

TABLA 5.26: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA DESDE LA BOCA.

Fecha	Extensión Intrusión (km)
7 de Abril	2.9
7 de Julio	2.9

En la Figura 5.24 se muestra la variación del grado de estratificación de la columna de agua, en la longitudinal. El grado de estratificación se define como la razón entre la diferencia de salinidad de la superficie y fondo, sobre la salinidad media de la columna.

Para ambas campañas de medición se tuvo en general bajo nivel de estratificación. Cabe recordar que el estero Tongoy no presentó afluentes superficiales de agua dulce para las fechas de medición, por lo que se concluyó que la mayor parte del agua procedía del mar. En este sentido, el bajo nivel de estratificación no se explica por una alta capacidad de mezcla en el estuario, sino porque gran parte del volumen de agua tuvo un origen común.

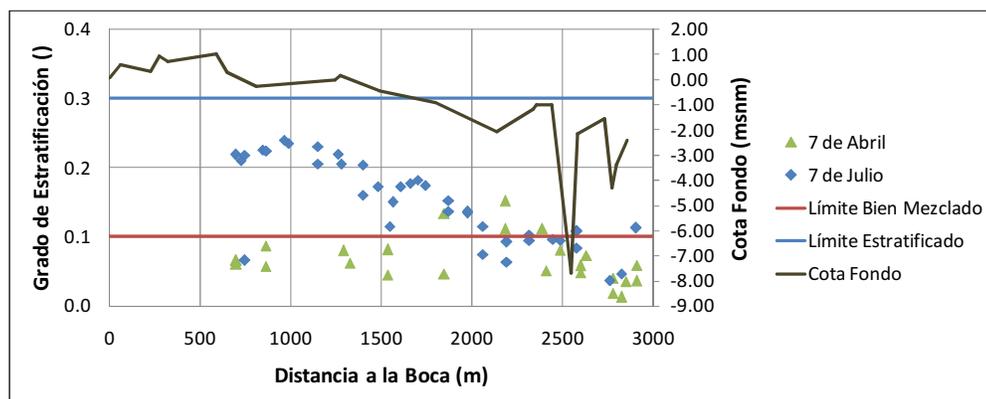


FIGURA 5.24: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL.

5.6. RESUMEN DE RESULTADOS

TABLA 5.27: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO TOLTÉN.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)	Amplitud Marea (m)	Coefficiente de Intercambio (%)	Salinidad Media (g/l)	Extensión Intrusión (km)
21 de Enero	187	0.3	26	1	3.1
9 de Marzo	186	0.7	27	11	4.2
14 de Junio	608	0.27	--	--	--
19 de Junio	1110	0.41	--	--	--

TABLA 5.28: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO LEBU.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)	Amplitud Marea (m)	Coefficiente de Intercambio (%)	Salinidad Media (g/l)	Extensión Intrusión (km)
19 de Enero	5.6	0.27	78	10	9.3
11 de Marzo	4.0	0.62	17	15	9.4
12 de Junio	4.3	0.4	100	18	9.2
22 de Junio	35.4	0.64	8	3	3.5

TABLA 5.29: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA ESTERO TONGOY.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)	Amplitud Marea (m)	Coefficiente de Intercambio (%)	Salinidad Media (g/l)	Extensión Intrusión (km)
7 de Abril	0	0.08	71	24	2.9
7 de Julio	0	0.23	100	28	2.9



CAPÍTULO 6: APLICACIÓN DE METODOLOGÍA

6.1. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA

El presente capítulo incluye la aplicación de la metodología desarrollada a los estuarios estudiados en las campañas de terreno realizadas durante el año 2009. En este sentido se obtienen la extensión del estuario, los límites de la *Zona Sin Intrusión*, *Zona de Mezcla Parcial* y *Zona de Cuña Salina* y el caudal de dilución asociado a las primeras dos zonas, recordando que se propone considerar caudal de dilución nulo para la *Zona de Cuña Salina*. Para efectos de este estudio, se obtendrá la distribución del caudal de dilución a lo largo del estuario, es decir se supondrá la existencia de varios interesados en descargar.

6.2. RÍO TOLTÉN

6.2.1. LÍMITE DEL ESTUARIO CON EL RÍO

Considerando la definición de estuario en términos de la máxima intrusión de la onda de marea, se llega a una extensión de 13.4 km considerando un nivel de marea de 1.8 m (pleamar de sicigia de la serie del 9 de marzo). La Figura 6.1 muestra como se obtuvo la extensión a partir de la batimetría y el máximo nivel de marea de sicigia.

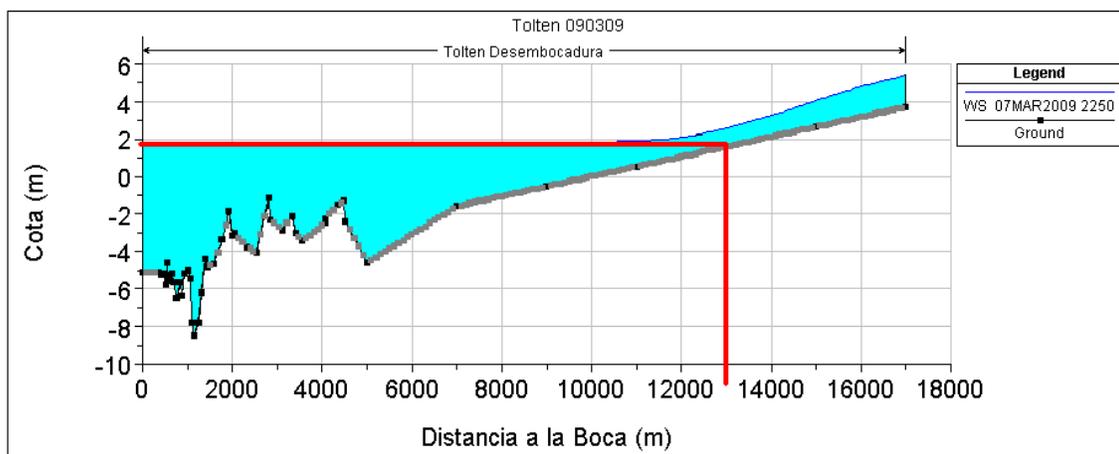


FIGURA 6.1. OBTENCIÓN DE MÁXIMA INTRUSIÓN DE ONDA DE MAREA.

