



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN  
ESTUARIOS: APLICACIÓN EN EL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

FRANCISCA ANDREA URMENETA MIGONE

PROFESORA GUÍA:  
CAROLINA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER  
MANUEL CONTRERAS LEIVA  
YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE  
2013

RESUMEN DE MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL  
POR: FRANCISCA URMENETA MIGONE  
FECHA: 21/11/2013  
PROF. GUIA: Sra. CAROLINA MERUANE NARANJO

## **METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN ESTUARIOS: APLICACIÓN EN EL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN**

El concepto de caudal ecológico se desarrolló como una herramienta de conservación para los ríos, mediante la determinación del caudal mínimo requerido para mantener condiciones de hábitat aceptables. Por lo general, las metodologías propuestas para ríos no consideran la parte estuarina de la desembocadura del río al mar, en donde no sólo se deben considerar las restricciones asociadas a la altura y velocidad de escurrimiento, sino que además, se deben considerar las restricciones en la intrusión salina. En este trabajo se presenta una alternativa metodológica para calcular el caudal ecológico en estuarios, la cual se basa en dos aspectos hidrodinámicos de los ríos en la desembocadura al mar: i) la altura de escurrimiento queda determinada por el nivel del mar; y ii) reducciones del caudal del río producen una mayor intrusión de agua marina con el consiguiente aumento de la salinidad del agua.

El objetivo general de este trabajo fue el de plantear una metodología para el cálculo del caudal ecológico en estuarios. Para esto, primero se revisó la literatura técnica y científica relacionada con los conceptos de hidrodinámica de estuarios y caudal ecológico. En base a esta revisión de antecedentes se identificaron 5 pasos o etapas clave que se deben abordar a la hora de definir una metodología para el cálculo del caudal ecológico de estuarios. El primer paso es identificar el límite del estuario, para lo cual se aplica un criterio basado en la influencia de la marea. Luego, en el segundo paso, se caracteriza el ecosistema estuarino, identificando los elementos biológicos sensibles, los cuales se sintetizan en un mapa de sensibilidad ambiental. Una vez identificada la sensibilidad ambiental del estuario, entonces se pasa a la siguiente etapa, relacionada con la caracterización hidrodinámica del estuario, identificando el alcance y el tiempo de permanencia normal de la cuña salina. Para este análisis se propone modelar numéricamente la hidrodinámica y salinidad del agua del estuario con el software HEC-RAS. Conociendo el comportamiento normal de la cuña salina, se pasa a la siguiente etapa 4, en donde se determinan las restricciones que permiten conservar los componentes biológicos sensibles, considerando para esto sus umbrales de resistencia a la salinidad. Finalmente, en el paso 5 se determina el caudal mínimo que cumple con las restricciones de concentración de sal y tiempo de permanencia de la cuña salina, a través de una modelación con HEC-RAS.

La metodología propuesta se ejemplifica mediante una aplicación en el estuario del río Aysén, en donde a partir de información secundaria y siguiendo cada uno de los pasos detallados anteriormente, se determinó de forma preliminar el caudal de agua dulce que debe llegar al estuario para mantener las concentraciones de sal bajo los umbrales de los elementos biológicos identificados como sensibles.

# Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a todos los que colaboraron con el desarrollo de éste trabajo: a mi profesora guía, Carolina Meruane, por su gran ayuda, disposición y tiempo dedicado durante todo el proceso; a los demás integrantes de la comisión, por sus comentarios realizados desde el comienzo; a Beth Baumgartner, Felipe Cerda, Felipe Sandoval, Alessandra Marcantonini y Carlos Reiher por su colaboración en distintos aspectos. Agradezco al Centro de Ecología Aplicada Ltda. por la ayuda y financiamiento para realizar este trabajo.

A mi familia por el apoyo brindado en todos mis años de estudios. Agradezco a mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos por su preocupación y muestras de cariño con cada etapa superada. En particular agradezco a mi madre y a mi hermano Javier, que me dieron fuerza cada vez que fue necesario, y a mis nonnos, Mario y Rosa, por enseñarme con su ejemplo la importancia de la familia.

Quiero agradecer de forma especial a mi pololo, Sebastián, por sus ayudas múltiples en el desarrollo de este trabajo y por su apoyo constante. A mis amigos de la vida, en particular a la Ale y Pia por su amistad y compañía, que valoro enormemente.

A los amigos que hicieron que mi paso por la universidad fuera muy especial. A mis amigos de plan común, en especial a mis compañeras de comunidad Angi, Coté y Maca. A mis amigos de civil e hidráulica por hacer muy gratos los últimos años, en particular a Oscar, Jandri y César por las largas tardes de estudio en alguna de nuestras casas. A la Vicky por su compañía y las risas. Gracias a todos por lo compartido. Gracias también a la universidad, a los profesores y funcionarios, por hacer posible esta experiencia.

# Tabla de contenido

Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	2
1.4. Organización del informe . . . . .	3
<b>2. Revisión Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1. Estuarios . . . . .	4
2.1.1. Clasificaciones . . . . .	5
2.1.2. Ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la cuña salina . . . . .	7
2.2. Caudal Ecológico . . . . .	9
2.2.1. Metodologías para el cálculo del caudal ecológico en ríos . . . . .	9
2.2.2. Hydropeaking . . . . .	15
2.3. Caracterización de flora y fauna . . . . .	16
2.3.1. Flora y vegetación terrestre . . . . .	16
2.3.2. Fauna terrestre . . . . .	17
2.3.3. Flora y fauna acuática . . . . .	17
2.3.4. Calidad del agua . . . . .	19
2.4. Antecedentes generales de HEC-RAS . . . . .	19
2.4.1. Modulo hidrodinámico de flujo impermanente . . . . .	20
2.4.2. Módulo de calidad de agua . . . . .	20
<b>3. Definiciones</b>	<b>21</b>
3.1. Definición de estuario . . . . .	21
3.2. Definición de caudal ecológico de estuarios . . . . .	22
<b>4. Metodología Propuesta</b>	<b>24</b>
4.1. Información general . . . . .	24
4.2. Estructura de la metodología propuesta . . . . .	24
4.2.1. Paso 1: Determinación del límite del estuario y área a caracterizar . . . . .	25
4.2.2. Paso 2: Caracterización del ecosistema estuarino y resistencia a la salinidad . . . . .	26

4.2.3.	Paso 3: Alcance del frente de intrusión salina en condiciones normales y tiempos de permanencia para distintas condiciones hidrológicas	29
4.2.4.	Paso 4: Restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina	32
4.2.5.	Paso 5: Determinación del caudal ecológico	33
<b>5.</b>	<b>Aplicación de la metodología en el estuario del río Aysén.</b>	<b>34</b>
5.1.	Paso 1: Determinación del límite del estuario y área a caracterizar	34
5.2.	Paso 2: Caracterización del ecosistema estuarino y resistencia a la salinidad	35
5.2.1.	Antecedentes de la zona de estudio	35
5.2.2.	Resistencia de los componentes a la salinidad	39
5.2.3.	Mapa de Sensibilidad Ambiental	41
5.2.4.	Identificación de componentes sensibles	42
5.3.	Paso 3: Alcance del frente de intrusión salina en condiciones normales y tiempos de permanencia para distintas condiciones hidrológicas	42
5.3.1.	Datos medidos en el estuario	44
5.3.2.	Resultados ecuación teórica	46
5.3.3.	Datos utilizados en la modelación	47
5.3.4.	Resultados modelación	51
5.3.5.	Análisis probabilístico	52
5.4.	Paso 4: Restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina	53
5.5.	Paso 5: Determinación del caudal ecológico	54
5.5.1.	Datos utilizados para la modelación	54
5.5.2.	Resultado del caudal ecológico	55
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>57</b>
6.1.	Metodología propuesta	57
6.2.	Aplicación al estuario del río Aysén	59
<b>7.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>60</b>
<b>A.</b>	<b>Datos utilizados de caudales</b>	<b>65</b>
<b>B.</b>	<b>Datos utilizados de mareas</b>	<b>71</b>

# Índice de tablas

4.1. Simbología para usos antrópicos en MSA, según la NOAA. . . . .	29
4.2. Simbología de recursos biológicos vulnerables para Mapa de Sensibilidad Ambiental (MSA), según la NOAA. . . . .	30
5.1. Especies de macrófitos de tipo helófitas, de agua dulce y que habitan en ríos o arroyos, registradas en la Región de Aysén. . . . .	38
5.2. Especies de peces registradas en el estuario del río Aysén. . . . .	38
5.3. Especies de aves registradas en la zona de estudio. . . . .	38
5.4. Tolerancias promedio a distintas salinidades, entre las poblaciones de la especie <i>Holcus lanatus</i> . . . . .	41
5.5. Efectos en la especie <i>Cyperus eragrostis</i> frente a tratamientos con agua salada. . . . .	41
5.6. Descripción de escenarios de modelación. . . . .	42
5.7. Resultados del alcance de la cuña salina a través de la ecuación teórica. . .	46
5.8. Recomendaciones de Ven Te Chow para método de Cowan. . . . .	49
5.9. Valores utilizados y resultado del número de Manning obtenido con el método de Cowan. . . . .	49
5.10. Caudales con distintas probabilidades de excedencia, utilizados para los escenarios con caudal constante (Escenarios 1 a 6). . . . .	50

# Índice de figuras

2.1. Tipos de estuario según balance de agua. . . . .	5
2.2. Tipos de estuario según estructura vertical de salinidad. . . . .	6
2.3. Modelo de cuña salina con fondo plano y solución de $L/H$ en función de $Fr_o$ . . . . .	8
2.4. Modelo de cuña salina con fondo variable. . . . .	8
2.5. Escalas consideradas en el análisis dentro del método “Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación”. . . . .	13
3.1. Esquema de campo de aplicación de la metodología. . . . .	22
3.2. Esquema del caudal ecológico en estuarios. . . . .	23
4.1. Ejemplo de la determinación del límite del estuario para el caso del río Toltén. . . . .	25
4.2. Esquema explicativo paso 3: Caracterización hidrodinámica. . . . .	32
5.1. Ubicación del estuario del río Aysén, en la Región de Aysén, Chile. . . . .	34
5.2. Determinación del límite del estuario del río Aysén. . . . .	35
5.3. Zona de rápidos en río Aysén. . . . .	36
5.4. Trucha arcoiris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> ) y Trucha café ( <i>Salmo trutta</i> ). . . . .	37
5.5. Mapa índice NDVI. Las zonas 1 y 2 indican sectores de alta intensidad de vegetación en las riberas. . . . .	39
5.6. Tolerancia a la salinidad de la especie <i>Holcus lanatus</i> . . . . .	40
5.7. Mapa de Sensibilidad Ambiental a la salinidad del estuario del río Aysén. . . . .	43
5.8. Puntos con datos de perfiles CTD en el estuario del río Aysén. . . . .	44
5.9. Perfiles de salinidad en todos los sectores registrados con sensores CTD. . . . .	45
5.10. Perfiles de salinidad separados por sectores de sensores CTD. . . . .	45
5.11. Perfil longitudinal de salinidad, según los datos medidos por los sensores CTD. . . . .	46
5.12. Batimetría del estuario del río Aysén. . . . .	47
5.13. Fotografía del lecho del río Aysén. Información proporcionada por el Ing. Carlos Reiher. . . . .	48
5.14. Curva granulométrica obtenida a través del software WipFrag 2010. . . . .	48
5.15. Serie de pronóstico de mareas en Puerto Chacabuco del año 2009, según SHOA. . . . .	51
5.16. Resultados de series de tiempo de alcances del frente de salinidad. . . . .	52
5.17. Perfiles longitudinales de salinidad promedio para escenarios con caudal constante. . . . .	53

5.18. Perfil longitudinal del porcentaje de tiempo en que la salinidad supera umbrales de 0 y 3 $gl^{-1}$ . . . . .	54
5.19. Días consecutivos en que el frente de intrusión alcanza la zona sensible según el caudal. . . . .	55
6.1. Esquema de los pasos de la metodología propuesta. . . . .	58

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El desarrollo y crecimiento de la sociedad actual ha provocado que ésta deba preocuparse de las alteraciones inducidas producto del cambio en el balance hídrico del medio ambiente acuático. El aumento de la demanda de agua, para satisfacer el crecimiento poblacional y de áreas agrícolas, mineras e industriales, ha provocado el deterioro de los cuerpos de agua, produciendo efectos directos sobre la población y sobre las especies acuáticas que habitan dichos sistemas (Dirección General de Aguas, 1996). Entre los sistemas afectados se encuentran los sistemas estuarinos, los cuales corresponden a la zona de la desembocadura de los ríos al mar, donde se combina agua dulce y salada, generándose un gradiente longitudinal de salinidad a lo largo del río.

El concepto de caudal ecológico se desarrolló como una herramienta de conservación del ecosistema de ríos, mediante la determinación del caudal mínimo requerido para mantener las condiciones del hábitat. Sin embargo, este concepto se ha ampliado, producto de las necesidades de caudal de agua dulce que poseen los estuarios (Halliday & Robins, 2001). Las zonas estuarinas corresponden a un sistema importante a analizar, ya que las características propias que posee hacen que su hidrodinámica sea muy diferente a la presente en ríos. De hecho, se ha mostrado que la duración y magnitud del caudal de agua dulce afluente al estuario puede cambiar como consecuencia del desarrollo de los recursos hídricos, y dichos cambios impactan a las especies estuarinas (Halliday & Robins, 2001). También, es importante destacar que los estuarios cumplen un rol natural importante como sitios de reproducción, desarrollo y crecimiento de muchas especies de animales y plantas estuarinas, y de muchas especies marinas que remontan hacia el estuario durante su período reproductivo. Esto se debe a la entrada desde el continente de una cantidad importante de nutrientes, materia orgánica particulada y sedimentos, transportados por los ríos (Stuardo & Valdovinos, 1989).

Las características propias de las zonas estuarinas hacen que su hidrodinámica sea muy diferente a la presente en ríos. Por ejemplo, en el caso de los ríos sin influencia de la marea, existe una relación directa entre caudal, velocidad y altura de escurrimiento, parámetros

abióticos con los que se relacionan las necesidades de las especies acuáticas presentes en ellos. En la zona estuarina de los ríos, en cambio, la altura y velocidad de escurrimiento, no sólo varían con el caudal, sino que además responde a la interacción con la marea, que varía periódicamente. El caudal afluente en este caso, además de relacionarse con los parámetros abióticos normales de ríos, se relaciona con la intrusión salina, pudiendo ser ésta de estratificación leve, moderada o alta, como en el caso de una cuña salina (Valle-Levinson, 2010). Debido a esto, aparecen nuevos problemas ambientales a considerar, y se requiere una metodología para determinar el caudal ecológico que proteja a las especies estuarinas de un aumento de salinidad al que no están acostumbradas.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es plantear una metodología para la determinación del caudal ecológico en estuarios y aplicarla en el estuario del río Aysén.

Para lograr este objetivo general se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Revisión bibliográfica de sistemas estuarinos y del concepto de caudal ecológico. Identificación de problema que genera la necesidad de elaboración de una metodología de caudal ecológico en estuarios.
2. Proposición de una metodología para el cálculo del caudal ecológico en estuarios.
3. Aplicación práctica de la metodología propuesta en el estuario del río Aysén.

## 1.3. Metodología

A continuación se detallan las metodologías asociadas a cada actividad indicada en la sección anterior:

1. ***Revisión bibliográfica de sistemas estuarinos y del concepto de caudal ecológico.***

Se desarrolló una revisión bibliográfica de los dos puntos principales de este estudio, los cuales corresponden a: *i*) definición, identificación de componentes y estudio de la hidrodinámica de estuarios, y *ii*) definición de caudal ecológico, avance del concepto y estudios realizados en Chile y en el extranjero.

2. ***Proposición de una metodología para el cálculo del caudal ecológico en estuarios.***

Una vez revisado el estado del arte de las dos componentes del estudio, se planteó una metodología de 5 pasos, los cuales fueron descrito en detalle dentro de la metodología. Como apoyo a los pasos propuestos, se añadió a la revisión bibliográfica información sobre la caracterización de la flora y fauna, como también se revisaron los aspectos generales del software HEC-RAS.

### 3. *Aplicación práctica de la metodología propuesta.*

Se aplicó la metodología propuesta al estuario del río Aysén. Para ello, se recopiló la información necesaria para cada paso de la metodología. Particularmente, los datos geométricos relacionados con la batimetría y línea de costa se obtuvieron de las cartas SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile). Para la caracterización biológica del estuario se recopiló información secundaria a través de antecedentes bibliográficos e imágenes satelitales. Luego, para la caracterización hidrodinámica del estuario se recopiló información de caudales, a partir de los registros de la estación fluviométrica “Río Aysén en Puerto Aysén” código BNA 11342001-4 de la DGA (Dirección General de Aguas); de mareas, a partir de la tabla de marea de la costa de Chile publicada por SHOA; y de salinidad, a partir de los perfiles CTD levantados en la zona por Centro de Ecología Aplicada Ltda. (CEA). Una vez recopilada la información necesaria, se procedió a aplicar la metodología y se obtuvo un resultado preliminar del caudal ecológico para el estuario del río Aysén.

## 1.4. Organización del informe

El informe se organiza en 6 capítulos. En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica, en donde se revisa el estado del arte respecto de los dos conceptos de este estudio: hidrodinámica de estuarios y caudal ecológico. También, se revisa la clasificación de estuarios y las metodologías propuestas para el cálculo del caudal ecológico en ríos. Por último, se incluye una revisión de antecedentes relacionada con la caracterización de flora y fauna, según estudios de impacto ambiental realizados en Chile en los últimos años, y se sintetizan los antecedentes generales del software HEC-RAS. En el Capítulo 3 se entregan las definiciones consideradas en el marco de este estudio. Estas definiciones permiten comprender de mejor forma el campo de aplicación al que apunta este trabajo. La metodología propuesta se presenta en el Capítulo 4, donde se expone la información general de la metodología y su estructura, describiendo los 5 pasos que la componen. Cada paso se encuentra descrito en detalle, indicando la información necesaria para llevarlos a cabo. En el Capítulo 5, por otra parte, se muestra la aplicación de la metodología propuesta al caso particular del estuario del río Aysén. Para la aplicación de cada paso, se indica la información utilizada, los supuestos considerados y finalmente los resultados obtenidos. Este capítulo ayuda a una mejor comprensión de los pasos de la metodología descrita en el capítulo anterior. Finalmente, en el Capítulo 6 se resumen y discuten los principales resultados presentados en este trabajo.

# Capítulo 2

## Revisión Bibliográfica

En este capítulo se presentan los antecedentes recopilados para llevar a cabo la elaboración de la metodología para la determinación de caudal ecológico en estuarios. Esta revisión comprende dos ejes temáticos principales: el estudio de los sistemas estuarinos y del concepto de caudal ecológico. Además, se incluye la revisión realizada sobre temas complementarios que aportaron en la elaboración de los pasos de la metodología.

### 2.1. Estuarios

De acuerdo con Cameron y Pritchard (1963), un estuario se define como un cuerpo de agua semi-cerrado y costero, con libre comunicación al océano y en el cual el agua del océano es diluida por el agua dulce. Por otra parte Olivares (2000) define un estuario como “cuerpo de agua costero, semi-cerrado, correspondiente al último tramo en el extremo de aguas abajo de un curso superficial, donde existe interacción entre agua dulce del río y agua salada del mar”.

En estos sistemas, el agua salada del océano tiende a moverse aguas arriba, conducido por la boyancia creada por las diferencias de densidad entre el agua dulce y salada (Niño & Tamburrino, 2004). La estratificación en la columna de agua puede ser leve, moderada o alta, dependiendo de las condiciones de mezcla. En el caso de estratificación alta, la mezcla en la interfaz es muy pequeña o nula.

En cuanto a la extensión del estuario, existen tres criterios clásicos para definir el límite de aguas arriba de un estuario (Booth, 2011):

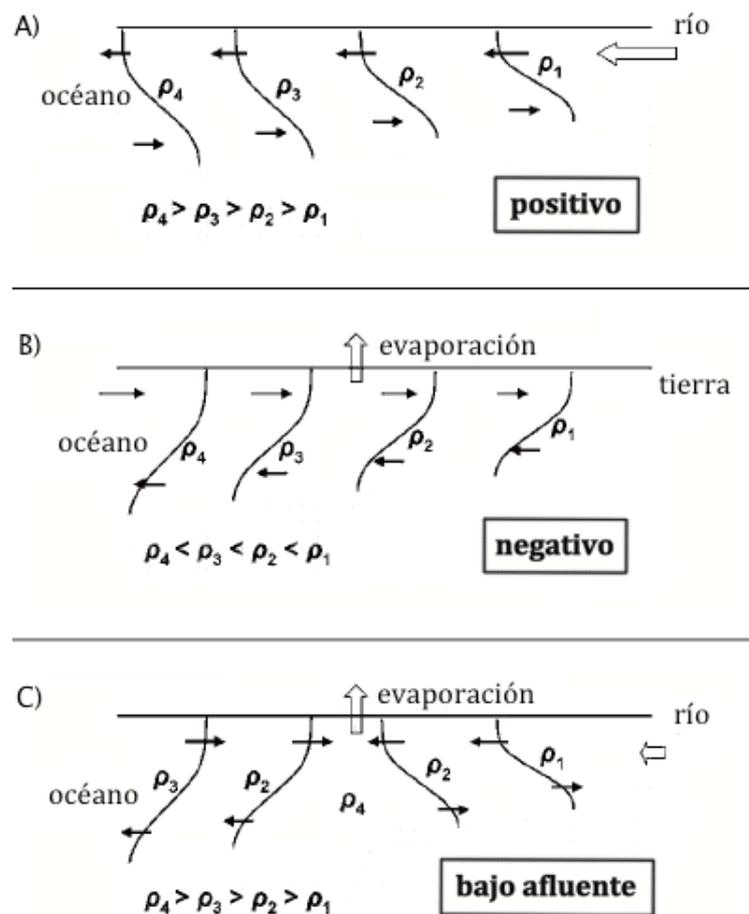
- Límite basado en la salinidad: Pritchard (1967) señala que un estuario queda limitado por el área en la cual la salinidad se encuentra en el rango de  $0,1 \text{ gl}^{-1}$  a  $30\text{-}35 \text{ gl}^{-1}$ .
- Límite basado en la onda de marea: Fairbridge (1980) propone que el límite de aguas arriba de un estuario se encontraría en la zona donde se deja de percibir el efecto de la marea.

- Límite basado en los sedimentos: Dalrymple (1992) define los límites de un 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.

### 2.1.1. Clasificaciones

Existen variadas clasificaciones de estuarios, según distintas características y parámetros: según balance de agua, según estructuras de salinidad y según comportamiento hidrodinámico. A continuación se detallan las principales características asociadas a cada uno de estos tipo de clasificación.

#### Clasificación según balance hídrico



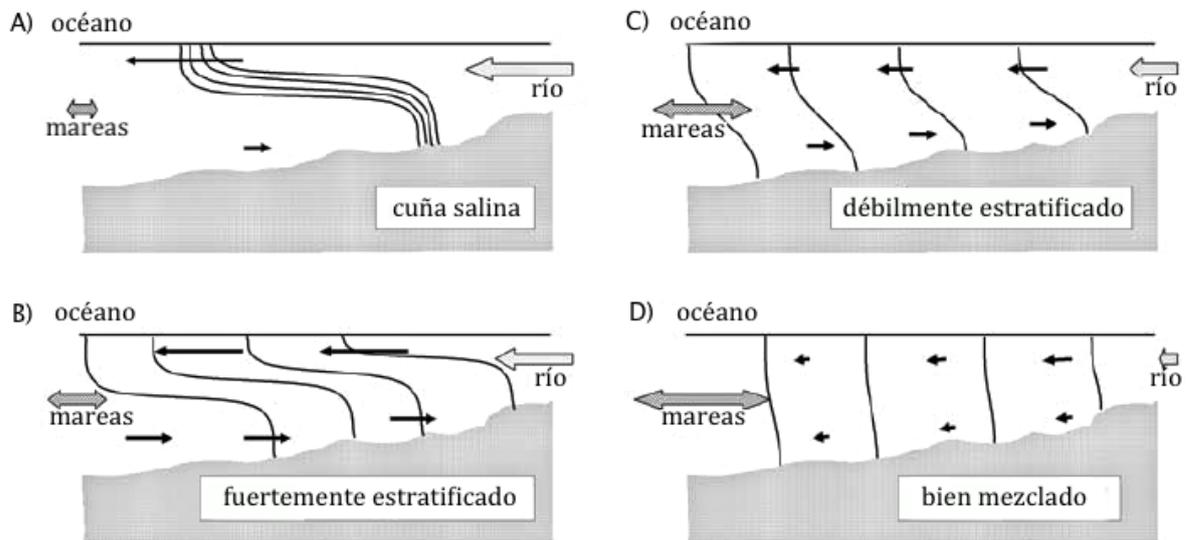
**Figura 2.1:** Tipos de estuario según balance de agua (Valle-Levinson, 2010).

- Balance de agua positivo (Figura 2.1A): En este tipo de estuarios, el agua dulce del río, la lluvia y el derretimiento de hielos exceden la pérdida por evaporación o congelamiento y establece un gradiente de densidad longitudinal.

- Balance de agua negativo (Figura 2.1B): Caso típico en regiones áridas, donde la evaporación excede la precipitación. La descarga del río es nula o escasa.
- Bajo afluente (Figura 2.1C): Evaporación causa zona de máxima salinidad.

### Clasificación según estructura vertical de salinidad

Clasificación propuesta por Cameron y Pritchard (1963). Estuarios pueden cambiar cíclicamente de un tipo a otro.



**Figura 2.2:** Tipos de estuario según estructura vertical de salinidad (Valle-Levinson, 2010).

- Cuña salina (Figura 2.2A): Caracterizado por grandes descargas de río y débil forzante del mar. Está fuertemente estratificado. Algunos sistemas pierden su naturaleza de cuña salina durante los períodos secos.
- Fuertemente estratificada (Figura 2.2B): Caracterizado por moderadas a altas descargas de río y débil a moderada forzante de la marea. La estratificación sigue siendo fuerte durante todo el ciclo de mareas.
- Débilmente estratificado (Figura 2.2C): Caracterizado por descargas de río débil a moderadas y forzante de marea moderada a alta. Hay mayor mezcla. Se da generalmente en estuarios templados.
- Bien mezclado (Figura 2.2D): Caracterizado por descarga de río débil y forzante de marea fuerte. Son estuarios bien mezclados verticalmente, con flujo unidireccional en la altura.

### Clasificación según comportamiento hidrodinámico

Fischer *et al.* (1979) propusieron un criterio basado en el número de Richardson de estuarios (Niño & Tamburrino, 2004).

$$R_i e = \frac{\Delta \rho g Q_f}{\rho_s W u_t^3} \quad (2.1)$$

donde:  $\Delta \rho = \rho_s - \rho_0$  es la diferencia de densidad entre agua dulce y agua salada,  $Q_f$  la descarga de agua dulce,  $W$  denota el ancho del estuario y  $u_t$  la velocidad RMS (root-mean-square), influenciada por los efectos de marea.

Con este parámetro se determina que si:

$R_i e > 0,8$  entonces el estuario está fuertemente estratificado y el flujo está dominado por intrusión salina.

$R_i e < 0,08$  el estuario está bien mezclado con variaciones despreciables de densidad en la vertical.

### 2.1.2. Ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la cuña salina

Cuando el estuario se encuentra en condiciones de alta estratificación, se habla de cuña salina, ya que es posible diferenciar dos capas de flujo: una de agua dulce y otra de agua salada (ver Figura 2.3). A continuación se describen los resultados de dos modelos que estudian el comportamiento de la cuña salina.

