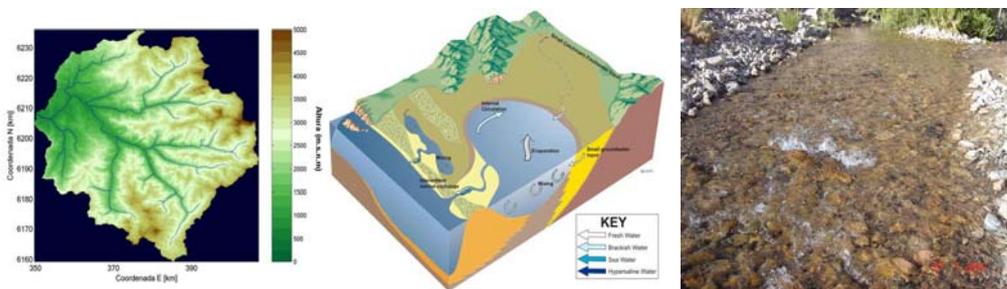




## CONCEPTOS Y CRITERIOS PARA LA EVALUACION AMBIENTAL DE HUMEDALES



Centro de Ecología Aplicada Ltda.

2006

## INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1.	Características estructurales de los humedales	4
1.2.	Características funcionales de los humedales	6
1.3.	Variables de estado	10
1.4.	El rol de las perturbaciones en los humedales	10
1.5.	Análisis multiescalado de la dinámica de un humedal	12
1.6.	Diseño conceptual sistema alerta temprana	13
<b>2.</b>	<b>HUMEDALES EN CUENCAS EXORREICAS COSTERAS</b>	<b>15</b>
2.1.	Propiedades fundamentales	15
2.2.	Variables de estado	18
2.3.	Factores forzantes	19
2.4.	Seguimiento ambiental	20
2.5.	Criterios y umbrales	21
2.6.	Sistema alerta temprana	21
2.7.	Medidas de mitigación	21
<b>3.</b>	<b>RÍOS EN CUENCAS EXORREICAS ANDINAS</b>	<b>22</b>
3.1.	Propiedades fundamentales	23
3.2.	Variables de estado	40
3.3.	Factores forzantes	41
3.4.	Seguimiento ambiental	41
3.5.	Criterios y umbrales	42
3.6.	Sistema alerta temprana	42
3.7.	Medidas de mitigación	42
<b>4.</b>	<b>LAGOS EN CIQUENCAS EXORREICAS ANDINAS</b>	<b>43</b>
4.1.	Propiedades fundamentales	43
4.2.	Variables de estado	47
4.3.	Factores forzantes	48



<b>4.4. Seguimiento ambiental</b>	<b>49</b>
<b>4.5. Criterio y umbrales</b>	<b>50</b>
<b>4.6. Sistema alerta temprana</b>	<b>51</b>
<b>4.7. Medidas alerta temprana</b>	<b>51</b>
<b>5. BOFEDALES Y VEGAS EN CUENCAS ENDORREICAS</b>	<b>52</b>
5.1. Propiedades fundamentales	52
5.2. Variables de estado	67
5.3. Factores forzantes	67
5.4. Seguimiento ambiental	68
5.5. Criterios y umbrales	69
5.6. Sistema alerta temprana	70
5.7. Medida de mitigación	70
<b>6. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN</b>	<b>71</b>
6.1. Estadística descriptiva	71
6.2. Estadística multivariada	73
<b>7. INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA IMPLEMENTAR UN PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL</b>	<b>75</b>
<b>8. FICHA DE EVALUACIÓN</b>	<b>76</b>
<b>9. GLOSARIO</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El término humedales se refiere a una amplia variedad de hábitats interiores, costeros y marinos que comparten ciertas características. Generalmente se los identifica como áreas que se inundan temporalmente, donde la napa freática aflora en la superficie o en suelos de baja permeabilidad cubiertos por agua poco profunda. Todos los humedales comparten una propiedad primordial, el agua, que juega un rol fundamental en el ecosistema, en la determinación de la estructura y las funciones ecológicas del éste.

A diferencia de los ecosistemas terrestres los humedales suelen presentar una gran variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio. Esto tiene efectos muy importantes sobre la diversidad biológica que habita en los humedales, ya que deben desarrollar adaptaciones para sobrevivir a estos cambios que pueden llegar a ser muy extremos, por ejemplo, ciclos hidrológicos anuales con períodos de sequía e inundación extremos.

Existen muchas definiciones del término humedales, algunas basadas en criterios principalmente ecológicos y otras más orientadas a cuestiones vinculadas a su manejo. La Convención sobre Humedales Ramsar los define en forma amplia como: *"las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros"*.

### 1.1 Características estructurales de los humedales

Los humedales pueden ser representados como ecosistemas constituidos por componentes vivos (bióticos) y no vivos (abióticos), que interactúan activamente como una unidad ecológica. Numerosos autores señalan que los ecosistemas pertenecen a una clase más amplia que los sistemas físicos, ya que éstos son entidades históricas, que poseen memoria de su desarrollo y de los eventos que afectan su comportamiento. Los componentes generan interacciones a través de las cuales son capaces de modificarse mutuamente, éstas determinan en último término los estados futuros del ecosistema.

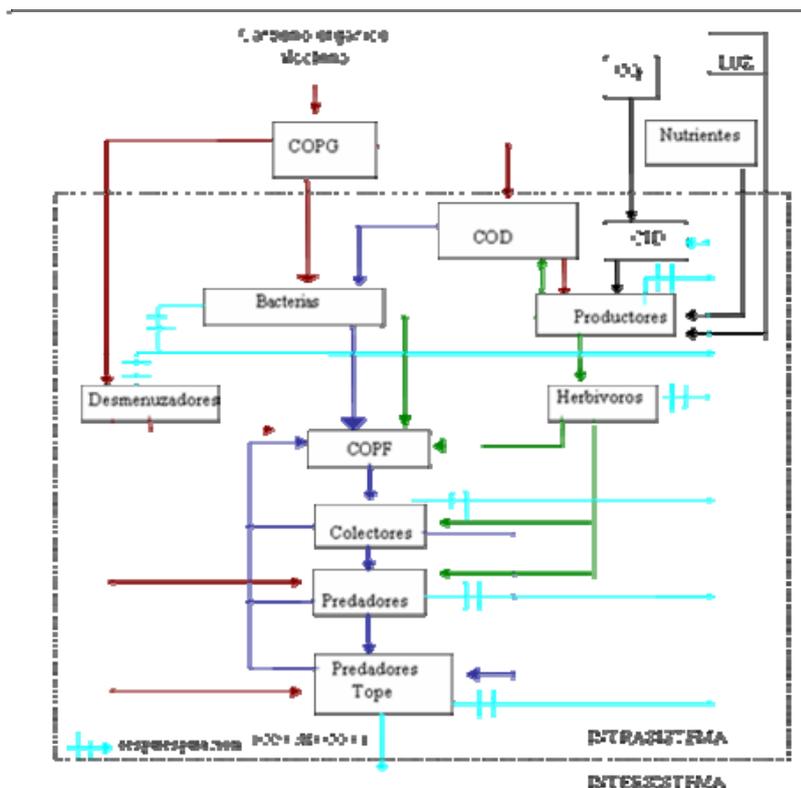
La estructura de los humedales esta dada principalmente por los componentes que lo constituyen, como flora y fauna acuática, vegetación ripariana, fauna terrestre asociada a la vegetación ripariana, componentes abióticos, y las interacciones que se generan entre cada uno ellos.

El funcionamiento corresponde a la expresión dinámica de la estructura del humedal, a través de cambios en los flujos de materia y energía entre los diferentes componentes del ecosistema.

Por esto definir los humedales a partir de la riqueza biológica de algunos componentes, como aves y vegetación ripariana, resulta en una simplificación que no permite el adecuado entendimiento de la estructura de los humedales y por ende, limita fuertemente el desarrollo de planes de manejo destinados a la conservación de los humedales.

De este modo, la estructura de los humedales debe definirse en función de sus elementos constituyentes y las interacciones biogeoquímicas que se generen entre ellos (Figura 1.1). Esta condición genera un grado de subjetividad asociado a los especialistas que están involucrados en el estudio de los humedales, ya que depende de la pregunta o fenómeno de interés, así como también de los antecedentes científicos disponibles. Como una forma de reducir la incertidumbre asociada a la falta de información primaria de la estructura de los humedales, se utilizan los **Talleres de Especialistas**, formados no sólo por científicos sino por todos aquellos usuarios que tengan algún tipo de conocimiento del humedal o temática en estudio. El objetivo principal de los talleres es establecer un modelo conceptual consensuado, que describa adecuadamente la estructura del humedal.

**Figura 1.1.** Estructura de ecosistema acuático existente

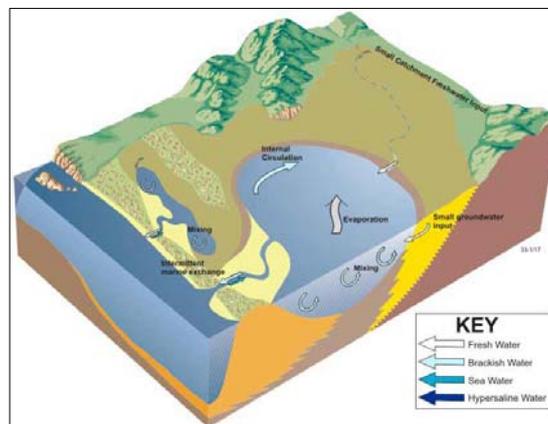


## 1.2 Características funcionales de los humedales

El patrón hidrológico de la cuenca es el principal factor forzante para los humedales y por ello, diferencias en magnitud, frecuencia y duración del caudal generan una variedad de respuestas dentro de éste. Por ende, los humedales son un reflejo de las condiciones ambientales presentes en la cuenca hidrológica, donde los aportes directos (ej. ríos) o difusos (ej. escorrentía) afectan su comportamiento (Figura 1.2).

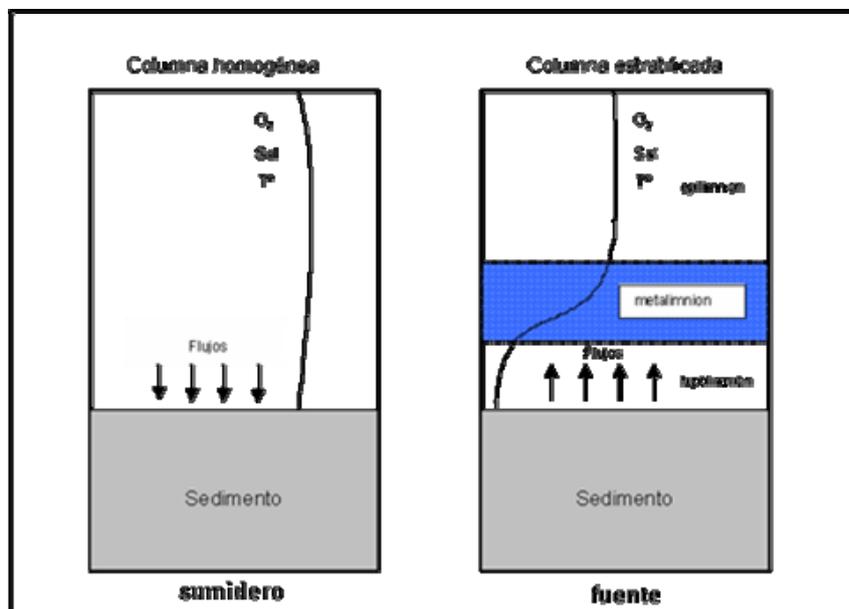
Durante el periodo de crecidas o de mayores caudales, se produce una reducción de la producción biológica, por el “lavado hidráulico” de los componentes bióticos y abióticos del humedal. En cambio, durante el periodo de estiaje la producción biológica aumenta debido al incremento del tiempo de residencia del agua y de la radiación solar. Esta alta sensibilidad a los cambios climáticos e hidrológicos conlleva a que la organización de los humedales muestre una marcada alternancia temporal y solamente surja cuando las condiciones hidrológicas lo permitan. La estrecha dependencia a las condiciones hidrológicas también es evidente a través del efecto en la disponibilidad de nutrientes, en los niveles de pH, en el grado de anaerobiosis del sustrato, en la salinidad del suelo y en diversas propiedades del sedimento.

