

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

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

FRANCISCA URMENETA M.¹
CAROLINA MERUANE N.²
YARKO NIÑO C.³
MANUEL CONTRERAS L.⁴
ALBERTO DE LA FUENTE S.⁵

RESUMEN

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 en la desembocadura 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. La metodología propuesta se focalizó en la determinación del caudal mínimo que debe llegar a la zona estuarina, de modo de frenar el avance de la intrusión salina, y así mantener las concentraciones de sal en el rango de habitabilidad de los elementos biológicos sensibles. Esta metodología se ejemplifica con una aplicación en el estuario del río Aysén, en donde para el análisis de la intrusión salina se modela el estuario con los módulos de flujo impermanente y de calidad de aguas de HEC-RAS.

¹Estudiante, Depto. de Ing. Civil, Universidad de Chile - furmenet@ing.uchile.cl

²Ingeniera Civil, PhD. Jefe de División de Ingeniería, Centro de Ecología Aplicada Ltda. - carolina@meruane.com

³Ingeniero Civil, MSc, PhD. Profesor Titular, Depto. de Ing. Civil, AMTC, Universidad de Chile - ynino@ing.uchile.cl

⁴Biólogo, MSc, PhD. Director Centro de Ecología Aplicada Ltda. - mcontreras@cea.cl

⁵Ingeniero Civil, PhD. Profesor Asistente, Depto. de Ing. Civil, Universidad de Chile - aldelaflu@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

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. Fue definido por la Dirección General de Aguas (DGA) como el “caudal que debe mantenerse en un curso fluvial de tal manera que los efectos abióticos producidos por la reducción de caudal no alteren las condiciones naturales del cauce” (Dirección General de Aguas, 2008). Así, en la última década se han realizado diversos estudios de caudal ecológico orientados a la mantención del hábitat acuático de los ríos. Sin embargo, en general, estos estudios no consideran la parte estuarina del río en la desembocadura al mar.

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. En la zona estuarina de los ríos, en cambio, la altura y velocidad de escurrimiento, no sólo varía con el caudal, sino que además responde a la interacción con el mar, que varía periódicamente de acuerdo con la marea. 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.

El objetivo principal de este estudio es proponer una metodología que permita determinar el caudal ecológico en estuarios y aplicarla en el estuario del río Aysén.

2. DEFINICIONES

Es necesario establecer cuáles son las definiciones de los conceptos de “estuario” y “caudal ecológico” que serán consideradas en esta metodología.

Definición de Estuario

Basándose en la definición propuesta por Cameron & Pritchard (1963) y el límite del estuario propuesto por Fairbridge (1980), en este 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 que, como límite de estuario se considera el criterio según onda de marea, es decir, el estuario llega hasta donde se percibe el efecto de la marea sobre el escurrimiento.

Definición de Caudal Ecológico de Estuarios

La definición de caudal ecológico que está en vigencia en Chile, y que es 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. Para el caso de estuarios, se requiere especificar que el requerimiento a considerar en este concepto es el de agua dulce. Es así que en el contexto de estuarios, el caudal ecológico se define 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 usos 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. Con respecto a este tema, se recomienda revisar DGA (2009).

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Metodologías para Determinar Caudal Ecológico en Ríos

Se han desarrollado numerosos métodos para obtener el caudal ecológico, los cuales pueden dividirse en tres tipos: los métodos hidrológicos o estadísticos, los métodos hidráulicos y los métodos hidrobiológicos. Dentro de estos últimos se incluyen 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).

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. Además, en casos calificados en los que se identifiquen en el hábitat riesgos 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.

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 1). Fisher et al. (1979) propusieron un criterio basado en el número de Richardson de estuarios (Ri_e), para clasificar los estuarios según su grado de estratificación.

$$Ri_e = \frac{\Delta\rho g Q_f}{\rho_s W u_t^3} \quad (1)$$

donde: $\Delta\rho = \rho_s - \rho_0$ es la diferencia de densidad entre agua dulce y agua salada, Q_f el caudal de agua dulce, W denota el ancho del estuario y u_t la velocidad RMS (Root-Mean-Square), influenciada por los efectos de marea. Se propone que para $Ri_e > 0,8$ el estuario está fuertemente estratificado y el flujo está dominado por intrusión salina, mientras que si $Ri_e < 0,08$, el estuario está bien mezclado con variaciones despreciables de densidad en la vertical.

Para el caso con presencia de cuña salina 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 fue dada por Schijf & Schonfeld (1953) y 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):

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

donde Fr_0 es el número de Froude densimétrico definido como:

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

donde q_f corresponde al caudal por unidad de ancho de agua dulce y ϕ 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 $c_{fi} = 0,01$.