De acuerdo a Schijf & Schonfeld (1953) es posible determinar una expresión analítica para calcular la longitud de la cuña,  $L$ , cuando el fondo es plano y la profundidad total de escurrimiento es igual a  $H$ . La ecuación se obtiene de plantear las ecuaciones de momentum en los ejes  $x$  y  $z$ , conservación de volumen (fluido incompresible) y conservación de la masa de sal, todas promediadas en la turbulencia (Niño & Tamburrino, 2004):

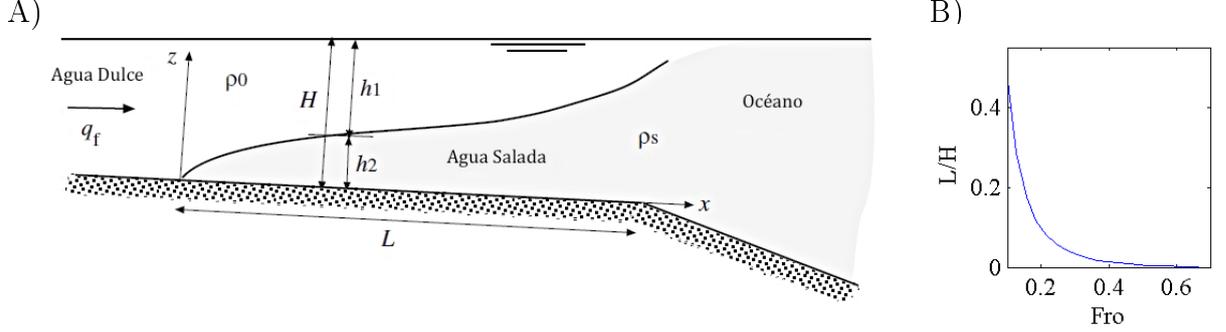
$$\frac{L}{H} = \frac{1}{4c_{fi}} \left[ \frac{1}{5Fr_0^2} - 2 + 3Fr_0^{2/3} - \frac{6}{5}Fr_0^{4/3} \right] \quad (2.2)$$

donde  $Fr_0$  es el número de Froude densimétrico definido como:

$$Fr_0^2 = \frac{q_f^2}{g\phi H^3} \quad (2.3)$$

donde  $q_f$  corresponde al caudal por unidad de ancho de agua dulce y  $\phi$  a la diferencia relativa de densidades entre el estrato de agua salada y el de agua dulce. Además  $c_{fi}$  corresponde al coeficiente de fricción interfacial o intercapa, que según Cole & Wells (2008) se puede estimar como  $c_{fi} = 0,01$ . En la Figura 2.3B se observa que el largo de la

cuña  $L$  aumenta para valores menores del Froude densimétrico. Como este último depende directamente del caudal, se puede notar que a menor caudal de agua dulce, la cuña salina alcanza distancias mayores aguas arriba del estuario.



**Figura 2.3:** A) Modelo de cuña salina con fondo plano. B) Solución de  $L/H$  en función de  $Fr_o$  de (2.2).

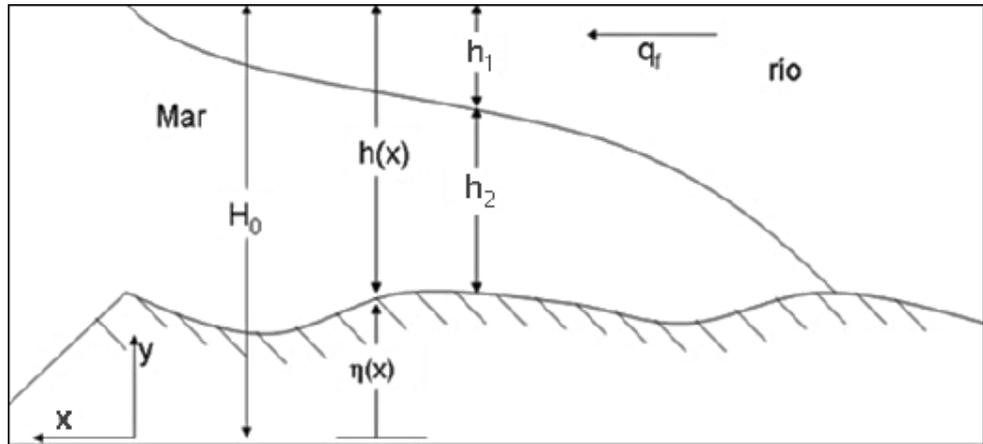
Además, definiendo las variables adimensionales  $\xi = \frac{x}{L}$ ;  $h_2^* = \frac{h_2}{h_{2c}}$ ;  $h_{2c} = H(1 - r_c)$ , se puede escribir la ecuación adimensional que caracteriza el perfil longitudinal de la cuña:

$$(Fr_0^2 - 1) \frac{h_2^*}{2} + (1 - Fr_0^{2/3}) h_2^* \left\{ 1 - \frac{3}{4} (1 - Fr_0^{2/3}) h_2^* + \frac{1}{5} (1 - Fr_0^{2/3})^2 h_2^* \right\} = K \xi \quad (2.4)$$

donde:

$$K = -\frac{Fr_0^2}{4} \left( \frac{1}{5Fr_0^2} - 2 + 3Fr_0^{2/3} - \frac{6}{5}Fr_0^{4/3} \right) (1 - Fr_0^{2/3})^{-2} \quad (2.5)$$

Un segundo modelo a considerar corresponde al desarrollado por Olivares (2000), en el que se considera el efecto de la batimetría sobre el alcance de la cuña salina. Este modelo es una extensión del modelo de cuña salina de Schijf y Schönfeld (1953), que supone lecho plano (Booth, 2011).



**Figura 2.4:** Modelo de cuña salina con fondo variable (Olivares, 2000).

$$\left( 1 - \frac{h_1}{H_0 - \eta(x)} \right) \frac{dh_1}{dx} + cf_i \frac{q_f^2 / (\phi g h_1^3)}{1 - q_f^2 / (\phi g h_1^3)} = 0 \quad (2.6)$$

Para ambos modelos, el coeficiente de fricción interfacial se puede obtener de valores recomendados en la literatura, por ejemplo el propuesto por Cole y Wells (2008), que consideran un valor de  $cf_i = 0,01$ .

## 2.2. Caudal Ecológico

El término caudal ecológico ha sido el más empleado para abordar el tema de las perturbaciones antrópicas sobre los sistemas fluviales, desde el punto de vista hidráulico (Meza & Pernollet, 2011). En ciertos países, como Estados Unidos, Canadá y en algunos países europeos, hace ya tres décadas que se aplican los “instream flow” para garantizar una cierta cantidad de agua en un cauce intervenido. En Chile, este instrumento se adoptó, bajo el nombre de caudal ecológico en la década de 1990, con el objetivo de conservar los ecosistemas de agua dulce (Endesa Chile, 2011).

La definición de este concepto es bastante amplia ya que ha sido desarrollada por variados autores. Algunas definiciones se presentan a continuación:

- Caudal que sea capaz de mantener el ecosistema en un nivel aceptable, considerando ésto como el caudal que permita mantener el ecosistema sin cambios irreversibles, es decir, bajo condiciones mínimas de recuperabilidad (Dirección General de Aguas, 1996).
- “Caudal mínimo que da cuenta de la conservación de la biodiversidad propia del curso en cuestión, adecuado para asegurar el cumplimiento de las funciones y servicios ecológicos del medio acuático, como lo son la mineralización, asimilación, entre otros”. Definición dada por CONAMA, 1998 (Jemett & Rodrigues, 2005).
- “Flujo que debe mantenerse en cada sector hidrográfico, de tal manera que los efectos abióticos producidos por una reducción de caudal no alteren la dinámica del ecosistema”. Definición descrita en método Vasco, España (Haro, 2002).
- “Caudal que debe mantenerse en un curso fluvial o en específico en cada sector hidrográfico, de tal manera que los efectos abióticos (disminución del perímetro mojado, profundidad, velocidad de la corriente, incremento en la concentración de nutrientes, entre otros) producidos por la reducción de caudal no alteren las condiciones naturales del cauce, impidiendo o limitando el desarrollo de los componentes bióticos del sistema (flora y fauna), como tampoco alteren la dinámica y funciones del ecosistema” (Dirección General de Aguas, 2008).

### 2.2.1. Metodologías para el cálculo del caudal ecológico en ríos

Para el cálculo del caudal ecológico se han desarrollado numerosos métodos, los cuales pueden dividirse en tres tipos: los métodos hidrológicos o estadísticos, los métodos hidráulicos y los métodos hidrobiológicos. A continuación se resumen cada uno de estos métodos.

### Métodos hidrológicos o estadísticos

Corresponden a los más simples, basándose en el análisis de registros estadísticos de caudales. Como ejemplo de este tipo de métodos, en Chile se debe destacar el Manual de Normas y Procedimientos, donde se establecen las normas, en virtud de las cuales la Dirección General de Aguas fija criterios y procedimientos para definir los caudales ecológicos mínimos, basados únicamente en la información de estadísticas fluviométricas del cauce, no dando cuenta de la variabilidad espacial ni de las distintas demandas (bióticas y abióticas) a las que están sometidos los distintos cursos de agua del país (Meza & Pernollet, 2011).

Históricamente, la DGA ha considerado como caudal mínimo ecológico un determinado porcentaje del caudal del río, establecido en forma constante, utilizando algunos de los siguientes criterios:

- Caudal igual al 10 % del caudal medio anual.
- Caudal igual al 50 % del caudal mínimo de estiaje del año 95 %.

Actualmente en Chile, según el Decreto 14 del Ministerio de Medio Ambiente (2013), se establece que para cada mes del año, el caudal ecológico mínimo se considerará como el caudal equivalente al 20 % del caudal medio mensual, con el límite máximo del 20 % del caudal medio anual. Además, en casos calificados en los que se identifiquen riesgos en la calidad de las aguas y/o en el hábitat que comprometan la supervivencia de las especies, se podrá fijar un caudal ecológico mínimo diferente, de hasta un máximo del 40 % del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial.

Sin embargo, un criterio coherente es el que liga las exigencias del hábitat que tienen las especies fluviales con las variaciones de las características de éste en función de los caudales circulantes (Baeza & García del Jalón, 1997). Un método destacado dentro de este concepto corresponde al **método de Montana o Tennant**, el que fue desarrollado por Tennant (1976) en los Estados Unidos. En este método se recomienda que los caudales mínimos se calculen de manera tal que sustenten la calidad de hábitat para peces, determinados de acuerdo a observaciones de cómo se reproducen de mejor forma las condiciones hidrológicas naturales de los ríos. La calidad del hábitat se clasifica de acuerdo al juicio profesional del observador. El método entrega porcentajes del caudal medio anual que se debe cumplir, dependiendo de la calificación dada al hábitat, y del período del año (Haro, 2002).

Otro método a destacar en esta categoría corresponde al establecido por **Baeza y García de Jalón** (1997), para el que analizaron series históricas de caudales diarios y buscaron un caudal bajo, al que las poblaciones fluviales hayan estado sometidas durante un período largo de días. Este corresponde a un caudal que ha condicionado una resistencia de los individuos frente a él. Para determinar qué caudal utilizar, ordenaron las series diarias de caudales en orden cronológico para cada año y calcularon el caudal medio de grupos de varios días consecutivos, desde 3 días hasta 100 días. Sobre esta nueva serie de caudales calcularon el caudal mínimo para cada grupo de días. Repitiendo la operación para cada año, calcularon valores medios de todos los años estudiados y los representaron gráficamente en función del número de días acumulado. Comprobaron que hay un cambio

de pendiente aproximadamente a los 25 días, por lo que se utiliza el caudal  $Q_{25d}$  como representativo, es decir, el caudal mínimo que fluye por el río durante 25 días seguidos (Baeza & García del Jalón, 1997).

### Métodos hidráulicos

Corresponden a los métodos que crean relaciones entre algún parámetro hidráulico y el caudal que escurre por el río (Haro, 2002). El método más utilizado en esta categoría corresponde al **Método del perímetro mojado**, elaborado por Nelson (1980). Consiste en graficar los valores de perímetro mojado versus el caudal para cada sección. Una vez construido este gráfico, se elige el punto donde cambia la pendiente de la curva como el punto buscado, debido a que este punto de inflexión representa el caudal por encima del cual la variación del perímetro mojado comienza a disminuir. Es decir, se asume que el caudal mínimo obtenido en la sección crítica cumple con los requerimientos de las necesidades mínimas de producción de alimento, desove, etc. (Haro, 2002). El principal inconveniente de este método es la falta de información sobre las relaciones existentes entre la biota y el perímetro mojado de un cauce.

### Métodos hidrobiológicos

En esta categoría se pueden incluir los métodos de estimación de hábitat, que transforman las mediciones hidráulicas en un indicador del aprovechamiento potencial del hábitat y los métodos de respuestas biológicas, que corresponden a modelos de desarrollo poblacional que incluyen series de tiempo, hábitat y caudales (Riestra, 2007).

A continuación se presentan algunos métodos de tipo hidrobiológico de interés.

#### **PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) (1982):**

Este método es una subcomponente de IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Se debe definir la especie que se desea conservar (especie objetivo). PHABSIM es un conjunto de modelos matemáticos cuyo propósito fundamental es calcular un índice de la cantidad de hábitat disponible en un cauce, para diferentes estados de vida de las especies y para distintos caudales en el río. Posee dos componentes analíticos principales: programas de simulación hidráulica y criterios de habitabilidad para diversas especies (Haro, 2002). Esta metodología está siendo utilizada ampliamente en Norteamérica y Europa (Centro de Ecología Aplicada, 2008b).

Los resultados del modelo hidráulico son: a) la altura de escurrimiento y b) las velocidades en las secciones transversales del cauce, para distintos caudales (Milhous *et al.*, 1989). La componente de hábitat utiliza información de tipo biótica para calcular o definir índices de utilidad del hábitat, entre 0 y 1 (donde 0 indica condición hidráulica no adecuada para un correcto desarrollo de la especie objetivo, mientras que 1 corresponde a hábitat adecuado).

Los parámetros hidráulicos estimados son combinados con los índices de utilidad de hábitat para determinar un índice global de habitabilidad, que es propio de la especie en estudio, de su fase de desarrollo y del caudal pasante por la sección. Se denomina generalmente área ponderada utilizable (APU) (Haro, 2002).

### Método Vasco:

Este método fue desarrollado en el norte de España, por el Departamento del Medio Ambiente del Gobierno Vasco. Se basa en el criterio que la disminución del flujo en el período de menor caudal circulante por aportaciones naturales, no provoque la extinción de especies de invertebrados bénticos y en ningún caso afecte al conjunto de poblaciones de las distintas especies que habitan la cuenca, es decir, considera la conservación de la biodiversidad.

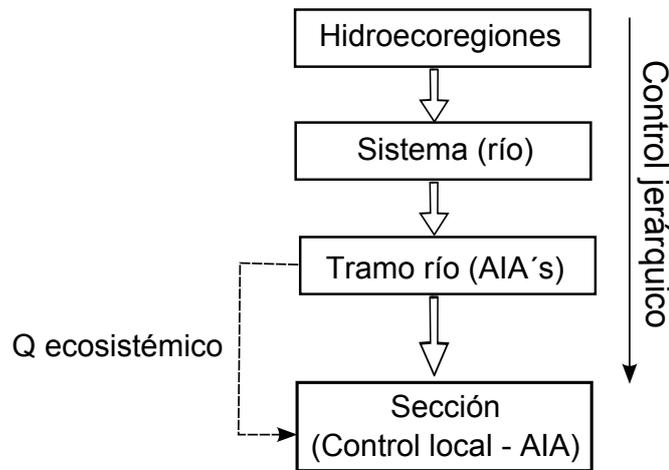
Dependiendo del grado de contaminación del tramo del río al cual es aplicado, utiliza diferentes ecuaciones: Para los tramos contaminados se utiliza una ecuación hidráulica, y para los tramos no contaminados, es decir, en condiciones naturales o con una mínima alteración humana, utiliza parametrizaciones bióticas (Haro, 2002).

La metodología puede resumirse en las siguientes etapas:

1. Recopilar antecedentes morfológicos (mapas hidrográficos), información hidráulica (área de cada sección, perímetro mojado y profundidades), información hidrológica (estadísticas de caudales medios diarios de al menos tres años) e información biológica (datos de macroinvertebrados bénticos y de comunidades de peces).
2. Estimación del caudal en un área de drenaje. Se debe obtener una relación entre el área de drenaje ( $A_u$ ) y el largo de las vías fluviales que la atraviesan ( $L_u$ ) y luego una relación entre el caudal en un punto de la red hidrográfica ( $Q_u$ ) y su  $A_u$ .
3. Modelo hidráulico. Mediante la ecuación de Manning se obtiene una expresión para el caudal del río en función del perímetro mojado. Se realiza un “test ecológico”, basado en la relación entre el número de taxones que integran la comunidad de macroinvertebrados bénticos y el perímetro mojado. El criterio es mantener al menos 15 taxas, que es el número mínimo encontrado en condiciones naturales en el país vasco.
4. Modelo biótico. Relaciona la diversidad ecológica con el caudal natural para los períodos de bajo caudal. Se utilizan dos criterios: Conservación de la fauna fluvial en un área de drenaje, subcuenca o cuenca completa, tal que la riqueza de especies habitantes se mantenga en el área en la que es aplicada (caudal óptimo) y conservación de la fauna fluvial en un tramo corto tal que la riqueza de especies local se conserve (caudal mínimo). Ambos criterios relacionan el número de especies con el caudal.

**Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación (CEA 2008):**

Se propone el modelo conceptual de la Figura 2.5 para determinar el caudal ecológico de un río, el cual incorpora un enfoque multiescalado y jerárquico (Figura 2.5). Se consideran cuatro escalas de análisis: i) Hidroecoregiones, definida por condiciones climáticas e hidrológicas específicas; ii) Sistema, definido por el río en toda su extensión; iii) Tramo de río, definido por la presencia de Áreas con Importancia Ambiental (AIA) (puede variar en el tiempo) y iv) Sección, definido por áreas donde se realiza el control local de los requerimientos de caudal por cada AIA (Centro de Ecología Aplicada, 2008a).



**Figura 2.5:** Escalas consideradas en el análisis dentro del método “Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación” (Centro de Ecología Aplicada, 2008a).

- **Hidroecoregiones:** Las Hidrozonas se estiman en función de la calidad del agua. Luego, las Ecozonas, en función de la fauna íctica nativa registrada en ellas. El análisis conjunto de estas dos ordenaciones dio como resultado siete Hidroecoregiones definidas (Altiplano, Loa - Camarones, Copiapó, Elqui, Aconcagua - Rapel, Biobío - Valdivia y Aysén), cada una de las cuales debiera tener planes de acción propios y distintivos.
- **Sistema (río):** La pendiente del cauce y el caudal son las variables que determinan mayoritariamente la expresión de los ecosistemas acuáticos y el desarrollo de usos antrópicos. El hábitat en plataformas litorales, meandros y zonas trenzadas, serían los más favorables para el desarrollo de la flora y fauna acuática, en particular para los peces nativos.
- **Tramo de río (Áreas con importancia ambiental, AIA):** Se define como aquellos bienes y servicios ecosistémicos que presenta un río, pudiendo ser de origen ecológico (AIE) y/o usos antrópicos (AUA). Las AIE corresponden a aquellas donde existen ecosistemas acuáticos o componentes bióticos (especies) con valor para la conservación biológica.
- **Sección:** Cada AIA presenta una sección característica en términos hidráulicos, donde se evaluarán y verificarán los requerimientos de caudal mínimo ecológico. Se debe conocer las preferencias de hábitat de las especies de interés. La determinación

de estas relaciones suelen expresarse en forma de “curvas de preferencia”. La forma típica en la cual se determinan las curvas de preferencia de hábitat parte del muestreo in situ de los individuos en un determinado sector, para luego ponderar la presencia de individuos por el hábitat total disponible.

El caudal ecológico en un tramo de río quedará definido de este modo por la AIA que presente el requerimiento más elevado de caudal.

La metodología para determinar el caudal mínimo ecológico está determinada por las siguientes etapas: *i)* identificación de AIA; *ii)* validación de las AIA, que implica obtención de información primaria específica y actualizada; *iii)* determinación de umbrales ambientales por AIA; *iv)* modelación de escenarios de caudal mínimo ecológico para mantención de AIA; *v)* determinación de la regla de operación del caudal mínimo ecológico; y *vi)* monitoreo de AIA, implica el diseño de un plan de seguimiento para verificar el comportamiento de las AIA frente a modificaciones en el caudal. Este tipo de método se considera holístico, porque involucra variables de distintos tipos.

En la etapa de determinación de umbrales ambientales por AIA, se consideran principalmente rangos de altura de escurrimiento que deben mantenerse para sustentar poblaciones de peces nativos y actividades de uso antrópico. Adicionalmente a caudales base requeridos, se deben mantener alturas de agua de las áreas de playa o escurrimiento somero para las fecha en que se produce el desove y/o reclutamiento de individuos. Otro parámetro importante a considerar corresponde al esfuerzo de corte de fondo que se ejerce sobre la superficie húmeda, el que es el responsable de desprender y remover el perifiton adherido al sustrato, y así, lavar el sistema. Debido a que variaciones en el caudal modifican el esfuerzo de corte, un caudal de lavado es requerido para mantener la fauna íctica y los procesos de regulación natural del flujo de carbono.

### **Legislación actual en Chile**

Es importante mencionar que a nivel nacional ya se reconoce la importancia de que el método a emplear para la determinación del caudal ecológico sea integrado, y no que incluya un análisis puramente hidrológico como fue en los años 90. La DGA, luego de lanzar el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos el año 2008, realizó algunas aclaraciones y correcciones en 2 minutos realizadas durante el 2009. En éstas se pretende entregar lineamientos para las metodologías de caudal ecológico, estableciendo (Dirección General de Aguas, 2009b):

1. Un valor que considere una visión más holística, que involucre por ejemplo, variables del tipo biológico, pesquero, antrópico, paisaje, dilución, turismo, navegación, entre otras.
2. Para proyectos que han sido sujetos a evaluación en el marco del SEIA y se ha establecido un caudal mínimo ecológico, se deberá respetar el máximo entre dicho caudal y el determinado por los criterios de estimación mensuales descritos en el manual, al momento de resolver dicha solicitud.
3. Es relevante el punto de control en el cual se exige el caudal ecológico. Se deberán

definir áreas de importancia ambiental, zonas o tramos sensibles en donde sea de importancia respetar el caudal ecológico.

Adicionalmente, según el Decreto 14 del Ministerio de Medio Ambiente (2013), se establece que para cada mes del año, el caudal ecológico mínimo se considerará como el caudal equivalente al 20 % del caudal medio mensual. Además, en casos calificados en los que se identifiquen riesgos en la calidad de las aguas y/o en el hábitat que comprometan la supervivencia de las especies, se podrá fijar un caudal ecológico mínimo diferente, de hasta un máximo del 40 % del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial.

### 2.2.2. Hydropeaking

Un tema relevante en los últimos años en el avance del concepto de caudal ecológico, es el denominado hydropeaking. Si se desea preservar la calidad ecológica de los ríos, no basta con determinar un caudal mínimo, sino que es importante también evitar grandes fluctuaciones de caudal a escala intradiaria. El hydropeaking puede causar severos impactos sobre la biodiversidad, debido a que peces, macroinvertebrados y plantas acuáticas se someten a un gran estrés y en muchas ocasiones no son capaces de sobrevivir a las frecuentes fluctuaciones del nivel de agua (Gostner *et al.*, 2011).

La principal causante de este problema es la hidroelectricidad, la cual, a pesar de ser una fuente de energía limpia, puede implicar significativos impactos locales y pérdidas medioambientales, producto de la generación intermitente o hydropeaking. Muchas centrales hidroeléctricas optimizan su operación generando electricidad en función de la demanda y los precios de mercado de corto plazo (Bain, 2009), sin considerar que estas fluctuaciones intradiarias, también generan impacto sobre el hábitat.

Bain (2009) desarrolló una escala de importancia de impactos para organizar los impactos de los hydropeaking, lo cual arrojó criterios para la operación de las centrales hidroeléctricas. Se utiliza la escala llamada gradiente de condición biológica, que organiza los resultados de los impactos en seis categorías, desde ecosistema natural o no alterado hasta ambientes altamente alterados. Luego, se analizan dos parámetros relevantes del hydropeaking: la razón entre menor y mayor descarga y el intervalo del cambio del nivel de agua para la operación típica del hydropeaking. Analizando 149 impactos de distintos casos de hidroeléctricas, que involucran invertebrados, peces y otros grupos como algas, plantas ribereñas, moluscos y macrófitas, Bain (2009) separó las seis categorías de impactos en dos grupos: nulo o bajo impacto y moderado a alto impacto. Con esto, determinó rangos de operación del hydropeaking para que los impactos cayeran dentro del grupo de nulo a bajo impacto, concluyendo que una conservación estándar del río para operación de hydropeaking requiere una máxima razón entre mayor y menor descarga de 4 y un rango máximo de nivel de 90 *cm*.

## 2.3. Caracterización de flora y fauna

Se realizó una revisión bibliográfica de diversos EIA para conocer los lineamientos básicos de las metodologías que se utilizan actualmente en Chile para la caracterización del medio biótico en estos estudios.

### 2.3.1. Flora y vegetación terrestre

Para la caracterización de flora y vegetación terrestre se busca identificar las especies vegetales presentes en los ecosistemas, definiendo su ubicación, distribución y abundancia, y poniendo énfasis en aquellas especies que se encuentren en alguna categoría de conservación. Posteriormente se genera una cartografía que represente estas variables.

Para la caracterización de la vegetación se pueden considerar aspectos como: el sistema de clasificación de uso de suelos a través de fotointerpretación, a partir del estudio de fotos aéreas; definición de las asociaciones vegetales a través de un muestreo en terreno bajo criterios de representatividad espacial; representatividad de la vegetación a escala nacional, regional y en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE) (Centro de Ecología Aplicada, 2008c). Se puede utilizar la Carta de Ocupación de Tierras, que corresponde a la metodología oficial utilizada en el catastro de la vegetación nativa de Chile en el Proyecto CONAF-CONAMA-BIRF (1997), con el fin de tener la posibilidad de comparar las formaciones vegetales encontradas con las descritas para Chile (Knight Piésold Consulting, 2009).

La metodología a seguir para la caracterización de la vegetación se podría desarrollar en las siguientes etapas (Knight Piésold Consulting, 2009):

- Recopilación de información cartográfica: Durante esta etapa se recopila y analiza la información base obtenida de cartografías de uso de suelo, cartografía de clasificación vegetal e imágenes satelitales.
- Descripción de las unidades de vegetación en terreno: Descripción cartográfica de la vegetación presente en el área de estudio.
- Tratamiento de datos y clasificación de las unidades cartográficas: Sintetizar la información detallada de tipos biológicos, cobertura y altura de cada unidad vegetacional y asignarle un nombre según el sistema de clasificación empleado.
- Segmentación y atribución: Finalmente se segmenta la imagen satelital en unidades cartográficas y se ajustan según información de terreno.

Para la caracterización de la flora un procedimiento consiste en: recolección de muestras en terreno; identificación de especies vegetales, donde todo el material recolectado es identificado; elaboración del listado florístico y descripción de atributos; clasificación de las especies. La flora vascular puede ser descrita por riqueza, origen fitogeográfico, formas de vida y estado de conservación (Centro de Ecología Aplicada, 2008c).

Las etapas para desarrollar la línea base de flora y vegetación se pueden dividir en dos etapas. Una primera etapa consiste en recopilación de antecedentes en base a una revi-

sión bibliográfica, y un trabajo de fotointerpretación preliminar para ser posteriormente evaluado y validado en terreno. Una segunda etapa consiste en campañas de terreno (Ministerio de Obras Públicas, 2011), donde se identifiquen de forma directa las especies presentes en el área de estudio.