6.2.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA

Utilizando la Ecuación (6.1) y HEC-RAS, se obtiene el caudal límite por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina. La información utilizada en la Ecuación (6.1) se presenta en la Tabla 6.1.



$$Q_{\text{Límite}} = 0.8 \cdot \frac{\rho}{\Delta\rho} \cdot \frac{W \cdot u_t^3}{g} \quad (6.1)$$

Donde $Q_{\text{Límite}}$ corresponde al caudal del río por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina, W al ancho medio del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\rho/\Delta\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y agua dulce, y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca que se puede aproximar por 0.71 veces la amplitud de la velocidad en la boca u_0 .

La modelación en HEC-RAS para obtener u_t se realizó considerando mareas de sicigia (serie del 9 de marzo), debido a que corresponde a la condición que implica mayor extensión de la cuña salina. Finalmente se llegó a un valor de $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$. para $Q_{\text{Límite}}$. Dado que el caudal con probabilidad de excedencia del 95% vale $174 \text{ m}^3/\text{s}$ que es mayor a $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$, se considera finalmente $Q_{\text{Límite}} = 174 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 6.1: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{\text{LÍMITE}}$.

Parámetro	Valor
W (m)	388
ρ río (kg/m^3)	1000
ρ océano (kg/m^3)	1025
u_t (m/s)	0.18

6.2.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA

Para determinar la máxima intrusión de la cuña salina y así poder definir el límite de la *Zona de Cuña Salina* se utiliza el modelo de Olivares (2000) según la guía que se incluye en el Anexo I. La información utilizada para correr el modelo se muestra en la Tabla 6.2, mientras que la batimetría se obtiene de la Figura 5.10.

TABLA 6.2: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.

Parámetro	Valor
Caudal límite (m^3/s)	174
Ancho medio (m)	372
Profundidad media (m)	2.9
Nivel del mar (msnm)	1.01
Amplitud velocidad boca (m/s)	0.2
Densidad cuña (Kg/m^3)	1025

El modelo de Olivares (2000) entrega finalmente una extensión para la cuña salina de 7.8 km.



6.2.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Debido a que el valor original del caudal límite ($7.5 \text{ m}^3/\text{s}$) es inferior al caudal con probabilidad de excedencia del 95% ($174 \text{ m}^3/\text{s}$), se concluye que es muy improbable tener intrusión en forma de mezcla parcial.

En este sentido, se llega a que este estuario no tendrá *Zona de Mezcla Parcial*, y que por lo tanto existirán solo la *Zona de Cuña Salina* y la *Zona Sin Intrusión*.

6.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Debido a que no existe *Zona de Mezcla Parcial*, no tiene sentido calcular caudales de dilución en esta zona.

6.2.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Utilizando HEC-RAS y considerando un caudal de $174 \text{ m}^3/\text{s}$ ($P_{exc}=95\%$) y mareas de sicigia (serie del 9 de marzo), obtenemos el caudal de dilución para la *Zona Sin Intrusión*, acorde a la guía presentada en el Anexo II. Cabe mencionar que los coeficientes de dispersión se obtuvieron de la Ecuación (3.7) (aplicable donde existen mediciones de salinidad) para el tramo entre los 0 y 5 km y a partir de la Ecuación (3.8) (válida para ríos) desde los 5 km de la boca hacia aguas arriba. Los resultados se muestran en la Figura 6.2. Como se observa en el gráfico, el efecto de marea es imperceptible en esta zona, por lo que las caudales máximo, mínimo y medio se superponen entre 7.8 km y 13.4 km.

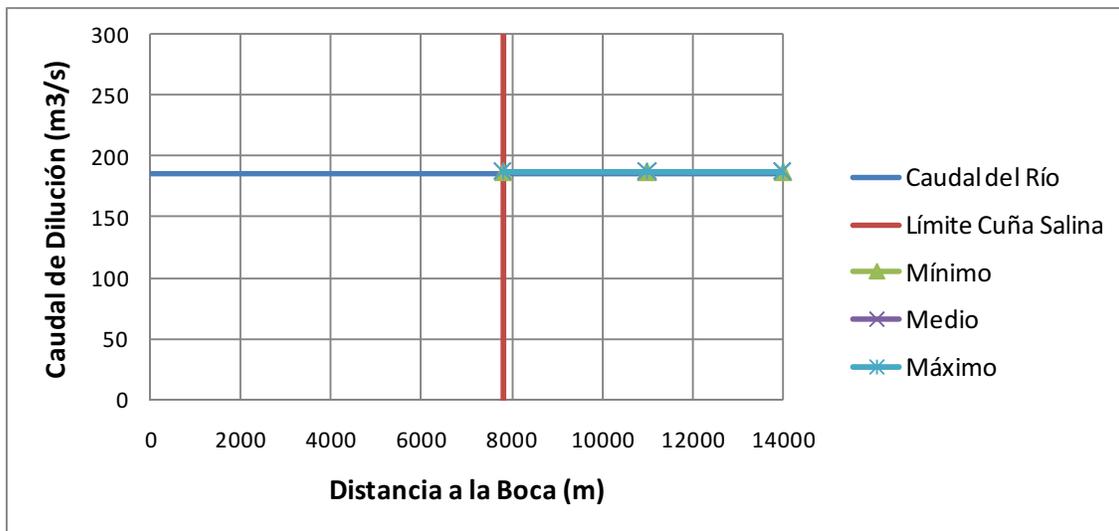


FIGURA 6.2. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.



6.2.7. RESUMEN

En la Tabla 6.3 se muestran las extensiones de las zonas características del estuario, mientras que en la Figura 6.3 se muestra la variación del caudal de dilución a lo largo del estuario.

TABLA 6.3: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO.