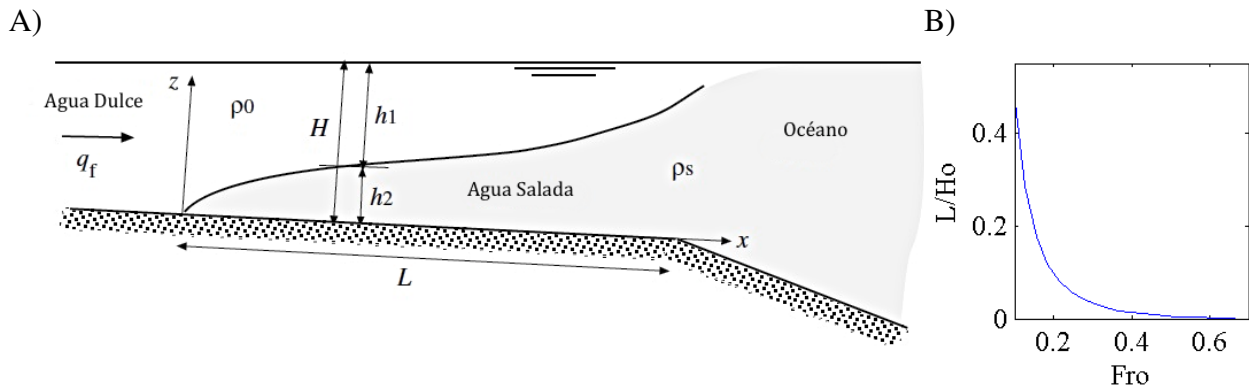


Figura 1: A) Modelo de cuña salina con fondo plano. B) Solución de L/H en función de Fr_0 de (2).

En la Figura 1B 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.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

La determinación del caudal ecológico en estuarios 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. A continuación se detallan los 5 pasos propuestos.

Paso 1: Determinación del Límite del Estuario y Área a Caracterizar

Para determinar el área a caracterizar, es importante definir el límite de aguas arriba del estuario. Para efectos de esta propuesta metodológica, éste 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. Luego, el área a caracterizar será todo el estuario y las riberas a su alrededor.

Paso 2: Caracterización del Ecosistema Estuarino y Requerimientos de Agua Dulce

Esta etapa corresponde a una línea base de la zona de estudio, análogamente a lo que se realiza al determinar el caudal ecológico en ríos. Se pretende obtener información acerca de las especies que habitan el estuario, incluyendo flora y fauna, y de las actividades antrópicas que puedan realizarse en él. Particularmente, es relevante conocer la posición de estos componentes a lo largo del estuario, 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 esto se propone desarrollar una serie de actividades relacionadas con la recopilación de antecedentes de la zona de estudio, levantamiento de información complementaria, identificación de los requerimientos de agua dulce y elaboración de un mapa de sensibilidad ambiental, como se explica a continuación.

a) Antecedentes de la zona de estudio: Una primera etapa de la caracterización debería corresponder a una revisión bibliográfica, en la que se recopilen documentos técnicos, estudios científicos y otros realizados en el ecosistema estuarino. Un antecedente que puede brindar información preliminar de la vegetación presente en el área a caracterizar corresponde a la fotointerpretación a través de imágenes satelitales (Knight Piésold Consulting, 2009; Centro de Ecología Aplicada, 2008a). Además, de forma análoga a los estudios de caudal ecológico en ríos, es necesario identificar los usos antrópicos presentes en la zona a caracterizar, tales como los puntos de captación de agua, sitios de pesca, turismo como rafting y kayak, entre otros (Centro de Ecología Aplicada, 2008b). La información se puede recopilar de distintas fuentes como municipalidades, agencias de turismo u otros canales de información, informes técnicos y científicos.

b) 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. Se propone elaborar un listado de las componentes identificadas en cada ítem y señalar el sector al que corresponden dentro del estuario y sus riberas.

c) Requerimientos de agua dulce de los componentes: 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. Cuando no exista información específica del componente buscado, se recomienda buscar información de especies similares que pudieran tener requerimientos parecidos.

d) Elaboración de un 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. 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. Luego, se recomienda seleccionar cuáles de los elementos presentes en el ecosistema estuarino corresponden a componentes sensibles, es decir, a aquellos que pueden verse afectados en alguna medida por el aumento en la concentración de sal.

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 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.

a) Modelación en HEC-RAS: En un estuario, la velocidad y la cota de 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 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. Luego, para modelar la salinidad se utiliza el módulo 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 cero. Como condición inicial se recomienda modelar con concentración nula en el río hasta la desembocadura. Para calibrar y validar los resultados de la modelación, se recomienda tener datos de perfiles CTD (conductividad, temperatura y profundidad) a lo largo del eje longitudinal del río, para conocer la salinidad promedio vertical en el río.

b) 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, por lo tanto, se conoce 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 realiza 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.

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.

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.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL ESTUARIO DEL RÍO AYSÉN

Paso 1: Determinación del Límite del Estuario y Área a Caracterizar

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 2). La condición de borde aguas abajo, sin embargo, se posicionó donde se poseen mediciones de perfiles CTD con datos medidos de salinidad.