### 2.3.2. Fauna terrestre

De forma análoga a la caracterización anterior, para la caracterización de la fauna se busca identificar las especies de animales presentes, definiendo su ubicación, distribución y abundancia, poniendo énfasis en las que se encuentren en alguna categoría de conservación. Estas variables son representadas en una cartografía (Centro de Ecología Aplicada, 2008c).

Luego de realizar una revisión de antecedentes sobre la fauna terrestre de la zona de estudio, se realizan campañas de terreno, que permiten tener una visión detallada de las especies presentes.

Según el grupo de vertebrados estudiado se utilizan distintas técnicas de muestreo (Knight Piésold Consulting, 2009), algunas de las cuales se mencionan a continuación.

- **Anfibios:** Se describen itinerarios a pie y se registran los ejemplares encontrados por detección visual. La determinación de abundancia relativa se realiza mediante conteo de ejemplares durante el desarrollo de transectas. Adicionalmente se buscan ejemplares levantando troncos o en horarios nocturnos.
- **Reptiles:** Avistamiento directo de ejemplares durante el curso de transectas, orientado mayormente a campañas de verano.
- **Mamíferos:** Para la detección de micromamíferos se utiliza baterías de trampas Sherman plegables. En cada estación de muestreo se dispone una línea de trampas, que son revisadas y retiradas al día siguiente de su instalación. Para la detección de macromamíferos se realizan transectas para detectar huellas y evidencias indirectas como fecas, pelos, madrigueras, etc.
- **Aves:** Se utiliza avistamiento directo con binoculares y reconocimiento de vocalizaciones e identificación de plumas y nidos.

Además de las transectas libres y detección por medios físicos de actividad, se utiliza el método de transectas aéreas, es decir mediante el sobrevuelo a baja altura en helicóptero (Centro de Ecología Aplicada, 2008c).

### 2.3.3. Flora y fauna acuática

La descripción de la biota acuática suele centrarse en los peces y sus fuentes de alimento (macrozoobentos), ya que sobre éstos se han establecido categorías de conservación (Centro de Ecología Aplicada, 2008c). El estado de conservación de las especies puede ser determinado mediante la revisión de las clasificaciones oficiales del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES).

Para el muestreo de la biota acuática se deben considerar fitobentos, fitoplancton, zoobentos, zooplancton y fauna íctica (Centro de Ecología Aplicada, 2008c). A continuación se presentan algunas definiciones y lineamientos generales para el muestreo de estos elementos, descritos en metodologías de EIA's.

- **Fitobentos:** Corresponden a los “organismos fototróficos que viven asociados a cualquier sustrato del fondo en los ecosistemas acuáticos”, incluyendo cianobacterias, microalgas, macroalgas y macrófitas (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2007).

Para el muestreo de fitobentos, una alternativa utilizada es extraer dos réplicas aleatorias en cada punto de muestreo, mediante el muestreador propuesto por David & Gee en 1993 (Centro de Ecología Aplicada, 2008c; Knight Piésold Consulting, 2009). Este material es examinado en laboratorio por microscopía óptica para identificación y recuento de taxa. Los resultados se expresan como listados de especies y abundancias de las microalgas presentes, y determinando índices de diversidad de Shannon-Wiener (Centro de Ecología Aplicada, 2008c; Knight Piésold Consulting, 2009).

- **Fitoplancton (plancton vegetal):** Corresponden a la “comunidad de microorganismos fotosintéticos que viven suspendidos en la masa de agua” (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2007).

Se recolectan dos réplicas en cada punto de muestreo, mediante una red adecuada (Centro de Ecología Aplicada, 2008c; Knight Piésold Consulting, 2009) y son preservadas con solución Lugol (Centro de Ecología Aplicada, 2008c; Ministerio de Obras Públicas, 2011). El fitoplancton se analiza mediante microscopía óptica (Knight Piésold Consulting, 2009; Ministerio de Obras Públicas, 2011).

- **Macrozoobentos:** Corresponden a las comunidades bentónicas, es decir que viven asociados al sustrato, mayores a 1 *mm* de longitud.

Siguiendo la metodología sugerida por CONAMA (1996) en el documento “Metodologías para la caracterización de la calidad ambiental”, se toman tres muestras aleatorias en cada sitio de muestreo, utilizando una red Surber. Las muestras son analizadas cualitativa y cuantitativamente mediante una lupa Zeiss Stemi 2000-C (Centro de Ecología Aplicada, 2008c; Knight Piésold Consulting, 2009).

- **Zooplancton (plancton animal):** Corresponde al plancton compuesto por organismos heterótrofos que obtienen su alimento por ingestión, como los protozoos, larvas y crustáceos.

Se recolectan dos muestras en cada punto de muestreo, mediante una red de arrastre. Las muestras son fijadas con formalina 10 %, para su clasificación y recuento mediante microscopía óptica.

- **Fauna íctica (fauna de peces):** Para la colecta de peces se pueden mencionar tres técnicas a menudo utilizadas:
  - Pesca eléctrica.
  - Pesca con espineles.
  - Pesca con redes.

Los ejemplares recolectados deben ser identificados y medidos en longitud y peso.

### 2.3.4. Calidad del agua

La metodología utilizada en el monitoreo para el análisis de calidad del agua corresponde típicamente a las indicadas en *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater* (2012), una publicación conjunta de American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), y Water Environment Federation (WEF).

Los parámetros monitoreados generalmente incluyen: pH, temperatura, conductividad, Oxígeno Disuelto, alcalinidad, Amonio, Nitrato, Nitrito, Nitrógeno orgánico total, Fosfatos, Fósforo total, Sólidos Totales Suspendidos (STS), Sólidos Totales Disueltos (STD), Demanda Bioquímica de Oxígeno, Clorofila a, Coliformes totales y fecales, metales alcalinos y metales pesados.

## 2.4. Antecedentes generales de HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) es un software de dominio público desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU (US Army Corps of Engineers). Está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales, en canales naturales o artificiales. Contiene cuatro componentes: cálculo de perfiles superficiales en flujo permanente e impermanente, cálculo de transporte de sedimento y análisis de calidad del agua. Los cuatro componentes utilizan datos geométricos y rutina de cálculo hidráulico comunes (US Army Corps of Engineers, 2006).

1. Simulación en flujo permanente: Es capaz de modelar régimen subcrítico, supercrítico y mixto. El procedimiento de cálculo está basado en la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Las pérdidas de energía son evaluadas por fricción (Manning) y contracción/expansión. La ecuación de momentum es utilizada en situaciones de escurrimiento rápidamente variado.
2. Simulación en flujo impermanente: Es capaz de simular flujo no permanente en canales abiertos. Para resolver, HEC-RAS utiliza el principio de conservación de masa (continuidad) y el principio de conservación de momentum, expresadas matemáticamente como ecuaciones diferenciales parciales.
3. Cálculo de transporte de sedimentos/fondo móvil: El potencial de transporte de sedimento es calculado a través de la fracción de tamaño de los granos. El modelo simula los términos a largo plazo que tienden a erosionar o depositar en el canal producto de modificar la frecuencia o duración de la descarga.
4. Análisis calidad del agua: Permite a los usuarios realizar análisis de calidad de aguas en ríos. Puede realizar detallados análisis de temperatura y transporte de un número limitado de constituyentes.

### 2.4.1. Módulo hidrodinámico de flujo impermanente

Las leyes físicas que gobiernan el flujo son: el principio de conservación de masa (continuidad) y el principio de conservación de momentum. Estas ecuaciones son expresadas matemáticamente en forma de ecuaciones diferenciales parciales.

- Ecuación de continuidad:

La forma final utilizada corresponde a:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (2.7)$$

donde  $A$  corresponde al área total por la cual escurre el flujo,  $Q$  al caudal lateral que ingresa al volumen de control,  $q_l$  al caudal por unidad de largo,  $t$  al tiempo y  $x$  el largo del volumen de control.

- Ecuación de momentum: La forma final utilizada corresponde a:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2.8)$$

donde  $v$  es la velocidad,  $g$  a la aceleración de gravedad,  $z$  la elevación de la superficie de agua y  $S_f$  la pendiente de fricción, calculada con la ecuación de Manning como:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2,208R^{4/3}A^2} \quad (2.9)$$

donde  $R$  es el radio hidráulico y  $n$  el coeficiente de Manning.

### 2.4.2. Módulo de calidad de agua

El módulo de calidad de agua utiliza el esquema numérico QUICKEST-ULTIMATE (Leonard, 1979 y 1991) para resolver la ecuación unidimensional de advección-dispersión. El modelo organiza los elementos de simulación en tres grupos: temperatura, algas y nutrientes y elementos arbitrarios.

Este módulo de HEC-RAS resuelve numéricamente la ecuación de advección-dispersión en régimen impermanente en 1-D, entre celdas de calidad de agua.

$$\frac{\partial}{\partial t}(VC) = -\frac{\partial}{\partial x}(QC)\Delta x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma A \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Delta x \quad (2.10)$$

donde  $V$  es el volumen de la celda de calidad de agua,  $C$  es la concentración,  $Q$  es el caudal,  $\Gamma$  es el coeficiente de dispersión definido por el usuario y  $A$  es el área de la sección transversal.

Se requiere haber ejecutado el modelo hidráulico y conocer las condiciones de borde y la condición inicial de la concentración.

# Capítulo 3

## Definiciones

Dada la revisión bibliográfica realizada, se pudo notar que los conceptos involucrados en el presente estudio poseen más de una definición, por lo que es necesario establecer cuáles son las definiciones que serán consideradas en esta metodología.

### 3.1. Definición de estuario

Como se indica en la Figura 3.1, el perfil característico de Chile se puede dividir en tres zonas relevantes, que dan origen a tres sectores de cauces: cauces de montaña, cauces trezados y meandrosos y deltas. La zona del delta incluye tanto los ríos que desembocan al mar como los que no. Los estuarios corresponden a aquellos sistemas conectados al mar, y que reciben, por lo tanto, influencia de la marea.

Considerando el esquema anterior y las características y clasificaciones de estuarios recopiladas en la revisión bibliográfica, en particular, la definición propuesta por Cameron & Pritchard (1963) y el límite de estuario propuesto por Fairbridge (1980), para el presente estudio se define un estuario como:

*Un cuerpo de agua costero, con libre comunicación al océano y donde el agua del océano es diluida por el agua dulce. Existe por lo tanto, interacción entre agua dulce de río y agua salada de mar. En este sentido, la interacción medible es la influencia de la marea, por lo cual, como límite de estuario se considera el límite según onda de marea, es decir, el estuario llega hasta donde se percibe el efecto de la marea sobre el escurrimiento.*

Según esta definición, es requisito que el estuario esté comunicado con el océano, lo que deja fuera de la definición a sistemas como lagunas costeras, que en el pasado fueron estuarios pero que actualmente corresponden a sistemas cerrados.

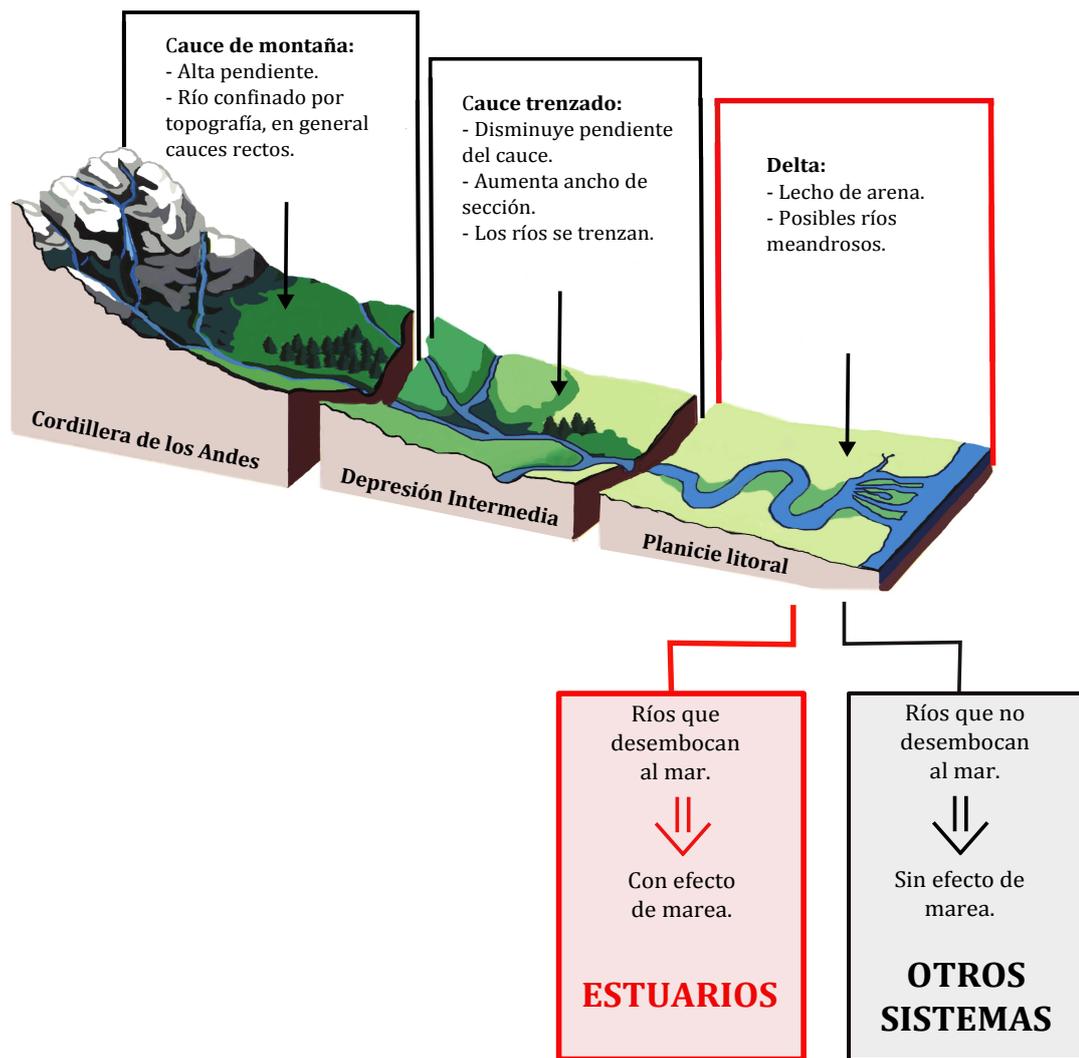


Figura 3.1: Esquema de campo de aplicación de la metodología.

### 3.2. Definición de caudal ecológico de estuarios

El caudal ecológico que con esta metodología se desea obtener, pretende proteger en las zonas estuarinas que grandes reducciones o fluctuaciones del caudal de agua dulce provoquen un cambio significativo en el sistema, afectando la flora y fauna del estuario. Una disminución de caudal de agua dulce puede provocar que el caudal de agua salada avance aguas arriba, como se muestra en el esquema de la Figura 3.2. Estos cambios físicos de la concentración de sal en el agua, provocan cambios biológicos en el sistema, afectando zonas en las que la vida acuática y la vegetación no están acostumbradas a recibir altas concentraciones de sal. Se desea evitar que altas concentraciones de sal ocurran en zonas en donde el hábitat no sea capaz de adaptarse.

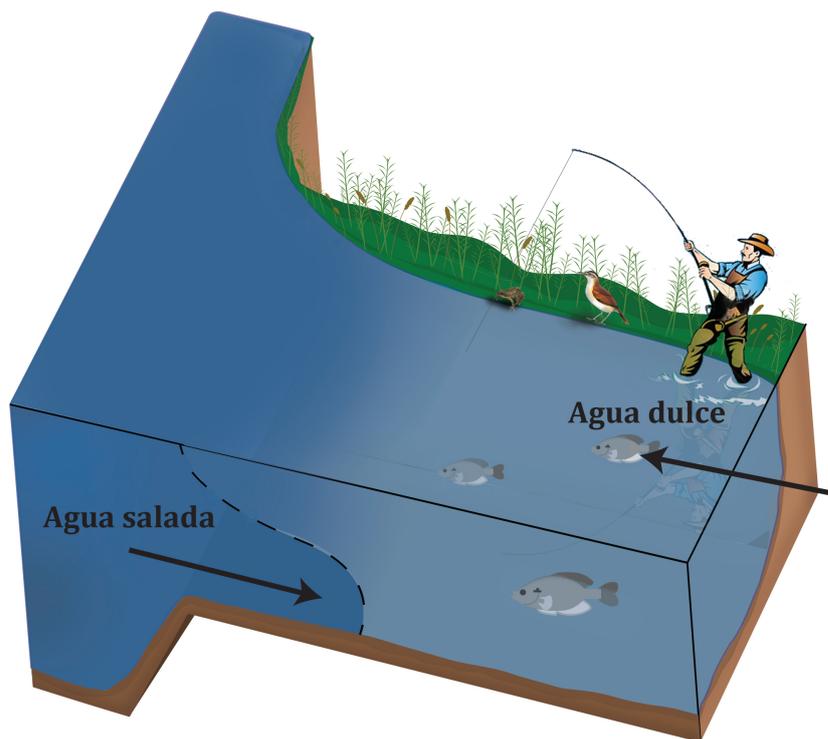
La definición de caudal ecológico que está en vigencia en Chile, y utilizada por el Servicio de Evaluación Ambiental, es la definida por la DGA en el Manual de Normas y Procedimientos para el Aprovechamiento de Recursos Hídricos del año 2008. Además existe el Reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo según el Decreto

14 del Ministerio de Medio Ambiente, del año 2013 (ver Capítulo 2).

Para el caso de estuarios, se especificará en la definición que el requerimiento a considerar en este concepto es el de agua dulce, pudiendo definirlo como:

*Es el caudal de agua dulce que debe llegar al estuario, de tal manera que los efectos abióticos producidos por los menores gastos de agua dulce no alteren las condiciones ecológicas del estuario, limitando o impidiendo el desarrollo de sus componentes bióticos, ni afecten la estructura y las funciones del ecosistema, permitiendo así conservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos del estuario.*

Es importante mencionar que esta metodología no busca determinar un caudal de dilución en un estuario, ya que éste debe ser calculado independientemente del caudal ecológico descrito en el párrafo anterior. La definición de un caudal de dilución está fuera del alcance de este trabajo. Con respecto a este tema, se recomienda revisar el estudio realizado por la DGA “Análisis Metodológico para determinar caudales de dilución en zonas estuarinas” (2009).



**Figura 3.2:** Esquema del caudal ecológico en estuarios.

# Capítulo 4

## Metodología Propuesta

### 4.1. Información general

En el presente capítulo se describe la metodología propuesta para determinar el caudal ecológico en estuarios. Ésta busca establecer los requerimientos mínimos de agua dulce, con el objeto de mantener el hábitat asociado al ecosistema estuarino. Desde este punto de vista, en la caracterización del ecosistema estuarino se deben identificar los componentes biológicos sensibles que existan en el estuario. Estos componentes sensibles y las condiciones normales de salinidad en el estuario, permiten determinar restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina, y por lo tanto, en el caudal de agua dulce que debe llegar al estuario. Partiendo de esta premisa, se define una metodología de 5 pasos, la cual consiste en identificar los elementos sensibles y caracterizar la hidrodinámica del estuario, para luego definir las restricciones sobre el avance del frente de intrusión salino, lo que finalmente permite el cálculo de un caudal ecológico.

### 4.2. Estructura de la metodología propuesta

A continuación se enumeran los pasos a seguir de la metodología propuesta.

1. *Determinación del límite del estuario y área a caracterizar:* Es necesario determinar los límites del área a caracterizar.
2. *Caracterización del ecosistema estuarino y resistencia a la salinidad:* Se deben identificar en el estuario las especies o actividades que podrían verse afectadas por una intrusión salina, a través de estudios ya existentes y/o levantamiento de información en terreno. Posteriormente, se debe investigar la resistencia a la salinidad que poseen los componentes que pudieran verse afectados. Es recomendable que los componentes identificados sean presentados en un mapa de sensibilidad ambiental, donde se puedan apreciar los componentes sensibles a una intrusión salina.
3. *Alcance del frente de intrusión salina en condiciones normales y tiempos de permanencia para distintas condiciones hidrológicas:* Para esto se realiza una modelación

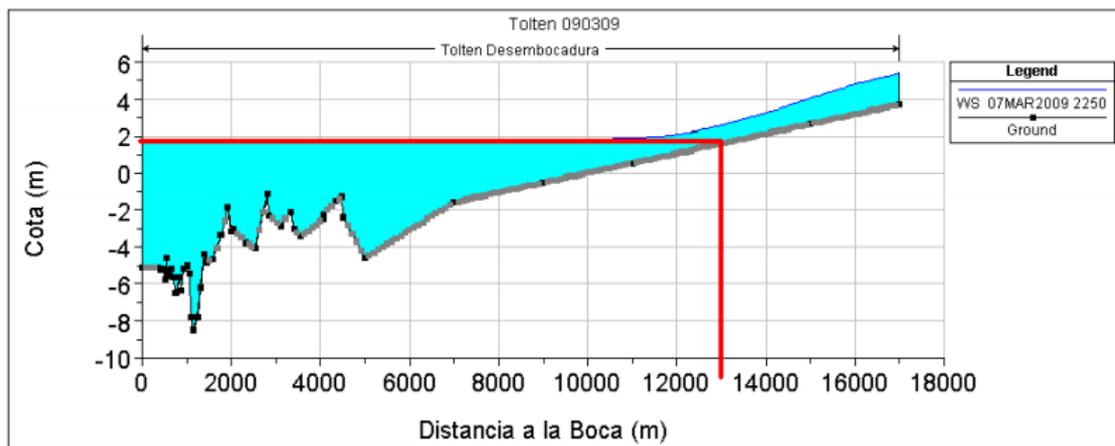
utilizando el software HEC-RAS y los datos de batimetría, caudales, mareas y perfiles CTD, requeridos para validar la simulación.

4. *Restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina:* Con los resultados de los pasos 2 y 3, se definen restricciones en el alcance de la cuña, con el objetivo de no impedir ni limitar el desarrollo de las especies analizadas.
5. *Determinación caudal ecológico:* Dadas las restricciones del punto 4, se determina con HEC-RAS el caudal de agua dulce que satisface dichas restricciones. Éste será el caudal ecológico del estuario.

A continuación se describirán en mayor detalle los pasos de la metodología, enumerados anteriormente.

#### 4.2.1. Paso 1: Determinación del límite del estuario y área a caracterizar

Para determinar el área a caracterizar, es importante definir el límite aguas arriba del estuario. La estimación de la longitud del estuario puede ser llevada a cabo a partir de una modelación de flujo impermanente, donde el lugar que define la longitud del estuario corresponde a la zona de máximo alcance de la marea en la modelación, analizada a partir de la variación del nivel superficial y el caudal. Para efectos de esta propuesta metodológica, este límite corresponde al punto donde se deja de percibir el efecto de la marea, el que se estima como el lugar del río cuya cota de terreno es igual a la cota del nivel del mar para una pleamar de sicigia (Dirección General de Aguas, 2009a). Para identificar este punto, se debe trazar una horizontal desde el nivel máximo de marea de sicigia hasta que intercepte con la cota de fondo del río, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 4.1. Luego, el área a caracterizar será todo el estuario y las riberas a su alrededor.



**Figura 4.1:** Ejemplo de la determinación del límite del estuario para el caso del río Tolten (Dirección General de Aguas, 2009a)

Al momento de realizar la modelación en HEC-RAS, es importante verificar que en ningún caso el frente de intrusión salina vaya a superar el límite determinado en este paso. Al contrario, se espera que este punto límite del estuario se encuentre bastante

aguas arriba de la distancia máxima que alcanza el frente de salinidad en condiciones normales.

#### **4.2.2. Paso 2: Caracterización del ecosistema estuarino y resistencia a la salinidad**

Esta etapa corresponde a una línea base de la zona de estudio, análogamente a lo que se realiza al determinar caudal ecológico en ríos. Se pretende obtener información acerca de las especies que habitan el estuario, incluyendo el medio acuático y ripariano y las actividades antrópicas que puedan realizarse en él. Particularmente, es relevante conocer la posición longitudinal dentro del estuario de estos componentes, de modo de identificar los efectos que tendría un eventual aumento en la concentración de sal producto de un cambio en el alcance de la intrusión salina.

Para recopilar esta información, en primer lugar se deberían revisar los antecedentes del estuario a analizar, incluyendo los estudios y posibles monitoreos previos que se hayan realizado en el área. En caso de que la caracterización preexistente del estuario sea escasa, sería necesario realizar un levantamiento de información para completarla. Para esto se recomienda realizar visitas a terreno, en las que se determinen los componentes mencionados anteriormente.

##### **Antecedentes de la zona de estudio**

Una primera etapa de la caracterización debería corresponder a una revisión bibliográfica, en la que se recopilen los estudios previos realizados en el ecosistema estuarino. A partir de documentos técnicos, estudios científicos y otros, se debe caracterizar en forma preliminar la flora y fauna acuática, evaluando la composición de especies, abundancia y distribución (Centro de Ecología Aplicada, 2008a). Es de relevancia toda la información acerca de especies que vivan en el estuario o sus riberas y actividades humanas que se realicen en él.

Un antecedente que puede brindar información preliminar corresponde a la fotointerpretación a través de imágenes satelitales (Knight Piésold Consulting, 2009; Centro de Ecología Aplicada, 2008c). Esta técnica brinda información básica de la vegetación presente en el área a caracterizar.

Análogamente a los estudios de caudal ecológico en ríos, es necesario identificar los usos antrópicos presentes en la zona a caracterizar. Se debe hacer un inventario de las actividades antrópicas, como balseos, pesca, turismo (rafting, kayak), etc. (Centro de Ecología Aplicada, 2008a). La información se puede recopilar de distintas fuentes como municipalidades, agencias de turismo u otros canales de información.

### Levantamiento de información complementaria

Podría ocurrir que los antecedentes recopilados de la zona de estudio no sean suficientes para completar una caracterización del estuario. En este caso, es necesario llevar a cabo un levantamiento de información complementaria a través de campañas en terreno. El levantamiento de información en terreno debería incluir la caracterización de: flora y vegetación terrestre, fauna terrestre, flora y fauna acuática, calidad del agua y actividades y usos antrópicos. Para cada una de estas categorías, se recomienda llevar a cabo un mínimo de dos campañas, durante las estaciones de invierno y verano.

#### *Caracterización de flora y vegetación terrestre:*

Idealmente se deberían realizar varias campañas de terreno con el propósito de cubrir la variedad estacional de las especies vegetales (Centro de Ecología Aplicada, 2008c).

Dada la revisión bibliográfica realizada sobre las metodologías de caracterización de la vegetación para las líneas bases de estudios de impactos ambientales, se propone el siguiente procedimiento como alternativa para la caracterización:

- Recolección de muestras en terreno. En las campañas de terreno se deben recolectar muestras y tomar fotografías, dejando registro de la posición geográfica de cada muestra.
- Identificación de especies vegetales. El material recolectado debe ser identificado utilizando bibliografía, comparación de ejemplares o identificación según expertos.
- Elaboración de listado. Se debe generar un listado de las especies identificadas acompañadas de su ubicación en el estuario.

#### *Caracterización de fauna terrestre:*

En el capítulo de revisión bibliográfica se pueden revisar algunos métodos para el muestreo, según el grupo de vertebrados que se desee estudiar. Considerando esto, se propone los siguientes pasos para la caracterización:

- Realización de métodos de detección directa (reconocimiento visual en transectas a pie o aéreas) o indirecta (detección de actividad física a través de fecas, huellas u otro).
- Identificación de especies con sus respectivas estimaciones de densidad.
- Elaboración de un listado de las especies identificadas y su ubicación en el estuario.