Zona	Límite Aguas Arriba (km)	Límite Aguas Abajo (km)
Influencia de Marea	13.4	7.8
Zona de Mezcla Parcial	No Existe	No Existe
Zona de Cuña Salina	7.8	0

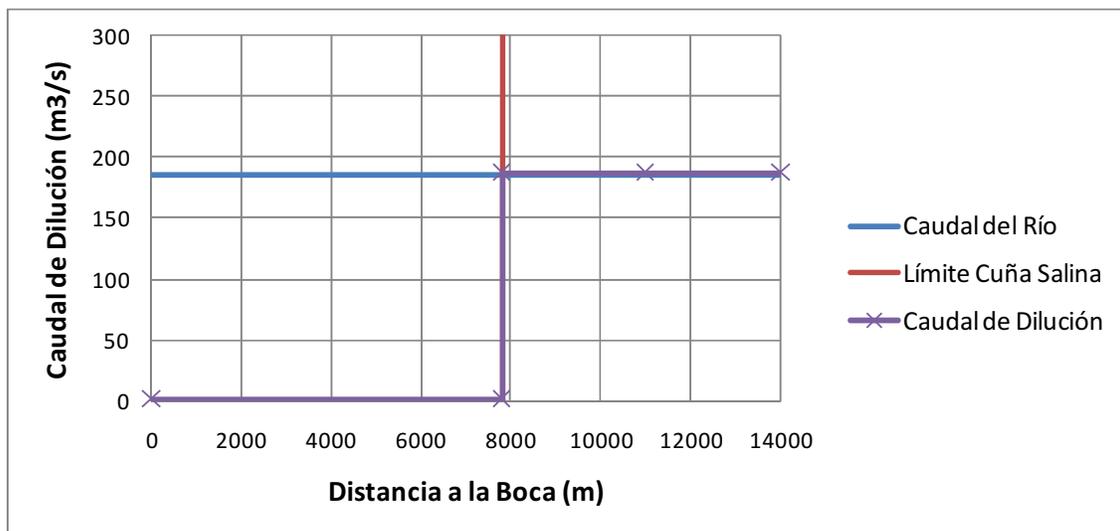


FIGURA 6.3. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

6.3. RÍO LEBU

6.3.1. LÍMITE DEL ESTUARIO CON EL RÍO

Considerando la definición de estuario en términos de la máxima intrusión de la onda de marea, se llega a una extensión de 26.8 km considerando un nivel de marea de 1.93 m (pleamar de sicigia de la serie del 22 de junio). La Figura 6.4 muestra como se obtuvo la extensión, conocida la batimetría.

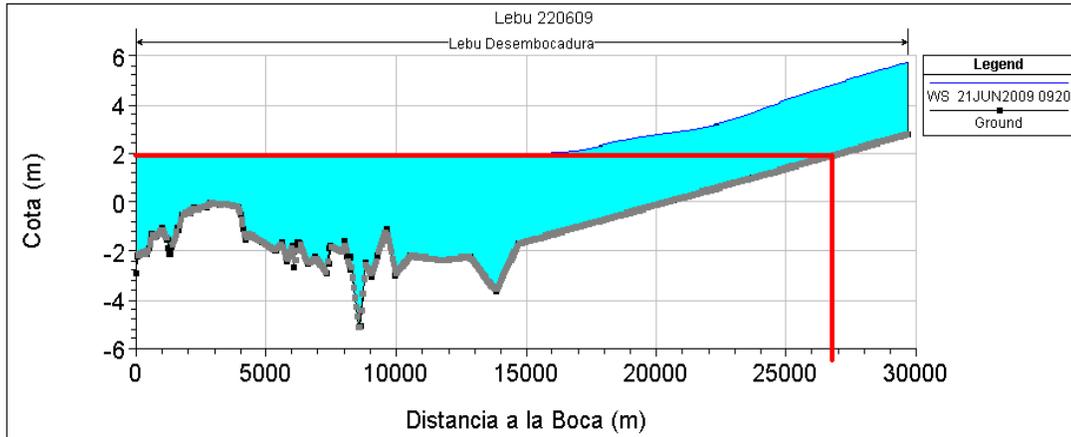


FIGURA 6.4. OBTENCIÓN DE MÁXIMA INTRUSIÓN DE ONDA DE MAREA.

6.3.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA

Utilizando la Ecuación (6.2) y HEC-RAS, se obtiene el caudal límite por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina. La información utilizada en la Ecuación (6.2) se presenta en la Tabla 6.4.

$$Q_{\text{Límite}} = 0.8 \cdot \frac{\rho}{\Delta\rho} \cdot \frac{W \cdot u_t^3}{g} \quad (6.2)$$

Donde $Q_{\text{Límite}}$ corresponde al caudal del río por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina, W al ancho medio del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\rho/\Delta\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y agua dulce, y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca que se puede aproximar por 0.71 veces la amplitud de la velocidad en la boca u_0 .

La modelación en HEC-RAS para obtener u_t se realizó considerando mareas de sicigia (serie del 22 de junio), debido a que corresponde a la condición más desfavorable. Finalmente se llegó a un valor de $8.7 \text{ m}^3/\text{s}$. para $Q_{\text{Límite}}$, el cual es mayor al caudal con probabilidad de excedencia del 95%, que resulta ser de $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Luego se concluye que $Q_{\text{Límite}} = 8.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 6.4: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{\text{LÍMITE}}$.

Parámetro	Valor
W (m)	85
ρ río (kg/m ³)	1000
ρ océano (kg/m ³)	1025
u_t (m/s)	0.32



6.3.1. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA

Para determinar la máxima intrusión de la cuña salina y así poder definir el límite de la *Zona de Cuña Salina* se utiliza el modelo de Olivares (2000) según la guía que se incluye en el Anexo I. La batimetría se obtiene de la Figura 5.16, mientras que la información utilizada para correr el modelo se muestra en la Tabla 6.5.

TABLA 6.5: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.

Parámetro	Valor
Caudal (m ³ /s)	8.7
Ancho medio (m)	101
Profundidad media (m)	1.4
Nivel del mar (msnm)	1.02
Amplitud velocidad boca (m/s)	0.4
Densidad cuña (Kg/m ³)	1025

El modelo de Olivares (2000) entrega una extensión para la cuña salina de 4.2 km. Notamos que esta distancia es mayor a la intrusión en forma de cuña salina medida en Lebu para la campaña del 22 de junio, que arrojó 3.5 km, por lo que el resultado obtenido se encuentra por el lado de la seguridad.

6.3.1. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Para determinar la máxima intrusión en forma de mezcla parcial y así poder definir el límite de la *Zona de Mezcla Parcial* se realiza una modelación en HEC-RAS según la guía del Anexo II. Acorde a la metodología propuesta, se utiliza para correr los modelos el caudal con probabilidad de excedencia de 95%, igual a 4.3 m³/s, según la información obtenida en la estación fluviométrica de la DGA en Los Álamos. Se utiliza además la serie de nivel del mar del 22 de junio (mareas de sicigia).

Finalmente, se determinó del modelo HEC-RAS que la salinidad disminuye por debajo de 0.2 g/l a 10.3 km de la boca, por lo que se considera ésta la extensión de la intrusión en forma de mezcla parcial.