Luego, para definir el límite aguas arriba del estuario, se utilizó 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, donde aparece una pendiente brusca que logra que la línea horizontal de la máxima marea (línea roja en la Figura 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.

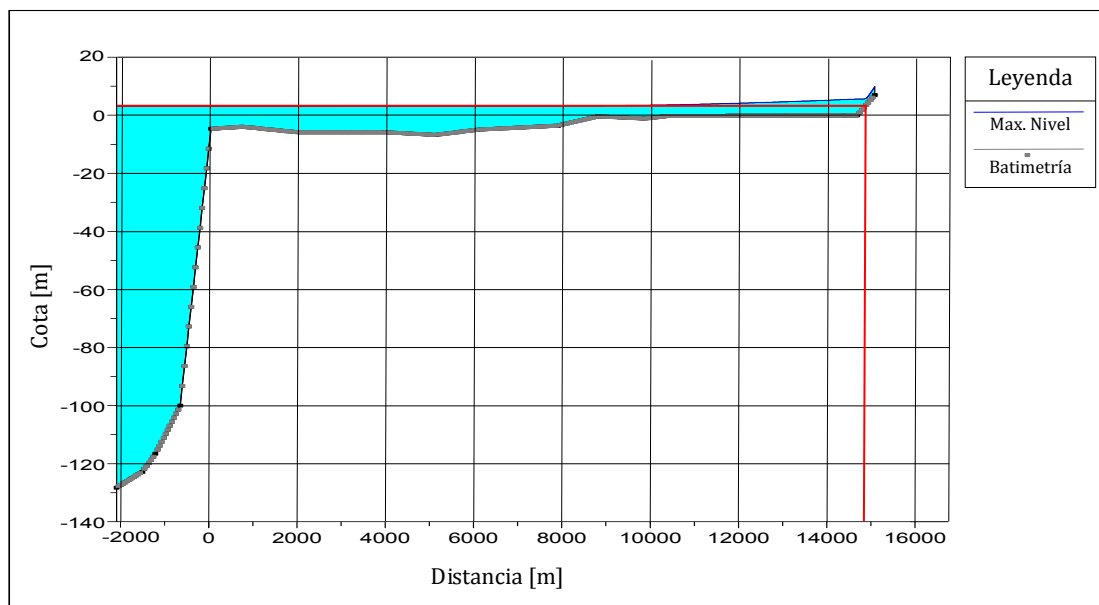


Figura 2: Determinación del límite del estuario del río Aysén, Paso 1.

Paso 2: Caracterización Preliminar del Ecosistema Estuarino

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 antecedentes bibliográficos.

Para identificar especies posiblemente afectadas por la salinidad del agua, se recopiló información de macrófitos acuáticos de la Región de Aysén. Los macrófitos acuáticos, también denominados hidrófitos 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, 2008c).

San Martín *et al.* (2011) realizó un estudio en el que identificó los macrófitos acuáticos 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.

Por otro lado, se realizó una revisión de los peces (indicados en la Tabla 1) y aves presentes en el estuario. La información de aves se recopiló de la Guía de Aves Dulceacuícola de Aysén (Figueroa *et al.*, 2001), en la cual se identificaron las especies Gaviota de Franklin (*Larus pipixcan*), Pato real (*Anas sibilatrix*), Garza Boyera (*Bubulcus ibis*), Queltehue (*Vanellus chilensis*), Gaviota Dominicana (*Larus dominicanus*), Gaviota Cahuil (*Larus maculipennis*) y Colegial (*Lessonia rufa*).

Tabla 1: Especies de peces registradas en la zona de estudio.

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 sp.</i>	Puerto Aysén	McDowall y Nakaya, 1987

Por otro lado, a partir de imágenes satelitales LANDSAT 5, se elaboró el mapa del “Índice de diferencia normalizada de vegetación” (NDVI) para obtener información preliminar de la vegetación del lugar (Figura 3). 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 infrarojo cercano (IRC) y la banda del infrarojo (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 3 se destacaron con círculos negros las zonas que indican alta intensidad de vegetación en las riberas, los que para efectos de esta aplicación preliminar, 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.