#### *Caracterización de flora y fauna acuática:*

Idealmente, el muestreo debe comprender fitobentos, fitoplancton, zoobentos, zooplankton, fauna íctica y vegetación. Algunas metodologías de muestreo de estas componentes fueron mencionadas en el capítulo 2. Dada la revisión bibliográfica realizada, se propone seguir un procedimiento que incluya:

- Definir estaciones de muestreo que caractericen zona de estudio.
- Identificar a través de las técnicas de muestreo escogidas, las especies de flora y

fauna acuática que habitan en el estuario.

- Elaboración de un listado de las especies identificadas, acompañados de las ubicaciones en las que fueron encontrados.

#### *Caracterización de calidad de agua:*

Se recomienda realizar monitoreo de calidad de agua para identificar el estado de los parámetros característicos de la columna de agua. En el capítulo de revisión bibliográfica se encuentran mencionados los principales parámetros y una típica metodología.

#### *Actividades y usos antrópicos:*

Es recomendable que la información acerca de actividades y usos antrópicos, recopilada dentro de los antecedentes de la zona de estudio, sea verificada durante la etapa de levantamiento de datos en terreno (Centro de Ecología Aplicada, 2008a).

### **Resistencia de los componentes a la salinidad**

Una vez identificados los componentes biológicos presentes en el estuario, se debe investigar sobre los umbrales de resistencia a la concentración de sal que éstos poseen y sobre el tiempo que el componente puede tolerar este umbral.

Esta información debe ser recopilada a través de revisión bibliográfica a estudios sobre umbrales de resistencia a la salinidad, o a través de consulta a expertos con dominio en este tema. Cuando no exista información específica de la componente buscada, se recomienda buscar información de especies similares que pudieran tener requerimientos parecidos.

### **Mapa de Sensibilidad Ambiental**

La información recopilada en los pasos anteriores puede ser representada de forma gráfica mediante un mapa, que permita visualizar la ubicación de los componentes del estuario. De esta forma se facilita en gran medida la identificación de los componentes sensibles y la posterior toma de decisiones con respecto al alcance que debería tener el frente de salinidad.

Se propone elaborar un mapa de la zona de estudio en el que se incluyan los componentes identificados anteriormente. Para la elaboración de este mapa, se recomienda seguir el formato de los mapas de sensibilidad ambiental (MSA) elaborados por DIRECTEMAR o los *Environmental Sensitivity Index Maps* elaborados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), los cuales están orientados a asesorar en forma eficiente a la autoridad frente a un derrame de hidrocarburos, pero pueden utilizarse para otros fines.

Para la aplicación a este trabajo, es de utilidad construir un mapa en el que se presenten las especies y usos en sus respectivas ubicaciones, así como la sensibilidad de las riberas, y para esto es recomendable tomar las simbologías oficiales utilizadas en los

**Tabla 4.1:** Simbología para usos antrópicos en MSA, según el NOAA. Fuente: <http://response.restoration.noaa.gov/maps-and-spatial-data/human-use-resources-shown-esi-maps.html>

Categoría	Símbolo
Aeropuerto/Helipuerto	
Playa	
Pesca comercial	
Parque nacional	
Marina	
Pesca recreativa	
Reserva Natural	

MSA. En las Tablas 4.2 y 4.1 se presentan algunas de las simbologías recomendadas por la NOAA para la construcción de éstos. En el sitio web de la sección *Office of Response and Restoration* de la NOAA es posible encontrar más simbologías (consultar: [response.restoration.noaa.gov/esi](http://response.restoration.noaa.gov/esi)).

### Identificación de componentes sensibles

Una vez identificados los componentes presentes en el ecosistema estuarino en el MSA, se recomienda seleccionar cuáles de ellos corresponden a componentes sensibles. Los componentes sensibles serán aquellos que pueden verse afectados, en alguna medida, por el aumento de la salinidad.

#### **4.2.3. Paso 3: Alcance del frente de intrusión salina en condiciones normales y tiempos de permanencia para distintas condiciones hidrológicas**

La importancia de este paso es identificar las zonas que no están acostumbradas a la presencia de altas concentraciones de sal, y que por lo tanto, representan sectores sensibles dentro del estuario. Para determinar el alcance del frente de intrusión salina y sus tiempos de permanencia, se propone una modelación numérica utilizando el software HEC-RAS.

**Tabla 4.2:** Simbología de recursos biológicos vulnerables en MSA, según la NOAA. Fuente: <http://response.restoration.noaa.gov/maps-and-spatial-data/biological-resources-shown-esi-maps.html>

Categoría	Símbolo	Comentario
<b>Mamífero marino</b>		
Delfín		Área de concentración
Ballena		Área de concentración, migración o varamiento
<b>Mamífero terrestre</b>		
Mamífero pequeño		Mamífero de pelo, área de alimentación
<b>Ave</b>		
Ave pelágica		Área de concentración
Ave costera		Área de concentración
<b>Reptil / anfibio</b>		
Lagartija		Área de concentración
Tortuga		Área de concentración
<b>Pez</b>		
Alevín		Hueva, cría de peces y área de concentración
Pez		Hueva, cría de peces y área de concentración
<b>Crustáceo / insecto</b>		
Bivalvo		Área de alojamiento y cosecha
Insecto		Ubicación de especie de importancia
<b>Vegetación</b>		
Vegetación humedal costera		Ubicación de especies de importancia
Vegetación terrestre endémica /nativa		Ubicación de especies de importancia
Vegetación sumergida/emergente acuática		Ubicación de especies de importancia

## Modelación con HEC-RAS

En un estuario, la velocidad y la cota de la superficie libre pueden experimentar grandes variaciones temporales debido al efecto de la marea, en períodos de tiempo mucho menores que los asociados a cambios hidrológicos (Dirección General de Aguas, 2009a). Es por esto que el flujo de un estuario se considera impermanente. Por lo tanto, la modelación de la hidrodinámica de un estuario se debe implementar sobre un software que permita modelar flujo impermanente, como HEC-RAS u otro software similar.

Para realizar la modelación, se deben ingresar en primer lugar los datos geométricos en la sección *Geometric data*. Luego, se ingresan los datos de flujo impermanente (*Unsteady flow data*) y se ejecuta el programa. Finalmente se pueden ingresar los datos al modelo de calidad de aguas (*Water quality data*) y volver a ejecutar el programa.

Los datos a ingresar para la modelación de estuarios son los siguientes:

### 1. *Datos geométricos:*

Se debe ingresar un esquema del estuario, las coordenadas de las secciones transversales, números de Manning y distancias entre secciones. Se recomienda ingresar las secciones transversales más representativas del estuario, y luego utilizar la opción de HEC-RAS para interpolar las secciones, logrando una buena aproximación de la batimetría.

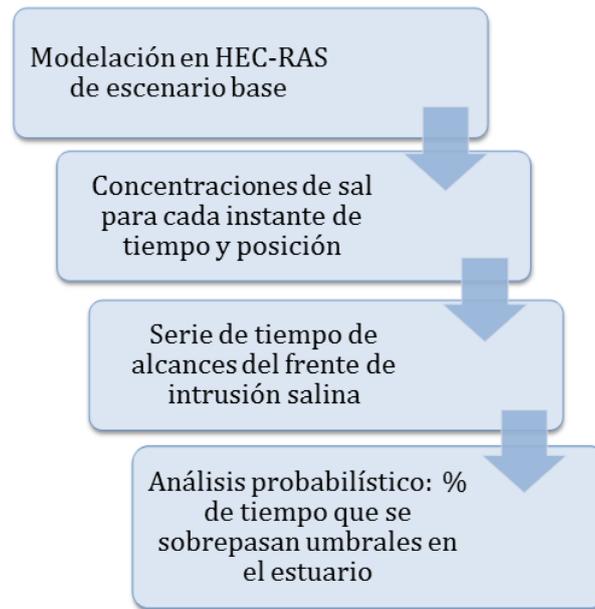
Para estimar el número de Manning, se recomienda utilizar la relación de Strickler y la curva granulométrica correspondiente.

### 2. *Datos flujo impermanente:*

Los datos a ingresar son las condiciones de borde y condiciones iniciales. Para la modelación en régimen impermanente se debe ingresar como condición de borde en la cabecera del estuario (aguas arriba) la serie de tiempo del caudal, y como condición de borde en la boca del estuario (aguas abajo en la desembocadura) la serie de tiempo de mareas al menos cada 6 horas, que es lo proporcionado por el SHOA. Estas series de tiempo se deben ingresar en las categorías *Flow Hydrograph* y *Stage Hydrograph*, respectivamente. Se considera como condición inicial el caudal en la sección aguas arriba, es decir, sobre la cabecera del estuario. Con esto, es posible ejecutar el modulo de hidrodinámica impermanente 1D. Posteriormente se debe acoplar a los resultados el módulo de calidad de aguas.

### 3. *Datos calidad de agua:*

Para modelar la salinidad se utiliza el modelo de calidad de aguas de HEC-RAS, donde se requiere como condición de borde contar con la salinidad promedio vertical aguas abajo. La salinidad de aguas arriba puede ser considerada como 0. Como condición inicial se recomienda modelar con concentración nula el río, hasta la desembocadura, y con concentración igual a la condición de borde aguas abajo del punto de desembocadura. Para calibrar o validar los resultados de la modelación, se recomienda tener mediciones de perfiles CTD (conductividad, temperatura y profundidad) a lo largo del eje longitudinal del río, para conocer la salinidad promedio vertical en éste.



**Figura 4.2:** Esquema explicativo paso 3: Caracterización hidrodinámica.

### Análisis Probabilístico

Una vez calibrado y validado el modelo, se procede a simular la serie completa de caudales y mareas. De esta modelación, se obtiene la concentración de sal en cada punto y para cada tiempo, obteniéndose entonces el alcance del frente de intrusión salino para cada instante de tiempo en la simulación. Con la serie de tiempo de alcances del frente de intrusión salino, se propone un análisis probabilístico de las condiciones normales, con el cual se determina para cada alcance, el porcentaje del tiempo que se sobrepasan ciertos umbrales de distancia a través del estuario. Con este resultado es posible estimar los tiempos de permanencia que tiene el frente de salinidad en los distintos puntos del estuario, en condiciones normales.

#### **4.2.4. Paso 4: Restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina**

Una vez conocidos los requerimientos de agua dulce de los componentes sensibles (etapa 2) y el alcance y los tiempos de permanencia del frente de intrusión salina en condiciones normales (etapa 3), se deben determinar los alcances máximos con sus respectivos tiempos de permanencia que satisfagan estos requerimientos. Estas restricciones deben asegurar que el alcance del frente de intrusión salina no provoque que los componentes sensibles sobrepasen su resistencia máxima a la concentración de sal (umbrales definidos en la etapa 2) en una cantidad de tiempo mayor a lo que pueden resistir.

#### 4.2.5. Paso 5: Determinación del caudal ecológico

Finalmente, se vuelve a utilizar HEC-RAS para modelar el estuario para determinar cuál es el caudal de agua dulce que como condición de borde logra que se cumplan las restricciones impuestas en la etapa anterior. Se recomienda realizar esta modelación con una serie de tiempo de mareas y un caudal constante en el módulo de flujo impermanente. El caudal ecológico puede ser encontrado realizando un procedimiento iterativo, donde en cada iteración se modele con un caudal distinto.

# Capítulo 5

## Aplicación de la metodología en el estuario del río Aysén.

### 5.1. Paso 1: Determinación del límite del estuario y área a caracterizar

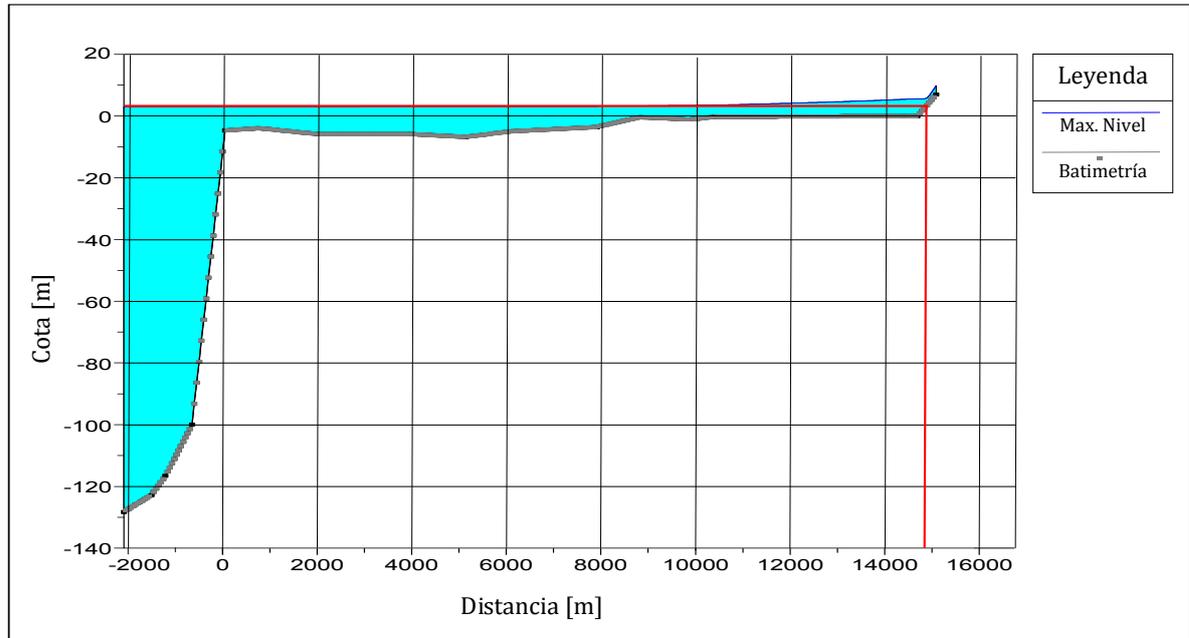
La aplicación de la metodología será efectuada en el estuario del río Aysén, ubicado en la XI Región, región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. A la zona del estuario confluyen el río Aysén y el río Los Palos (ver Figura 5.1).



Figura 5.1: Ubicación del estuario del río Aysén, en la Región de Aysén, Chile.

## CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN.

Para definir el inicio del estuario, es decir, el límite con el fiordo Aysén, se consideró el punto donde la pendiente se eleva de forma abrupta. En este punto se definió el cero para todas las mediciones de distancia que se realicen más adelante (ver Figura 5.2). La condición de borde aguas abajo, por otra parte, se posicionó donde se poseen mediciones de perfiles CTD con datos medidos de salinidad.



**Figura 5.2:** Determinación del límite del estuario del río Aysén.

El límite aguas arriba del estuario se obtuvo siguiendo el método descrito en el Paso 1. Debido a que el estuario presenta muy baja pendiente, fue necesario prolongar la información batimétrica hasta la zona de rápidos (Figura 5.3), donde aparece una pendiente brusca que logra que la línea horizontal de la máxima marea (línea roja en la Figura 5.2) intercepte la línea del terreno. Según este método la extensión del estuario corresponde a 14.9 km. Es importante notar que además del argumento del cambio de pendiente en la zona de rápidos, esta zona representa una desconexión hidráulica, que asegura que la zona aguas arriba de los rápidos no se vea afectada por la marea.

## 5.2. Paso 2: Caracterización del ecosistema estuarino y resistencia a la salinidad

### 5.2.1. Antecedentes de la zona de estudio

Hasta la fecha, el sector del estuario del río Aysén no cuenta con un monitoreo detallado del componente biótico. Para efectos de esta aplicación, la caracterización del ecosistema estuarino se realizó a través de antecedentes bibliográficos.



**Figura 5.3:** Zona de rápidos en río Aysén, coordenadas: 684801 E, 4969119 S.  
Fuente: Google Earth.

### Antecedentes bibliográficos

Se realizó una revisión para conocer la vegetación presente en el área a caracterizar. Se revisaron las clasificaciones de Gajardo (1994) y de Luebert & Pliscoff (2006), las cuales poseen representación cartográfica y por lo tanto áreas de distribución definidas. Con esto se obtuvo un listado de las especies más representativas del área.

Según la clasificación del Sistema Básico de Clasificación de la Vegetación Nativa de Chile desarrollado por Gajardo (1994), el área a caracterizar corresponde a la formación vegetal de *Bosque siempreverde de Puyuhuapi*. Este corresponde a un bosque que se extiende por las laderas bajas y valles occidentales de las cordilleras patagónicas, ocupando también las islas y fiordos próximos, en el límite entre la X Región de Los Lagos y la XI Región de Aysén. Predominan en el dosel arbóreo superior especies del género *Nothofagus* de hojas perennes, pequeñas y en algunos sectores es frecuente el ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendron wuiferum*) situado en las zonas pantanosas. Se caracteriza por las siguientes comunidades vegetales: *Nothofagus betuloides* y *Podocarpus nubigena* (coigüe de Magallanes y mañío macho), *N. nitida* y *P. nubigena* (coigüe de Chiloé y mañío macho), *Eucryphia cordifolia* y *Weinmannia trichosperma* (ulmo y tineo), *N. betuloides* y *Chusquea macrostachya* (coigüe de Magallanes y colihue), *P. wuiferum* y *Tepualia stipularis* (ciprés de las Guaitecas y tepú), *C. quila* y *Fuchsia magellanica* (quila y chilco), *F. magellanica* y *Aristotelia chilensis* (chilco y maqui), *Juncus procerus* y *Lotus corniculatus* (junquillo y lotera).

Según la Sinopsis Bioclimática y Vegetacional de Chile (Luebert & Pliscoff, 2006) el piso vegetal corresponde a “Bosque siempreverde templado interior de *Nothofagus betuloides* y *Desfontainia spinosa*”. Este se describe como bosque siempreverde dominado por *Nothofagus betuloides*, *Drimys winteri* y *Podocarpus nubigena* en el dosel superior. El estrato arbustivo se caracteriza por la presencia constante de *Desfontainia spinosa*, la que se ve acompañada por *Blechnum magellanicum*, *Fuchsia magellanica* y *Pseudopa-*

## CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN.

*nax laetevirens*. Al nivel del suelo destaca la presencia de *Lebetanthus myrsinites* y las epífitas más importantes son *Philesia magellanica* y *Campsidium valdivianum*. Las comunidades zonales que lo caracterizan son: *Nothofagus betuloides*, *Nothofagetum betuloidis*, *Nothofagus betuloides-Podocarpus nubigena*, *Fuchsia magellanica-Aristotelia chilensis*.

Para identificar especies posiblemente afectadas por la salinidad del agua, se recopiló información de macrófitas acuáticas de la Región de Aysén. Las macrófitas acuáticas, también denominados hidrófitas o plantas acuáticas, juegan un papel importante en estos ecosistemas, ya que sin ellos la naturaleza de los ecosistemas se haría más uniforme, incapaz de mantener las comunidades de peces y otros animales que en ellos se encuentran. Se los puede utilizar como bioindicadores para un primer diagnóstico de la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos, debido a su sensibilidad a los cambios que se producen en los medios en los que viven (García *et al.*, 2009). Las plantas acuáticas podrían ser un buen indicador de los requerimientos de avifauna y anfibios asociados a ríos, ya que estos utilizan las zonas de bosque, matorral y mallines asociados a los ríos para reproducirse (Centro de Ecología Aplicada, 2008b).

San Martín *et al.* (2011) realizó un estudio en el que identificó las macrófitas acuáticas en los cuerpos límnicos y en las marismas salobres de la Patagonia occidental de la Región de Aysén. En este estudio se clasifican las especies según origen fitogeográfico (nativa o introducida), hábitat y salinidad del agua. En la Tabla 5.1 se presentan las especies de macrófitas del tipo helófitas (plantas ribereñas o palustres) de agua dulce, que habitan en ríos y/o arroyos. Estas especies, por ser de agua dulce predominantemente, podrían verse afectadas por la presencia de agua salada.

Por otro lado, se realizó una revisión de los peces y aves presentes en el estuario (Tabla 5.2 y 5.3 respectivamente), indicando las ubicaciones de cada registro. La información de aves se recopiló de la Guía de Aves Dulceacuícola de Aysén (Figuroa *et al.*, 2001).



**Figura 5.4:** Trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) y Trucha café (*Salmo trutta*).

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUARIO DEL  
RÍO AYSÉN.

**Tabla 5.1:** Especies de macrófitos de tipo helófitas, de agua dulce y que habitan en ríos o arroyos, registradas en la Región de Aysén. Fuente: San Martín et al. (2011).

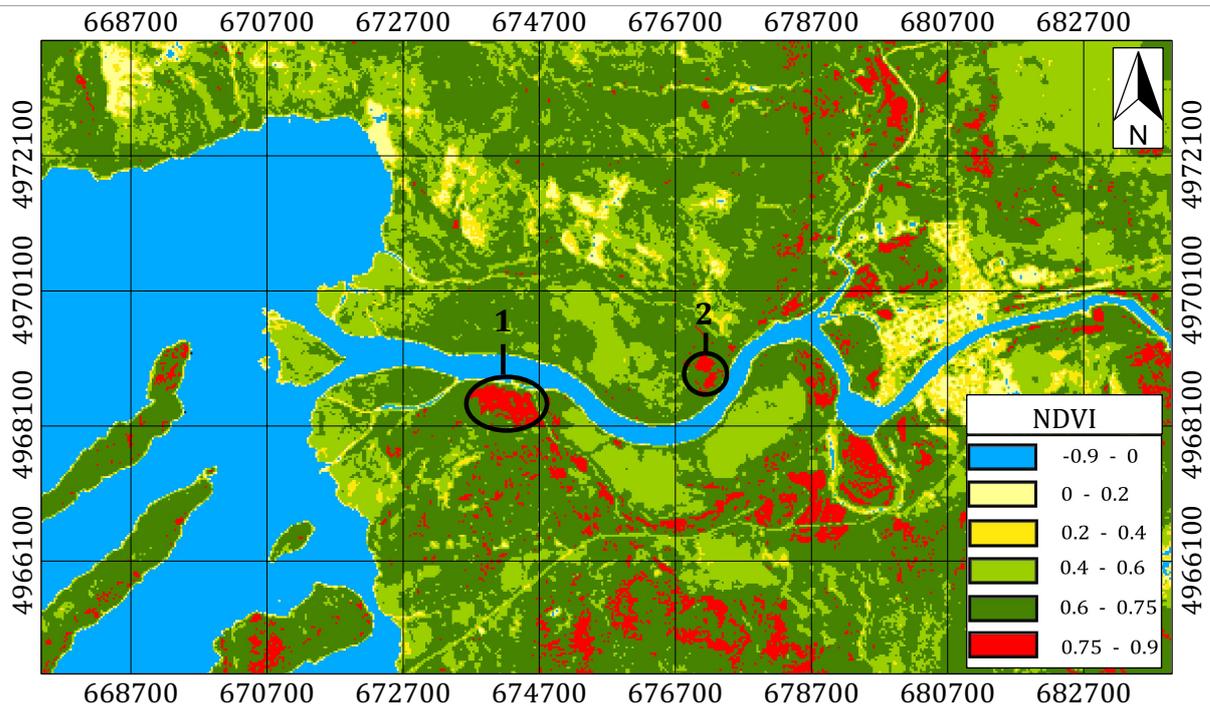
Nombre común	Especie	Familia	Origen
Llallante	<i>Geum magellanicum</i>	Rosaceae	Nativo
Cortadera grande	<i>Carex pseudocyperus</i>	Cyperaceae	Introducido
Cortadera azul	<i>Carex riparia</i> Curtis	Cyperaceae	Nativo
Cortadera	<i>Cyperus eragrostis</i>	Cyperaceae	Nativo
Litorela	<i>Litorella australis</i>	Plantaginaceae	Nativo
Quil-Quil	<i>Blechnum chilense</i>	Blechnaceae	Nativo
Cortadera	<i>Carex banksii</i>	Cyperaceae	Nativo
No conocido	<i>Carex darwinii</i>	Cyperaceae	Nativo
No conocido	<i>Carex macloviana</i>	Cyperaceae	Nativo
Limpiaplata	<i>Equisetum bogotense</i>	Equisetaceae	Nativo
Pasto dulce	<i>Holcus lanatus</i>	Poaceae	Introducido
Tembladerilla	<i>Hydrocotyle chamaemorus</i>	Hydrocotylaceae	Nativo
Junquillo rojo	<i>Juncus microcephalus</i>	Juncaceae	Nativo
Hierba de la vaca	<i>Juncus pallescens</i>	Juncaceae	Nativo
Junquillo grande	<i>Juncus procerus</i>	Juncaceae	Nativo
Cola de zorro	<i>Polypogon australis</i>	Poaceae	Nativo
Botón de oro	<i>Ranunculus repens</i>	Ranunculaceae	Introducido
Romaza	<i>Rumex conglomeratus</i>	Polygonaceae	Introducido
Hualtata	<i>Senecio fistulosus</i>	Asteraceae	Nativo
Lampazo	<i>Senecio smithii</i>	Asteraceae	Nativo
No me olvides del campo	<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	Scrophulariaceae	Introducido

**Tabla 5.2:** Especies de peces registradas en el estuario del río Aysén.

Nombre común	Nombre científico	Ubicación	Fuente
Trucha arcoiris	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Puerto Aysén	Sernapesca, 2007
Trucha arcoiris	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Zona Rápidos	Sernapesca, 2011
Trucha café	<i>Salmo trutta</i>	Zona Rápidos	Sernapesca, 2007
Indeterminada	<i>Aplochiton</i> sp.	Puerto Aysén	McDowall y Nakaya, 1987

**Tabla 5.3:** Especies de aves registradas en la zona de estudio. Fuente: Figueroa et al. (2001)

Nombre común	Nombre científico	Ubicación
Gaviota de Franklin	<i>Larus pipixcan</i>	Desembocadura río Aysén
Pato real	<i>Anas sibilatrix</i>	Puerto Aysén
Garza Boyera	<i>Bubulcus ibis</i>	Puerto Aysén
Queltehue, Tero	<i>Vanellus chilensis</i>	Puerto Aysén
Gaviota Dominicana	<i>Larus dominicanus</i>	Puerto Aysén
Gaviota Cahuil	<i>Larus maculipennis</i>	Puerto Aysén y Puerto Chacabuco
Colegial	<i>Lessonia rufa</i>	Puerto Aysén



**Figura 5.5:** Mapa índice NDVI. Las zonas 1 y 2 indican sectores de alta intensidad de vegetación en las riberas.

### Información a través de imágenes satelitales

A partir de imágenes satelitales LANDSAT 5, se elaboró el mapa del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) (presentado en la Figura 5.5), para obtener información preliminar de la vegetación del lugar. Este índice se utiliza para identificar la cobertura y el estado de la vegetación en base a la medición de la intensidad de la radiación de las bandas del espectro electromagnético (Chuvieco, 2002). Expresa la actividad fotosintética en la planta, donde al combinar las bandas del infrarrojo cercano (IRC) y la banda del infrarrojo (R) del espectro electromagnético, se establece una relación que varía entre valores de -1 y 1, donde los valores extremos expresan una actividad mínima (nula captura de energía luminosa) o máxima (total utilización de la energía luminosa disponible) en la planta, respectivamente. En la Figura 5.5 se destacaron con círculos negros las zonas que indican alta intensidad de vegetación en las riberas, los que para efectos de esta aplicación, son identificados como los lugares sensibles. A lo largo del eje longitudinal del estuario, estos lugares sensibles están ubicados en las distancias 3 y 6,7 km de la boca del estuario, respectivamente.