**Figura 1.2.** Descripción del acoplamiento entre los humedales y la cuenca hidrológica.



Las condiciones hidráulicas de los humedales, están gobernadas por la morfología de la cubeta, el caudal de los tributarios, viento, y en algunos casos las mareas. La interacción entre estos factores produce gradientes verticales, de densidad, temperatura o bien, por la demanda bioquímica de oxígeno desde los sedimentos. Lo anterior puede generar estratificaciones verticales dinámicas que alteran la disponibilidad de oxígeno y por ende, procesos biogeoquímicos como la recarga interna (Figura 1.3). En consecuencia, los procesos de intercambio entre la columna de agua y los sedimentos, así como también la especiación química, son regulados fundamentalmente por la disponibilidad de oxígeno en el agua.

**Figura 1.3.** Estructura vertical de los humedales.

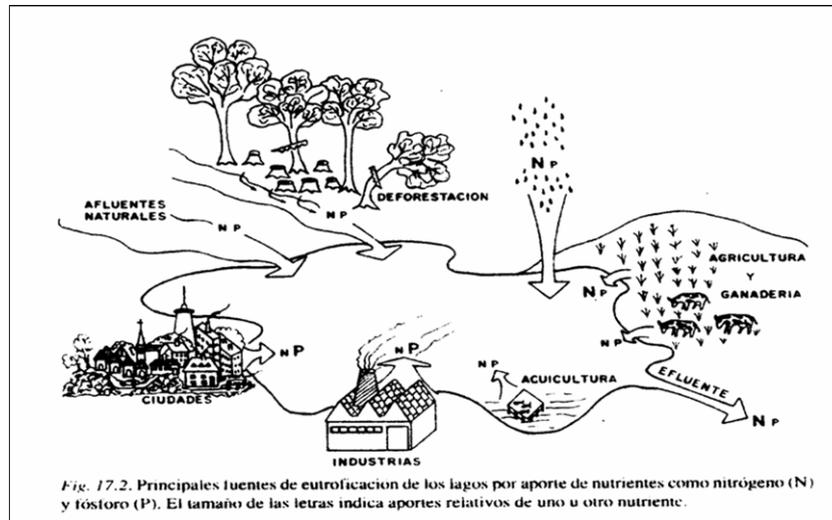


Los nutrientes aportados al humedal pueden ser de origen terrestre, provenientes de la cuenca de drenaje, denominados alóctonos, constituyéndose como la principal fuente de energía al ecosistema (Figura 1.4). Por otra parte, entre las principales funciones de los humedales esta la capacidad de producción de materia orgánica autóctona, proceso que se denomina eutrofización. Como se señaló anteriormente, la producción biológica en los humedales es regulada por factores externos, como recursos hídricos y aportes de nutrientes, dando como resultado una acumulación progresiva de materia orgánica (Figura 1.5).

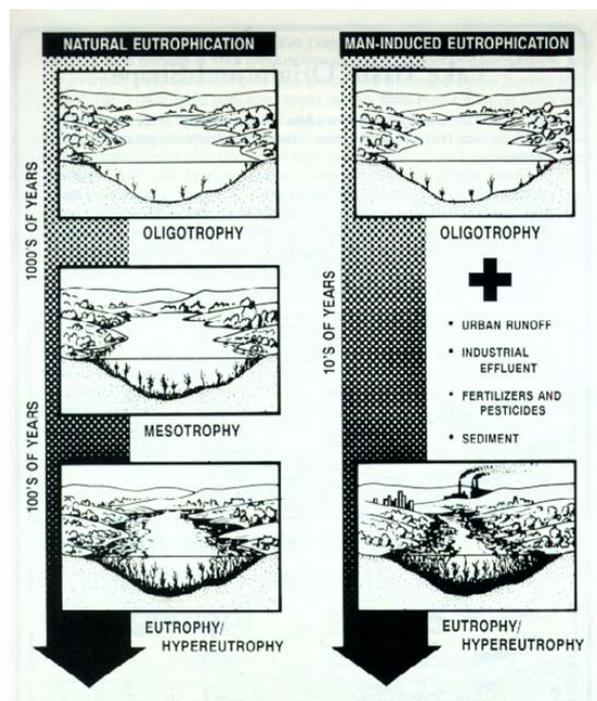
Los humedales pasan de un estado de bajo contenido de materia orgánica (oligotrófico) hacia un estado de alto contenido de materia orgánica (eutrófico), siendo este proceso unidireccional e irreversible (Figura 1.6).

El efecto del aporte de nutrientes de origen antrópico a los humedales, es el incremento en la tasa de acumulación de materia orgánica. Lo que permite establecer los siguientes hechos: i) la eutrofización es un proceso natural de enriquecimiento de los humedales, ii) aportes antrópicos de nutrientes aceleran el proceso de eutrofización, iii) el manejo integrado de los humedales solo permite reducir la velocidad de la eutrofización y, iv) todos los humedales sufren un proceso de envejecimiento o deterioro que altera la estructura y funcionamiento de los mismos.

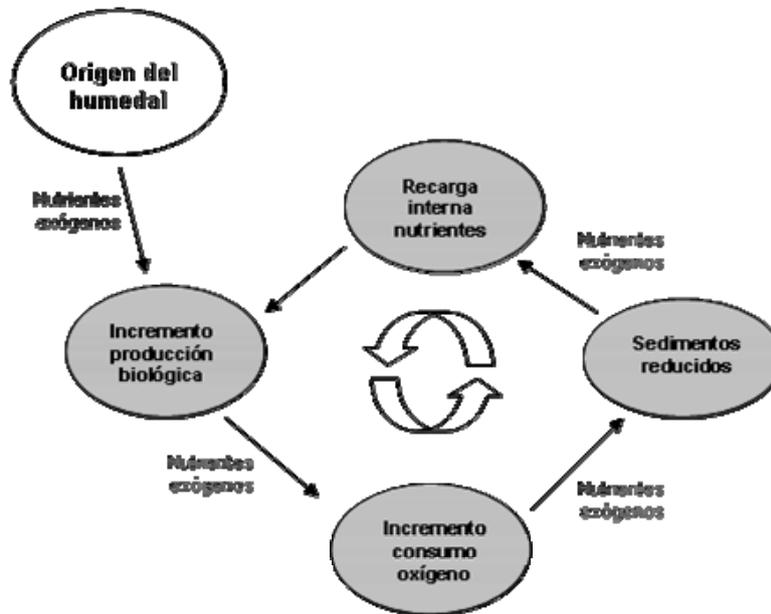
**Figura 1.4.** Aportes difusos y puntuales de materia orgánica y nutriente desde la cuenca hidrológica hacia los humedales.



**Figura 1.5.** Descripción del proceso de eutroficación en humedales.



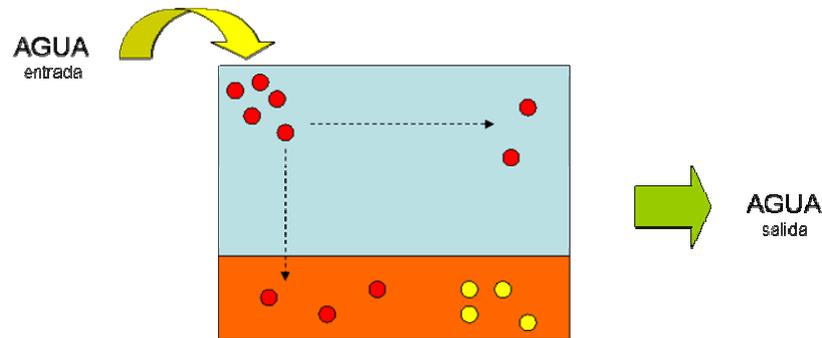
**Figura 1.6.** Ciclo de producción biológica unidireccional debido a aportes de nutrientes exógenos.



**Que debemos recordar del funcionamiento los humedales:**

- Los humedales son un “espejo” de la condición ambiental de la cuenca y de los cambios que en ella ocurren, así como también de las actividades que se realicen en el interior del humedal (ej. acuicultura).
- Los humedales son sistemas que acumulan los materiales que en él ingresan, esto les confiere una capacidad de “filtración”, que en la actualidad esta siendo utilizada para el tratamiento de aguas (Figura 1.7).
- Los humedales que se encuentran en un estado eutrófico siguen acumulando materiales, sin embargo, también liberan materiales desde los sedimentos. Este proceso se denomina recarga interna.

**Figura 1.7.** Descripción del proceso de acumulación de materiales en los humedales.



### 1.3 Variables de estado

Cada uno de los elementos bióticos y abióticos que componen la estructura de los humedales responde a las condiciones ambientales en función de sus atributos internos (límites de tolerancia ambiental) y externos (interacciones y agentes forzantes). De este modo, podemos utilizar cualquier componente del humedal para monitorear su “estado” (ej. bioindicadores), y trasladar esa condición al estado del humedal. Para lo cual debemos utilizar el supuesto que el componente escogido representa fielmente la condición global de humedal, o bien, es el componente más sensible que permite detectar cambios tempranos. Es evidente que cuando se desconocen las características básicas de los componentes bióticos y/ abióticos, su uso como bioindicadores es limitado. En este contexto la identificación de variables de estado de los humedales, permite analizar la condición global del humedal sin la necesidad de un análisis detallado de su estructura. Las variables de estado son aquellas que describen el comportamiento global de los humedales.

La identificación de aspectos básicos de la estructura y funcionamiento de un humedal, así como también de los factores forzantes, permiten la elaboración e implementación de un programa de seguimiento ambiental más acotado.

### 1.4 El rol de las perturbaciones en los humedales

Las perturbaciones son procesos que afectan la estructura y funcionamiento de los humedales, dependiendo de su comportamiento pueden ser de 2 tipos: i) presión, donde el proceso actúa por un periodo prolongado de tiempo, y ii) pulso, donde existe un evento único. Dentro de este último tipo se encuentran las perturbaciones catastróficas, que son eventos de corta duración pero de alta intensidad. En función del origen, las perturbaciones pueden ser naturales o antrópicas, aún cuando los efectos que generan sobre los humedales pueden ser

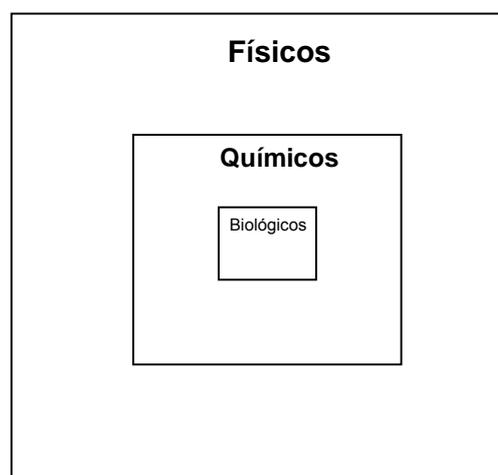
similares. Las perturbaciones de tipo natural modifican los humedales, pero son procesos que forman parte de la dinámica de los sistemas (ej. crecidas). Los sistemas tienen la capacidad de resistir o absorber el efecto de las perturbaciones naturales (capacidad de resiliencia o buffer), mediante la duplicación de las funciones ecosistémicas, estadios de resistencia, entre otros. En cambio, las perturbaciones antrópicas son frecuentemente procesos o materiales “no conocidos” por los sistemas y por ende, los efectos pueden ser muy variables, pero en la mayoría de los casos de carácter negativo (ej. contaminación).

Tal como se indicó anteriormente, los humedales son regulados principalmente por factores como el caudal, las condiciones climáticas y los nutrientes, entre otros. Sin embargo, no todos los factores tienen la misma jerarquía (“importancia”), en cuanto a su rol como factor forzante.

En la Figura 1.9 se presenta en forma muy simple la jerarquía de los factores que regulan los humedales, a partir de lo cual se desprende que los factores físicos son los más importantes, para luego continuar con los químicos y por último los biológicos. Esto podemos ejemplificarlo de la siguiente manera: podemos agregar una cantidad de nutrientes extremadamente alta a un humedal sin que ocurran cambios en su condición trófica, debido a que los tiempos de residencia pueden ser bajos. O bien, podemos agregar peces herbívoros a un humedal para controlar la biomasa de plantas acuáticas sin ningún resultado, si es que el humedal presenta una carga de nutrientes alta. En cambio, una alteración en los caudales modifica inmediatamente la masa de los componentes bióticos y abióticos.