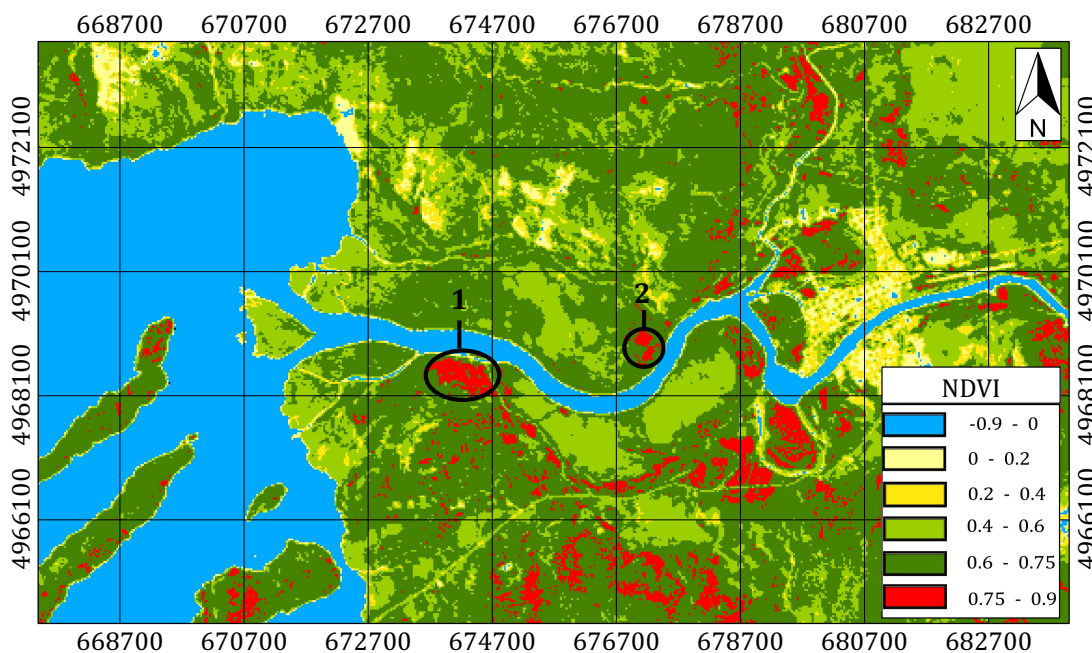


Figura 3: Mapa índice NDVI.

Requerimientos de agua dulce de los componentes

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

Según el estudio realizado por Ashraf *et al.* (1986), al aumentar las concentraciones de sal, se producen efectos adversos sobre la población de *H. lanatus*. 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. Los resultados del experimento, expresados en índice de tolerancia, muestran que se producen efectos negativos sobre la población de *H. lanatus* al aumentar las concentraciones de *NaCl* (ver Tabla 2).

Tabla 2: Tolerancias promedio a distintas salinidades, entre las poblaciones de la especie *Holcus lanatus* estudiadas por Ashraf *et al.* (1986).

NaCl [$mol\ m^{-3}$]	NaCl [$g\ l^{-1}$]	Tolerancia Promedio [%]
50	2.9	91.3
100	5.8	80.7
150	8.8	64.0
200	11.7	43.7
250	14.6	17.0

La especie *Cyperus eragrostis*, según los resultados del experimento realizado por Zulkaliph *et al.* (2011), no se ve afectada con una salinidad de $30\ g\ l^{-1}$ y con una salinidad de $61.4\ g\ l^{-1}$ mostró sólo síntomas medios. Por lo tanto, la especie resiste altas concentraciones de sal.

Con respecto a los peces identificados, aparentemente las *O.mykiss* (trucha arcoiris) están bastante adaptadas a cambios de salinidad. Tanto la *O.mykiss* (trucha arcoiris) como la *S.trutta* (trucha café) son aparentemente capaces de soportar una salinidad entre 0 y $35\ g\ l^{-1}$, 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* es la única que podría verse fuertemente afectada por un aumento brusco de salinidad.

Mapa de Sensibilidad Ambiental

La información recopilada en esta etapa se tradujo en un mapa, en el que se puede visualizar de forma clara la ubicación de los principales componentes biológicos. En el Mapa de Sensibilidad Ambiental (Figura 4) se observan los peces identificados en el estuario (Trucha café y arcoiris), las aves y las zonas de vegetación ribereña. 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.