### 5.2.2. Resistencia de los componentes a la salinidad

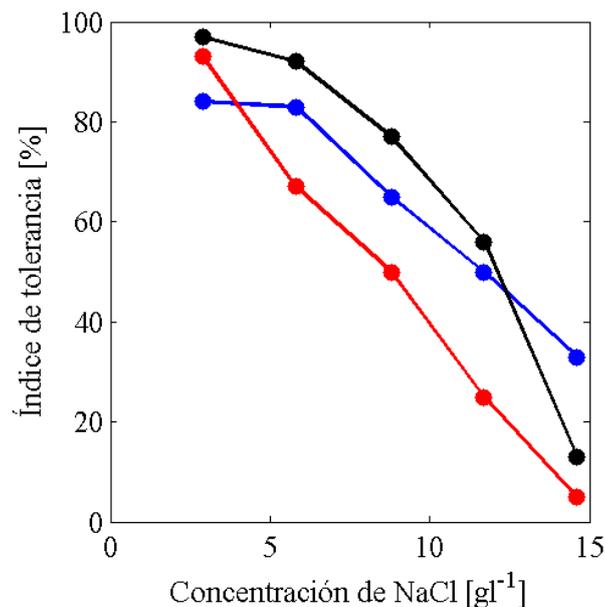
A partir de la revisión bibliográfica, se recopiló información de las especies de macrófitas *Cyperus eragrostis* (Cortadera) y *Holcus lanatus* (Pasto dulce) y de los peces *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoiris) y *Salmo trutta* (trucha café).

- *Holcus lanatus*:

Al aumentar las concentraciones de sal, se producen efectos adversos sobre la población de *H. lanatus* (Ashraf *et al.*, 1986). En el experimento realizado por el departamento de botánica de la Universidad de Liverpool se midió la longitud de las raíces después de haber tratado con *NaCl* a las poblaciones por un periodo de 14 días. El promedio de la longitud de las raíces fue transformado a un índice de tolerancia a la sal de acuerdo a Hannon y Bradshaw (1968), donde:

$$\text{Índice de tolerancia} = \frac{\text{promedio de la longitud de las raíces más largas con NaCl}}{\text{promedio de la longitud de las raíces más largas sin NaCl}}$$

Los resultados del experimento, expresados en índice de tolerancia, mostraron que se producen efectos negativos sobre la población de *H. lanatus* al aumentar las concentraciones de *NaCl* (ver Tabla 5.4). Podemos ver que para salinidades mayores a  $9 \text{ gl}^{-1}$ , la tolerancia de esta especie está bajo el 50 %.



**Figura 5.6:** Tolerancia a la salinidad de la especie *Holcus lanatus*, luego de 14 días de exposición. Las distintas curvas corresponden a las 3 poblaciones estudiadas. Fuente: Ashraf *et al.* (1986)

- *Cyperus eragrostis*:

Zulkaliph *et al.* (2011) realizó un estudio en el que distintas especie fueron expuestas a salinidades crecientes en el agua. La respuesta de las especies fue evaluada por una escala de daños, en la que 1 corresponde a 0 % de daño (no hay efectos visibles) y 9 corresponde a 100 % de daño (muerte). Según los resultados del experimento, *Cyperus eragrostis* no se vio afectada con una salinidad de  $30 \text{ gl}^{-1}$  y con una salinidad de  $61,4 \text{ gl}^{-1}$  mostró sólo síntomas medios (ver Tabla 5.5). Por lo tanto, según Zulkaliph *et al.* (2011), la especie resiste altas concentraciones de sal.

**Tabla 5.4:** Tolerancias promedio a distintas salinidades, entre las poblaciones de la especie *Holcus lanatus* estudiadas por Ashraf *et al.* (1986).

NaCl [ $gl^{-1}$ ]	Tolerancia Promedio [%]
2,9	91,3
5,8	80,7
8,8	64,0
11,7	43,7
14,6	17,0

**Tabla 5.5:** Efectos en la especie *Cyperus eragrostis* frente a tratamientos con agua salada. Fuente: Zulkaliph *et al.* (2011). Además, se indica la tolerancia (T) calculada a partir de la escala de daño.

Tratamiento		Escala de daño visual							
		Día 3		Día 7		Día 14		Día 21	
$dSm^{-1}$	$gl^{-1}$	Daño	T [%]	Daño	T [%]	Daño	T [%]	Daño	T [%]
0	0,0	1,0	100	1,0	100	1,0	100	1,0	100
24	15,4	2,0	88	2,0	88	2,4	83	2,6	80
48	30,7	2,6	80	3,4	70	3,6	68	3,8	65
72	46,1	3,8	65	4,4	58	4,6	55	4,6	55
96	61,4	4,4	58	5,4	45	5,4	45	5,4	45

- Trucha arcoiris y trucha café:

Aparentemente las *O.mykiss* (trucha arcoiris) están bastante adaptadas a cambios de salinidad. Sin embargo, Johnsson *et al.* (1994) señaló que las *O.mykiss* están mejor capacitadas para aclimatarse al agua de mar durante el invierno, cuando la temperatura del agua es menor, pero no extrema. La rapidez de la transferencia es importante y Uno (1989) recomienda para las *O.mykiss* y otras especies de truchas, un período de aclimatación de 4 a 7 días en un 50 % de agua de mar antes de exponerlas por completo, debido a que esto puede simular el movimiento natural hacia el agua de mar de algunas especies de truchas. Tanto la *O.mykiss* (trucha arcoiris) como la *S.trutta* (trucha café) son aparentemente capaces de soportar una salinidad entre 0 y 35  $gl^{-1}$ , en especímenes mayores. Sin embargo, la salinidad puede ser una consideración importante para mantener a los peces en etapa temprana: la reproducción y etapas tempranas requieren agua dulce (Molony, 2001).

Según la información disponible, se puede apreciar que de estas especies, *Holcus lanatus* podría verse fuertemente afectada por un aumento brusco de salinidad.

### 5.2.3. Mapa de Sensibilidad Ambiental

La información recopilada en esta etapa se tradujo en un mapa, el cual se presenta en la Figura 5.7, en el que se puede visualizar de forma clara la ubicación de los principales componentes biológicos. En este Mapa de Sensibilidad Ambiental se observan los peces identificados en el estuario (Trucha café y arcoiris), las aves y las zonas de vegetación

riberaña. Se indican las zonas de vegetación sensibles, correspondientes a las identificadas en el mapa del índice NDVI para esta aplicación. Además, el color de las riberas indica la sensibilidad a la salinidad: las líneas rojas indican sectores no acostumbrados a la presencia de sal, mientras que las líneas amarillas señalan sectores donde hay presencia de la intrusión salina en condiciones normales. Esta última información puede ser recopilada a partir de los resultados del Paso 3, el cual se describe en la siguiente sección.

#### 5.2.4. Identificación de componentes sensibles

Según la información recopilada en los pasos anteriores, se determina que de los componentes identificados, el que posee una mayor sensibilidad a un posible aumento del frente de intrusión salina corresponde a la zona 1 del mapa índice NDVI (Figura 5.5). Debido a que la información de la vegetación presente en el estuario corresponde a especies típicas de la Región de Aysén, y no al resultado de un monitoreo de ésta, no se posee la ubicación exacta de las especies en el estuario. Por esta razón, y en el contexto de la aplicación de esta metodología, se asociará a la zona 1 de alta intensidad de vegetación, la componente *Holcus lanatus* como componente sensible.

### 5.3. Paso 3: Alcance del frente de intrusión salina en condiciones normales y tiempos de permanencia para distintas condiciones hidrológicas

Para conocer los alcances del frente de salinidad en condiciones normales y sus tiempos de permanencia, se realizó la modelación en HEC-RAS de 7 escenarios (ver Tabla 5.6). El primer escenario (escenario base) corresponde a la modelación de un año completo, con datos reales de caudales y mareas durante todo el período, y busca conocer el comportamiento normal del frente de salinidad durante todo un año. Los 6 escenarios siguientes ayudan a conocer las situaciones más extremas a las cuales se enfrenta el sistema, y consideran un caudal del río constante.

**Tabla 5.6:** Descripción de escenarios de modelación.

Escenario	Condición de caudal	Serie de marea
Base	Serie de tiempo $Q_{md}$	Año completo
1	$Q_{95}$	Sicigia
2	$Q_{50}$	Sicigia
3	$Q_5$	Sicigia
4	$Q_{95}$	Cuadratura
5	$Q_{50}$	Cuadratura
6	$Q_5$	Cuadratura

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN.

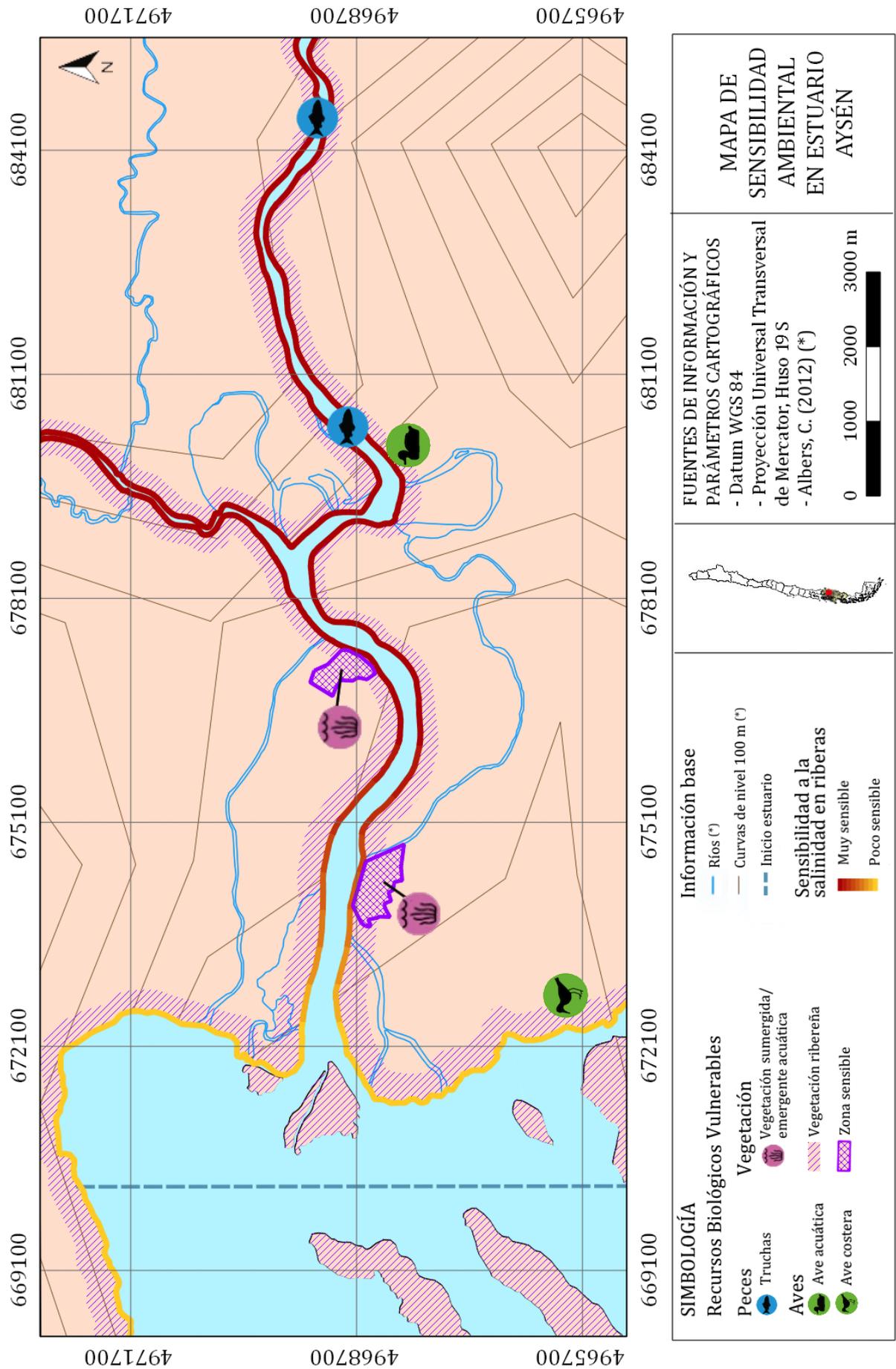
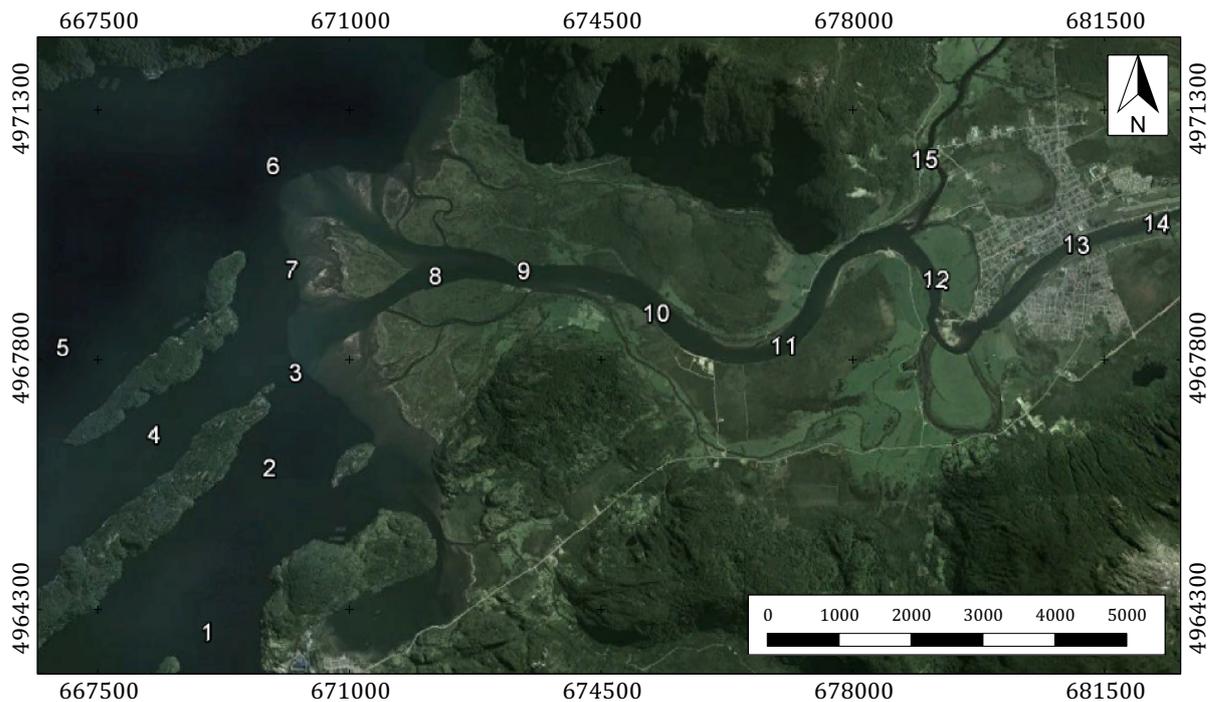


Figura 5.7: Mapa de Sensibilidad Ambiental a la salinidad del estuario del río Aysén.

### 5.3.1. Datos medidos en el estuario

En la Figura 5.8 se muestra la ubicación de los perfiles de conductividad, temperatura y profundidad (perfiles CTD) tomados por CEA (Centro de Ecología Aplicada Ltda.) en Mayo del 2010. Aunque sólo se posee perfiles para un instante del año, es relevante tener datos medidos del comportamiento de la salinidad en el estuario.



**Figura 5.8:** Puntos con datos de perfiles CTD en el estuario del río Aysén.

La Figura 5.9 presenta los perfiles de salinidad de todos los sensores monitoreados, mientras que en la Figura 5.10 se separan los perfiles de salinidad en dos sectores del estuario, para identificar las zonas con presencia de sal (panel A) y las zonas sin presencia de sal (panel B).

Los perfiles correspondientes a los sectores 8 y 9 indican la presencia de una cuña salina (Figura 5.10A), mientras que los sectores 10 a 15, muestran condición de agua dulce (Figura 5.10B). Finalmente, el resto de los perfiles indican condición de agua salada (Figura 5.9), con valores cercanos a los  $30 \text{ g l}^{-1}$  en profundidad. Con la información de los perfiles se demuestra la presencia de una cuña salina en el estuario del río Aysén, donde coexisten dos capas de flujo bien definidas y con escasa mezcla.

Además, es posible calcular los valores de salinidad promedio en la vertical, a través de los puntos medidos en el estuario. Con éstos, se construyó un perfil longitudinal de salinidad para observar el alcance del frente de intrusión dentro del estuario (Figura 5.11).

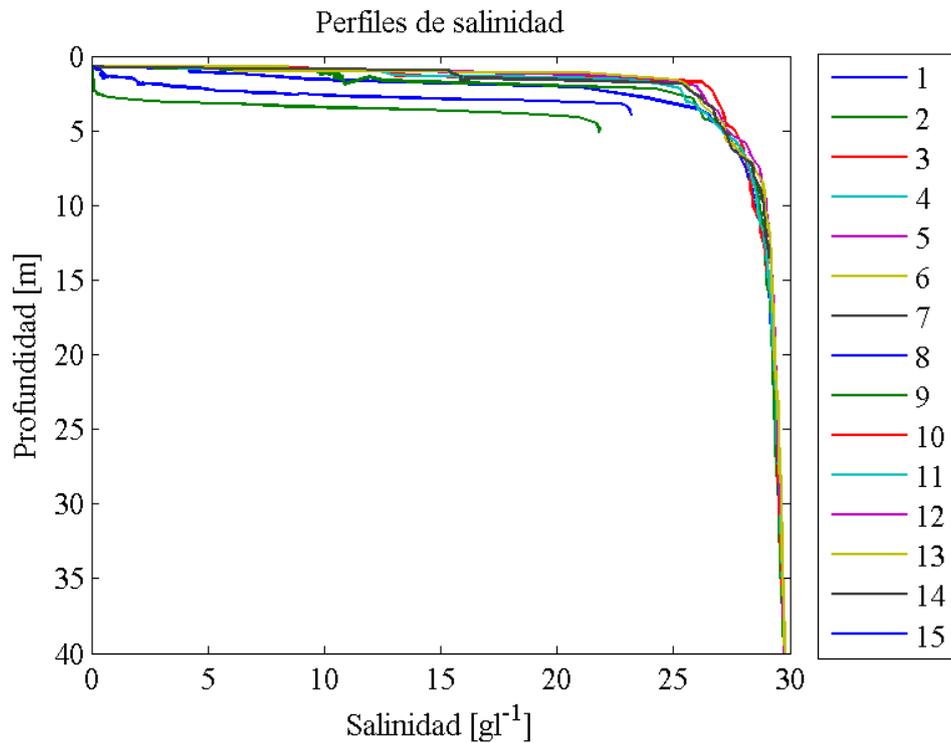


Figura 5.9: Perfiles de salinidad en todos los sectores registrados con sensores CTD.

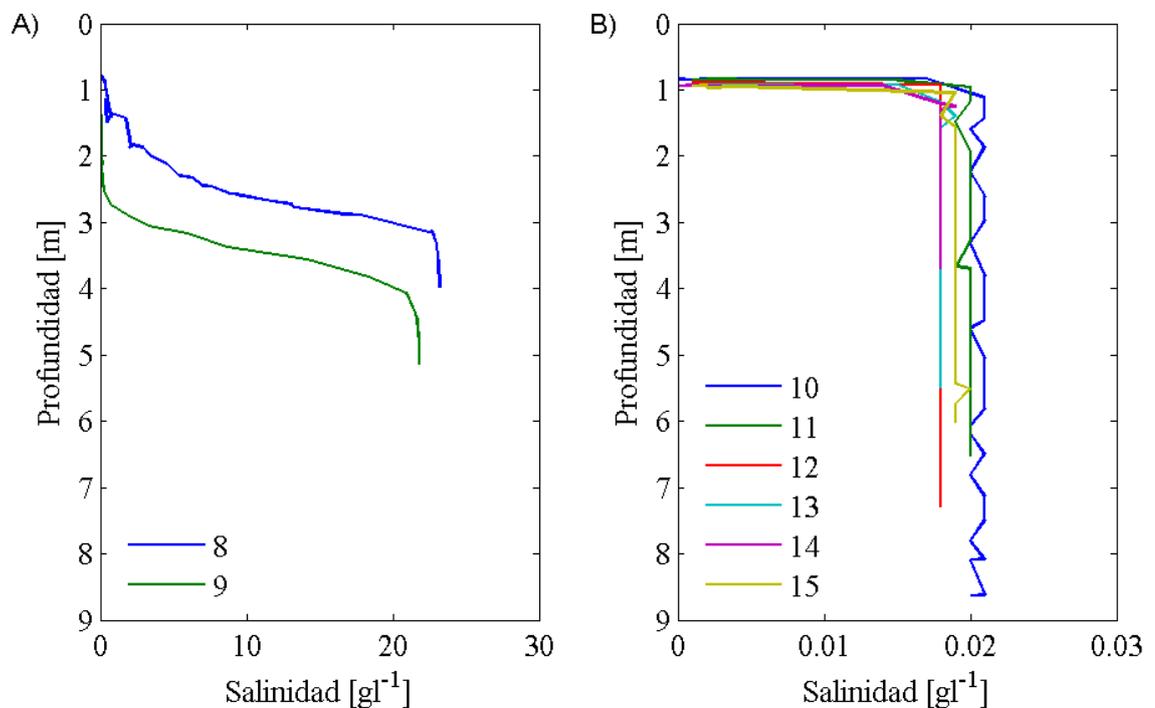
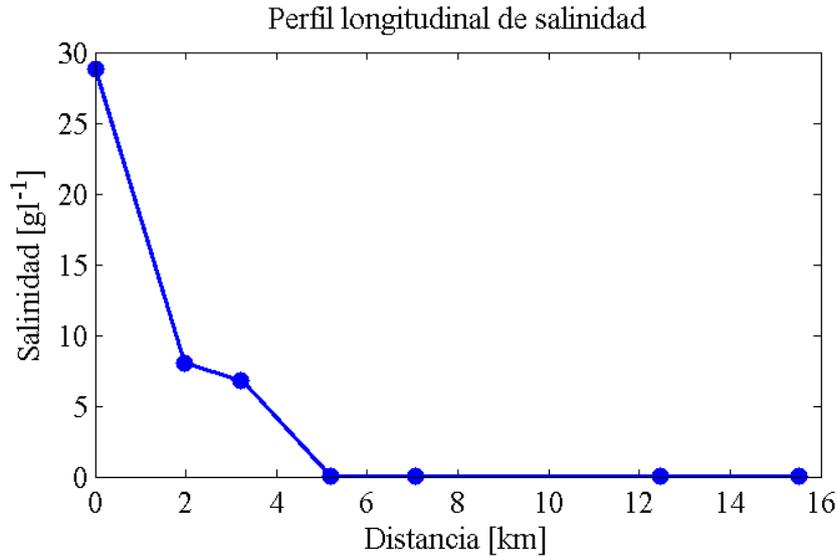


Figura 5.10: A) Perfiles de salinidad en los sectores 8 y 9 de sensores CTD, y B) perfiles de salinidad en los sectores 10, 11, 12, 13, 14 y 15, correspondientes a agua dulce.



**Figura 5.11:** Perfil longitudinal de salinidad construido a través de valores promedio en la vertical, según los datos medidos por los sensores CTD.

**Tabla 5.7:** Resultados del alcance de la cuña salina a través de la ecuación teórica.

Probabilidad de Excedencia	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Largo cuña, H=8,1 [m] [km]	Largo cuña, H= 5,1 [m] [km]
$Q_5$	1372	0,01	0,00
$Q_{50}$	558	0,40	0,02
$Q_{95}$	221	3,53	0,45

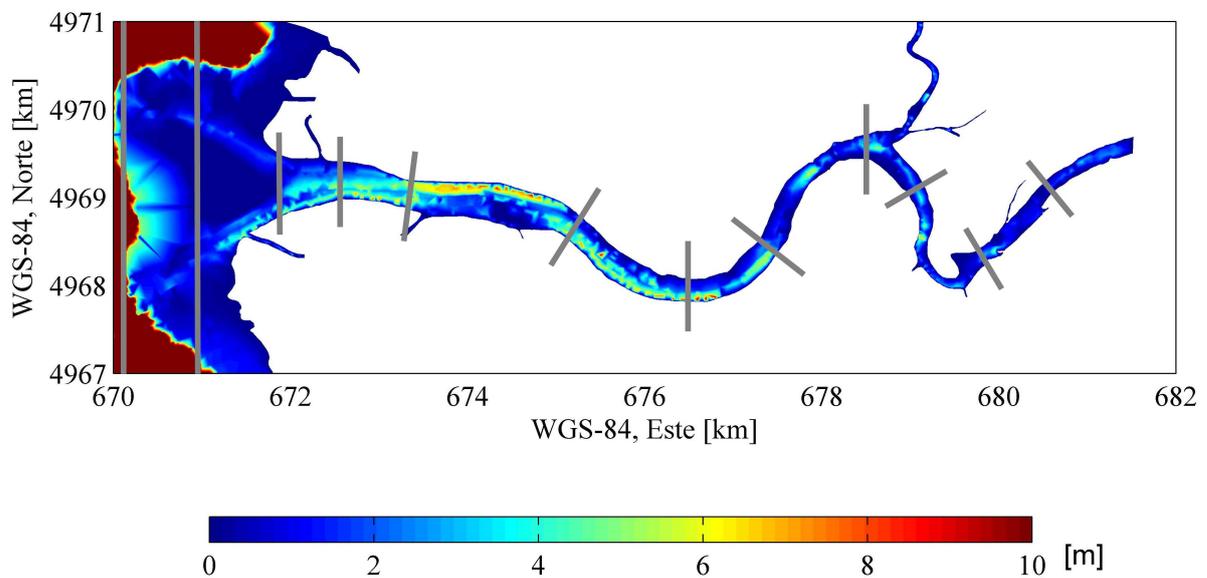
### 5.3.2. Resultados ecuación teórica

En el caso del estuario del río Aysén, existe la presencia de una cuña salina, es decir de alta estratificación. Además, el número de Richardson calculado corresponde a 27,3 (utilizando el caudal de 50 % de probabilidad de excedencia), valor que asegura alta estratificación. Por lo tanto, se puede estimar el alcance de la cuña salina a través de la ecuación 2.2, presentada en la sección de revisión de antecedentes. Considerando una densidad del agua salada de  $1022 \text{ kg/m}^3$  (calculada a través de la fórmula de la UNESCO con valores de temperatura de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  y salinidad de  $28,8 \text{ g/l}^{-1}$ ) y del agua dulce de  $1000 \text{ kg/m}^3$  (con temperatura de  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  y salinidad igual a 0), se obtiene un valor de  $\phi = 0,022$ . El coeficiente de fricción interfacial se consideró  $cf_i = 0,01$  (Cole y Wells, 2008), y el ancho del cauce de  $200 \text{ m}$ , correspondiente al valor medio estimado. Con estos valores, se calcularon los alcances de la cuña salina para las distintas condiciones de caudal y para condición de alta y baja marea ( $H = 8,1$  y  $5,1 \text{ m}$ , respectivamente), obteniendo los resultados presentados en la Tabla 5.7. Los caudales considerados corresponden a la suma del caudal del río Aysén y del río Los Palos. Cabe recordar que este cálculo supone régimen permanente en un canal uniforme de lecho plano.

### 5.3.3. Datos utilizados en la modelación

#### Datos geométricos

En primer lugar se adaptaron los datos de batimetría para poder generar secciones transversales e ingresar a HEC-RAS. A partir de esta batimetría se escogieron 12 secciones transversales representativas del cauce, y luego se interpolaron cada 50 m. En la Figura 5.12 se presentan los datos de batimetría y la posición de las secciones transversales utilizadas, señaladas con líneas grises en la Figura.



**Figura 5.12:** Batimetría del estuario del río Aysén.

Para estimar el número de Manning del tramo de estudio, por otra parte, se utilizaron fotografías del lecho (Figura 5.13), con las cuales se obtuvo una curva granulométrica utilizando el software WipFrag (Figura 5.14). Aún cuando las fotografías utilizadas corresponden al tramo aguas arriba del área del estuario, se consideraron adecuadas para esta modelación. Con la curva granulométrica se obtiene que  $d_{90} = 15,59 \text{ mm}$ , con lo que se calculó un coeficiente de Manning igual a  $n = 0,019 \text{ sm}^{-1/3}$ .