Para la modelación de HEC-RAS se utilizaron los coeficientes de dispersión mostrados en la Figura 6.5 obtenidos mediante la Ecuación (3.7), utilizando la información de salinidad obtenida para la campaña del 12 de junio, dado que en ésta se tuvo un caudal de 4.3 m³/s similar al caudal con probabilidad de excedencia del 95% utilizado para la modelación. Para el tramo sin mediciones de salinidad se utilizó la Ecuación (3.8) para obtener los coeficientes de dispersión.

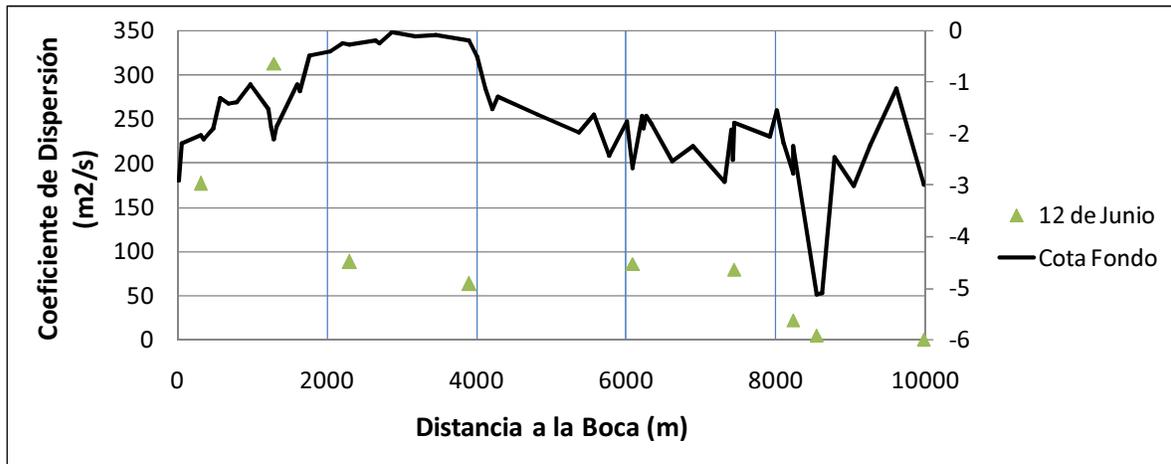


FIGURA 6.5. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL.

6.3.2. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Para determinar el caudal de dilución en esta zona se ocupa HEC-RAS, según las indicaciones de la guía incluida en el Anexo II. Para el modelo se considera el caudal con probabilidad de excedencia del 95% y condiciones de marea de cuadratura (serie del 19 de enero). El resultado de la modelación se muestra en la Figura 6.6, indicándose los valores extremos del caudal de dilución. Las características de la descarga virtual utilizada se detallan en la Tabla 6.6, además del coeficiente de intercambio utilizado y de la concentración proveniente del mar resultante de la aplicación de la Ecuación (3.14).

TABLA 6.6: CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA VIRTUAL UTILIZADA.

$Q_{95\%}$ (m^3/s)	4.3
R (%)	78
$Q_{Descarga}$ (m^3/s)	0.1
$C_{Descarga}$ (mg/l)	100
C_{Mar} (mg/l)	0.5

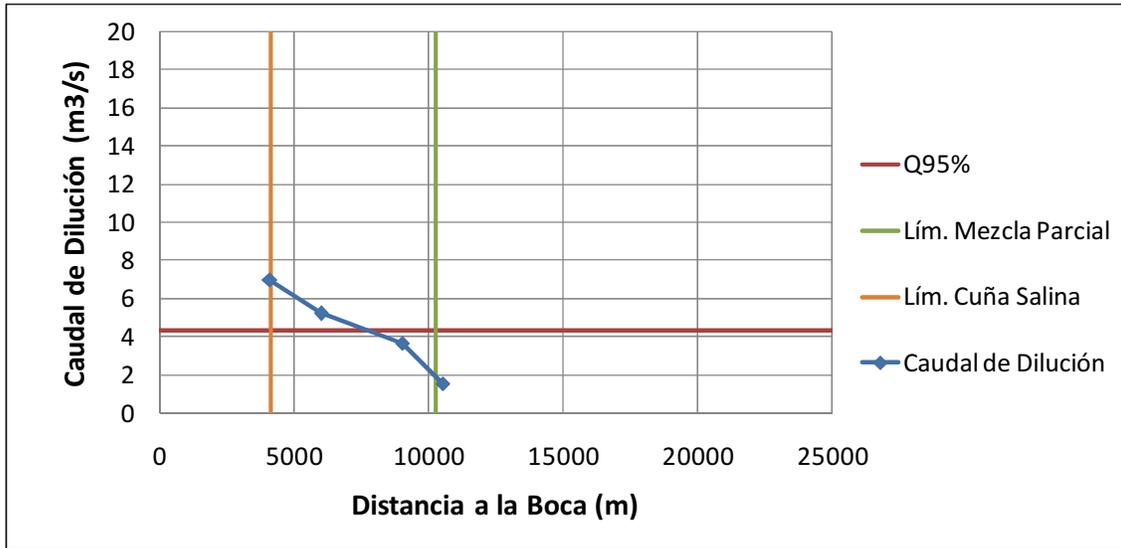


FIGURA 6.6. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

6.3.1. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Para determinar el caudal de dilución en esta zona se ocupa HEC-RAS, según las indicaciones de la guía incluida en el Anexo II. Los coeficientes de dispersión se obtuvieron a partir de la Ecuación (3.7) (aplicable donde existen mediciones de salinidad) para el tramo entre los 0 y 10.3 km y a partir de la Ecuación (3.8) (válida para ríos) desde los 10.3 km de la boca hacia aguas arriba. Además se consideró la serie del nivel del mar del 22 de junio (marea de sicigia). El resultado se entrega en la Figura 6.7.