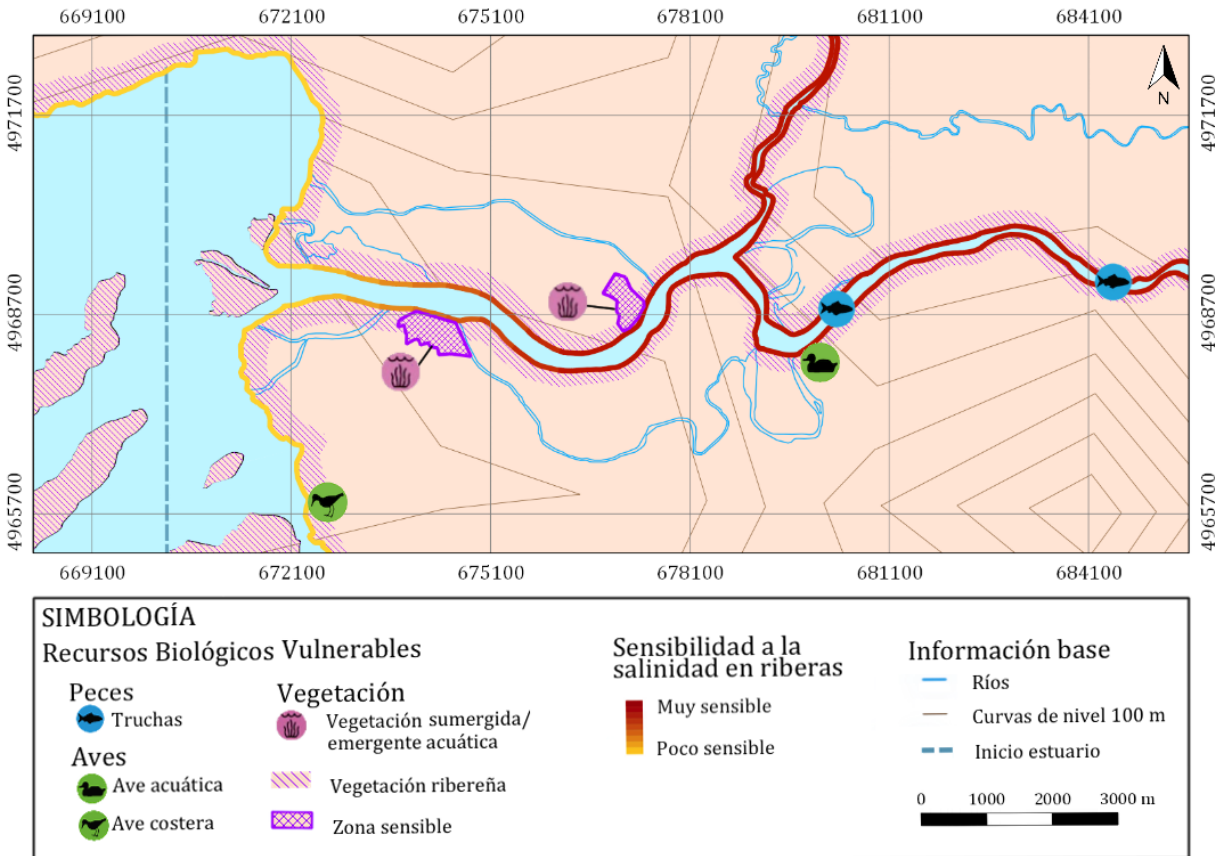


Figura 4: Mapa de Sensibilidad Ambiental a la salinidad del estuario del río Aysén.

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 en el mapa NDVI (Figura 3), ubicada a 3 km de la boca del estuario. 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.

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 3). 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 3: Descripción de escenarios de modelación.

Escenario	Condición de caudal	Serie de marea
Base	Variable	Año completo
1	Cte. = Q_{95}	Sicigia
2	Cte. = Q_{50}	Sicigia
3	Cte. = Q_5	Sicigia
4	Cte. = Q_{95}	Cuadratura
5	Cte. = Q_{50}	Cuadratura
6	Cte. = Q_5	Cuadratura

Resultados ecuación teórica

En el caso del estuario del río Aysén, según datos medidos, es habitual 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, presentada en la sección de revisión de antecedentes. Considerando una densidad del agua salada de 1022 kg/m^3 (calculado a través de la fórmula de la UNESCO con valores de temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y salinidad de 28.8 gl^{-1}) y del agua dulce de 1000 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 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, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 4. 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.

Tabla 4: Resultados del alcance de la cuña salina a través de la ecuación teórica.

Probabilidad de Excedencia	Caudal [m^3/s]	Largo cuña, $H_o=8.1 \text{ [m]}$ [km]	Largo cuña, $H_o= 5.07\text{[m]}$ [km]
Q_5	1372	0.01	0.00
Q_{50}	558	0.40	0.02
Q_{95}	221	3.53	0.45

Datos utilizados en la modelación

- Datos geométricos

Se adaptaron los datos de batimetría para poder generar secciones transversales e ingresar a HEC-RAS. Para estimar el número de Manning del tramo de estudio, se utilizaron fotografías del lecho, con las cuales se obtuvo una curva granulométrica utilizando el software WipFrag. Aún cuando las fotografías utilizadas caracterizan el 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 $n = 0,019 \text{ sm}^{-1/3}$, que será el valor utilizado en la modelación.

- **Modelación hidrodinámica en régimen impermanente**

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. 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 4), calculados con una serie de caudales de 10 años.

Se utilizó la serie de mareas del SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile) del año 2009 en Puerto Chacabuco, que corresponde a datos medidos 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 períodos 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, promediados en la vertical, resultando un valor de 28.8 gl^{-1} . En la sección aguas arriba se consideró una concentración igual a 0, al igual que para la condición inicial para la salinidad de todo el estuario. Finalmente, en ausencia de mediciones detalladas que permitan validar los resultados de la modelación, se consideró el caso con un coeficiente de dispersión constante y nulo a lo largo del estuario. Es importante destacar que el módulo de calidad de agua de HEC-RAS permite utilizar un coeficiente de dispersión proporcional al determinado por Fisher (Fisher 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. Se consideró 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 el modelo a través de un coeficiente de dispersión.