Los procesos biológicos en los ecosistemas acuáticos, son una expresión de las condiciones físicas y químicas, que se producen en la columna de agua y sedimentos, modulados por factores forzantes externos. De este modo, cualquier cambio en el comportamiento de ambas matrices, generará cambios en la composición y abundancia de las comunidades acuáticas.

**Figura 1.9.** Distribución jerárquica de los factores que controlan los humedales.



Lo anterior nos lleva a plantear la necesidad de recordar esta jerarquía cada vez que implementamos un programa de monitoreo o tratamos de encontrar la explicación a algún fenómeno ocurrido en un humedal. Debemos vincular la jerarquía con las características del humedal o fenómeno, colocando especial atención a las propiedades intrínsecas del humedal y en la calidad y magnitud de las alteraciones. Debe existir una coherencia entre el diseño de monitoreo y las propiedades del humedal, y entre el fenómeno y las propiedades de las perturbaciones.

Los factores forzantes son aquellos que afectan o regulan el funcionamiento global de los humedales, pueden ser de origen natural o antrópico. Por definición son externos a los humedales. La identificación de los factores forzantes de un ecosistema, permite determinar e implementar medidas de manejo o control más específicas.

**Que debemos recordar de las perturbaciones o factores forzantes:**

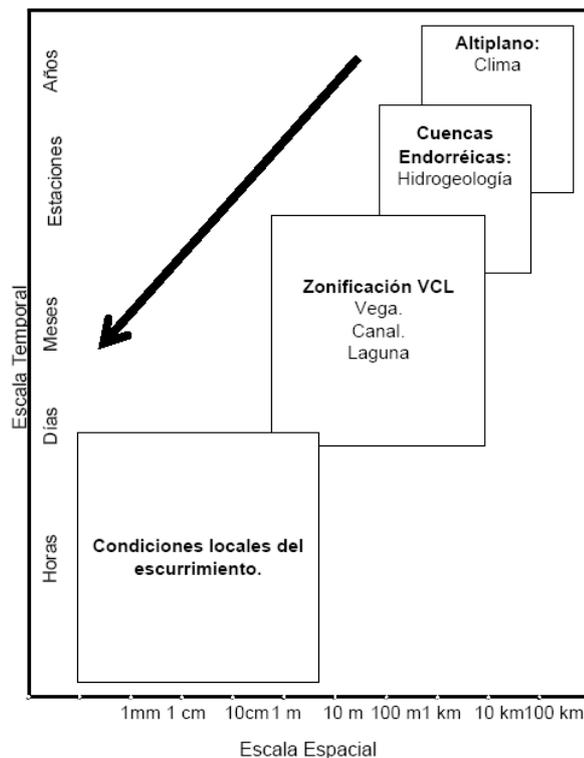
- Las perturbaciones son jerárquicas en cuanto a su rol como factor regulador de la estructura y funcionamiento de los humedales.
- Cada vez que queremos encontrar la explicación a algún fenómeno ocurrido en un humedal, debe existir coherencia entre el fenómeno y las propiedades de las perturbaciones.
- No debemos olvidar que frecuentemente vamos a encontrar efectos sinérgicos entre los factores que pueden afectar a los humedales, los cuales pueden interactuar en diferentes escalas espaciales y temporales. Lo anterior limita fuertemente la posibilidad de encontrar una explicación simple más allá de toda duda, sobre algún fenómeno ocurrido en el humedal.

**1.5 Análisis multiescalado de la dinámica de un humedal.**

Una de las complejidades del estudio o descripción de los humedales radica en que cada uno de los agentes que lo modulan actúa a diferentes escalas temporales y espaciales. Por ejemplo, los procesos climatológicos están asociados a macroescalas las cuales determinan y fuerzan tanto la dinámica del ecosistema en estudio, como también la dinámica de los ecosistemas que se encuentran en la región. En cambio, las condiciones locales del escurrimiento (velocidad, alturas), controlan los procesos de intercambio entre el agua, los sedimentos, y la atmósfera afectando de esta manera la respuesta de los componentes biológicos.

Por otro lado, los agentes que determinan la dinámica espacial de pequeña escala, determinan la variabilidad del ecosistema en escalas de tiempo pequeñas, de horas o incluso minutos (Figura 1.10).

**Figura 1.10.** Esquema de diferentes escalas interactuantes en la dinámica espacio-temporal de humedales altoandinos.



### 1.6 Diseño conceptual sistema alerta temprana

Existen 2 aspectos básicos a considerar en el diseño de un sistema de alerta temprana: i) variable(s) de estado que reflejen adecuadamente el comportamiento del humedal y ii) control espacio-temporal coherente de la variable (s) de estado y las actividades antrópicas que ejercen presión sobre los humedales.

Las variables de estado dan cuenta del comportamiento global de los humedales (ver punto 1.3), no necesariamente corresponden a aquellas incluidas en normas secundarias destinadas a la protección y/o conservación de los humedales. Es importante destacar que las variables de estado deben tener una sensibilidad, que permita detectar tempranamente modificaciones en la estructura y funcionamiento de los humedales. Por ejemplo, el control del caudal de las vertientes permite detectar efectos de la explotación de agua subterránea sobre ecosistemas acuáticos de bofedales, sin embargo, no refleja adecuadamente variaciones en el nivel freático que sustenta la vegetación hidrófila.

El control espacio-temporal implica determinar donde y cuando deben medirse las variables de estado, en función de los atributos específicos de cada humedal y actividad antrópica a monitorear. Conceptualmente se debe buscar coherencia entre el área de mayor impacto y el área y periodo más sensible del humedal. Por ejemplo, para evaluar del efecto del aporte de nutrientes en un lago, debemos centrarnos en el grado de anoxia que presenta la zona hipolimnética<sup>1</sup> durante el periodo de estratificación de la columna de agua, en la zona de mayor profundidad de la cubeta y con mayor tiempo de residencia.

---

<sup>1</sup> Región hipolimnética: zona localizada entre la termoclina o haloclina y el fondo de los cuerpos de agua.

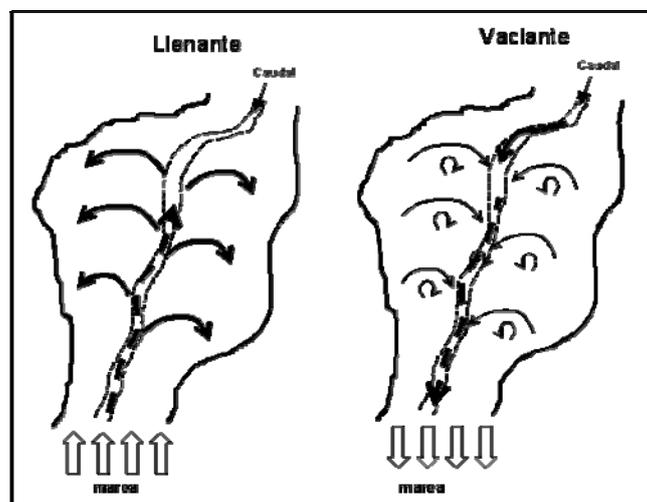
## 2. HUMEDALES EN CUENCAS EXORREICAS COSTERAS

Este tipo de humedales se caracteriza por presentar una vinculación muy estrecha con el mar, pudiendo estar conectado en forma permanente (ej. estuarios) y/o temporal (ej. lagunas costeras saladas). De este modo, en las cuencas exorreicas costeras encontraremos humedales muy dinámicos espacial y temporalmente, en función del balance entre los caudales de los ríos, el mar y la tasa de evaporación. En este tipo de humedales la acción del mar como factor regulador adquiere mayor importancia.

### 2.1 Propiedades fundamentales

Este tipo de humedales se caracteriza por presentar una cubeta somera, que recibe los aportes de los ríos y el mar, en algunos casos es posible encontrar una llanura de inundación lateral (Figura 2.1). Dependiendo de la morfología del terreno donde se encuentre el humedal y de las condiciones hidráulicas de la zona, las condiciones del escurrimiento estarán gobernadas por la altura de agua impuesta por el nivel del mar. El aumento del nivel aguas abajo del sistema, peralta el escurrimiento en el humedal aumentando el volumen de agua, de manera que este aumento se debe al efecto conjunto de los caudales de agua dulce y agua marina que se acumulan en el humedal. El ingreso de agua marina produce una disminución de la velocidad y eventualmente el cambio en el sentido del escurrimiento. Por el contrario, la vaciante induce una disminución del volumen en el humedal, aumentando la velocidad en sentido del escurrimiento de los ríos tributarios.

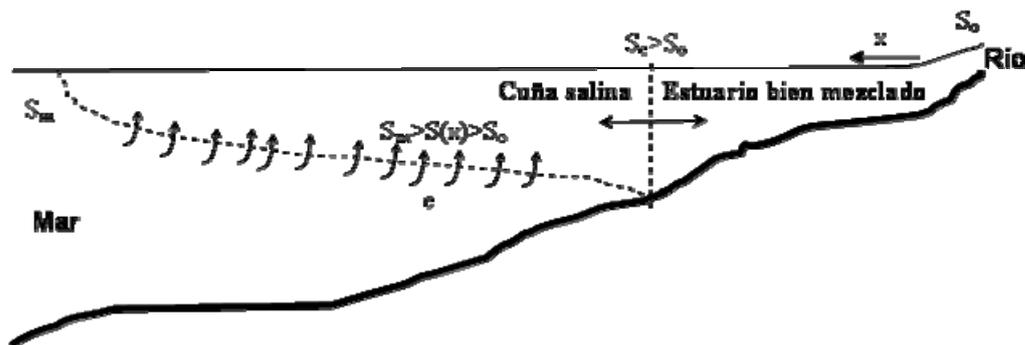
**Figura 2.1.** Esquema de intercambio entre la cubeta principal y la llanura de inundación, donde el canal principal alimenta hídricamente la llanura de inundación por medio de escurrimientos laterales.



El aporte de los ríos se aprecia durante las crecidas invernales, las cuales producen un efecto similar a la marea, pero la magnitud del impacto es mayor debido a que el aumento de caudales puede ser varios órdenes de magnitud mayor al de condiciones normales. El aumento del caudal significa un aumento en las velocidades y alturas de escurrimiento, favoreciendo los procesos de arrastre de sedimento y lavado del sistema por el ingreso masivo de agua dulce. La magnitud de la influencia del agua salada depende del equilibrio que se alcanza entre el agua salada transportada por dispersión desde el mar hacia aguas arriba, y el agua dulce que la tiende a empujar hacia el mar.

La variabilidad longitudinal de las condiciones físicas en el sistema está dada por la dinámica de los procesos de mezcla característicos de este tipo de humedales, en que la salinidad aumenta hacia aguas abajo producto de la presencia del océano que impone valores altos en este parámetro (Figura 2.2).

**Figura 2.2.** Esquema longitudinal de humedales costeros. S = salinidad.



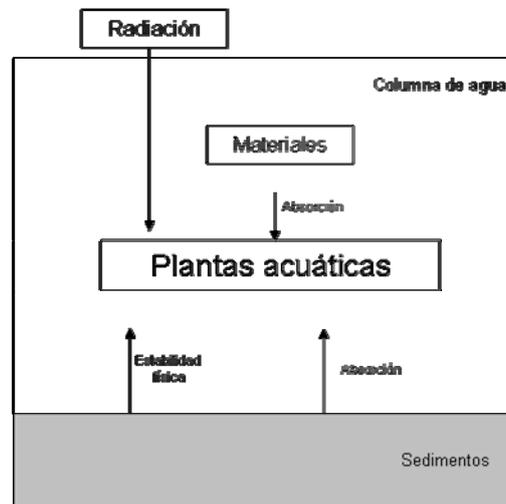
La dinámica vertical asociada a la cuña salina, puede producir una suerte de estratificación. La importancia de este fenómeno radica en que esta estratificación impediría el paso de oxígeno de la atmósfera a la zona profunda, de manera que este compuesto podría agotarse o bajar drásticamente su concentración en las zonas cercanas a los sedimentos.