Adicionalmente, se corrigió el número de Manning del cauce utilizando el método de Cowan. El valor calculado a través de la curva granulométrica corresponde a  $n_0$ , y el resto de los coeficientes se estimaron según las recomendaciones entregadas por Ven Te Chow, presentadas en la Tabla 5.8. Con éstos parámetros, el número de Manning  $n$  se calcula como:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (5.1)$$

Utilizando las recomendaciones presentadas en la Tabla 5.8, se escogieron los valores que se presentan en la Tabla 5.9. Finalmente, se obtiene un valor del coeficiente de Manning de  $n = 0,044 \text{ sm}^{-1/3}$ , que fue el utilizado para la modelación.

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN.



Figura 5.13: Fotografía del lecho del río Aysén. Información proporcionada por el Ing. Carlos Reiher.

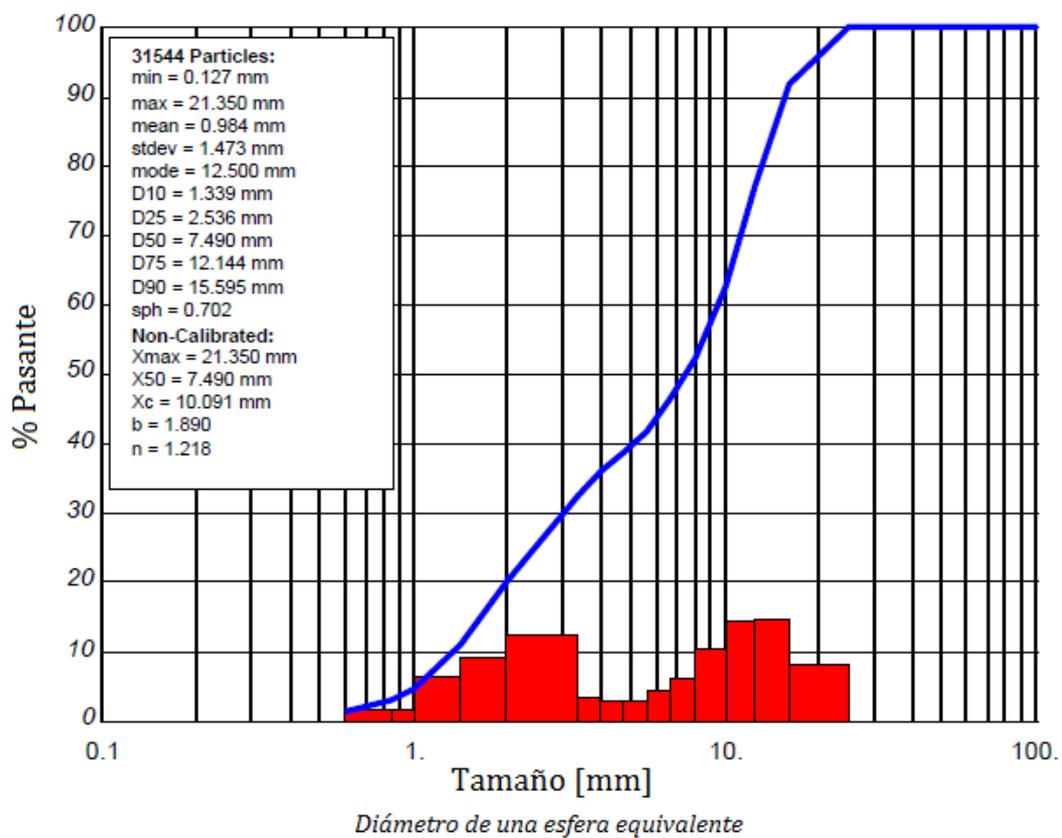


Figura 5.14: Curva granulométrica obtenida a través del software WipFrag 2010.

**Tabla 5.8:** Recomendaciones de Ven Te Chow (1994) para método de Cowan.

Material	Tierra		0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina	$n_0$	0,024
	Grava gruesa	$[sm^{-1/3}]$	0,028
Grado de irregularidad	Suave		0,000
	Menor	$n_1$	0,005
	Moderado	$[sm^{-1/3}]$	0,010
	Severo		0,020
Variaciones de las secciones	Gradual		0,000
	Ocasionales	$n_2$	0,005
	Frecuentes	$[sm^{-1/3}]$	0,010 - 0,015
Obstrucciones	Insignificante		0,000
	Menor	$n_3$	0,010 - 0,015
	Apreciable	$[sm^{-1/3}]$	0,020 - 0,030
	Severo		0,040 - 0,060
Densidad de vegetación	Baja		0,005 - 0,010
	Media	$n_4$	0,010 - 0,025
	Alta	$[sm^{-1/3}]$	0,025 - 0,050
	Muy alta		0,050 - 0,100
Frecuencia de meandros	Menor		1
	Apreciable	$m$	1,15
	Severo		1,3

**Tabla 5.9:** Valores utilizados y resultado del número de Manning obtenido con el método de Cowan.

Característica	Valor $[sm^{-1/3}]$
$n_0$	0,019
$n_1$	0,005
$n_2$	0,000
$n_3$	0,010
$n_4$	0,010
$m$	1,000
<b>n</b>	<b>0,044</b>

Para obtener un valor más preciso del coeficiente de Manning, se recomienda el levantamiento de calcatas en el lecho. Sin embargo, es importante destacar que los resultados de la modelación no poseen gran sensibilidad a este coeficiente. La modelación se realizó con coeficientes de Manning cercanos a 0,02 y 0,06  $sm^{-1/3}$ , y los resultados no se vieron altamente afectados, es decir, el alcance del frente de intrusión salino tuvo un resultado similar.

## Modelación hidrodinámica en régimen impermanente

### Caudales

Se utilizaron los caudales medios diarios ( $Q_{md}$ ), en la estación Aysén en Puerto Aysén. Además, se agregó como condición de borde la serie de  $Q_{md}$  correspondiente al río Los Palos, el cual confluye hacia el río Aysén dentro de la zona de estudio (ver Figura 5.1).

Como se indicó anteriormente, para el escenario base se utilizó la serie de  $Q_{md}$  de un año completo. Para los escenarios del 1 al 6 se consideraron caudales constantes para las modelaciones, correspondientes a los caudales de 95, 50 y 5% de probabilidad de excedencia (ver Tabla 5.10), calculados con una serie de caudales de 10 años.

**Tabla 5.10:** Caudales con distintas probabilidades de excedencia, utilizados para los escenarios con caudal constante (Escenarios 1 a 6).

	Aysen [ $m^3/s$ ]	Los Palos [ $m^3/s$ ]	Total [ $m^3/s$ ]
$Q_{95}$	201,8	18,8	220,6
$Q_{50}$	492,9	64,6	557,5
$Q_5$	1207,2	164,5	1371,7

Para el escenario base se utilizó la serie completa de caudales medios diarios del año 2009. Como condición inicial, se utilizaron los caudales de 50% de probabilidad de excedencia, tanto para los caudales del río Aysén como del río Los Palos. En el período de simulación el resultado se independiza de esta condición.

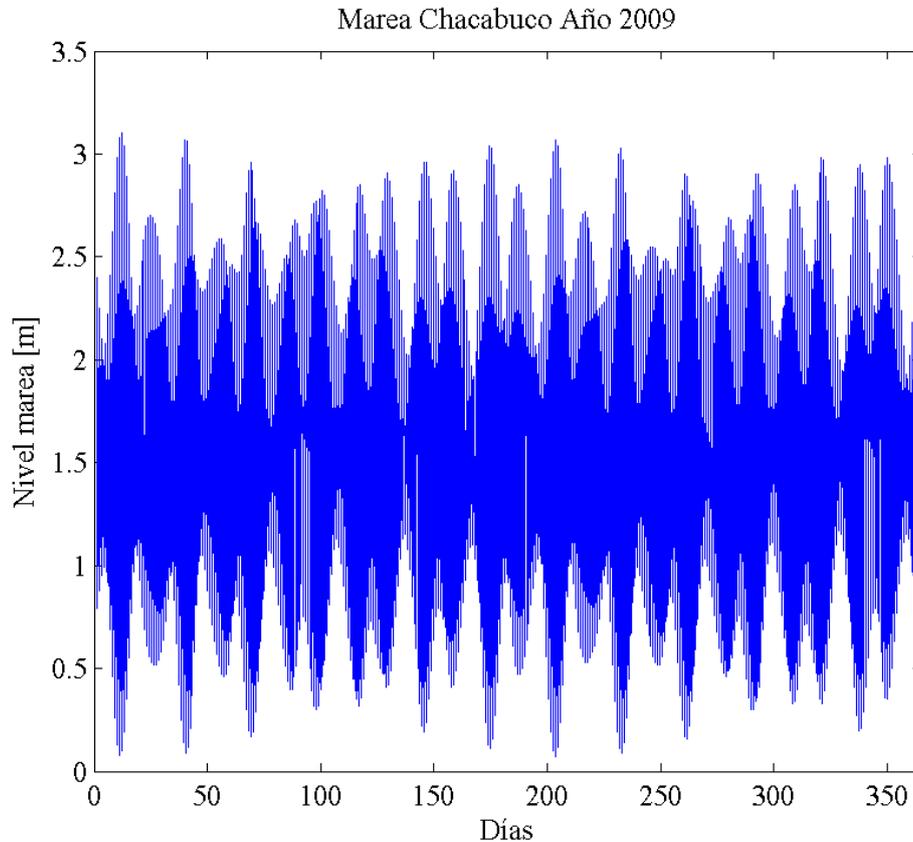
### Mareas

Se utilizó la serie de mareas del SHOA del año 2009 en Puerto Chacabuco, que corresponde a datos pronosticados cada 6 horas. Para la modelación del escenario base, se utilizó la serie completa de mareas. Para los escenarios del 1 al 3, que corresponden a marea de Sicigia, se utilizó un período de 7 días, incluyendo el máximo rango de marea. Análogamente, para los escenarios del 4 al 6, que corresponden a marea de Cuadratura, se utilizó un período de 7 días incluyendo el mínimo rango de marea.

## Modelación de la salinidad

Utilizando el mismo escenario generado por la modelación de régimen impermanente, se acopló el modelo de calidad de agua. Para representar la salinidad se escogió como constituyente un componente pasivo y conservativo. En este módulo, se consideró en la sección de aguas abajo la condición de borde dada por perfiles CTD medidos en la desembocadura (en particular, los perfiles de los sectores 2, 3 y 6 en Figura 5.8) promediados en la vertical, resultando un valor de  $28.8 \text{ } gl^{-1}$ .

Finalmente, en ausencia de mediciones detalladas que permitan validar los resultados de la modelación, se consideró un coeficiente de dispersión constante y nulo a lo largo del

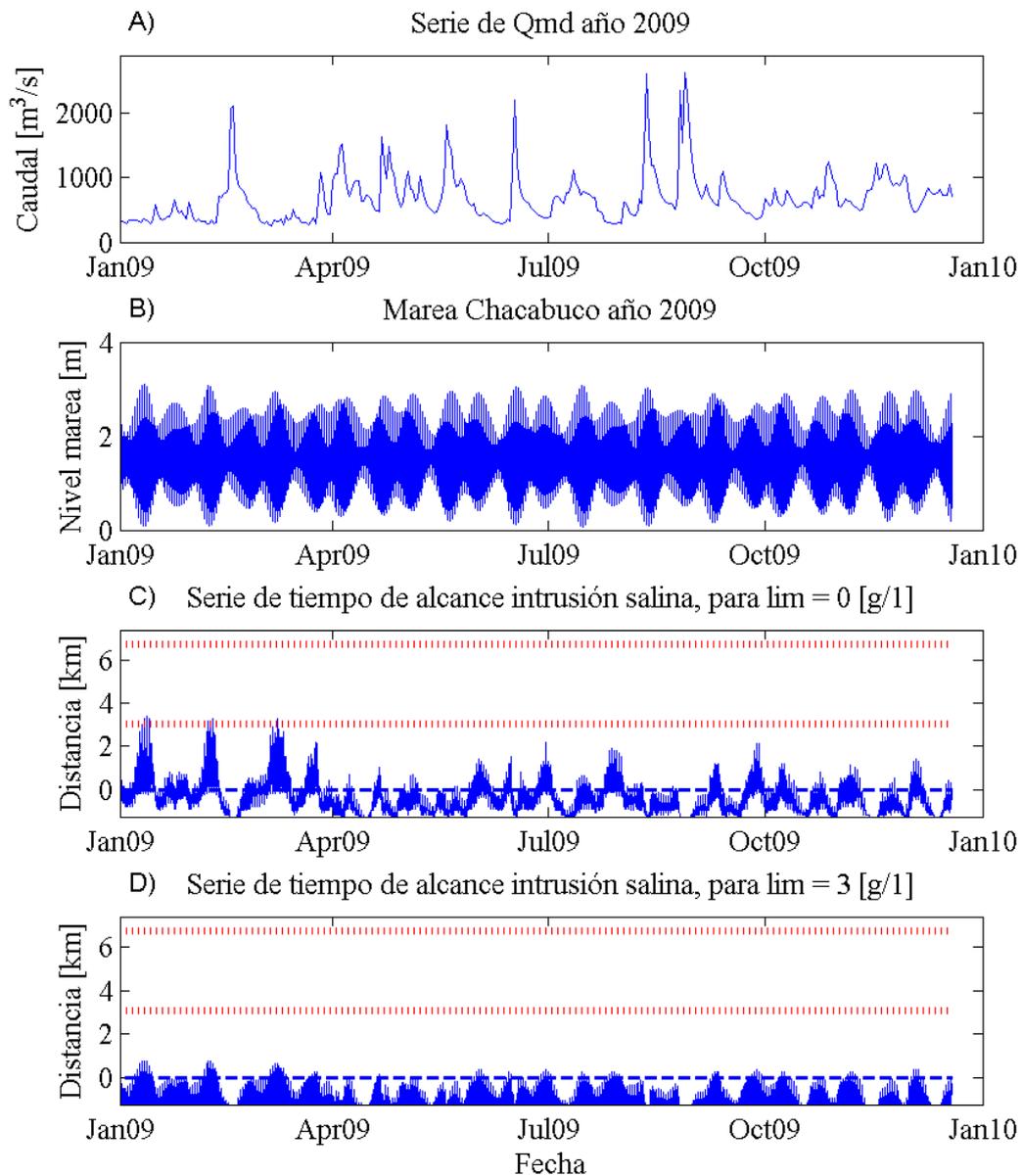


**Figura 5.15:** Serie de pronóstico de mareas en Puerto Chacabuco del año 2009. Fuente: SHOA (2009).

estuario. Es importante destacar que el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS permite utilizar un coeficiente de dispersión proporcional al determinado por Fischer *et al.* (1979) para ríos. Sin embargo, éste no considera el término de diferencia de densidades entre las dos capas de flujo, y por lo tanto, puede sobrestimar la dispersión para el caso de una cuña salina. En este sentido, se asumió que para el caso de cuña salina es una buena aproximación utilizar dispersión nula en el estuario. En caso de poseer mediciones que permitan validar el modelo, se recomienda calibrar los resultados ajustando el coeficiente de dispersión.

#### 5.3.4. Resultados modelación

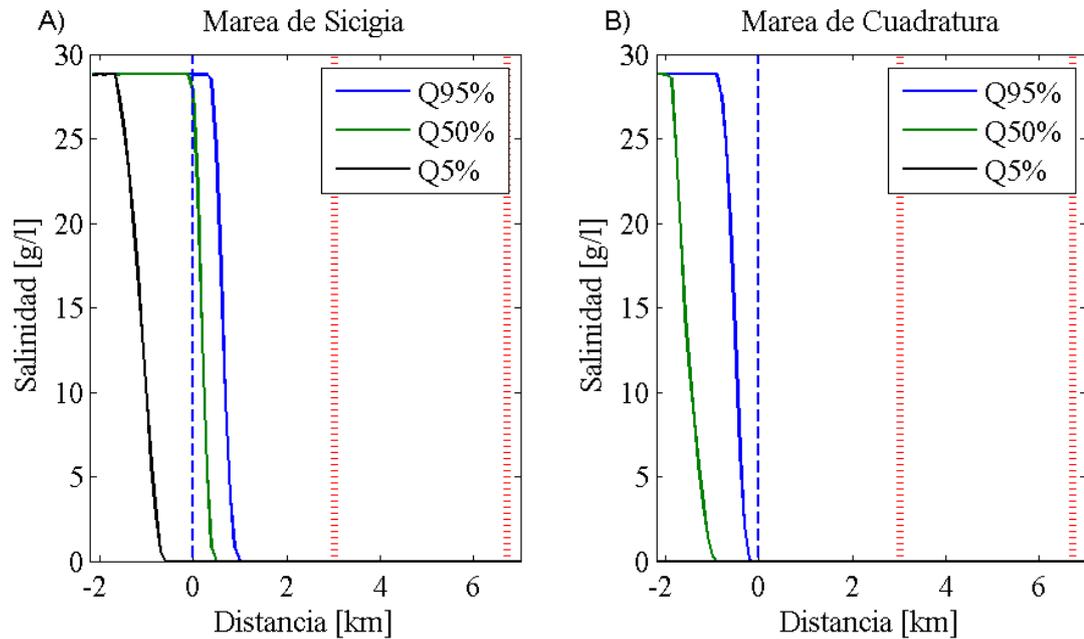
Los resultados de la modelación entregan la concentración de sal en cada punto del estuario y en cada tiempo. En la Figura 5.16 se presentan los resultados de los alcances en que se superan distintos límites de salinidad durante el año de modelación para el escenario base, mientras que para los escenarios del 1 al 6, se presentan en la Figura 5.17 los resultados para un instante de tiempo de la simulación. Estos resultados corresponden al caso de dispersión nula en el estuario.



**Figura 5.16:** Serie de tiempo de caudales y mareas en escenario base (paneles A y B); y series de tiempo producidas de alcances del frente de salinidad, para concentraciones de sal de 0 y  $3 \text{ gl}^{-1}$ , paneles C y D, respectivamente. Línea segmentada azul marca boca del estuario, y líneas punteadas en rojo marcan posición de zonas sensibles identificadas en las Figuras 5.5 y 5.7.

### 5.3.5. Análisis probabilístico

Realizando un análisis probabilístico con los resultados del escenario base, se calcularon los porcentajes de tiempo del año en que el frente de salinidad (con límite de salinidad de 0 y  $3 \text{ gl}^{-1}$ ) ingresa a los primeros kilómetros del estuario. Estos resultados se presentan en la Figura 5.18, donde se puede observar que el frente de salinidad ingresa en escasas ocasiones y alcanza distancias máximas cercanas a los 3 km. Los resultados de la modelación realizada con  $Q_{md}$  fueron comparados con la situación con 20 % de  $Q_{md}$ , para observar el



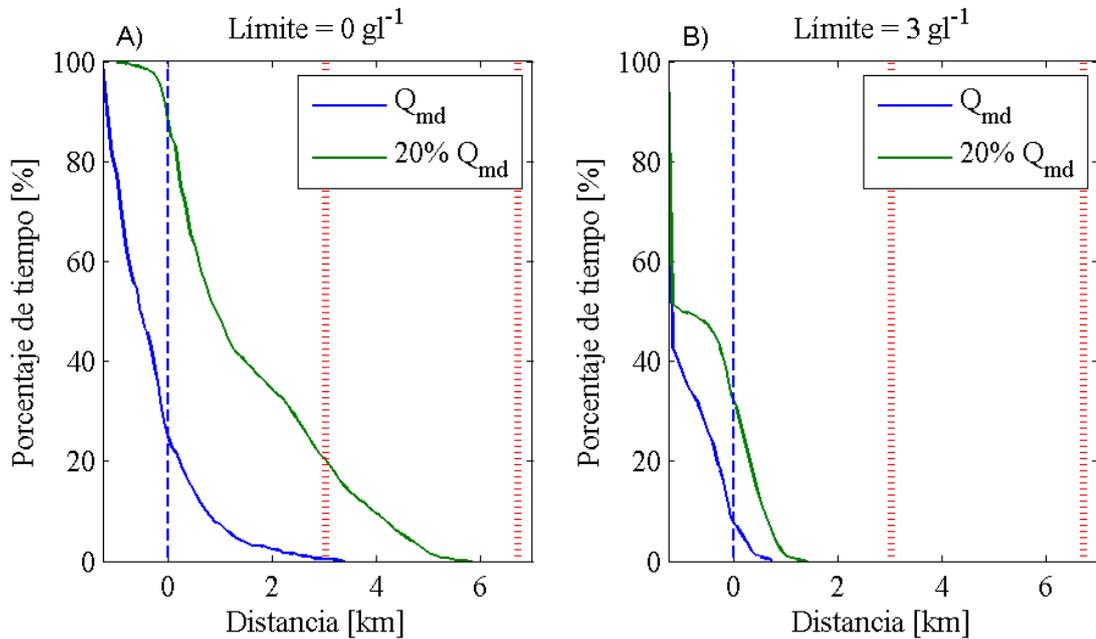
**Figura 5.17:** Perfiles longitudinales de salinidad promedio para escenarios con caudal constante, y para condición de marea de sicigia (escenarios 1 a 3, panel A) y de cuadratura (escenario 4 al 6, panel B). Línea segmentada azul marca boca del estuario, y líneas punteadas en rojo marcan posición de zonas sensibles identificadas en las Figuras 5.5 y 5.7.

efecto que tiene una fuerte disminución del caudal en los alcances de la intrusión salina. Como se observa en la Figura 5.18, para ambos límites de salinidad, los porcentajes de tiempo de los respectivos alcances se ven afectados por la disminución de caudal.

Según los resultados de la modelación, se puede concluir que sólo los primeros tramos del estuario reciben esporádicamente la presencia de una cuña salina, y que el estuario no está habituado a grandes concentraciones de sal en condiciones normales. En el contexto de los lugares sensibles (1) y (2) identificados preliminarmente en la Figura 5.5, se observa que en un bajo porcentaje del tiempo el frente de intrusión salina alcanza estos sectores (ver Figura 5.18), por lo que en condiciones normales, estas zonas no reciben altas concentraciones de sal.

#### 5.4. Paso 4: Restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina

La restricción en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina debe proteger al componente sensible identificado en el paso 2. El dato que se posee de la especie sensible *Holcus lanatus* es que para un tiempo de exposición de 14 días a concentraciones mayores a  $9 \text{ gl}^{-1}$ , la especie se ve notoriamente afectada. De este modo, la restricción que se impuso fue que el frente de intrusión salino no alcance la ubicación del componente sensible en más de 14 días consecutivos (durante el período de simulación de un año).



**Figura 5.18:** Perfil longitudinal del porcentaje de tiempo en que la salinidad supera umbral de 0 y 3  $gl^{-1}$ , paneles A y B, respectivamente. Escenario base (línea azul) y con reducción del caudal del río al 20% del caudal base (línea roja). Línea segmentada azul marca boca del estuario, y líneas punteadas en rojo marcan posición de zonas sensibles identificadas en las Figuras 5.5 y 5.7.

Como se definió en la Figura 5.5, esta zona sensible está ubicada a 3  $km$  del inicio del estuario. Para tomar una restricción conservadora, y considerando que los valores de salinidad entregados por HEC-RAS son un promedio en la vertical, se consideran los alcances del frente de intrusión para un límite mayor a 0  $gl^{-1}$ .

## 5.5. Paso 5: Determinación del caudal ecológico

Utilizando nuevamente el software HEC-RAS, se modeló la salinidad del estuario para encontrar el mínimo caudal que cumple la restricción establecida en el paso 4. Se realizó un procedimiento iterativo, cambiando la condición de borde aguas arriba ingresada en HEC-RAS (condición de caudal).

### 5.5.1. Datos utilizados para la modelación

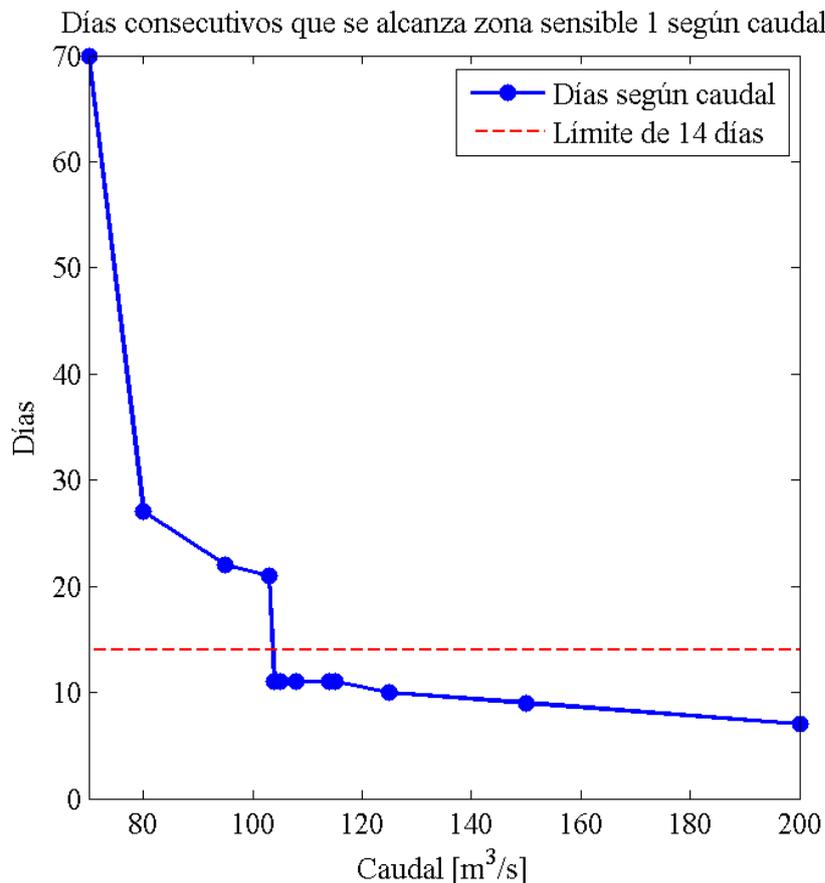
Para cada iteración, se utilizó como condición de borde aguas abajo (en la boca del estuario) la serie de mareas de todo el año, al igual que en el Escenario Base realizado para la aplicación del paso 3. Como condición de borde en la cabeza del estuario (aguas arriba) se ingresó un caudal constante para todo el año. La primera iteración se realizó con un caudal constante igual al 20% del caudal de 50% de probabilidad de excedencia, ya que según los resultados del paso 3 se conoce que con un caudal del 20% el frente de

intrusión salino alcanza la zona sensible. Debido a que el caudal debe cumplirse bajo la junta del río Aysén con el río Los Palos, se ve afectado por ambos aportes. Para efectos de la modelación, para cada iteración se redujeron en cantidades iguales ambos afluentes.

### 5.5.2. Resultado del caudal ecológico

Con los resultados de cada iteración se calculó el máximo número de días consecutivos que el frente de salinidad mayor a  $0 \text{ gl}^{-1}$  alcanza el lugar sensible, durante un año completo. El procedimiento terminó cuando este número de días fue menor a 14, utilizando una precisión en el caudal de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la Figura 5.19 se presenta el número de días consecutivos que el frente de intrusión, con límite  $0 \text{ gl}^{-1}$ , alcanza la zona sensible 1, durante un año de modelación.



**Figura 5.19:** Días consecutivos en que el frente de intrusión, con límite  $0 \text{ gl}^{-1}$ , alcanza la zona sensible 1 (indicada en las Figuras 5.5 y 5.7), para distintos caudales.