Resultados modelación

Los resultados de la modelación entregan la concentración de sal en cada punto del estuario y en cada tiempo. Para el escenario base se presentan los alcances en que se superan distintos límites de salinidad durante el año de modelación (Figura 5), mientras que para los escenarios del 1 al 6, se presentan los resultados para un instante de tiempo de la simulación (Figura 6). Estos resultados corresponden al caso de dispersión nula en el estuario. En la Figura 5 se representa como los alcances de la cuña son un resultado combinado de la serie de caudales y mareas.

Análisis probabilístico

Realizando un análisis probabilístico con los resultados del escenario base, se calcularon los porcentajes del tiempo en que el frente de salinidad (con límite de salinidad de 0 y 3 gl^{-1}) ingresa a los primeros kilómetros del estuario (Figura 7). Se puede observar que el frente de salinidad ingresa

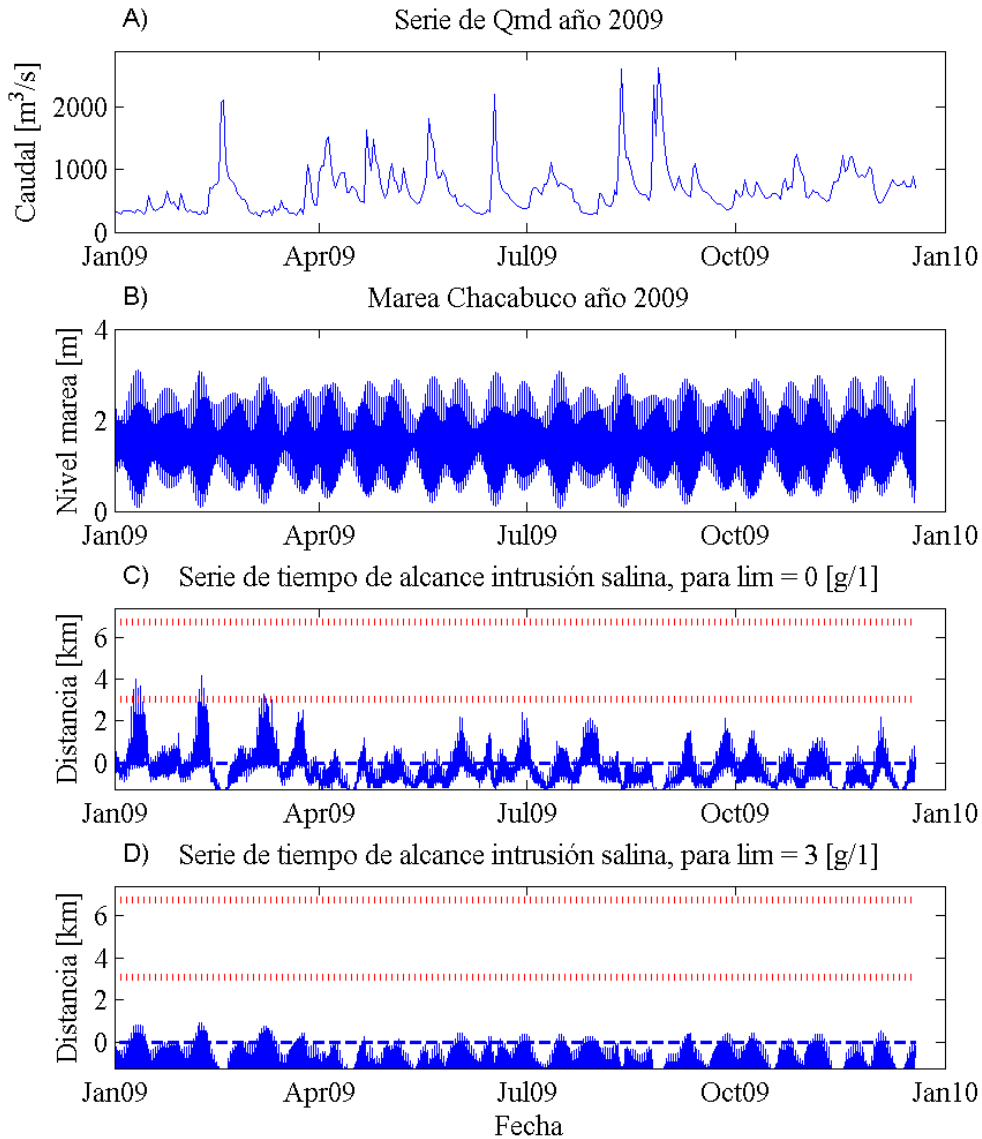


Figura 5: Serie de tiempo de caudales y mareas en escenario base (paneles A y B) y series de tiempo de alcances del frente de salinidad, para concentraciones de sal de 0 y 3 g l^{-1} , paneles C y D, respectivamente. Línea segmentada azul marca boca del estuario, y líneas punteadas en rojo marcan posición de zonas sensibles identificadas en Figura 4.