Una segunda clase de estratificación vertical se puede deber a efectos batimétricos en el sistema. Durante la llenante, las zonas laterales podrían ser inundadas por aguas con alta salinidad. La presencia de barreras o depresiones del lecho podrían impedir la salida de esta agua durante la vaciante, generándose piscinas de alta salinidad, estratificando la columna de agua. Tal estratificación dificultaría la mezcla en la vertical impidiendo tanto la salida del agua salina del sistema como una adecuada oxigenación de la zona cercana a los sedimentos.

La zona central de las cubetas se caracteriza por elevadas profundidades, donde el escurrimiento no se ve obstruido por vegetación. En cambio, en las llanuras de inundación, las profundidades son bajas y es usual encontrar parches de vegetación, tales como juncos que crecen en alta abundancia.

La vegetación acuática vascular es el componente biológico característico de los humedales, existen especies flotantes que mantienen sus raíces en la columna de agua, pero en general, las plantas mantienen sus raíces en los sedimentos, manteniendo los tejidos vegetativos en toda la extensión de la columna de agua, e incluso con parte de los tejidos aéreos (ej. totoras y ciperáceas). Las plantas acuáticas se pueden localizar solamente en aquellas áreas donde se alcanzan sus requerimientos ambientales mínimos. En general es posible señalar que las condiciones hidrodinámicas limitan fuertemente la distribución de las plantas (Figura 2.3).

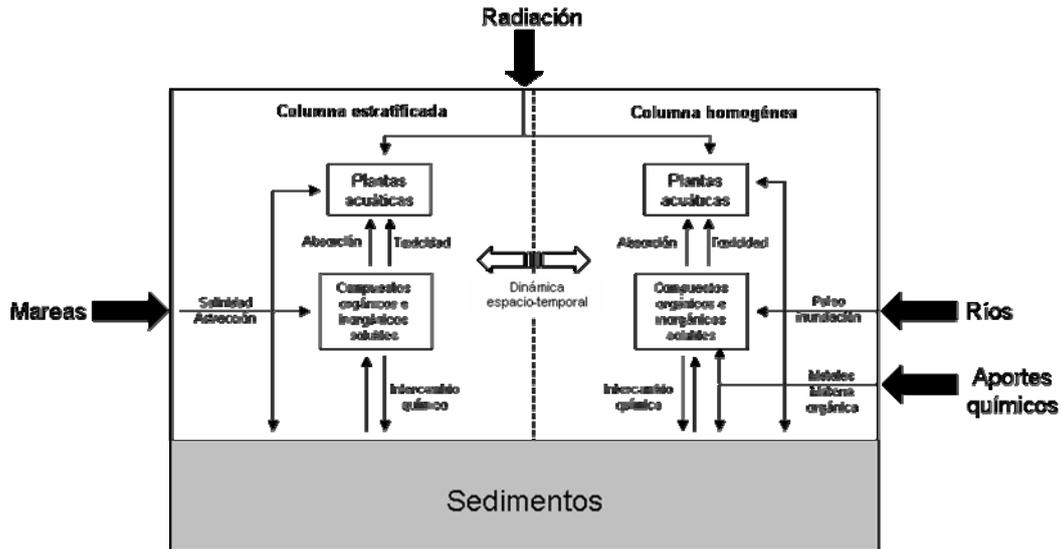
**Figura 2.3.** Procesos que afectan la dinámica de plantas acuáticas.



Este tipo de humedales constituye un importante sitio de reproducción para especies de peces marinos (ej. lisas, pejerreyes), los cuales utilizan temporalmente este tipo de hábitats, realizando migraciones reproductivas anuales.

Los antecedentes señalados anteriormente permiten postular un modelo ecosistémico de funcionamiento de los humedales costeros (Figura 2.4).

**Figura 2.4.** Modelo conceptual ecosistémico de los humedales costeros.



## 2.2 Variables de estado

Para las lagunas y/o estuarios ubicados en cuencas exorreicas costeras con un nivel bajo de precipitaciones, se proponen las siguientes variables de estado:

- Producción primaria en la columna de agua: el nivel de producción primaria o estado trófico es un buen indicador, se determina genéricamente a través de la concentración de los pigmentos fotosintéticos (ej. Clorofila a), o bien, mediante la transparencia del agua mediante el disco Secchi.
- Cobertura de macrófitas emergentes: las macrófitas son excelentes indicadores del nivel de producción global. La composición específica es un aspecto relevante a considerar como hábitats y oferta de alimento para la fauna, pero como variable de estado es más relevante la cobertura total del humedal.
- Condiciones de oxido-reducción en el sedimento: la estratificación vertical de la columna de agua o aportes de agua proveniente del mar, pueden cambiar las condiciones de oxido-reducción en la interfase sedimento-agua. Este proceso puede cambiar el comportamiento del humedal, desde un sistema tipo sumidero a uno tipo fuente (“recarga interna”).
- Composición y abundancia de peces marinos: este grupo de especies son indicadores del estado trófico del humedal y del grado de conectividad con el mar.

- Composición y abundancia de la avifauna: la caracterización de la avifauna en grupos funcionales, dependiendo de sus hábitos alimentarios (ej. herbívoros, piscívoros), permite evaluar los flujos de energía dominantes en el humedal.

Esta lista de variables de estado no pretende ser exhaustiva, sino más bien, una ilustración de algunas variables que podemos utilizar para el seguimiento del comportamiento global de los humedales costeros. Es importante señalar que deben ser evaluadas en función de las propiedades específicas de cada humedal.

### **2.3 Factores forzantes**

La descripción de la estructura y funcionamiento del humedal, permite identificar aquellos factores forzantes que regulan el comportamiento de los humedales. A continuación se detallan los más importantes:

- Caudal de aguas marinas: este factor afecta el estado trófico del humedal a través de la modificación del balance químico. La magnitud y la temporalidad del caudal determinan las condiciones de oxidación-reducción en los sedimentos, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones de hábitats para los peces marinos. Los caudales pueden variar por condiciones oceanográficas o hidrológicas particulares, así como también por modificación antrópica de las barras que conectan los humedales con el mar. En general, valores de salinidad menores a 1 g/l denotan un dominio de condiciones hidrológicas desde la cuenca de avenamiento, salinidades superiores hasta valores de 33 g/l, indican influencia marina.
- Caudal ríos tributarios: este factor afecta el balance químico y la estructura espacial del humedal. Es particularmente relevante el efecto del pulso de inundación ("crecidas"), debido a que puede modificar la estructura del humedal, a través del arrastre de componentes bióticos y abióticos. En términos simples el humedal puede ser "lavado" durante los eventos de crecidas. Caudales que aumentan en orden de magnitud respecto de los registrados en periodos de estiaje ("flujo basal"), permiten establecer la relevancia de las crecidas en los humedales.
- Carga de nutrientes: los nutrientes regulan el estado trófico del humedal, frecuentemente son el nitrógeno o el fósforo, en sus formas biodisponibles. Es importante señalar que esta condición es dinámica y depende de la concentración, sobre ciertos umbrales otros nutrientes o factores pueden llegar a ser limitantes. En general podemos establecer que concentraciones superiores a 50 ug/l de fósforo y 100 ug/l de nitrógeno, aceleran el proceso de eutroficación.

## 2.4 Seguimiento ambiental

En la tabla 2.1 se propone el programa de seguimiento ambiental mínimo para humedales costeros.

**Tabla 2.1.** Programa de seguimiento ambiental mínimo.

Variable	Diseño muestreo
Nivel hidrométrico	Controlar periodos hidrológicos extremos <sup>2</sup>
Disco Secchi	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima)
Temperatura	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
pH	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Oxígeno disuelto	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Conductividad	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Potencial redox (sedimento)	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima), tributario y desagüe.
Clorofila a	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Nitrógeno orgánico total	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributarios y desagüe
Fósforo total	Controlar periodos hidrológicos extremos en cubeta principal del humedal (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributarios y desagüe
Cobertura macrófitas	Controlar periodos hidrológicos extremos cobertura total

<sup>2</sup> Periodos hidrológicos extremos: corresponden a condiciones de estiaje y crecidas, identificadas en el hidrograma específico de cada humedal.

## **2.5 Criterios y umbrales**

Las lagunas costeras y estuarios son regulados hídricamente por el caudal de los ríos y mar, proceso que determina su expresión ecológica en cuanto a la composición y abundancia de las especies. Durante invierno aumenta el caudal de los ríos y nivel hidrométrico de las lagunas costeras, hasta un punto donde se abre la barrera de arena que aísla el humedal, facilitando la entrada de agua de mar. El balance entre ambos aportes hídricos afecta la estratificación vertical de la laguna y disponibilidad de nutrientes, siendo la salinidad la variable de estado más importante.

Para el diseño de un programa de monitoreo o análisis de comportamiento del humedal, se debe utilizar como criterio la condición de aislamiento que presenta la laguna respecto del mar. Considerando que el proceso de apertura y cierre de la barra es breve, podemos utilizar la condición que se genera después del cierre de la barra, para compararla con el periodo cuando la laguna depende principalmente del aporte de los ríos.

Entre el periodo de aislamiento y apertura de la barra se modifica la condición de circulación de la columna de agua, estratificándose por aportes de sales provenientes del mar. Podemos utilizar el patrón temporal de estratificación y mezcla como indicador del comportamiento de la laguna, estableciendo como umbral el nivel de salinidad durante el periodo de mezcla. La presencia de un hipolimnion anóxico con una haloclina en forma permanente, indica que fue sobrepasado el umbral y se modificó el comportamiento ecológico de la laguna o estuario.

En los estuarios no existe un aislamiento físico que impida la circulación del agua, permitiendo la estratificación de la columna del agua en función del régimen de caudales.

## **2.6 Sistema alerta temprana**

El nivel hidrométrico de la laguna es un buen indicador del balance hídrico, su seguimiento temporal permite identificar en forma temprana variaciones de origen natural o antrópico que pueden alterar el comportamiento ecológico de la laguna costera. Cuando se observan alteraciones en los patrones hidrométricos o salinidad pueden indicar por ejemplo, la apertura asincrónica de la barra terminal, o bien, una trasvasije de caudales provenientes de ríos vecinos.

## **2.7 Medidas de mitigación**

El restablecimiento del patrón temporal de apertura de la barra terminal, es una medida que permite restaurar el nivel de trofía, así como también los procesos migratorios de peces marinos. La reforestación de la cuenca con vegetación nativa, la incorporación de tratamientos biológicos como los wetlands artificiales

en efluentes industriales líquidos, disminuye la carga de sedimentos y nutrientes, disminuyendo la tasa de eutroficación de la laguna.

### **3. RÍOS EN CUENCAS EXORREICAS ANDINAS**

Los ríos son ecosistemas lineales que evacúan hacia los océanos el agua caída sobre las masas continentales. Esta transferencia gravitacional hace que se disipe la energía potencial contenida en el agua, dando como resultado modificaciones importantes en la morfología de los cauces fluviales. El proceso hidráulico derivado de esta pérdida se desarrolla en forma previsible en los cauces, de manera que las morfologías adoptadas por los diversos ríos del mundo son muy parecidas entre sí cuando son similares las condiciones topográficas, altitud y pluviosidad.

Además, las condiciones geográficas de una determinada cuenca fluvial pueden imponer ciertas características específicas a los ríos. En efecto, existen mayores diferencias entre los distintos sectores de un mismo río que entre sectores homólogos de ríos distintos. De ahí que los estudios ecológicos de los ríos tiendan a considerar divisiones altitudinales de los sistemas fluviales, con criterios físicos, químicos y/o biológicos, en vez de considerar el sistema en su conjunto desde el nacimiento hasta la desembocadura. Sin embargo, tales subdivisiones se realizan sólo para facilitar el estudio, ya que todo sistema fluvial debe tomarse en última instancia como un todo que presenta una gradación de características a lo largo de su curso.

Los ríos chilenos al drenar la vertiente occidental de la cordillera de los Andes y desembocar en el Pacífico, con la excepción de aquellos que drenan las planicies altiplánicas y que corren en cuencas paralelas al valle central, son cortos y torrenciales. Esta característica influye fundamentalmente en la carga de sólidos que arrastran las aguas.