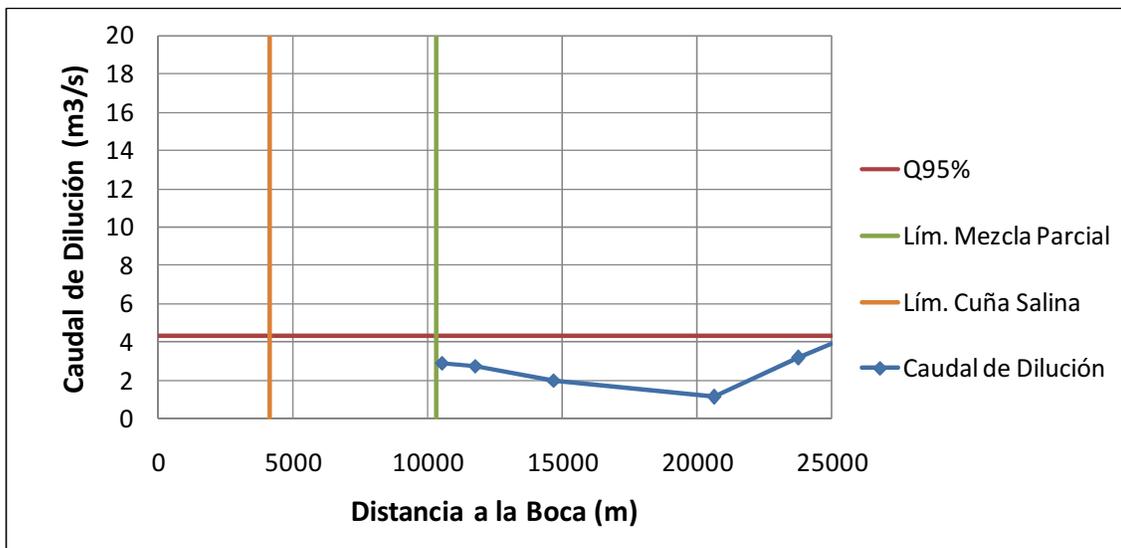


FIGURA 6.7. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.



6.3.2. RESUMEN

En la Tabla 6.7 se muestra un resumen de las zonas en que se divide el estuario, mientras que la Figura 6.8. muestra la variación del caudal de dilución a lo largo de éste.

TABLA 6.7: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO.

Zona	Límite Aguas Arriba (km)	Límite Aguas Abajo (km)
Influencia de Marea	26.8	10.3
Zona de Mezcla Parcial	10.3	4.2
Zona de Cuña Salina	4.2	0

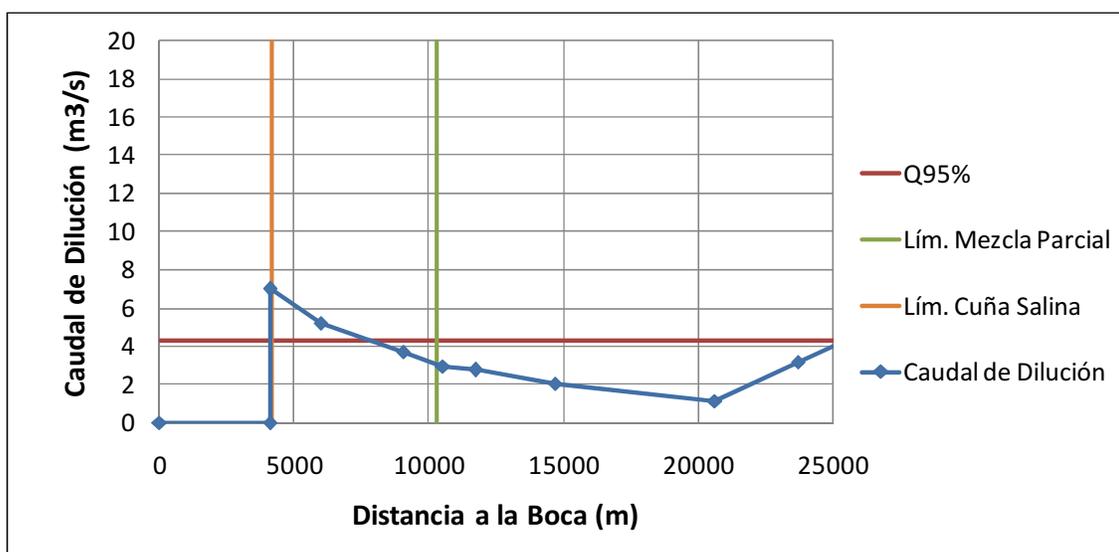


FIGURA 6.8. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

6.4. ESTERO TONGOY

Para las fechas en que fueron realizadas las campañas de terreno no se observó aporte de agua superficial desde la cuenca hacia el estero, por lo que se concluye que la mayor parte del agua del estero proviene del océano. Lo anterior se verifica con los valores de salinidad medidos, los cuales se encuentran en el rango 24 g/l a 28 g/l, valores cercanos a la salinidad del agua de mar. En base a lo anterior y a la definición de los límites de estuario adoptada, se determina que todo el estero corresponde a un estuario, por lo que su extensión es de 2.9 km.

Por otro lado, se realiza un análisis hidrológico de la cuenca aportante al estero, para determinar si las condiciones observadas en terreno son normales, o bien excepcionales. De



acuerdo a mediciones de precipitación de la estación Cerrillos Pobres, ubicada en la cuenca de la Quebrada de Camarones, entre los años 1962 y 1968 (sin contar 1966), precipitó un total de 51 días. Esto da una probabilidad de precipitación de 2.3%. La cota máxima de la cuenca del estero Tongoy es superior a los 1200 msnm, mientras que la longitud de la quebrada que define el estero es de alrededor de 20 km. La superficie de la cuenca es de alrededor de 300 km². Con estos datos, se puede estimar el tiempo de concentración de la cuenca, lo que se lleva a cabo por medio de los métodos de California y de Giandotti, presentados en las Ecuaciones (6.3) y (6.4), respectivamente.

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (6.3)$$

$$t_c = 60 \cdot \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H}} \quad (6.4)$$

Donde t_c al tiempo de concentración en segundos, A corresponde al área de la cuenca en km², H al desnivel en metros, L a la longitud del cauce principal en km.

Los resultados entregados por los modelos indican que el tiempo de concentración para la cuenca del estero Tongoy es de menos de 5 horas (2 horas para el método de California y 3.5 horas para el de Giandotti). Considerando el bajo tiempo de concentración y la probabilidad de asociada a la precipitación, se puede concluir que el estuario presenta un caudal afluente durante muy pocas ocasiones en el año, y que estos corresponden principalmente a pulsos ocasionados por la precipitación, que rápidamente llegan a la zona costera. Por lo tanto, se puede asegurar que la condición normal del sistema es la observada en terreno para las fechas de medición. Debido a que la probabilidad de recibir aporte de aguas superficiales es baja, no tiene sentido definir las zonas de mezcla antes propuestas. Por las razones antes mencionadas, se impone arbitrariamente un caudal de dilución nulo para toda la extensión del estuario.