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 efecto que tiene una fuerte disminución del caudal en los alcances de la intrusión salina. Como se observa en la Figura 7, 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

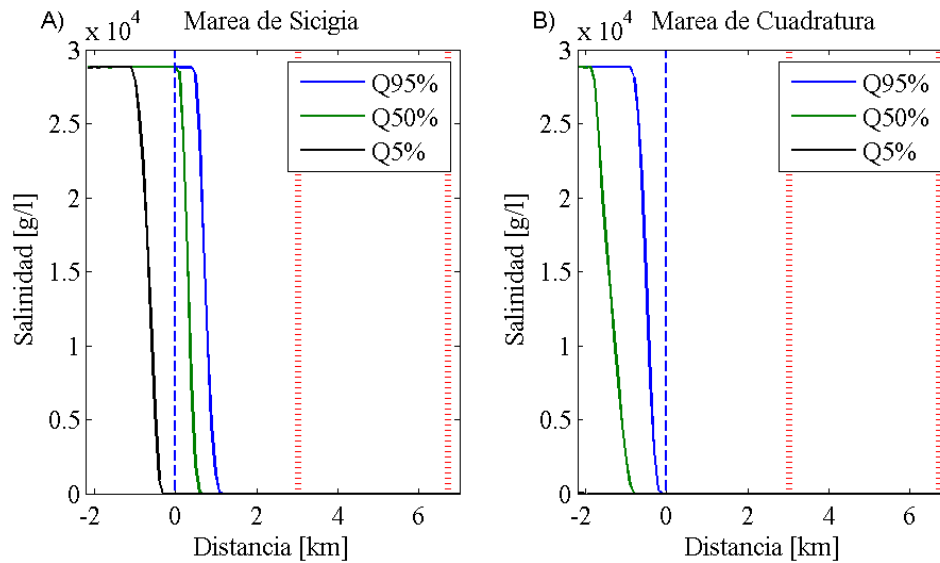


Figura 6: Perfiles longitudinales de salinidad promedio para escenarios con caudal constante, y para condición de marea de sicigia (escenarios 1 a 3, panel A) y de cuadratura (escenario 4 al 6, panel B). Línea segmentada azul marca boca del estuario, y líneas punteadas en rojo marcan posición de zonas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

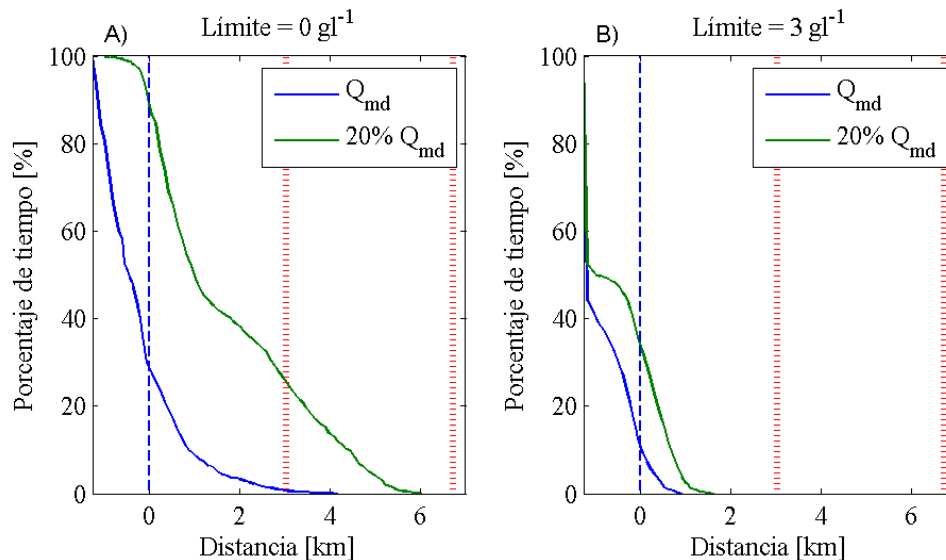


Figura 7: Perfil longitudinal del porcentaje de tiempo en que la salinidad supera umbral de 0 y 3 g l^{-1} , paneles A y B, respectivamente. Escenario base (línea azul) y con reducción del caudal del río al 20% del caudal base (línea roja). Línea segmentada azul marca boca del estuario, y líneas punteadas en rojo marcan posición de zonas sensibles identificadas en Figura 4.

(1) y (2) identificados preliminarmente en las Figuras 3 y 4, se observa que en un bajo porcentaje del tiempo el frente de intrusión salina alcanza estos sectores (ver Figura 7), por lo que en condiciones normales, estas zonas no reciben altas concentraciones de sal.