Tal como está ampliamente detallado en la literatura, mayor es la carga y el tamaño de las partículas que arrastra la corriente en este tipo de sistemas. Este hecho influye directamente tanto en la morfología fluvial como en la calidad química de las aguas, dado que el flujo alto tiende a incrementar la acción erosiva y a transportar mayor cantidad de material en suspensión. Este material particulado en suspensión en contacto con el agua es transformado y degradado en procesos físico-químicos y/o biológicos, dando como resultado las características químicas al agua. Al bajar las aguas durante el período estival, el flujo se reduce progresivamente hasta alcanzar el nivel base, las masas hídricas permanecen mayor tiempo en las zonas de inundación (llanura aluvial), depositando la mayor parte de su carga de material particulado.

La calidad química de las aguas de los sistemas fluviales depende en último término de variables climáticas, geológicas y orográficas. A la modalidad del escurrimiento superficial, se suman los efectos de los diversos usos de sus aguas

en la cuenca. Un factor importante de destacar que interviene en nuestro país en la calidad química del agua, es la litología.

En efecto, al escurrir las aguas superficialmente, lixivian depósitos de sales que se acumulan en el agua, en un proceso creciente a medida que disminuye la altitud. En contraste con esta continuidad observada en los procesos físico-químicos, se ha planteado una zonación de los sistemas lóticos<sup>3</sup> con criterios biológicos. De esta manera se define el ritrón como la región que se extiende desde las fuentes de origen del curso de agua, hasta el punto en que las temperaturas medias mensuales ascienden a 20°C, las concentraciones de oxígeno son siempre elevadas, la corriente es rápida y turbulenta y el lecho se compone de rocas, piedras o grava, con espacios ocasionales de arena o limo. Aguas abajo comienza el potamón, en donde aumenta la temperatura del agua, la concentración de oxígeno y las velocidades de escurrimiento se reducen, cambiando significativamente las condiciones del hábitat y del lecho del río con sedimentos más finos.

### **3.1 Propiedades fundamentales**

#### Características físicas de los ríos.

Para el estudio de las características físicas de un río es necesario considerar que en éste intervienen diversas escalas espaciales. Se entiende por escalas a la unidad de medida característica del problema, por ejemplo, la escala planetaria es de miles de kilómetros, mientras que la escala asociada al zoobentos es de centímetros.

En el caso particular de un río, se distinguen en el análisis al menos 3 escalas principales: largo, ancho y profundidad de los ríos. Las escalas de longitud de los ríos son usualmente de 100 Km. en Chile, desde su nacimiento hasta la desembocadura al mar. Por el contrario, los anchos de éstos varían desde algunos metros en la cordillera donde nacen, y pueden alcanzar valores de centenas de metros en la desembocadura. Esta variación de los anchos también ocurre para la profundidad de escurrimiento, que en la montaña es del orden de centímetros, mientras que en la desembocadura se alcanzan profundidades máximas inferiores a 10 m, aproximadamente.

**Longitud de los ríos:** Esta escala está también asociada con los procesos a nivel de cuenca, que determinan, entre otras cosas, cambios en la pendiente del terreno y caudal, que a su vez son parámetros que determinan la dinámica de los ríos en las escalas asociadas al ancho y profundidad. La definición de cuenca está ligada a un punto en el río, es así que la cuenca es la superficie de territorio que cumple con que toda el agua que cae en ésta, escurre por el punto del río para el cual se definió la cuenca.

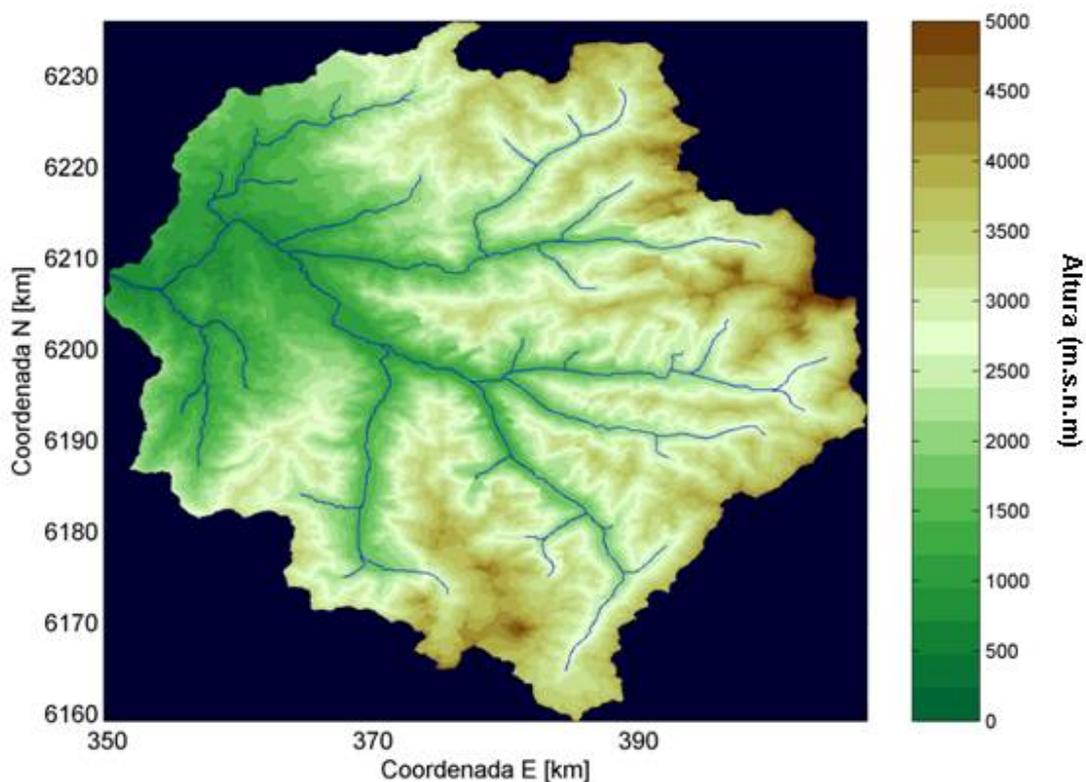
---

<sup>3</sup> Sistemas lóticos: ambientes tipo ríos con bajo tiempo de residencia

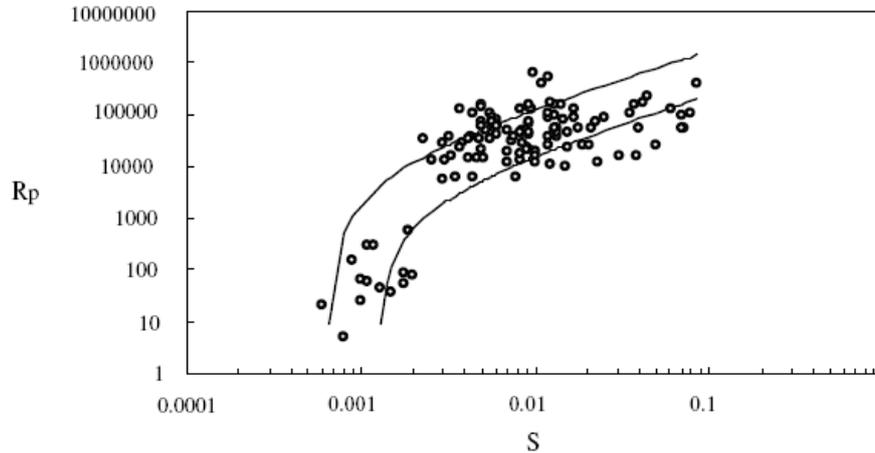
Un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 3.1, que corresponde a la cuenca aportante para un río de la zona central de Chile. A partir de la definición de cuenca, se obtiene que el caudal que circula por un punto del cauce se pueda expresar como la multiplicación de la superficie de la cuenca aportante, y la precipitación efectiva sobre ésta. Se entiende como precipitación efectiva a aquella que es capaz de transformarse en escorrentía superficial. Para la definición de la precipitación efectiva sobre la cuenca, se debe considerar el tipo de suelo y vegetación, y la infiltración. Es así que existe una estrecha relación entre la cuenca y los procesos físicos en un río. Por ejemplo, al analizar el impacto de las ciudades en una cuenca, se tiene que éstas pavimentan una porción importante del territorio, impidiendo la infiltración de las aguas, por lo tanto aumenta la precipitación efectiva, y por otro lado, aumenta la velocidad a la cual el agua precipitada llega efectivamente al cauce del río.

Respecto a la pendiente del terreno, ésta es mayor en la zona alta de los ríos que en la desembocadura al mar. El cambio longitudinal de la pendiente del terreno tiene directa implicancia en las condiciones locales asociadas a la profundidad del escurrimiento. Por ejemplo, la Figura 3.2 muestra en el eje y, una medida del tamaño de los sedimentos ( $R_p$ ) en función de la pendiente del terreno ( $S$ ), correspondiendo a la distribución granulométrica. Se aprecia que mayores pendientes del terreno están asociadas también con un sustrato más grueso.

**Figura 3.1.** Cuenca y cauces principales característicos de los ríos.



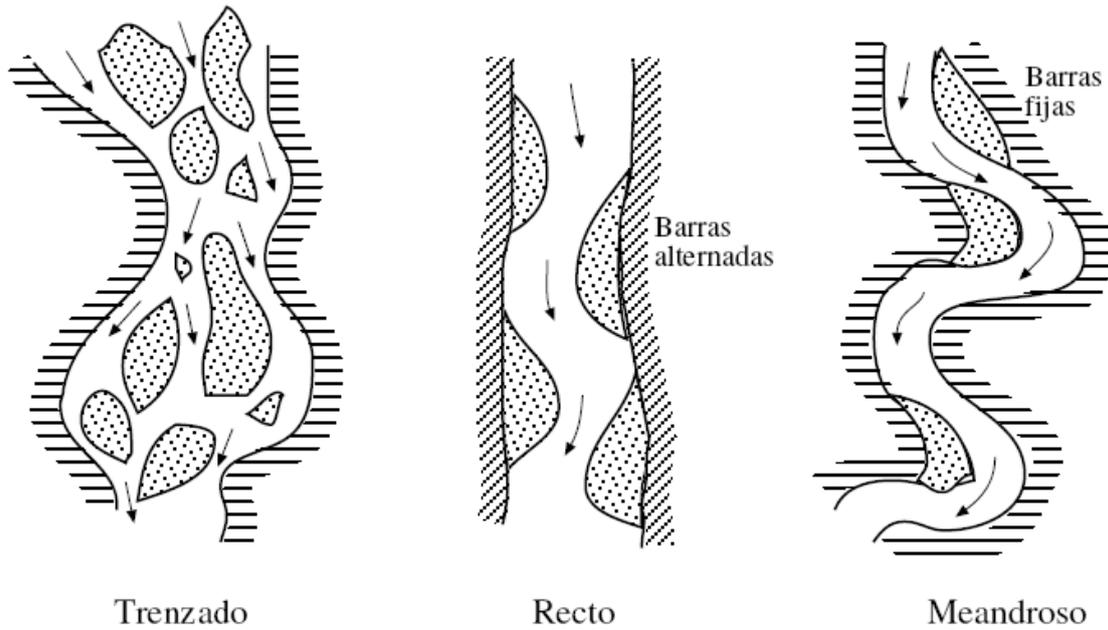
**Figura 3.2.** Relación entre pendiente de terreno S, y una medida del tamaño de los sedimentos  $R_p$ .



**Morfología fluvial (ancho):** Los ríos se dividen primariamente en cauces con lechos rocosos y aluviales. Los cauces con lecho rocoso son aquellos que se fundan en roca, por lo tanto, el escurrimiento no tiene la posibilidad de modificar el cauce, al menos en una escala de tiempo de años. Por el contrario, los cauces aluviales son aquellos fundados en sedimentos, y por lo tanto, tienen amplia libertad para modificar la forma del lecho y riberas.

En los cauces aluviales puede desarrollarse una amplia gama de morfologías relacionadas con la pendiente del terreno y el caudal circulante, podemos encontrar cauces aluviales rectos, meandrosos y trenzados. La Figura 3.3 muestra un esquema de cada uno de estos cauces, los cauces rectos se ubican en las zonas de mayor pendiente, mientras que en las zonas de baja pendiente el cauce se trenza. El lecho de los cauces meandrosos esta usualmente formado por arena, mientras que el lecho de los cauces rectos se compone principalmente por bolones con cantos redondeados por el efecto erosivo del escurrimiento.