CAPÍTULO 7: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para conocer la precisión asociada a los modelos propuestos se hace necesario validar la metodología desarrollada. En este sentido se propone aplicar los modelos de Olivares (2000) y HEC-RAS a los estuarios piloto considerando las condiciones de caudal afluente y marea que se tuvo en las campañas de terreno, de modo de poder comparar los resultados de las modelaciones con las mediciones de terreno. Por otro lado, se utilizarán modelos alternativos al de Olivares (2000) para analizar la extensión de la *Zona de Cuña Salina* y a HEC-RAS para analizar la extensión y el caudal de dilución de la *Zona de Mezcla Parcial* y de la *Zona Sin Intrusión*.

7.1. VALIDACIÓN DE MÁXIMA INTRUSIÓN DE LA ONDA DE MAREA

Ocupando modelación impermanente en HEC-RAS se determinó para cada estuario y campaña de terreno la variación temporal del caudal y de la altura de escurrimiento en el límite entre el estuario y el río obtenido a partir de la proyección de la pleamar de sicigia sobre la cota de fondo del cauce. Los resultados se muestran en la Tabla 7.1.

TABLA 7.1: VARIACIÓN DEL NIVEL Y CAUDAL EN EL LÍMITE ESTUARIO/RÍO.

Lebu	Variación Profundidad (%)	Variación Caudal (%)	Toltén	Variación Profundidad (%)	Variación Caudal (%)
19 de Enero	1.3	0.4	21 de Enero	1.5	0.1
11 de Marzo	4.1	2.0	9 de Marzo	1.0	0.1
12 de Junio	2.0	0.8	15 de Junio	1.1	0.1
22 de Junio	0.5	0.2	19 de Junio	0.8	0.0

Se puede observar que las variaciones obtenidas son mínimas, tanto para el caudal como para la profundidad, lo que indica que en el límite entre estuario y su afluente el efecto de marea es imperceptible.

7.2. VALIDACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN

La validez de la metodología desarrollada depende en gran medida de la capacidad para determinar el caudal límite a partir del cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina, definido por la Ecuación (7.1). En este sentido se procede a verificar la capacidad de dicha ecuación para estimar el nivel de estratificación de los estuarios piloto estudiados para las condiciones de caudal afluente y marea que se tuvo en las fechas de medición.



$$Q_{Límite} = 0.8 \cdot \frac{W \cdot u_t^3}{\Delta\rho/\rho \cdot g} \quad (7.1)$$

7.2.1. TOLTÉN

En terreno se observó intrusión en forma de cuña salina para las campañas del 21 de enero y 9 de marzo, mientras que para las campañas de junio no se tuvo intrusión. Luego se espera encontrar valores de $Q_{Límite}$ inferiores al caudal del río para las campañas del 21 de enero y 9 de marzo, mientras que para las campañas de junio no tiene sentido preguntarse por $Q_{Límite}$. En la Tabla 7.2 se muestran los caudales límites obtenidos y aforados en terreno.

TABLA 7.2: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$.

Fecha	u_t (m/s)	W (m)	$Q_{Río}$ (m ³ /s)	$Q_{Límite}$ (m ³ /s)
21 de Enero	0.10	388	186	1
9 de Marzo	0.28	388	187	28

Finalmente se concluye que los resultados entregados por el modelo concuerdan con las mediciones en terreno para el río Toltén.

7.2.1. LEBU

En terreno se observó intrusión en forma de cuña salina solo para la campaña del 22 de junio. Para el resto de las campañas la intrusión fue en forma de mezcla parcial. Luego se esperaría obtener valores de $Q_{Límite}$ inferiores al del río solo para la campaña del 22 de junio. En la Tabla 7.3 se muestran los caudales límites obtenidos y aforados en terreno.

TABLA 7.3: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$.

Fecha	u_t (m/s)	W (m)	$Q_{Río}$ (m ³ /s)	$Q_{Límite}$ (m ³ /s)
19 de Enero	0.22	85	5.6	3.0
11 de Marzo	0.58	85	4.0	54.1
12 de Junio	0.34	85	4.3	10.9
22 de Junio	0.39	85	35.4	16.5

Luego se obtienen valores para $Q_{Límite}$ consistentes con la teoría, salvo para la campaña de enero. Lo que explica dicho fenómeno es que a pesar de que no se observó intrusión en forma



de cuña salina en enero, sí se observó estratificación en sectores alejados a la boca, producto de cierto volumen de agua marina estancada tras la grada que existe en el estuario a cuatro kilómetros de la boca, observable en la Figura 5.16.

7.3. VALIDACIÓN DEL MODELO DE OLIVARES (2000)

Se propone aplicar el modelo de Olivares (2000) a los estuarios de los ríos Toltén y Lebu, con las condiciones de marea y caudal afluente medidas en las campañas de terreno, de modo de poder comparar la extensión de la cuña salina entregada por el modelo con la observada en terreno. Por otro lado se aplican modelos alternativos al de Olivares, para comparar la calidad de los resultados entregados por éste.

7.3.1. TOLTÉN

Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Olivares a las condiciones asociadas a las campañas de enero y marzo se muestran en la Tabla 7.5. Además se muestran los resultados entregados por los modelos alternativos al de Olivares.

TABLA 7.4: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.

Campaña de terreno	Caudal (m ³ /s)	H marea (msnm)	Profundidad media (m)	Ancho medio (m)	Velocidad boca (m/s)
21 de Enero	186	0.98	2.9	340	0.2
9 de Marzo	187	0.95	2.9	372	0.4

Se consideró una densidad de la cuña igual a 1025 kg/m³, para obtener la extensión máxima.

TABLA 7.5: COMPARACIÓN ENTRE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y REAL.

Campaña de terreno	Longitud real (m)	Olivares (m)	Arita y Jirka (m)	Schijf y S. (m)	Keulegan (m)
21 de Enero	3100	5050	4643	6183	7637
9 de Marzo	4200	5803	2736	2722	2250

Vemos que el modelo de Olivares (2000) tiende a sobreestimar la extensión de la cuña para el estuario del río Toltén. Lo anterior se puede arreglar utilizando un modelo de cuña salina que considere el efecto impermanente de la marea. Independiente de lo anterior, vemos que los resultados entregados por el modelo de Olivares se encuentran por el lado de la seguridad, a diferencia de los resultados entregados por los modelos alternativos.