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 gl^{-1} , la especie se ve notoriamente afectada.

Por lo tanto, la restricción impondrá 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). Como se definió en la Figura 3, 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} .

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). 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 cabecera 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 este caudal 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 proporciones iguales ambos caudales.

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

El caudal que cumplió la restricción, corresponde a un caudal total de $115 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a un 19.4 % del caudal total de 50 % de probabilidad de excedencia. Esto quiere decir, que modelando en HEC-RAS con condición normal de mareas y con caudal constante igual a $115 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtuvo que el frente de salinidad nunca superó la ubicación del componente sensible (3 km) más de 14 días consecutivos. En efecto, con este caudal se supera sólo 13 días seguidos este límite.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una alternativa metodológica para calcular el caudal ecológico de estuarios, la cual se enmarca en el trabajo de título de la primera autora para optar al título de Ingeniera Civil de la Universidad de Chile. La metodología propuesta considera el hecho que reducciones en el caudal del río producen una mayor intrusión de agua marina, aumentando la concentración normal de sal en el sistema. 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 resumen y discuten los principales resultados presentados en este artículo.

Metodología Propuesta

La metodología propuesta contempla 5 pasos principales, los cuales se esquematizan en la Figura 8. 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 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.

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. 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.

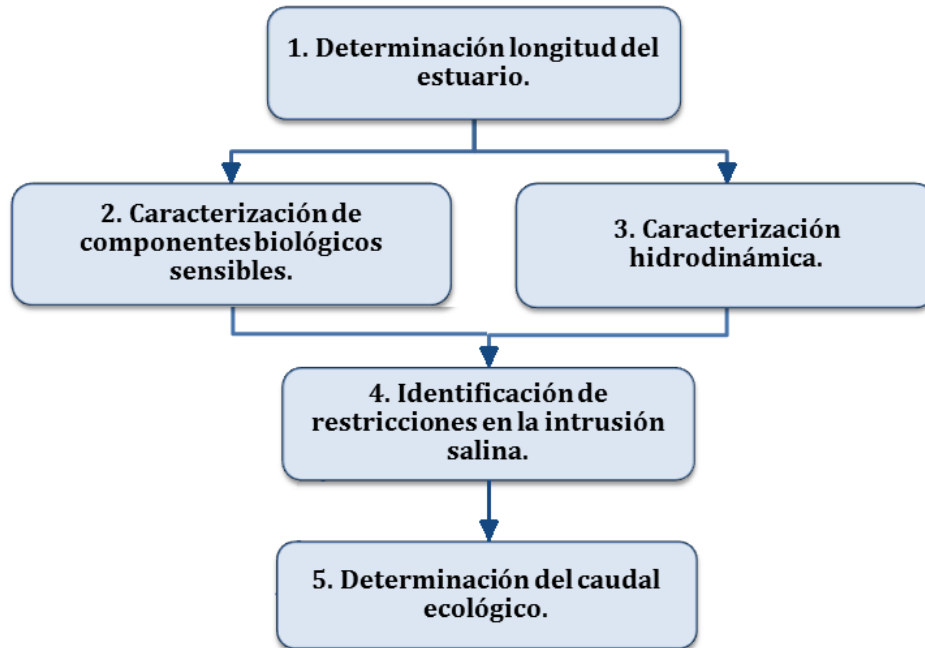


Figura 8: Esquema de los pasos de la metodología propuesta.

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). 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 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 $115 \text{ m}^3/\text{s}$ 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, la cual se utiliza 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.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece a Beth Baumgartner, Felipe Cerda, Felipe Sandoval y Carlos Reiher por su colaboración en distintos aspectos de este trabajo. Los autores agradecen la revisión del comité científico del XXI Congreso de Ingeniería Hidráulica, que permitió mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- 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*, 725 – 734.
- Cameron, W. M., & Pritchard, D. W. 1963. Estuaries. *The Sea, New York*, 2, 306–324.
- Centro de Ecología Aplicada. 2008a. Medio Biótico, Línea de Base Proyecto Hidroeléctrico Aysén, para Estudio de Impacto Ambiental.
- Centro de Ecología Aplicada. 2008b. Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación. Informe.
- Centro de Ecología Aplicada. 2008c. Estimación del caudal ecológico del proyecto hidroeléctrico Aysén. Informe.
- 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.
- 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.
- 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.
- García, P., Fernández, R., & Cirujano, S. 2009. *Habitantes del agua. Macrófitos*. Agencia Andaluza del Agua.
- 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*.
- Knight Piésold Consulting. 2009. Medio Biótico, Línea de Base Proyecto Central Hidroeléctrica Cuervo, Estudio de Impacto Ambiental, elaborado para Energía Austral Ltda.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2013. Decreto 14.

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*.

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)*, 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.

Valle-Levinson, A. (ed). 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge.

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*, 523 – 530.