El caudal que cumplió la restricción, corresponde a un caudal total de  $104 \text{ m}^3/\text{s}$ , que es equivalente a un 18.7% del  $Q_{50}$ . Esto quiere decir, que modelando en HEC-RAS con condición normal de mareas, y con caudal constante igual a  $104 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtuvo que el

*CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUARIO DEL  
RÍO AYSÉN.*

frente de salinidad nunca superó la ubicación del componente sensible, ubicado a 3 *km*, más de 14 días consecutivos. En efecto, con este caudal se supera sólo 11 días seguidos este límite.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En este trabajo se presentó una alternativa metodológica para calcular el caudal ecológico de estuarios. La metodología propuesta se basa en dos aspectos hidrodinámicos de estuarios que son los que determinan su respuesta ante reducciones del caudal del río: i) la altura de escurrimiento queda determinada por el nivel del mar que varía por la marea, y no por el caudal de agua del río; y ii) reducciones del caudal del río producen una mayor intrusión de agua marina con el consiguiente aumento de la salinidad del agua. De este modo, el caudal mínimo que debe llegar a la zona estuarina, corresponde al que mantiene las condiciones de salinidad bajo los umbrales de tolerancia de los componentes biológicos sensibles.

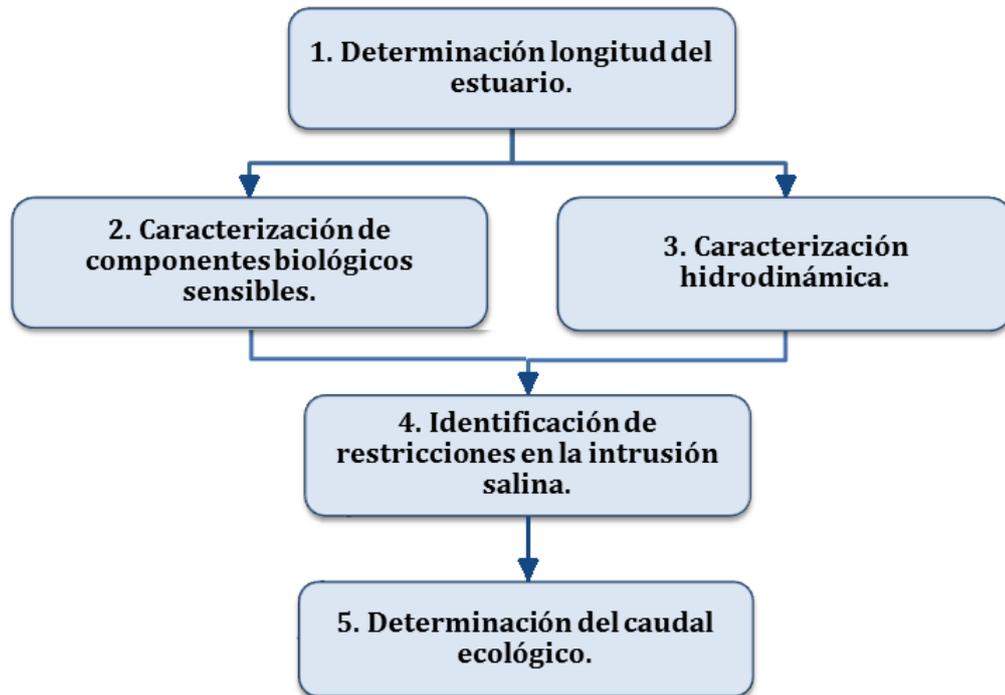
A continuación se detallan las principales conclusiones asociadas a las dos líneas de trabajo presentadas en este estudio.

### 6.1. Metodología propuesta

La metodología propuesta contempla 5 pasos principales, los cuales se esquematizan en la Figura 6.1 y se detallan a continuación:

1. Determinación del límite del estuario y área a caracterizar.
2. Caracterización del ecosistema estuarino, identificando los umbrales de habitabilidad asociados a la concentración de sal.
3. Caracterización hidrodinámica del estuario, identificando el alcance del frente de intrusión salina en condiciones normales y tiempos de permanencia para distintas condiciones hidrológicas.
4. Identificación de restricciones en el alcance y tiempo de permanencia de la intrusión salina.
5. Determinación del caudal ecológico.

Lo primero es identificar el límite del estuario, para lo cual se aplica un criterio basado en la influencia de la marea. Luego, se caracteriza el ecosistema estuarino y se identifican los umbrales de tolerancia a la salinidad de los elementos biológicos sensibles. En esta



**Figura 6.1:** Esquema de los pasos de la metodología propuesta.

etapa se identifican cuáles son los elementos biológicos más vulnerables a un aumento en la concentración de sal. Este paso es análogo a lo realizado en las metodologías de caudal ecológico en ríos, donde también se definen zonas sensibles (o áreas de importancia ambiental), con la diferencia que en esta metodología el parámetro de control es la concentración de sal. Se propone plasmar los resultados de esta etapa de la metodología en un Mapa de Sensibilidad Ambiental, en el que se logren identificar con facilidad los componentes que puedan verse altamente afectados producto de un aumento en el alcance de la intrusión salina. Una vez identificada la sensibilidad ambiental del estuario, entonces se pasa a la siguiente etapa, relacionada con la caracterización hidrodinámica, identificando el alcance y el tiempo de permanencia normal de la cuña salina en el estuario. Es relevante el tiempo de permanencia de la cuña salina, dado que la resistencia que poseen los componentes sensibles a la salinidad, generalmente depende de un tiempo de exposición a ella. Para este análisis se propone modelar numéricamente la hidrodinámica y calidad de aguas del estuario con el software HEC-RAS. Conociendo el comportamiento normal de la cuña salina, se pasa a la siguiente etapa 4, en donde se determinan las restricciones que permiten conservar los componentes biológicos, considerando para esto sus umbrales de resistencia a la salinidad. Finalmente, en el paso 5 se determina el caudal mínimo que cumple con las restricciones de concentración de sal y tiempo de permanencia de la cuña salina, a través de una modelación con HEC-RAS.

La metodología propuesta posee como ventaja que requiere de información de fácil acceso, como lo son las series de caudales y mareas, y la condición de borde de la salinidad puede ser estimada a priori como la salinidad del agua de mar. Además, el software HEC-RAS corresponde a un programa de uso masivo en nuestro país y de acceso gratuito, lo que representa una gran ventaja al momento de difundir una metodología. A través de

la etapa de revisión bibliográfica, se puede recopilar información secundaria que permita hacer una caracterización preliminar de los componentes biológicos sensibles del estuario. Sin embargo, se recomienda realizar al menos un monitoreo que permita caracterizar la flora y fauna, así como los componentes antrópicos del estuario, y validar la modelación hidrodinámica con mediciones de conductividad y temperatura.

Finalmente, es importante mencionar que la metodología propuesta es aplicable sólo a estuarios que cumplan con la definición descrita en este trabajo, en la que se considera como estuario a la zona de transición de la desembocadura de un río al mar, que se encuentra abierto y bajo la influencia de la marea. Los sistemas que no reciben influencia de la marea, quedan excluidos de la aplicabilidad de esta metodología. Además, el parámetro de control que se analiza para definir el caudal ecológico es únicamente la salinidad. Queda abierto para próximos estudios, el considerar otros factores que pudieran afectar también los componentes bióticos, como por ejemplo, el análisis sedimentológico, los cambios en la velocidad de escurrimiento y el Hydropeaking. Éste último puede provocar una oscilación intradiaria del frente de intrusión salino, y por lo tanto, un estrés en la biota del estuario.

## 6.2. Aplicación al estuario del río Aysén

Respecto de la aplicación de la metodología al estuario del río Aysén, se hizo una caracterización preliminar basada en información secundaria, con el objeto de ejemplificar la aplicación de la metodología propuesta. En el análisis hidrodinámico, se mostró cómo el alcance de la intrusión salina cambia producto del efecto combinado entre la altura de marea y el caudal del río. Así, el mayor alcance se obtiene para condiciones de alta marea y bajo caudal, la que en el caso del estuario del río Aysén corresponde a una distancia del orden de 4 km medida desde la desembocadura (ver Figura 5.16). En el análisis de los componentes biológicos sensibles, por otra parte, se identificó una zona de alta intensidad de vegetación ribereña (determinada a través de un mapa de Índice Normalizado de Vegetación, NDVI). En base a una revisión de los tipos de vegetación ribereña de la región de Aysén se asoció este parche vegetacional a la especie *Holcus lanatus*, y la determinación de su requerimiento de agua dulce se obtuvo de los estudios experimentales desarrollados por Ashraf *et al.* (1986). A partir de los umbrales de salinidad y del tiempo de exposición definidos en estos estudios, se definió una restricción para el alcance de la cuña salina de 3 km y un tiempo máximo de permanencia de 14 días consecutivos. En base a estas restricciones, se obtuvo un caudal mínimo de  $104 \text{ m}^3/\text{s}$  bajo la junta del río los Palos con el río Aysén.

Es importante mencionar que para un resultado más preciso del caudal ecológico, se debe considerar en el paso 2 la realización de un monitoreo, en donde se identifique con propiedad las especies vegetacionales ubicadas en las riberas, como también las especies de peces que habitan en el sector del estuario. Para la aplicación del paso 3, por otra parte, se recomienda el levantamiento de calicatas para la caracterización granulométrica del lecho del río, las que se utilizan en la estimación del número de Manning. Adicionalmente, se recomienda validar los resultados de la modelación con sensores CT (de conductividad y temperatura), midiendo a lo largo del estuario, con el fin de poseer una serie de tiempo de valores de salinidad, la que permitiría calibrar y validar la modelación de la cuña salina.

# Capítulo 7

## Bibliografía

- Albers, C. 2012. *Coberturas SIG para la enseñanza de la Geografía en Chile*. [www.rulamahue.cl/mapoteca](http://www.rulamahue.cl/mapoteca). Universidad de la Frontera. Temuco.
- Ashraf, M., Mc Neilly, T., & Bradshaw, D. 1986. Tolerance of sodium chloride and its genetic basis in natural populations of four grass species. *New Phytol*, 103, 725 – 734.
- Baeza, D., & García del Jalón, D. 1997. Caracterización del Régimen de Caudales en Ríos de la Cuenca del Tajo atendiendo a criterios Biológicos. *Asociación Española de Limnología, Madrid, España.*, 13, 69–78.
- Bain, M. 2009. Hydro Peaking and Green energy: standards and application to the St. Marys river USA and Canada. *Department of Natural Resources, Cornell University*.
- Booth, T. 2011. *Metodología para determinar caudales de dilución en estuarios*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Cameron, W. M., & Pritchard, D. W. 1963. Estuaries. *The Sea, New York*, 2, 306–324.
- Centro de Ecología Aplicada. 2008a. Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación. Informe.
- Centro de Ecología Aplicada. 2008b. Estimación del caudal ecológico del proyecto hidroeléctrico Aysén. Informe.
- Centro de Ecología Aplicada. 2008c. Medio Biótico, Línea de Base Proyecto Hidroeléctrico Aysén, para Estudio de Impacto Ambiental.
- Chow, V. T. 1994. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill, New York.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. *Edit. Ariel Ciencia, España*.
- Cole, T., & Wells, S. A. 2008. CE-QUAL-W2 : A Two-Dimensional , Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual.

- Confederación Hidrográfica del Ebro. 2007. *Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva Marco del Agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro*. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Dirección General de Aguas. 1996. Caudales ecológicos. Caracterización hidroambiental Etapa I. Informe.
- Dirección General de Aguas. 2008. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. Informe.
- Dirección General de Aguas. 2009a. Análisis metodológico para determinar caudales de dilución en zonas estuarinas. Informe.
- Dirección General de Aguas. 2009b. Minuta Depto. Conservación y Protección de Recursos Hídricos N°173/179.
- Endesa Chile. 2011. Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. Un análisis de las tendencias actuales. Primera edición.
- Fairbridge, R. W. 1980. *The estuary: its definition and geo-dynamic cycle*. En: *Chemistry and Biochemistry of Estuaries*. New York: John Wiley and Sons.
- Figueroa, R. A., Cerda, J., & Tala, C. 2001. *Guía de Aves Dulceacuícolas de Aysén*. Servicio Agrícola y Ganadero, Región de Aysén, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C., Imberger, J., & Brooks, N. H. (eds). 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Gajardo, I. 1994. *La vegetación natural de Chile: Clasificación y distribución Geográfica*. CONAF.
- García, P., Fernández, R., & Cirujano, S. 2009. *Habitantes del agua. Macrófitos*. Agencia Andaluza del Agua.
- Gostner, W., Lucarelli, C., Theiner, D., Kager, A., Premstaller, G., & Schleiss, A. J. 2011. *A holistic approach to reduce negative impacts of Hydropeaking*. En: *Dams and reservoirs under changing challenges*. Taylor & Francis Group, London.
- Halliday, I., & Robins, J. 2001. Environmental flows for sub-tropical estuaries: Understanding the freshwater needs of estuaries for sustainable fisheries production and assessing the impacts of water regulation. *Queensland Government. Department of Primary Industries and Fisheries. Australia*.
- Haro, A. 2002. *Metodologías para evaluar el impacto de extracciones de agua sobre la biodiversidad en cauces naturales*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Jemett, G., & Rodrigues, A. 2005. Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama

- legal e institucional en Chile y Brasil. *Revista de Gestión del Agua de América Latina*, Junio, Vol. 2 NO. 3, 83–96.
- Knight Piésold Consulting. 2009. Medio Biótico, Línea de Base Proyecto Central Hidroeléctrica Cuervo, Estudio de Impacto Ambiental, elaborado para Energía Austral Ltda.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. 2006. *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Editorial Universitaria.
- Meza, R., & Pernollet, C. 2011. *Estimación de los requerimientos de hábitat físico y caudal ecológico del pato cortacorrientes en el cuenca del río Cachapoal*. XX Congreso chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad chilena de Ingeniería Hidráulica.
- Milhous, R. T., Updike, M. A., & Schneider, D. M. 1989. Physical Habitat Simulation System Reference Manual, Versión II. Instream Flow Information Paper No. 26. *U. S. Fish and Wildlife Service, Research and Development*.
- Ministerio de Obras Públicas. 2011. Medio Biótico, Línea de base Proyecto Embalse Valle Hermoso, Estudio de Impacto Ambiental.
- Molony, B. 2001. Environmental requirements and tolerances of Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Brown trout (*Salmo trutta*) with special reference to Western Australia: A review. *Fisheries Research Report No. 130*.
- Niño, Y., & Tamburrino, A. 2004. *Apuntes del curso Hidrodinámica Ambiental*. Universidad de Chile.
- Olivares, M. 2000. *Estudio analítico-numérico y experimental de la cuña salina en estuarios*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Riestra, F. 2007. *Establecimiento de caudales ecológicos mínimos en Chile*. En: *Gestión Sostenible de Humedales*. CYTED, Universidad de Chile.
- San Martín, C., Pérez, Y., Montenegro, D., & Álvarez, M. 2011. Diversidad, hábito y hábitat de macrófitos acuáticos en la Patagonia Occidental (Región de Aisén, Chile). *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 39, 23 – 41.
- Schijf, J.B., & Schonfeld, J.C. 1953. Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water. *Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, Minnesota*, 321–333.
- Stuardo, J., & Valdovinos, C. 1989. Estuarios y lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile Central. *Departamento de oceanografía, Universidad de Concepción. Ambiente y Desarrollo*, 5, 107–115.
- US Army Corps of Engineers. 2006. HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. *Hydrologic Engineering Center*.

## CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Valle-Levinson, A. (ed). 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press.
- Zulkaliph, N. A., Juraimi, A. S., Uddin, M. K., Begum, M., Mustapha, M. S., Amrizal, S. M., & Samsuddin, N. H. 2011. Use of saline water for weed control in seashore Paspalum. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 523 – 530.

# Anexos

# Anexo A

## Datos utilizados de caudales

En este anexo se presentan los datos de caudales medios diarios del año 2009 del río Aysén y del río Los Palos, utilizados para las modelaciones de año completo. Los datos están basados en la información de la estación fluviométrica “Río Aysén en Puerto Aysén” código BNA 11342001-4 de la DGA (Dirección General de Aguas).

**Tabla A:** Datos de caudales medios mensuales del año 2009, en río Aysén y río Los Palos.

Mes	Día	Q Aysén [ $m^3/s$ ]	Q Los Palos [ $m^3/s$ ]
1	1	284.5	51.9
1	2	270.1	46.5
1	3	262.9	40.9
1	4	264.3	23.3
1	5	299.0	36.8
1	6	299.0	40.7
1	7	283.1	53.9
1	8	274.4	59.1
1	9	265.7	55.4
1	10	271.5	27.0
1	11	301.9	63.0
1	12	280.2	65.7
1	13	258.5	59.6
1	14	260.0	20.5
1	15	307.6	44.3
1	16	554.6	22.4
1	17	369.7	75.4
1	18	306.2	62.9
1	19	294.6	51.6

ANEXO A. DATOS UTILIZADOS DE CAUDALES

Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]	Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]
1	20	320.6	38.0	3	4	279.1	48.2
1	21	345.2	47.9	3	5	225.7	39.0
1	22	353.8	40.8	3	6	211.5	36.5
1	23	447.7	42.0	3	7	289.7	50.0
1	24	583.5	70.2	3	8	268.4	46.3
1	25	442.0	77.8	3	9	272.0	46.9
1	26	403.0	53.8	3	10	307.5	53.1
1	27	404.4	84.9	3	11	232.8	40.2
1	28	352.4	72.0	3	12	357.3	61.7
1	29	339.4	25.7	3	13	295.1	50.9
1	30	519.9	103.5	3	14	305.7	52.8
1	31	395.7	94.0	3	15	440.8	76.1
2	1	320.2	43.5	3	16	382.2	66.0
2	2	291.9	39.7	3	17	318.2	54.9
2	3	318.0	43.2	3	18	319.9	55.2
2	4	291.9	39.7	3	19	261.3	45.1
2	5	291.9	39.7	3	20	254.2	43.9
2	6	276.6	37.6	3	21	263.1	45.4
2	7	244.0	33.1	3	22	227.5	39.3
2	8	248.3	33.7	3	23	279.1	48.2
2	9	302.8	41.1	3	24	327.1	56.4
2	10	259.2	35.2	3	25	236.4	40.8
2	11	272.3	37.0	3	26	565.2	97.6
2	12	623.0	84.6	3	27	924.3	159.5
2	13	614.3	83.4	3	28	748.3	129.2
2	14	662.2	90.0	3	29	471.0	81.3
2	15	668.7	90.8	3	30	375.0	64.7
2	16	727.6	98.8	3	31	364.4	62.9
2	17	1829.8	248.6	4	1	799.9	148.6
2	18	1855.9	252.1	4	2	915.8	151.8
2	19	988.9	134.3	4	3	929.4	135.0
2	20	797.3	108.3	4	4	1236.7	229.8
2	21	734.1	99.7	4	5	1350.9	177.4
2	22	705.8	95.9	4	6	999.0	140.9
2	23	651.3	88.5	4	7	722.3	121.7
2	24	540.2	73.4	4	8	602.6	113.5
2	25	518.4	70.4	4	9	705.4	122.2
2	26	470.5	63.9	4	10	792.6	147.3
2	27	470.5	63.9	4	11	804.8	149.6
2	28	420.4	57.1	4	12	797.5	148.2
3	1	293.3	50.6	4	13	522.7	109.0
3	2	266.6	46.0	4	14	537.4	99.9
3	3	250.6	43.3	4	15	611.0	113.5

ANEXO A. DATOS UTILIZADOS DE CAUDALES

Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]	Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]
4	16	593.8	110.3	5	29	522.3	79.8
4	17	569.3	105.8	5	30	489.7	80.4
4	18	466.2	86.6	5	31	522.3	85.1
4	19	417.1	77.5	6	1	390.0	64.6
4	20	419.6	78.0	6	2	356.2	59.8
4	21	404.9	75.2	6	3	356.2	66.0
4	22	1387.4	246.7	6	4	381.5	64.1
4	23	1086.3	153.7	6	5	354.1	57.0
4	24	832.8	161.4	6	6	343.6	53.2
4	25	1298.0	183.3	6	7	316.2	50.3
4	26	1011.1	147.3	6	8	276.1	47.5
4	27	931.2	148.2	6	9	259.3	46.8
4	28	681.9	124.5	6	10	255.0	46.0
4	29	539.4	118.1	6	11	242.4	42.8
4	30	449.4	99.4	6	12	244.5	41.4
5	1	521.3	116.3	6	13	250.8	52.2
5	2	758.2	169.2	6	14	305.6	50.3
5	3	900.4	200.9	6	15	276.1	47.9
5	4	675.3	150.7	6	16	957.0	164.3
5	5	658.7	147.0	6	17	2059.4	155.7
5	6	528.4	117.9	6	18	1110.8	99.2
5	7	545.0	121.6	6	19	788.3	81.2
5	8	836.4	186.7	6	20	640.8	79.3
5	9	661.1	157.0	6	21	592.3	72.6
5	10	545.0	121.6	6	22	558.6	68.8
5	11	466.8	104.2	6	23	537.5	64.1
5	12	426.5	95.2	6	24	465.8	61.2
5	13	400.4	89.4	6	25	440.5	56.5
5	14	374.4	83.5	6	26	404.7	52.7
5	15	388.6	86.7	6	27	362.6	50.3
5	16	476.3	106.3	6	28	341.5	49.4
5	17	561.6	125.3	6	29	322.5	49.8
5	18	763.0	170.3	6	30	320.4	49.8
5	19	1618.6	207.8	7	1	345.4	41.1
5	20	1341.2	162.3	7	2	350.0	40.3
5	21	1284.0	158.1	7	3	500.5	57.6
5	22	905.9	127.4	7	4	618.9	78.1
5	23	742.7	113.7	7	5	632.8	71.2
5	24	761.7	114.7	7	6	628.2	60.4
5	25	859.7	129.5	7	7	593.4	51.1
5	26	810.7	108.9	7	8	551.7	54.7
5	27	682.8	96.8	7	9	704.7	70.0
5	28	593.1	86.7	7	10	707.0	55.5

ANEXO A. DATOS UTILIZADOS DE CAUDALES

Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]	Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]
7	11	811.3	73.7	8	23	518.0	54.7
7	12	1033.8	83.3	8	24	457.6	51.7
7	13	853.0	60.8	8	25	650.4	72.8
7	14	802.0	53.5	8	26	2178.7	168.1
7	15	688.4	49.5	8	27	1416.9	121.9
7	16	732.5	53.5	8	28	2450.5	178.6
7	17	713.9	58.4	8	29	2125.3	169.1
7	18	697.7	55.1	8	30	1630.6	93.8
7	19	672.2	50.3	8	31	1210.1	74.3
7	20	646.7	47.5	9	1	936.8	75.6
7	21	644.4	44.7	9	2	802.5	69.9
7	22	449.7	41.5	9	3	707.5	62.5
7	23	424.8	39.2	9	4	626.4	55.0
7	24	408.7	37.7	9	5	709.8	50.5
7	25	278.2	36.3	9	6	846.5	47.5
7	26	271.2	33.0	9	7	691.3	41.1
7	27	264.3	31.6	9	8	633.4	34.5
7	28	257.3	30.4	9	9	584.7	30.2
7	29	252.7	29.0	9	10	547.7	27.1
7	30	266.6	27.8	9	11	543.0	25.0
7	31	268.9	26.9	9	12	971.6	32.1
8	1	255.5	33.2	9	13	1054.9	46.4
8	2	544.2	70.8	9	14	946.1	51.2
8	3	529.6	70.3	9	15	758.5	51.4
8	4	450.6	55.7	9	16	670.4	49.3
8	5	385.6	46.2	9	17	612.5	46.5
8	6	369.3	42.8	9	18	596.3	43.4
8	7	362.3	44.2	9	19	575.5	39.4
8	8	448.3	54.7	9	20	538.4	35.6
8	9	600.5	73.3	9	21	492.1	31.3
8	10	536.6	59.2	9	22	457.3	28.6
8	11	1340.2	89.3	9	23	434.2	26.2
8	12	2420.3	194.2	9	24	395.5	51.0
8	13	1556.2	130.5	9	25	389.5	48.1
8	14	1096.3	97.4	9	26	357.4	40.9
8	15	1087.0	97.9	9	27	331.3	36.6
8	16	961.6	87.8	9	28	317.2	35.6
8	17	785.1	75.8	9	29	335.3	38.0
8	18	668.9	67.2	9	30	401.6	54.4
8	19	610.9	61.7	10	1	613.2	61.6
8	20	566.7	57.2	10	2	558.6	60.8
8	21	541.2	55.7	10	3	509.6	60.1
8	22	536.6	56.7	10	4	537.6	60.4

ANEXO A. DATOS UTILIZADOS DE CAUDALES

Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]	Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]
10	5	777.0	62.2	11	17	1101.0	120.3
10	6	616.0	60.8	11	18	877.9	96.1
10	7	536.2	60.1	11	19	912.0	99.8
10	8	506.8	60.0	11	20	1075.9	117.6
10	9	548.8	60.6	11	21	1091.9	119.3
10	10	742.0	62.2	11	22	971.2	106.2
10	11	688.8	61.2	11	23	843.7	92.4
10	12	604.8	60.5	11	24	789.1	86.4
10	13	547.4	60.0	11	25	816.4	89.4
10	14	491.4	59.7	11	26	821.0	89.9
10	15	477.4	59.6	11	27	791.4	86.7
10	16	505.4	59.9	11	28	843.7	92.4
10	17	565.8	60.5	11	29	943.9	103.2
10	18	556.0	60.4	11	30	909.7	99.5
10	19	543.7	60.2	12	1	597.5	107.5
10	20	511.9	56.6	12	2	463.9	93.2
10	21	465.4	55.4	12	3	379.8	84.2
10	22	717.6	57.3	12	4	379.8	84.2
10	23	800.9	60.0	12	5	424.3	88.9
10	24	617.2	60.3	12	6	503.5	97.4
10	25	673.6	60.5	12	7	555.4	103.0
10	26	644.2	60.3	12	8	642.0	112.2
10	27	1087.5	63.1	12	9	713.8	119.9
10	28	1190.3	64.0	12	10	664.3	114.6
10	29	1029.0	63.5	12	11	642.0	112.2
10	30	879.2	63.0	12	12	637.1	111.7
10	31	834.4	62.7	12	13	651.9	113.3
11	1	511.0	61.5	12	14	696.5	118.1
11	2	476.9	59.3	12	15	619.8	109.9
11	3	530.1	64.7	12	16	617.3	109.6
11	4	605.4	72.9	12	17	622.2	110.1
11	5	560.2	70.4	12	18	780.0	113.3
11	6	582.0	64.0	12	19	610.4	100.3
11	7	531.9	58.5	12	20	651.5	105.4
11	8	497.7	54.8	12	21	1004.9	140.8
11	9	472.7	52.1	12	22	1153.5	177.1
11	10	438.5	48.4	12	23	2108.2	226.6
11	11	452.2	49.9	12	24	1504.8	176.3
11	12	568.3	62.5	12	25	1193.6	165.4
11	13	718.5	78.8	12	26	1515.9	201.2
11	14	723.1	79.3	12	27	1392.4	186.9
11	15	739.0	81.0	12	28	1426.5	187.7
11	16	891.5	97.6	12	29	1082.2	149.3

ANEXO A. DATOS UTILIZADOS DE CAUDALES

Mes	Día	Q Aysén [m <sup>3</sup> /s]	Q Los Palos [m <sup>3</sup> /s]
12	30	904.5	131.0
12	31	788.1	120.2

# Anexo B

## Datos utilizados de mareas

En este anexo se presenta la serie de tiempo de mareas utilizada para las modelaciones de año completo. Corresponden a datos del año 2009 en Puerto Chacabuco, publicados por SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile).