7.3.2. LEBU

Para validar el modelo de Olivares (2000) se recurre a la única campaña en que se observó intrusión en forma de cuña salina para el estuario del río Lebu, es decir la del 22 de junio.

Los datos de entrada para la modelación en el río Lebu se presentan en la Tabla 7.6, mientras que los resultados se incluyen en la Tabla 7.7, en la que son comparadas las longitudes de la intrusión real y la modelada para los dos casos considerados.

TABLA 7.6: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.

Campaña de terreno	Caudal (m ³ /s)	H marea (msnm)	Profundidad media (m)	Ancho medio (m)	Velocidad Boca (m/s)
22 de Junio	35.4	1.03	2.4	124	0.4

TABLA 7.7: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Campaña de terreno	Longitud real (m)	Olivares (m)	Arita y Jirka (m)	Schijf y S. (m)	Keulegan (m)
22 de Junio	3500	3148	755	1435	736

Se observa que el modelo de Olivares (2000) entrega una extensión inferior a la medida en terreno. Sin embargo, a partir de las mediciones de salinidad y de batimetría, se concluye que las salinidades medidas aguas arriba de los 4 kilómetros corresponden a agua marina estancada por el efecto de una grada ubicada entre los 2 y 4 kilómetros, apreciable en la Figura 5.16. Efectos como el anterior no son tomados en cuenta por el modelo de Olivares (2000).

7.4. VALIDACIÓN DE MODELACIÓN DE HEC-RAS

Se comparan las extensiones de la intrusión en forma de mezcla parcial medidas en las campañas del 19 de enero, 11 de marzo y 12 de junio con los resultados entregados por HEC-RAS. Para la modelación se consideran las condiciones de marea y de caudal afluente medidas en terreno, además de mediciones de salinidad realizadas por González (1994), presentadas en el Anexo V. A modo de comparación se presentan los resultados obtenidos a partir de modelos alternativos a HEC-RAS.

Los resultados de la estimación de la longitud de la intrusión salina para las tres campañas de terreno analizadas se presentan en la Tabla 7.8. El detalle de los modelos alternativos utilizados se entrega en el Anexo III.



TABLA 7.8: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA EN FORMA DE MEZCLA PARCIAL.

Método	19 de Enero	11 de Marzo	12 de Junio
Ippen et al. (1966)	7942	13173	13312
Alber y Scheldon (2001)	9353	9845	9734
Miller y McPherson (1992)	9144	9245	9229
HEC-RAS	9580	9860	10276
Máxima Extensión Medida	9260	9400	9150

Se aprecia de la Tabla 7.8 que las longitudes entregadas por HEC-RAS se asemejan bastante a las medidas en terreno, siendo siempre mayores. Cabe recordar que la extensión de la intrusión salina puede sufrir variaciones de varios kilómetros en el transcurso del día, por lo que la longitud medida en terreno pudo no haber sido la máxima del día. Como ejemplo se menciona que para la campaña del 12 de junio la mínima extensión obtenida a partir de HEC-RAS corresponde a 7900 m.

Dados los resultados obtenidos y considerando además que HEC-RAS debe ser utilizado para determinar la batimetría y el caudal de dilución del estuario, se concluye que HEC-RAS es la herramienta más adecuada para determinar la extensión del mismo.

7.5. ANÁLISIS DEL SUPUESTO DE UNIDIMENSIONALIDAD

7.5.1. TOLTÉN

Para el estudio se ha trabajado bajo el supuesto de la unidimensionalidad del flujo, despreciando las posibles circulaciones transversales. Entre otros, se ha despreciado el efecto de coriolis.

La importancia relativa de coriolis puede ser estimada a partir del *Número de Rossby*, que relaciona el tiempo asociado a la advección con el tiempo de la rotación. Éste se define por (Fischer et al, 1979) en la Ecuación (7.2).

$$R_0 = \frac{U}{L_s \cdot f} \quad (7.2)$$

Donde R_0 corresponde al *Número de Rossby*, U a la velocidad del flujo, L_s a una longitud característica y f a la frecuencia de coriolis, definida en la Ecuación (7.3).



$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{seno}(\phi) \quad (7.3)$$

Donde f corresponde a la frecuencia de coriolis, W corresponde a la velocidad angular de la tierra y ϕ es la latitud.

Radio de Rossby menores a 0.1 indican que el efecto de coriolis es importante.

Para el cálculo de R_o , se considera la zona más ancha del río Toltén y las condiciones en las que la velocidad del flujo es menor (campañas de enero y marzo), de modo de tener la condición más crítica respecto al efecto de coriolis. Los datos utilizados y los radios obtenidos se presentan en la Tabla 7.9.

TABLA 7.9: DATOS PARA CÁLCULO DE EFECTO DE CORIOLIS.

Latitud (°)	f (rad/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	W (m)	Ro ()
39.67	9.31 E-05	1400	187	0.13	600	2.4

Dado que el radio de Rossby obtenido es mayor a 0.1 se concluye que el efecto de coriolis es despreciable, por lo que es válido aplicar la metodología para determinar caudales de dilución desarrollada.



CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. SOBRE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO

La metodología propuesta en el acápite 4.2.1. para definir los límites del estuario fue formulada para obtener la mayor extensión de estuario posible y de este modo asegurar una buena estimación del caudal de dilución para todo el tramo del estuario en que exista influencia de marea. Debe quedar claro que la metodología propuesta entrega resultados coherentes aún cuando la influencia de marea sea despreciable, por lo que da cuenta de la transición entre el río y el estuario.

La metodología fue validada con información obtenida en terreno y con modelación numérica en HEC-RAS, obteniéndose resultados positivos, como se observa en el acápite 7.1. Se propone continuar la validación estudiando estuarios de características distintas a las de los ríos Toltén y Lebu.