**Figura 3.3.** Relación entre pendiente de terreno  $S$ , y una medida del tamaño de los sedimentos  $R_p$ .



Los cauces rectos se dividen espacialmente en función de sus características hidrodinámicas:

- **Cascada:** Escurrimiento que se caracteriza por presentar alta pendiente, donde la energía se disipa por la sucesiva presencia de pequeños "saltos de agua" formados por la presencia de grandes obstrucciones en el cauce (Figura 3.4).

**Figura 3.4.** Escurrimiento de cascada.



- **Lecho plano:** Escurrimiento dado por que el lecho es plano, compuesto por grava gruesa y adoquines. No se registran muchas perturbaciones de la superficie libre por la presencia de las rocas (Figura 3.5).

**Figura 3.5** Escurrimiento de lecho plano.



- **Salto-poza:** Secuencia de saltos y pozones (Figura 3.6).

**Figura 3.6** Esguerrimiento de salto poza



- **Rápidos-pozas:** Secuencia de pozones y rápidos de lecho de grava y bolones (Figura 3.7).

**Figura 3.7** Esguerrimiento de rápido poza.

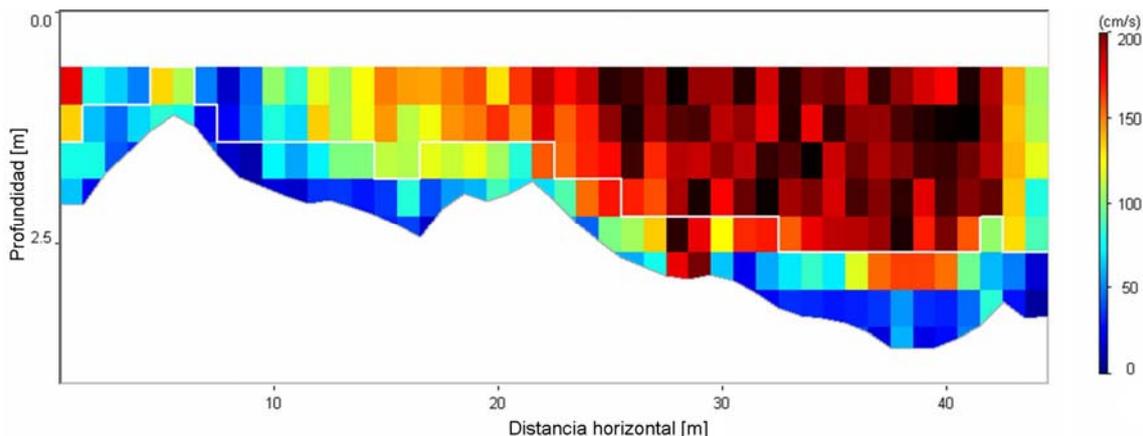


Esta categoría morfológica de los cauces naturales tiene una directa relación con las condiciones de hábitat de las especies acuáticas en los ríos. Por ejemplo, una morfología tipo cascada no es muy adecuada para el desarrollo de la vida en el río dado que impone altos valores de turbulencia ambiente y esfuerzo de corte (fuerza que ejerce el flujo sobre el fondo). Por el contrario, un cauce trenzado favorece la heterogeneidad de condiciones del escurrimiento en el eje transversal a éste, aumentando la diversidad de hábitats.

**Profundidad de escurrimiento:** La variabilidad transversal y vertical del escurrimiento está en estrecha relación con los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en un río. La velocidad local del escurrimiento, la altura y el tipo de sustrato determinan los niveles de turbulencia, que a su vez están en estrecha relación con las condiciones de hábitat local, los procesos de transporte longitudinal de masa, intercambio de masa e intercambio de gases con la atmósfera.

En el eje transversal del escurrimiento es posible encontrar que la velocidad y la profundidad no son constantes, sino que depende estrechamente de la profundidad local del escurrimiento. La Figura 3.8 muestra un perfil transversal de la velocidad en un cauce recto, donde se observa una región con menor velocidad de escurrimiento y bajas profundidades. Esta región de menor velocidad es un hábitat de refugio para las especies que habitan en el río. No así la zona central donde se desarrollan las mayores velocidades.

**Figura 3.8.** Mediciones de la velocidad del escurrimiento en el eje transversal. Color rojo indica mayores velocidades, color azul menores.

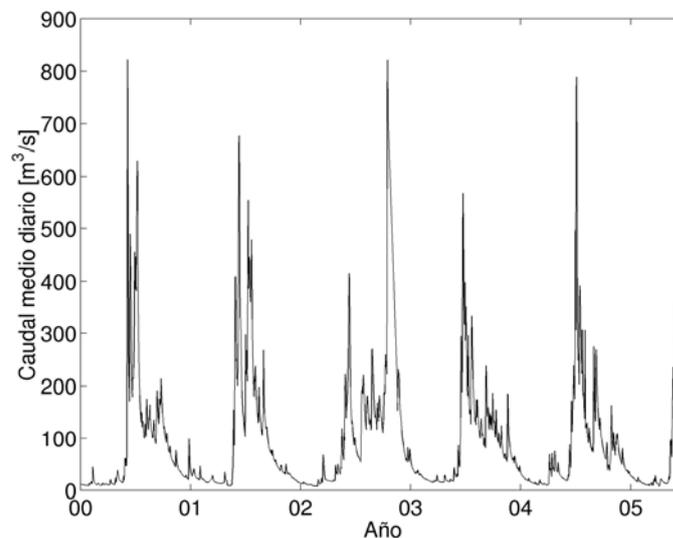


De acuerdo con el régimen hidrológico de un río, éste puede clasificarse en un río de régimen pluvial, régimen nival o mixto. La caracterización anterior está relacionada con cuál es el principal agente que regula la variabilidad estacional del caudal, siendo el régimen pluvial aquel que presenta los máximos asociados al régimen de precipitaciones en la cuenca. El régimen nival en cambio, es aquel que presenta los mayores caudales asociados al deshielo cordillerano. En un mismo río es posible encontrar que la zona alta de éste tiene un régimen predominantemente nival, mientras que la zona baja tiene un régimen pluvial.

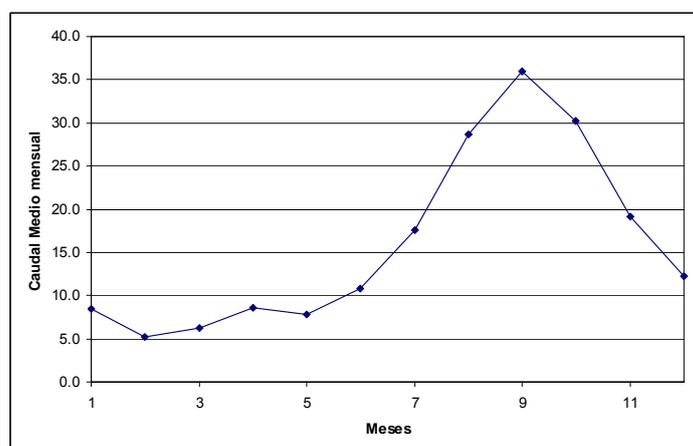
Además de la diferencia en términos del génesis de las aguas, la principal diferencia entre un río con régimen pluvial con uno con régimen nival, es que el régimen pluvial está caracterizado por crecidas de corta duración pero alta magnitud (Figura 3.9). En cambio, los ríos con régimen nival, las crecidas por deshielo tienen una duración estacional, mostrando cambios diarios del caudal bajos, alcanzando un máximo en noviembre- diciembre (Figura 3.10).

El aumento del caudal en el río implica un aumento en las velocidades y alturas de escurrimiento, favoreciendo los procesos de arrastre de sedimento, erosión, arrastre de vegetación, y lavado del sistema por el ingreso masivo de agua dulce.

**Figura 3.9.** Serie de tiempo de caudales medios diarios en un río con régimen pluvial.



**Figura 3.10.** Serie de tiempo de caudales medios mensuales en un río con régimen nival.



### Características biológicas de los ríos.

La biodiversidad de los ríos ritrónicos esta constituida principalmente por larvas de insectos y peces (Figura 3.11), siendo estos últimos las especies más características. La fauna íctica de las aguas continentales de Chile sólo alcanza a 46 especies, un número bajo si se lo compara con otras regiones biogeográficas del mundo, cuyo origen sería principalmente marino y tropical. Este hecho podría ser explicado por el aislamiento geográfico del país y las características hidrológicas de los ríos. El temprano aislamiento geográfico habría influido en el alto endemismo y primitividad de estas especies, especialmente aquéllas del grupo de Siluriformes o "bagres". Esta fauna sin embargo, es considerada de gran importancia biogeográfica y ecológica si se considera su grado de endemismo, origen y distribución panaustral.

Los peces constituyen una importante fuente de alimentación y recreación, así como también se ha demostrado que son de gran utilidad para caracterizar las condiciones ambientales de los ríos. Los fundamentos que sustentan estos atributos se basan en el hecho de que las características y diversidad de las comunidades de peces están directamente relacionadas con la variedad y extensión de los hábitats<sup>4</sup> presentes en los ríos. El ambiente físico seleccionado por los peces depende principalmente de los procesos geológicos, morfológicos e hidrológicos que además influyen la vegetación ripariana, constituyendo un mosaico de hábitat a lo largo del río y su llanura aluvial

<sup>4</sup> Hábitat: el término define donde los peces viven, sin especificar la disponibilidad de recursos alimentarios o cuales son utilizados por los peces.

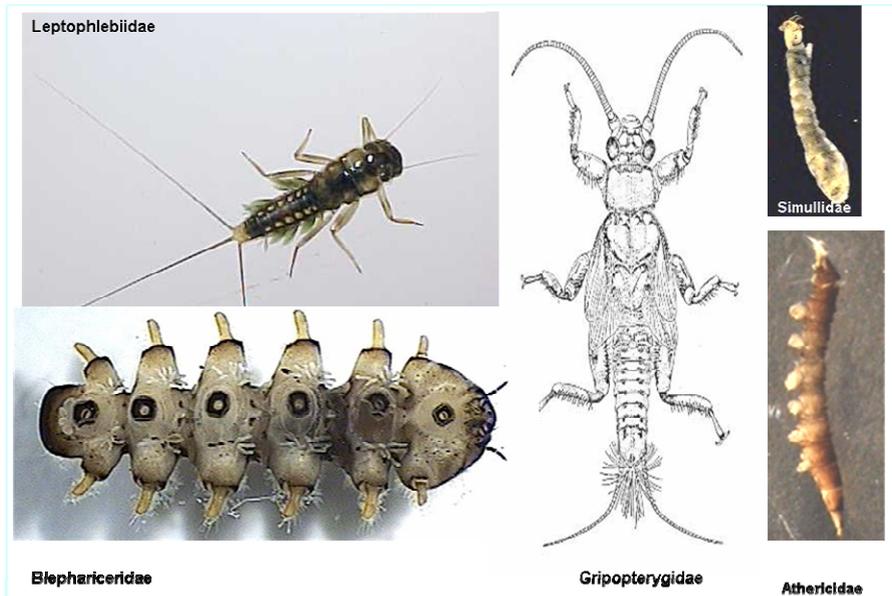
El caudal es el principal agente responsable de moldear el ambiente físico y crear heterogeneidad espacial, a través del balance entre los procesos de erosión y depositación de sedimentos y la pendiente del terreno.

Los ríos tienen una elevada heterogeneidad espacial y por ende, una mayor diversidad de ambientes, áreas que pueden potencialmente ser utilizadas por los peces. Sin embargo, los requerimientos de hábitat de los peces son específicos, es así como los salmonídeos (ej. truchas y salmones) utilizan preferentemente aguas frías y ricas en oxígeno disuelto, en cambio, los ciprinidos (ej. carpas) prefieren aguas lentas, templadas y ricas en materia orgánica. Adicionalmente, los diferentes estadios de desarrollo de una especie pueden tener requerimientos de distintos hábitat, por lo cual a través de la historia de vida de un individuo, los hábitat utilizados van cambiando. A modo de ejemplo podemos señalar los tipos de hábitat utilizados por las truchas: i) los adultos se encuentran preferentemente en las zonas rítmicas, realizando desplazamientos diarios entre rápidos y pozones. Utilizan este tipo de ambiente principalmente para alimentación, ii) los juveniles prefieren ambientes con menor velocidad de escurrimiento, sustrato dominado por rocas de gran tamaño y abundante materia orgánica, iii) los alevines requieren de cursos de agua de baja profundidad, aguas frías y con abundantes guijarros. En estos ambientes los adultos realizan el desove.