**Tabla B:** Datos de mareas del año 2009 en Puerto Chacabuco.

Tiempo [días]	H [m]
1.162	2.400
1.431	0.790
1.694	1.960
1.923	1.000
2.192	2.250
2.460	0.880
2.731	1.970
2.963	1.090
3.231	2.100
3.498	0.950
3.772	2.000
3.019	1.140
4.281	1.970
4.547	0.990
4.819	2.080
5.086	1.090
5.336	1.900
5.597	0.970
5.868	2.220

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
6.144	0.920
6.394	1.900
6.638	0.900
6.912	2.410
7.188	0.690
7.444	1.980
7.676	0.810
7.949	2.620
8.223	0.460
8.484	2.100
8.711	0.690
8.984	2.810
9.255	0.260
9.517	2.220
9.746	0.560
10.017	2.980
10.285	0.130
10.547	2.320
10.779	0.450
11.049	3.080
11.317	0.080
11.577	2.370
11.812	0.390
12.081	3.100
12.347	0.100
12.608	2.380
12.843	0.400
13.113	3.040
13.378	0.190
13.640	2.340
13.874	0.490
14.144	2.890
14.409	0.350
14.676	2.290
14.908	0.650
15.176	2.660
15.441	0.550
15.713	2.240
15.946	0.840
16.213	2.400
16.475	0.770
16.751	2.210
16.994	1.010

Tiempo [días]	H [m]
17.258	2.150
17.517	0.970
17.794	2.220
18.055	1.090
18.315	1.970
18.567	1.100
18.842	2.260
19.121	1.050
19.376	1.900
19.615	1.130
19.888	2.360
20.172	0.930
20.431	1.920
20.654	1.110
20.928	2.480
21.207	0.800
21.469	1.990
21.687	1.050
21.960	2.580
22.235	0.690
22.496	2.050
22.716	0.980
23.986	2.650
23.258	0.610
23.519	2.100
23.742	0.930
24.010	2.690
24.280	0.560
24.539	2.130
24.766	0.880
25.033	2.700
25.301	0.530
25.558	2.140
25.789	0.840
26.053	2.690
26.321	0.520
26.577	2.140
26.810	0.810
27.075	2.660
27.341	0.520
27.597	2.150
27.833	0.780
28.097	2.600

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
28.362	0.540
28.620	2.160
28.858	0.770
29.121	2.510
29.385	0.580
29.647	2.180
29.885	0.790
30.147	2.390
30.409	0.640
30.676	2.200
30.917	0.850
31.177	2.230
31.436	0.730
31.710	2.210
31.956	0.930
32.214	2.060
32.467	0.840
32.747	2.240
0.006	0.990
33.262	1.890
33.508	0.950
33.790	2.270
34.069	0.970
34.320	1.800
34.562	1.020
34.839	2.340
35.131	0.830
35.383	1.800
35.614	1.000
35.889	2.470
36.177	0.620
36.438	1.920
36.659	0.900
36.933	2.650
37.213	0.420
37.477	2.070
37.699	0.760
37.971	2.830
38.244	0.250
38.508	2.230
38.735	0.600
39.006	2.980
39.274	0.140

Tiempo [días]	H [m]
39.538	2.360
39.769	0.470
40.038	3.070
40.304	0.090
40.566	2.450
40.802	0.390
41.069	3.060
41.333	0.120
41.596	2.490
41.834	0.400
42.100	2.950
42.363	0.210
42.627	2.500
42.866	0.490
43.130	2.760
43.391	0.370
43.660	2.480
43.900	0.640
44.162	2.510
44.419	0.580
44.694	2.430
44.939	0.810
45.198	2.240
45.449	0.810
45.728	2.390
45.985	0.960
46.243	2.000
46.483	1.020
46.767	2.350
47.041	1.050
47.297	1.830
47.527	1.180
47.809	2.330
48.103	1.050
48.355	1.760
48.579	1.260
48.855	2.340
49.154	0.980
49.411	1.780
49.624	1.250
49.898	2.380
50.190	0.880
50.452	1.850

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
50.661	1.200
50.933	2.440
51.216	0.790
51.481	1.930
51.694	1.140
51.963	2.490
52.239	0.710
52.503	2.010
52.722	1.060
52.989	2.540
53.260	0.630
53.523	2.080
53.749	0.970
54.013	2.570
54.280	0.570
54.542	2.150
54.773	0.870
55.035	2.590
55.299	0.510
55.561	2.220
55.797	0.770
56.058	2.590
56.320	0.470
56.581	2.290
56.822	0.690
57.082	2.560
57.342	0.460
57.604	2.360
57.848	0.640
58.107	2.480
58.365	0.470
58.631	2.410
58.877	0.640
59.133	2.350
59.389	0.520
59.659	2.450
59.910	0.680
60.164	2.180
60.415	0.630
60.690	2.460
60.947	0.760
61.202	1.990
61.444	0.770

Tiempo [días]	H [m]
61.726	2.440
61.994	0.830
62.251	1.830
62.482	0.930
62.767	2.420
63.053	0.850
63.309	1.750
63.535	1.050
63.817	2.430
64.116	0.760
64.372	1.780
64.594	1.050
64.870	2.510
65.164	0.600
65.426	1.910
65.644	0.950
65.917	2.650
66.200	0.440
66.465	2.080
66.687	0.800
66.958	2.810
67.231	0.300
67.496	2.260
67.725	0.630
67.994	2.920
68.260	0.200
68.525	2.420
68.760	0.500
69.027	2.960
69.289	0.170
69.554	2.550
69.794	0.430
70.058	2.920
70.317	0.190
70.583	2.640
70.826	0.420
71.088	2.780
71.345	0.290
71.613	2.670
71.860	0.490
72.119	2.580
72.372	0.440
72.644	2.660

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
72.894	0.600
73.150	2.350
73.399	0.630
73.674	2.610
73.931	0.740
74.185	2.110
74.425	0.840
74.705	2.530
74.970	0.880
75.225	1.910
75.453	1.030
75.737	2.440
76.017	1.000
76.271	1.760
76.485	1.190
76.773	2.360
77.072	1.070
77.320	1.670
77.529	1.310
77.814	2.290
78.126	1.060
78.376	1.660
78.583	1.360
78.859	2.270
79.166	0.990
79.429	1.730
79.631	1.340
79.901	2.280
80.194	0.900
80.462	1.830
80.670	1.270
80.937	2.320
81.217	0.810
81.485	1.950
81.704	1.160
81.967	2.370
82.238	0.710
82.505	2.070
82.733	1.010
82.994	2.430
83.258	0.600
83.524	2.200
83.759	0.860

Tiempo [días]	H [m]
84.019	2.490
84.278	0.510
84.543	2.330
84.785	0.700
85.044	2.510
85.299	0.440
85.564	2.460
85.811	0.570
86.068	2.490
86.322	0.400
86.588	2.570
86.839	0.490
87.094	2.420
87.346	0.400
87.614	2.650
87.869	0.470
88.122	2.290
88.371	0.460
88.642	2.680
88.901	0.510
89.155	2.130
89.398	0.580
89.674	2.660
89.939	0.590
90.194	1.960
90.428	0.730
90.709	2.600
90.983	0.690
91.243	1.830
91.466	0.910
91.751	2.530
92.038	0.750
92.299	1.770
92.517	1.030
92.801	2.500
93.099	0.730
93.356	1.800
93.577	1.060
93.853	2.530
94.147	0.620
94.408	1.930
94.630	0.970
94.902	2.610

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
95.184	0.500
95.449	2.110
95.676	0.840
95.944	2.710
96.215	0.390
96.482	2.310
96.716	0.680
96.982	2.760
97.244	0.320
97.512	2.510
97.753	0.550
98.017	2.770
98.273	0.300
98.541	2.670
98.788	0.460
99.049	2.700
99.301	0.320
99.569	2.780
99.821	0.430
100.079	2.590
100.328	0.400
100.598	2.820
100.853	0.460
101.109	2.430
101.354	0.520
101.626	2.800
101.885	0.540
102.138	2.250
102.379	0.670
102.653	2.730
102.917	0.660
103.169	2.060
103.403	0.840
103.680	2.630
103.949	0.810
104.201	1.890
104.425	1.000
104.706	2.500
104.985	0.960
105.235	1.750
105.447	1.150
105.734	2.380
106.028	1.080

Tiempo [días]	H [m]
106.276	1.650
106.474	1.280
106.768	2.260
107.084	1.130
107.327	1.610
107.522	1.390
107.812	2.170
108.134	1.090
108.390	1.660
108.592	1.410
108.862	2.130
109.167	1.010
109.434	1.780
109.646	1.330
109.907	2.150
110.191	0.900
110.461	1.930
110.686	1.190
110.944	2.220
111.212	0.780
111.482	2.100
111.717	1.000
111.975	2.300
112.233	0.650
112.502	2.280
112.746	0.800
113.003	2.360
113.255	0.540
113.523	2.460
113.773	0.610
114.030	2.400
114.278	0.450
114.546	2.630
114.801	0.450
115.056	2.390
115.302	0.390
115.571	2.760
115.829	0.350
116.084	2.340
116.328	0.390
116.599	2.840
116.860	0.320
117.115	2.240

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
117.356	0.450
117.628	2.850
117.893	0.360
118.149	2.120
118.385	0.550
118.660	2.800
118.929	0.450
119.188	1.990
119.417	0.700
119.697	2.710
119.971	0.580
120.235	1.890
120.455	0.850
120.738	2.610
121.019	0.690
121.284	1.850
121.503	0.990
121.785	2.530
122.076	0.730
122.335	1.870
122.560	1.040
122.836	2.490
123.126	0.690
123.387	1.980
123.617	1.000
123.885	2.490
124.165	0.620
124.431	2.170
124.667	0.890
124.932	2.510
125.197	0.550
125.467	2.390
125.710	0.740
125.973	2.530
126.227	0.500
126.498	2.600
126.749	0.580
127.009	2.530
127.256	0.480
127.527	2.770
127.782	0.470
128.042	2.500
128.284	0.480

Tiempo [días]	H [m]
128.555	2.880
128.813	0.410
129.071	2.430
129.312	0.520
129.582	2.910
129.843	0.420
130.098	2.330
130.337	0.600
130.608	2.870
130.872	0.490
131.124	2.200
131.360	0.700
131.632	2.790
131.899	0.610
132.149	2.050
132.381	0.830
132.655	2.670
132.925	0.750
133.174	1.910
133.400	0.960
133.676	2.530
133.952	0.900
134.201	1.790
134.419	1.090
134.699	2.390
134.983	1.030
135.234	1.700
135.440	1.220
135.727	2.240
136.024	1.130
136.276	1.660
136.474	1.330
136.765	2.110
137.081	1.150
137.331	1.680
137.546	1.400
137.819	2.030
138.126	1.080
138.388	1.790
138.619	1.330
138.873	2.020
139.157	0.980
139.426	1.960

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
139.667	1.170
139.919	2.070
140.182	0.850
140.453	2.160
140.702	0.950
140.956	2.150
141.206	0.720
141.478	2.370
141.733	0.720
141.988	2.220
142.231	0.600
142.502	2.580
142.761	0.500
143.018	2.280
143.258	0.500
143.528	2.770
143.790	0.330
144.047	2.300
144.286	0.440
144.556	2.900
144.820	0.220
145.077	2.290
145.315	0.410
145.585	2.960
145.851	0.190
146.108	2.240
146.345	0.440
146.617	2.960
146.884	0.240
147.142	2.170
147.376	0.510
147.650	2.890
147.919	0.350
148.181	2.080
148.408	0.630
148.685	2.780
148.956	0.490
149.222	2.000
149.445	0.790
149.724	2.640
149.999	0.640
150.267	1.960
150.490	0.940

Tiempo [días]	H [m]
150.767	2.500
151.049	0.750
151.314	1.980
151.546	1.040
151.818	2.370
152.100	0.790
152.365	2.080
152.606	1.030
152.871	2.290
153.142	0.780
153.411	2.260
153.663	0.920
153.923	2.270
154.178	0.740
154.450	2.470
154.707	0.750
154.967	2.300
155.209	0.700
155.482	2.670
155.743	0.590
156.003	2.330
156.240	0.660
156.511	2.820
156.774	0.470
157.033	2.350
157.268	0.630
157.538	2.900
157.803	0.410
158.060	2.330
158.294	0.640
158.564	2.920
158.829	0.420
159.084	2.270
159.319	0.670
159.588	2.870
159.854	0.490
160.106	2.180
160.341	0.740
160.610	2.790
160.878	0.580
161.128	2.070
161.360	0.830
161.630	2.670

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
161.900	0.700
162.150	1.960
162.379	0.920
162.650	2.530
162.923	0.820
163.174	1.880
163.399	1.030
163.672	2.390
163.947	0.930
164.203	1.820
164.423	1.130
164.698	2.240
164.976	1.030
165.240	1.800
165.458	1.230
165.733	2.090
166.016	1.090
166.283	1.820
166.515	1.300
166.783	1.970
167.069	1.100
167.334	1.900
167.589	1.260
167.839	1.920
168.115	1.030
168.383	2.040
168.646	1.100
168.892	1.940
169.149	0.930
169.421	2.240
169.687	0.870
169.939	2.000
170.180	0.820
170.452	2.450
170.719	0.630
170.977	2.090
171.210	0.700
171.483	2.670
171.750	0.410
172.010	2.180
172.241	0.590
172.513	2.850
172.780	0.240

Tiempo [días]	H [m]
173.040	2.260
173.273	0.490
173.543	2.970
173.810	0.130
174.069	2.300
174.304	0.420
174.574	3.040
174.841	0.110
175.101	2.300
175.336	0.410
175.606	3.030
175.873	0.160
176.133	2.270
176.367	0.460
176.638	2.950
176.906	0.270
177.169	2.220
177.399	0.570
177.672	2.800
177.940	0.430
178.208	2.160
178.435	0.740
178.708	2.600
178.976	0.620
179.248	2.130
179.479	0.910
179.751	2.380
180.019	0.790
180.292	2.140
180.535	1.040
180.801	2.190
181.069	0.920
181.340	2.200
181.601	1.040
181.859	2.080
182.117	0.960
182.389	2.340
182.658	0.920
182.917	2.060
183.156	0.940
183.430	2.510
183.701	0.750
183.963	2.120

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
184.191	0.890
184.465	2.670
184.735	0.610
184.996	2.180
185.222	0.830
185.494	2.780
185.763	0.510
186.023	2.230
186.251	0.780
186.521	2.840
186.788	0.470
187.047	2.240
187.277	0.750
187.545	2.850
187.812	0.470
188.068	2.220
188.301	0.760
188.567	2.810
188.835	0.500
189.089	2.170
189.322	0.790
189.588	2.730
189.856	0.560
190.110	2.110
190.343	0.830
190.608	2.630
190.876	0.640
191.131	2.060
191.364	0.880
191.629	2.510
191.897	0.720
192.153	2.030
192.386	0.940
192.651	2.380
192.919	0.810
193.181	2.010
193.413	1.020
193.678	2.230
193.944	0.890
194.214	2.010
194.449	1.100
194.712	2.070
194.974	0.970

Tiempo [días]	H [m]
195.251	2.030
195.498	1.160
195.756	1.930
196.016	1.030
196.293	2.080
196.563	1.140
196.811	1.830
197.067	1.050
197.341	2.180
197.625	1.010
197.870	1.810
198.115	1.010
198.388	2.320
198.672	0.790
198.926	1.880
199.156	0.920
199.429	2.510
199.708	0.560
199.968	2.000
200.192	0.800
200.465	2.700
200.739	0.350
201.002	2.140
201.228	0.650
201.499	2.880
201.769	0.190
202.032	2.270
202.263	0.510
202.532	3.010
202.799	0.100
203.061	2.360
203.295	0.410
203.564	3.070
203.829	0.070
204.091	2.400
204.326	0.370
204.595	3.040
204.860	0.120
205.122	2.410
205.358	0.420
205.626	2.930
205.890	0.240
206.156	2.390

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
206.392	0.540
206.658	2.730
206.921	0.420
207.192	2.350
207.428	0.710
207.693	2.480
207.953	0.630
208.229	2.320
208.472	0.880
208.735	2.220
208.990	0.850
209.269	2.310
209.527	1.000
209.789	2.010
210.036	1.030
210.315	2.330
210.592	1.010
210.849	1.900
211.088	1.110
211.363	2.390
211.649	0.910
211.907	1.910
212.133	1.110
212.407	2.490
212.690	0.790
212.952	1.980
213.170	1.060
213.444	2.590
213.721	0.680
213.984	2.050
214.203	0.990
214.474	2.670
214.747	0.600
215.009	2.120
215.233	0.920
215.501	2.710
215.772	0.560
216.032	2.160
216.260	0.880
216.526	2.720
216.793	0.530
217.053	2.180
217.284	0.850

Tiempo [días]	H [m]
217.548	2.690
217.814	0.530
218.072	2.190
218.306	0.820
218.569	2.640
218.834	0.550
219.092	2.190
219.328	0.810
219.590	2.570
219.853	0.580
220.113	2.200
220.351	0.800
220.612	2.480
220.874	0.610
221.136	2.220
221.376	0.820
221.635	2.350
221.896	0.670
222.163	2.240
222.405	0.860
222.663	2.210
222.919	0.740
223.192	2.250
223.440	0.920
223.695	2.040
223.947	0.840
224.226	2.270
224.483	0.980
224.738	1.880
224.981	0.950
225.264	2.280
225.540	1.000
225.792	1.760
226.028	1.050
226.310	2.310
226.606	0.910
226.854	1.740
227.085	1.070
227.361	2.390
227.657	0.730
227.914	1.820
228.136	0.990
228.410	2.540

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
228.694	0.520
228.958	1.980
229.178	0.850
229.451	2.710
229.727	0.340
229.992	2.150
230.217	0.680
230.488	2.880
230.757	0.190
231.021	2.310
231.252	0.510
231.521	3.000
231.786	0.110
232.049	2.440
232.285	0.400
232.553	3.030
232.815	0.090
233.079	2.530
233.318	0.360
233.583	2.970
233.844	0.140
234.110	2.570
234.351	0.400
234.614	2.810
234.873	0.260
235.142	2.580
235.385	0.520
235.646	2.580
235.901	0.450
236.175	2.550
236.422	0.660
236.681	2.320
236.931	0.670
237.210	2.510
237.465	0.820
237.724	2.070
237.963	0.900
238.246	2.450
238.515	0.940
238.775	1.890
239.003	1.090
239.287	2.410
239.575	0.990

Tiempo [días]	H [m]
239.830	1.790
240.053	1.210
240.333	2.390
240.632	0.950
240.886	1.790
241.104	1.240
241.378	2.410
241.674	0.880
241.935	1.850
242.146	1.200
242.419	2.460
242.704	0.800
242.969	1.930
243.183	1.140
243.453	2.500
243.730	0.720
243.994	2.020
244.215	1.070
244.482	2.530
244.752	0.660
245.017	2.110
245.244	0.990
245.507	2.550
245.773	0.610
246.036	2.180
246.269	0.910
246.530	2.550
246.792	0.560
247.056	2.240
247.292	0.820
247.552	2.540
247.812	0.530
248.074	2.310
248.316	0.740
248.574	2.500
248.832	0.520
249.095	2.380
249.340	0.680
249.597	2.430
249.853	0.520
250.118	2.440
250.367	0.660
250.622	2.320

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
250.874	0.560
251.144	2.480
251.396	0.680
251.649	2.170
251.899	0.630
252.172	2.490
252.430	0.730
252.682	2.000
252.925	0.750
253.205	2.480
253.471	0.810
253.726	1.840
253.958	0.890
254.242	2.440
254.522	0.850
254.780	1.740
255.003	1.030
255.288	2.410
255.585	0.820
255.840	1.730
256.063	1.090
256.341	2.440
256.640	0.690
256.899	1.820
257.119	1.020
257.392	2.550
257.680	0.530
257.944	1.990
258.165	0.870
258.437	2.690
258.713	0.370
258.978	2.190
259.206	0.700
259.474	2.820
259.742	0.250
260.008	2.380
260.243	0.540
260.509	2.900
260.772	0.170
261.038	2.550
261.278	0.420
261.542	2.890
261.800	0.160

Tiempo [días]	H [m]
262.067	2.680
262.311	0.370
262.573	2.800
262.828	0.220
263.097	2.750
263.344	0.390
263.603	2.640
263.856	0.340
264.127	2.770
264.378	0.470
264.636	2.430
264.883	0.510
265.158	2.730
265.415	0.590
265.670	2.200
265.911	0.710
266.190	2.650
266.453	0.740
266.710	2.000
266.940	0.910
267.222	2.560
267.496	0.890
267.753	1.840
267.971	1.100
268.257	2.450
268.547	1.000
268.801	1.730
269.012	1.240
269.298	2.360
269.604	1.030
269.853	1.690
270.065	1.320
270.344	2.300
270.651	1.000
270.910	1.740
271.117	1.330
271.389	2.280
271.683	0.930
271.951	1.840
272.162	1.280
272.428	2.300
272.709	0.850
272.978	1.960

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
273.199	1.180
273.460	2.330
273.731	0.760
303.999	2.080
274.229	1.060
274.488	2.370
274.750	0.680
275.017	2.210
275.255	0.920
275.513	2.410
275.769	0.600
276.036	2.330
276.279	0.770
276.536	2.430
276.789	0.530
277.055	2.450
277.303	0.640
277.559	2.420
277.810	0.480
278.076	2.570
278.329	0.540
278.583	2.360
278.832	0.460
279.100	2.650
279.356	0.490
279.609	2.270
279.856	0.490
280.126	2.690
280.386	0.500
280.639	2.140
280.882	0.570
281.156	2.680
281.420	0.550
281.674	1.990
281.910	0.690
282.188	2.630
282.459	0.640
282.717	1.860
282.944	0.840
283.226	2.550
283.506	0.730
283.769	1.780
283.988	0.980

Tiempo [días]	H [m]
284.272	2.490
284.565	0.760
284.824	1.780
285.045	1.060
285.324	2.470
285.621	0.690
285.879	1.870
286.103	1.020
286.376	2.520
286.663	0.570
286.926	2.040
287.153	0.890
287.422	2.610
287.696	0.450
287.963	2.250
288.197	0.730
288.463	2.680
288.726	0.360
288.994	2.470
289.235	0.570
289.499	2.700
289.755	0.300
290.024	2.670
290.272	0.440
290.533	2.680
290.783	0.300
291.053	2.820
291.306	0.370
291.565	2.600
291.812	0.340
292.083	2.900
292.338	0.360
292.596	2.480
292.840	0.440
293.111	2.900
293.371	0.410
293.626	2.330
293.867	0.570
294.140	2.850
294.403	0.530
294.658	2.150
294.892	0.730
295.168	2.740

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
295.436	0.690
295.690	1.980
295.917	0.900
296.196	2.610
296.471	0.850
296.726	1.830
296.942	1.070
297.225	2.460
297.511	1.010
297.765	1.720
297.970	1.230
298.258	2.310
298.563	1.100
298.812	1.660
299.014	1.360
299.301	2.190
299.617	1.110
299.870	1.680
300.081	1.410
300.351	2.120
300.656	1.050
300.922	1.790
301.139	1.360
301.398	2.110
301.682	0.970
301.953	1.930
302.182	1.240
302.438	2.140
302.704	0.870
302.975	2.090
303.214	1.070
303.469	2.200
303.724	0.760
303.994	2.250
304.240	0.880
304.496	2.260
304.744	0.650
305.014	2.430
305.265	0.690
305.521	2.310
305.766	0.560
306.035	2.590
306.290	0.520

Tiempo [días]	H [m]
306.546	2.320
306.789	0.490
307.058	2.730
307.317	0.390
307.572	2.300
307.814	0.450
308.083	2.820
308.346	0.330
308.600	2.230
308.841	0.470
309.112	2.850
309.376	0.340
309.631	2.140
309.869	0.530
310.142	2.820
310.410	0.400
310.667	2.040
310.899	0.640
311.176	2.740
311.447	0.510
311.709	1.940
311.934	0.770
312.214	2.640
312.490	0.630
312.756	1.880
312.976	0.910
313.258	2.530
313.542	0.710
313.805	1.880
314.030	1.010
314.307	2.460
314.596	0.720
314.857	1.960
315.089	1.020
315.358	2.430
315.640	0.660
315.906	2.120
316.143	0.920
316.408	2.430
316.676	0.590
316.946	2.340
317.191	0.770
317.453	2.460

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
317.708	0.530
317.979	2.580
318.231	0.590
318.492	2.480
318.738	0.480
319.010	2.770
319.267	0.440
319.526	2.480
319.768	0.470
320.039	2.910
320.299	0.350
320.558	2.460
320.797	0.480
321.067	2.980
321.329	0.330
321.586	2.390
321.824	0.530
322.095	2.970
322.359	0.390
322.614	2.280
322.850	0.620
323.122	2.890
323.388	0.500
323.640	2.140
323.874	0.740
324.147	2.770
324.415	0.650
324.667	2.000
324.896	0.890
325.170	2.610
325.443	0.820
325.696	1.870
325.917	1.040
326.194	2.440
326.473	0.980
326.728	1.770
326.939	1.190
327.220	2.270
327.510	1.100
327.767	1.710
327.971	1.320
328.255	2.110
328.562	1.170

Tiempo [días]	H [m]
328.817	1.720
329.035	1.410
329.305	2.000
329.612	1.150
329.872	1.800
330.111	1.380
330.360	1.950
330.645	1.070
330.915	1.940
331.162	1.230
331.409	1.980
331.671	0.960
331.943	2.120
332.197	1.040
332.447	2.040
332.694	0.850
332.967	2.310
333.224	0.820
333.479	2.120
333.719	0.730
333.990	2.510
334.251	0.600
334.508	2.190
334.744	0.620
335.015	2.690
335.278	0.410
335.535	2.240
335.771	0.530
336.041	2.840
336.306	0.270
336.563	2.260
336.800	0.470
337.069	2.930
337.335	0.200
337.592	2.250
337.829	0.450
338.099	2.950
338.366	0.210
338.624	2.210
338.860	0.480
339.131	2.910
339.399	0.290
339.659	2.140

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
339.891	0.560
340.165	2.820
340.434	0.410
340.699	2.070
340.926	0.690
341.201	2.680
341.472	0.550
341.741	2.030
341.966	0.850
342.242	2.520
342.517	0.690
342.785	2.030
343.017	0.980
343.290	2.370
343.567	0.770
343.834	2.090
344.078	1.020
344.342	2.260
344.615	0.790
344.884	2.230
345.138	0.940
345.397	2.220
345.655	0.770
345.927	2.440
346.188	0.770
346.447	2.240
346.690	0.730
346.963	2.650
347.226	0.580
347.488	2.290
347.722	0.670
347.994	2.820
348.259	0.440
348.520	2.340
348.753	0.630
349.024	2.940
349.289	0.360
349.548	2.350
349.782	0.600
350.051	2.980
350.317	0.350
350.574	2.320
350.808	0.620

Tiempo [días]	H [m]
351.078	2.950
351.344	0.410
351.599	2.250
351.833	0.670
352.102	2.860
352.369	0.500
352.622	2.150
352.856	0.770
353.124	2.730
353.393	0.630
353.646	2.050
353.876	0.880
354.145	2.580
354.416	0.770
354.670	1.950
354.897	1.000
355.167	2.410
355.439	0.910
355.698	1.890
355.920	1.130
356.190	2.240
356.465	1.020
356.730	1.850
356.951	1.240
357.221	2.070
357.497	1.110
357.769	1.860
358.001	1.320
358.265	1.930
358.544	1.150
358.815	1.910
359.074	1.310
359.320	1.850
359.594	1.130
359.863	2.020
360.135	1.180
360.376	1.840
360.632	1.050
360.903	2.180
361.177	0.970
361.426	1.900
361.664	0.950
361.937	2.370

ANEXO B. DATOS UTILIZADOS DE MAREAS

Tiempo [días]	H [m]
362.208	0.740
362.465	1.990
362.694	0.830
362.967	2.570
363.238	0.510
363.497	2.100
363.726	0.700
363.997	2.750
364.266	0.320
364.526	2.190
364.757	0.580
365.027	2.900
365.294	0.190
365.555	2.270
365.788	0.470