8.2. ZONIFICACIÓN DEL ESTUARIO Y CAUDAL DE DILUCIÓN

8.2.1. DETERMINACIÓN DE $Q_{LÍMITE}$

Es necesaria una validación del coeficiente 0.8 de la Ecuación (8.1) utilizada para determinar el caudal por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina. Para ello se recomienda aplicar la metodología desarrollada a un conjunto mayor de estuarios piloto.

$$Q_{Límite} = 0.8 \cdot \frac{W \cdot u_t^3}{\Delta\rho/\rho \cdot g} \quad (8.1)$$

Donde $Q_{Límite}$ corresponde al mínimo caudal del río para que exista cuña salina, W al ancho medio del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\Delta\rho/\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y del agua dulce ($\Delta\rho/\rho = 0.025$) y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca del estuario que se puede aproximar por $0.71 \cdot u_0$, donde u_0 corresponde a la máxima velocidad en la boca del estuario, obtenida de modelación en HEC-RAS.

8.3. CUERPOS DE AGUA SIN AFLUENTE SUPERFICIAL

Solo tiene sentido aplicar la metodología desarrollada cuando el cuerpo estuarino de agua analizado posea un caudal afluyente durante todo el año. Un ejemplo de lo anterior corresponde al estuario del estero Tongoy, analizado en el acápite 6.4.



8.4. RECOMENDACIONES

La metodología desarrollada debe ser aplicada a otros estuarios piloto, de modo de ajustar los modelos propuestos a la realidad de los estuarios existentes en el territorio nacional. En el mismo sentido se propone analizar el alcance de la aplicabilidad de HEC-RAS a través del uso de modelos numéricos más avanzados que contemplen el uso mallas bi- o tridimensionales. A su vez se recomienda validar el modelo de cuña salina de Olivares (2000) con uno que considere la variación temporal existente producto del fenómeno de marea.

Finalmente debe quedar claro que la metodología desarrollada no es aplicable a fiordos, lagunas costeras ni humedales costeros.



CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA

- Arita, M., Jirka, G. (1987). “Two-Layer Model of Saline Wedge. I: Entrainment and Interfacial Friction”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113, pp 1229-1248.
- Arita, M., Jirka, G. (1986). “Two-Layer Model of Saline Wedge. II: Prediction of Mean Properties”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113, pp 1249-1263.
- Aquambiente Ltda. (2006). Definición oceanográfica de límites de aplicación de la normativa en estuarios de Chile.
- Bustos, C. (2007). “Desarrollo de una metodología para la estimación del caudal de dilución en estuarios. Aplicación Estuario Pudeto X Región”. Trabajo de Título para obtener el Título de Ingeniero Civil en Geografía, Universidad de Santiago de Chile.
- Congress of the United States of America. (2000). *Estuaries and Clean Waters Act of 2000*, S. 835.
- Dirección General de Aguas (2005). “Criterios para la Determinación de Caudales Disponibles para la Dilución en Cuerpos Receptores Superficiales”. *Minuta Técnica* N° 11.
- Engle, V. Kurtz, J. Smith, L. Chancy, C. Bourgeois, P. (2007) “A Classification of U.S. Estuaries Based on Physical and Hydrologic Attributes”. *Environ. Monit Assess*, 129, pp. 397-412.
- Espinoza, J. M. (2006) Caracterización hidrodinámica de la desembocadura del río Maipo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile.
- Fischer, H., List, J., Koh, R., Imberger, J., Brooks, N. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Gang-Ji, Z. (2008). “Hydrodynamics and Water Quality Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries”. Wiley-Interscience.
- Ippen, A., Eagleson, P., Dean, R., Bretschneider, C., Raichlen, F., Harleman, D., Johnson, J., Keulegan, G., Simmons, H. (1966). *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. McGraw-Hill.
- Manual de la Convención de Ramsar (2004). Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). 3ª Edición.



Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2001), “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”, Decreto Supremo N°90/2000.

Miranda, J. (2000). “Estudio analítico y experimental de los efectos de la batimetría en la intrusión salina en estuarios estratificados”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Niño, Y., Tamburrino, A. (2002) Apuntes del curso Hidrodinámica Ambiental.

Olivares, M. (2000). “Estudio analítico-numérico y experimental de la cuña salina en estuarios”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Savenije, H. (2005). “Salinity and Tides in Alluvial Estuaries”. Elsevier BV.

Stuardo, J., Valdovinos, C. (1989) “Estuarios y lagunas costeras: Ecosistemas importantes del Chile central”. *Amb y Des*, 1, pp 107-115

U.S. Environmental Protection Agency (1997), “Development of Mixing Zone Dilution Factors”.

U.S. Environmental Protection Agency (1991), “Technical Support Document for Water Quality-based Toxics Control”.



CAPÍTULO 10: GLOSARIO

Bajamar:

Instante en que el nivel del mar alcanza su mínimo.

Cuadratura, Marea de cuadratura:

Marea de baja amplitud, que ocurre en luna creciente o menguante.

Coriolis:

Aceleración perpendicular a la dirección de movimiento de un cuerpo en un sistema no inercial, como lo es el planeta Tierra.

Deltas:

Terreno comprendido entre los brazos de un río en su desembocadura al mar.

Excursión:

Distancia horizontal que viaja un elemento de agua durante un periodo de marea. Es decir corresponde a la suma de la distancia que recorre hacia aguas arriba durante la llenante y la que recorre de regreso durante la vaciante.

Isohalina:

Curva de salinidad constante.

Llenante, Periodo de llenante:

Periodo de tiempo en que agua proveniente del mar, ingresa al estuario, producto del aumento del nivel del mar.

Pleamar:

Instante en que el nivel del mar alcanza su máximo.

Prisma de marea:

Volumen de agua que entra al estuario desde el mar, durante el periodo de llenante.

Régimen permanente impermanente

Sicigia, Marea de Sicigia:



Marea de gran amplitud, que ocurre para luna llena o nueva.

Vaciante:

Periodo de tiempo en que el agua estuarina fluye en dirección al océano, producto de una disminución en el nivel del mar.

Valor cuadrático medio:

Es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Corresponde a la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (10.1)$$

Donde x_{rms} corresponde a el valor cuadrático medio de x , N al número de valores que se tienen y x_i a los valores que se tienen.



ANEXOS

- Anexo I Extensión de la cuña salina según Olivares (2000).
- Anexo II Modelación hidráulica y de calidad de aguas utilizando HEC-RAS.
- Anexo III Modelos de balance de sal.
- Anexo IV Modelos alternativos para la cuña salina.
- Anexo V Mediciones del río Lebu obtenidas por González (1994).
- Anexo VI Mediciones de salinidad y batimetría.
- Anexo VII Normativas de emisión extranjeras.
- Anexo VIII Caudales históricos DGA para Lebu y Toltén.