En algunos ambientes, los hábitat están disponibles sólo temporalmente, como consecuencia de cambios drásticos en las condiciones ambientales, por ejemplo el congelamiento o desecación de las aguas, por lo que los peces requieren realizar dispersiones o migraciones entre los distintos tipos de hábitat.

Existe un factor adicional que condiciona los requerimientos de hábitat diferenciales intra e interespecíficos, relacionado más bien con las interacciones tróficas entre las especies. Es así como la depredación y/o la competencia por recursos afecta notablemente la distribución espacial de los peces.

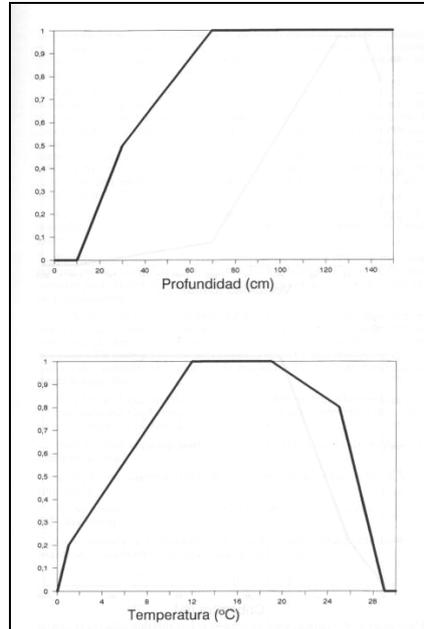
**Figura 3.11.** Fauna bentónica de los ríos.



Los peces son frecuentemente utilizados como bioindicadores para establecer los requerimientos de caudal en los ríos, debido a su importancia para la pesca deportiva y además por ser los componentes que están en la parte más alta de las tramas tróficas (“predadores tope”). Lo anterior establece la necesidad de identificar los requerimientos ambientales de los peces, como la temperatura, altura y velocidad de escurrimiento. Estos antecedentes, están prácticamente ausentes para la fauna íctica nativa, siendo necesario recurrir a estudios realizados en especies exóticas. A modo de ejemplo, en la Figura 3.12 se detallan los requerimientos de hábitat de las truchas (García de Jalón et al., 1993)<sup>5</sup>. Los requerimientos mínimos de profundidad son entre 10 y 30 cm. para el 50 % de los casos. Los valores de temperatura oscilan entre 2 y 28 °C.

<sup>5</sup> GARCIA DE JALON, D., M. MAYO, F. HERVELLA, E. BARCELO & T. FERNANDEZ. (1993). Principios y Técnicas de Gestión de la Pesca en Aguas Continentales. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 247 pp.

**Figura 3.12.** Requerimientos de hábitat de las truchas (Índice de habitabilidad versus profundidad y temperatura).



La trucha arcoiris (*Onchorynchus mykiss*) es una especie euritérmica que tolera un amplio rango de temperaturas. Esta especie puede sobrevivir en ambientes térmicos que van desde 0 °C hasta 24 °C, sin embargo, su temperatura óptima se ubica entre los 10 °C y 15 °C.

Estudios de laboratorio indican que su desempeño locomotor es óptimo alrededor de 11 °C, pero pueden mantener una actividad relativamente alta a mayores y menores temperaturas, especialmente si los individuos han sido aclimatados previamente. Por su parte la trucha café (*Salmo trutta*) tiene un rango de tolerancia entre 0.5 °C y 25.5 °C. Su temperatura óptima se encuentra entre los 9 °C y 15 °C (Tabla 3.1), temperaturas superiores a 27 °C pueden llegar ser letales, sobre los 20 °C su apetito y crecimiento disminuye permitiendo el ataque de organismos patógenos.

**Tabla 3.1.** Resumen de requerimientos físico-químicos de algunas especies de peces.

ESPECIE	Tº LETAL INFERIOR (°C)	Tº LETAL SUPERIOR (°C)	RANGO ÓPTIMO (°C)	OXÍGENO LIMITANTE (mg/L)	CONDICIÓN
<i>Onchorynchus mykiss</i>	0	24.0	10.0 – 15.0	6.5 5.5	Condición natural Mínimo Experimental
<i>Salmo trutta</i>	0.5	25.5 22.0	9.0 – 15.0	8.7	Cultivos Relación Tº/Oxígeno
<i>Salvenius alpinus</i>	< 1.4	18.5	1.4 -14	6.2	Condición natural

s/: sin información

La tolerancia térmica de los peces posee una notable variación interespecífica, capacidad que depende en gran medida del ambiente térmico natural. En general las especies de aguas continentales presentan una mayor tolerancia que las marinas, lo que se correlaciona con la mayor variabilidad ambiental que se observa en ambientes límnicos<sup>6</sup>.

En la Tabla 3.2 se describen los rangos de tolerancia de peces que habitan en ríos, considerando diferentes estadios de desarrollo. En términos generales podemos establecer que las velocidades máximas no superan los 2 m/s y las velocidades óptimas no superan 1 m/s.

**Tabla 3.2.** Valores de velocidad como límite superior para salmónidos (m/s).

ESPECIES	DESOVE	ALEVINES	JUVENILES	ADULTOS
<i>Salmón del Atlántico</i> <sup>1</sup>	1,00	1,00	1,00	-
<i>Trucha Café</i> <sup>2</sup>	1,19	0,88	1,07	1,83
<i>Trucha Arco Iris</i> <sup>3</sup>	0,94	0,90	1,06	1,06
<i>Salmón Chinook</i> <sup>4</sup>	1,31	0,76	0,91	1,52

Velocidad de corriente preferida para salmónidos (m/s).

ESPECIES	DESOVE	ALEVINES	JUVENILES	ADULTOS
<i>Salmón del Atlántico</i> <sup>1</sup>	0,60-0,80	0,10-0,30	0,10-0,40	-
<i>Trucha Café</i> <sup>2</sup>	0,21-0,52	0,09	0,15	0,15
<i>Trucha Arco Iris</i> <sup>3</sup>	0,49-0,91	0,00	0,00-0,15	0,15-0,61
<i>Salmón Chinook</i> <sup>4</sup>	0,46-0,73	0,06-0,09	0,12-0,21	0,83

Stanley y Trial, 1995<sup>7</sup>  
 Raleigh et al., 1986a<sup>8</sup>  
 Raleigh et al., 1984<sup>9</sup>

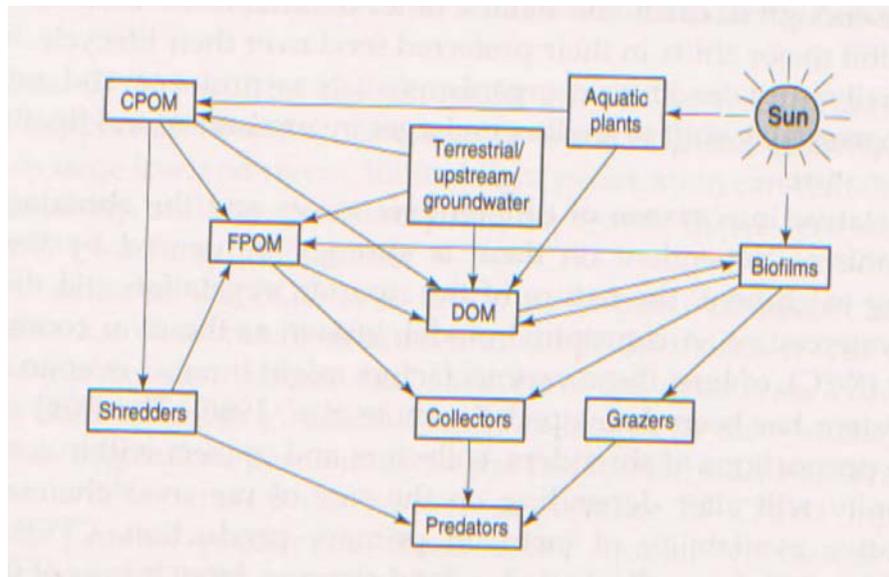
<sup>6</sup> Sistemas límnicos: ambientes dulceacuícolas.

<sup>7</sup> Stanley, J.G. y J.G. Trial. 1995. Habitat Suitability Index Models: Nonmigratory Freshwater Life Stages of Atlantic Salmon. Biological Science Report 3. U.S. Department of the Interior, National Biological Service. Washington, D.C.

<sup>8</sup> Raleigh, R.F., W.J. Miller y P.C. Nelson. 1986a. Habitat Suitability Index Models and Instream Flow Suitability Curves: Chinook Salmon. U.S. Fish Wildl. Serv. Biol. Rep. 82(10.122). 64 páginas.

Los estudios en ríos han tenido sistemáticamente un fuerte énfasis descriptivo, documentado en importantes obras como las de Hynes (1970), Welcomme (1992) y recientemente Allan (1995). En este contexto, la mayoría de los estudios desarrollados en ecosistemas lóticos establecen como marco conceptual la hipótesis planteada por Cummins y col. (1973), basados principalmente en estudios de hábitos alimentarios de invertebrados acuáticos. En ella se plantea un modelo de la estructura trofodinámica de los macroinvertebrados bentónicos, considerando diferentes fuentes alimenticias de materia orgánica (Figura 3.13). En estos ríos exorreicos el metabolismo de los ríos es fundamentalmente heterotrófico (Figura 3.14).

**Figura 3.13.** Flujo de materia orgánica en los ríos, basado en aportes de materia orgánica alóctona.

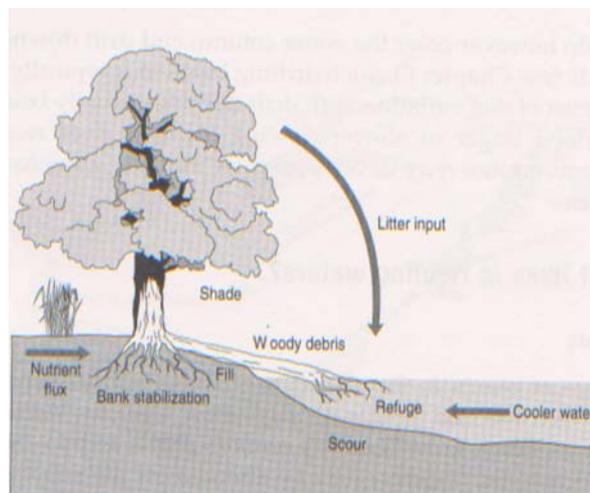


A partir de este modelo, se desarrolló la hipótesis del "Río Continuo" (Vannote y col., 1980), donde se postulan los cambios biogeoquímicos que afectan al carbono orgánico al ser transportado en un gradiente altitudinal. Esta hipótesis postula que la abundancia de los diferentes grupos trofofuncionales y la relación entre P/R (producción/respiración), varía espacialmente en respuesta a los cambios que se producen en las características hidrodinámicas de los ríos y a la disponibilidad de materia orgánica alóctona (Figura 3.15).

<sup>9</sup> Raleigh, R.F., L.D. Zuckerman y P.C. Nelson. 1986b. Habitat Suitability Index Models and Instream Flow Suitability Curves: Brown Trout, Revised. U.S. Fish Wild. Serv. Biol. Rep. 82(10.124). 65 pp. [Editado inicialmente con en N°: FWS/OBS-82/10.71, Septiembre de 1984]

La mayor parte de la evidencia empírica que apoya la hipótesis del "Río Continuo", proviene de estudios realizados en ecosistemas lóticos de cabecera de bosques templados del Hemisferio Norte. En éstos, la principal fuente de carbono proviene de materia orgánica alóctona que se acumula estacionalmente en los cursos de agua. Este patrón es recurrente en ecosistemas lóticos de montaña con abundante cobertura de vegetación ripariana, en donde la trama trófica está estructurada principalmente por organismos detritívoros, que degradan y consumen la materia orgánica alóctona (ej. hojas, ramas).

**Figura 3.14.** Aporte de materia orgánica alóctona a los ríos desde la vegetación terrestre.



En función del régimen temporal de perturbaciones es probable encontrar en la naturaleza un continuo entre ecosistemas lóticos basados en la utilización de materia orgánica alóctona y/o autóctona. En los primeros las perturbaciones exógenas, tales como los eventos hidrológicos estocásticos, serían las principales fuerzas estructuradoras del ecosistema. En cambio, las interacciones biológicas endógenas, como competencia o prelación, regularían los ecosistemas lóticos basados principalmente en la materia orgánica autóctona. Este patrón resultaría en una capacidad de respuesta diferencial de los ecosistemas a las perturbaciones, en términos de la estabilidad temporal de las estructuras ecológicas.

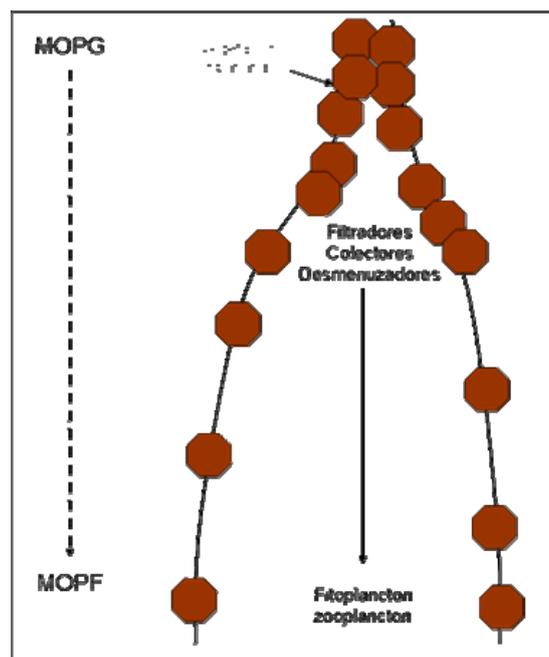
Ecosistemas acuáticos basados en la degradación de materia orgánica alóctona son característicos de ambientes fluctuantes, debido a que el material particulado alóctono permanece con biomasa alta en el sedimento, incluso después de incrementos drásticos en el caudal, lo cual permite una rápida recuperación de la estructura de los ecosistemas.

En cambio, ecosistemas lóticos basados en la producción de carbono orgánico autóctono (ej. microalgas, macrófitas), son frecuentes en ambientes poco fluctuantes, como los desiertos en zonas de alta evaporación, en donde los autótrofos son la principal fuente de carbono. Los organismos autótrofos requieren mayor tiempo de recuperación después de una perturbación, debido a los lentos tiempos de recambio generacional.

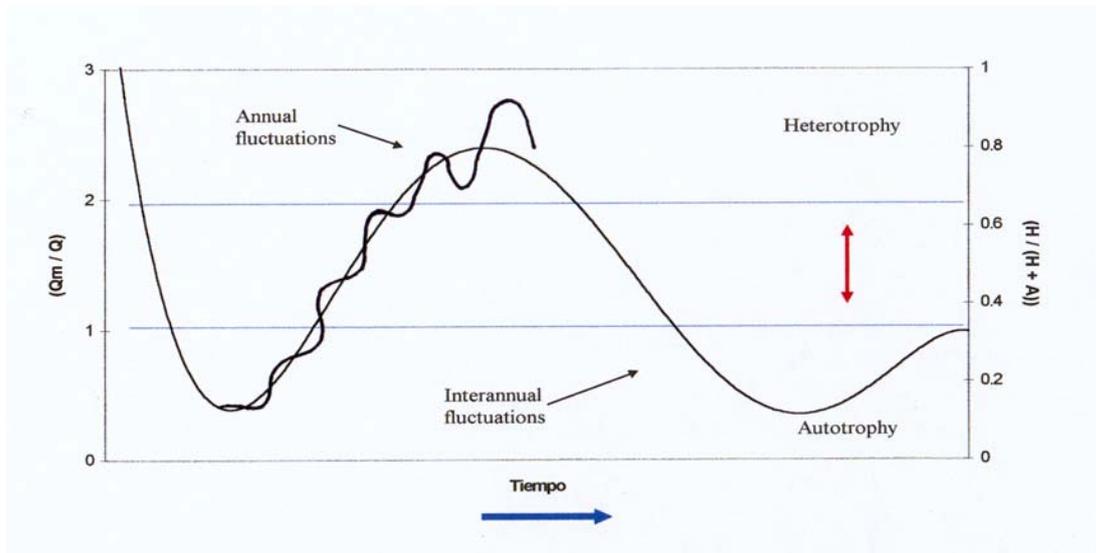
Ríos afectados por crecidas (evento hidrológico), estarían permanentemente regresando a las primeras etapas de la sucesión ecológica, de alguna manera las crecidas eliminarían la “memoria ecológica” de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Estos resultados permiten plantear una hipótesis en torno al metabolismo de los ecosistemas lóticos, a través de la cual se podrían explicar los cambios espaciales y temporales en las características estructurales y funcionales de los mismos.

En ultimo termino donde el metabolismo de los ecosistemas lóticos esta determinado por el régimen de perturbaciones exógenas de meso y macroescala. Las variaciones en los patrones climáticos a macroescala (e.g. fenómeno “El Niño”), determinarían la importancia relativa de la utilización de carbono orgánico alóctono (metabolismo heterotrófico) y autóctono (metabolismo autotrófico) en el flujo de materia y energía en los ecosistemas lóticos, mientras que las variaciones intranuales del caudal determinarían la magnitud de los flujos de materia y energía intra e intersistémicos. En general, ecosistemas basados en metabolismos heterotróficos serían característicos de ambientes fluctuantes, en cambio, el metabolismo autotrófico sería dominante en ambientes estables (Figura 3.16).

**Figura 3.15.** Reciclamiento geoquímico de materiales a lo largo del río. MOPG= materia orgánica particulado grueso. MOPF = materia orgánica particulada fina.

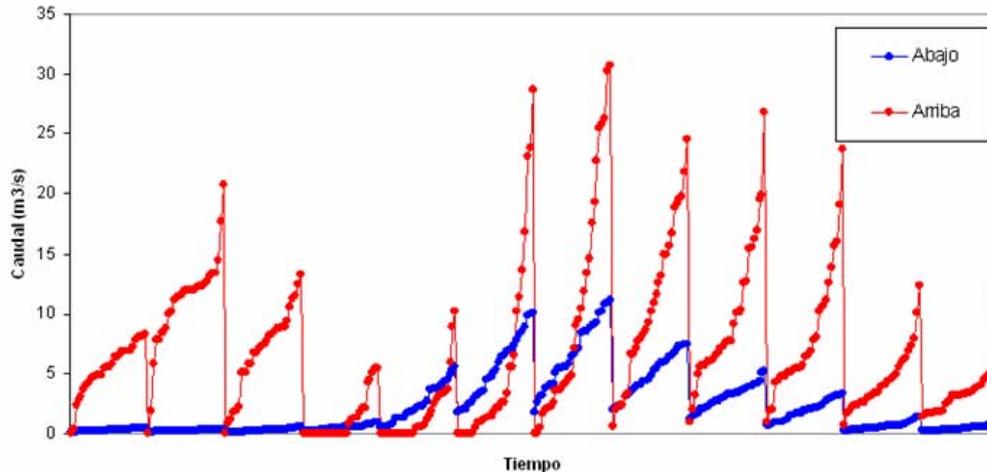


**Figura 3.16.** Modelo del metabolismo de los ríos en función del grado de perturbación hidrológica.  $Q_m$ = caudal mensual.  $Q$ =caudal promedio.  $H$ = heterotrofia.  $A$ = autotrofia



A partir del modelo propuesto es posible inferir que frente a una reducción en el grado de perturbación, debido por ejemplo a la canalización o embalsamiento de las aguas (Figura 3.17), se producirá un desplazamiento del metabolismo heterotrófico a un autotrófico. El cambio en el metabolismo tiene asociado modificaciones en la composición de especies acuáticas, debido al cambio en el origen de la materia orgánica que sustenta el ecosistema acuático.

**Figura 3.17.** Efecto de la regulación de caudales sobre el comportamiento hidrológico de los ríos. Arriba= aguas arriba de la regulación del caudal. Abajo= aguas debajo de la regulación del caudal.



### 3.2 Variables de estado

Para los ríos ubicados en cuencas exorreicas, se proponen las siguientes variables de estado:

- **Biomasa MOP:** la materia orgánica particulada (MOP) sostiene la trama trófica acuática, por ende, variaciones en la biomasa de MOP afectarán la capacidad de carga de los ríos.
- **Biomasa microalgas:** las microalgas bentónicas sostienen la fauna íctica en ríos sin limitación de radiación solar, por ende, variaciones en la biomasa de microalgas afectarán la capacidad de carga de los ríos.
- **Biomasa fauna bentónica:** la fauna bentónica es la principal fuente de alimento de la fauna, por ende, variaciones en la biomasa de fauna bentónica afectarán la capacidad de carga de los ríos.
- **Composición y abundancia de la fauna íctica:** la caracterización de la fauna íctica, permite evaluar el estado de los hábitats (capacidad de carga) y los flujos de energía dominantes en los ríos.

Esta lista de variables de estado no pretende ser exhaustiva, sino más bien, una ilustración de algunas variables que podemos utilizar para el seguimiento del comportamiento global de los ríos. Es importante señalar que deben ser evaluadas en función de las propiedades específicas de cada río.

### 3.3 Factores forzantes

A continuación se detallan los más importantes:

- **Caudal:** es el principal factor que regula el comportamiento de los ecosistemas acuáticos en los ríos. Cualquier cambio en el caudal de los ríos puede afectar la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, aún cuando existe un rango de variación que puede ser absorbido por la capacidad de resiliencia y resistencia de los sistemas biológicos. La reducción del caudal por debajo de los valores históricos mínimos registrados instantáneamente y alteración del patrón temporal durante el ciclo hidrológico, modifican en forma importante la estructura y funcionamiento de los humedales.
- **Nutrientes:** la producción primaria acuática es limitada por la disponibilidad de nutrientes, siendo las especies nitrogenadas el factor que comúnmente regula la producción primaria durante periodos de estabilidad hidrológica. Variaciones en la masa de nutrientes disponibles en el agua afectan la producción primaria de los ríos. En general podemos establecer que concentraciones superiores a 50 ug/l de nitrógeno, aceleran el proceso de eutroficación.
- **Condiciones climáticas:** las condiciones climáticas locales regulan la dinámica temporal de los ríos, factores como las precipitaciones o temperatura del aire, afectan la expresión de los componentes biológicos.

### 3.4 Seguimiento ambiental

En la tabla 3.3 se propone el programa de seguimiento ambiental mínimo para los ríos.

**Tabla 3.3.** Programa de seguimiento ambiental mínimo.

Variable	Diseño muestreo
Caudal	Controlar mensualmente
Temperatura	Controlar periodos hidrológicos extremos <sup>10</sup>
Conductividad eléctrica	Controlar periodos hidrológicos extremos
Altura de escurrimiento	Controlar mensualmente
MP (material particulado total)	Controlar periodos hidrológicos extremos
MOP (material orgánico particulado)	Controlar periodos hidrológicos extremos
Composición y abundancia microalgas bentónicas	Controlar periodos hidrológicos extremos
Composición y abundancia fauna bentónica	Controlar periodos hidrológicos extremos
Composición y abundancia fauna íctica	Controlar periodos hidrológicos extremos

<sup>10</sup> Periodos hidrológicos extremos: corresponden a condiciones de estiaje y crecidas, identificadas en el hidrograma específico de cada humedal.

### **3.5 Criterios y umbrales**

Las condiciones ecológicas de los ríos son reguladas principalmente por su caudal, en términos del aporte hídrico y material particulado de origen terrestre. Las crecidas mantienen a los ríos en los primeros estados de desarrollo, en otras palabras son siempre jóvenes. Cuando se alteran las condiciones hidrológicas de los ríos, debido al embalsamiento, regulación o trasvasije de las aguas, éstos comienzan a envejecer, a eutrofizarse, debido a que se afecta la dinámica de las crecidas, en términos de su frecuencia e intensidad.

Para implementar un programa de monitoreo en ríos debemos utilizar como criterio las siguientes condiciones: i) aguas bajas (“estiaje o flujo base”), ii) aguas altas (“crecidas”) y iii) aguas con alto contenido de sólidos suspendidos. Esta última condición se relaciona más estrechamente con aquellos ríos que son alimentados por glaciares.

Una modificación en el caudal implica una reducción y/o alteración de su régimen, por lo cual se requiere mantener un caudal ambiental mínimo. La Dirección General de Aguas (DGA) establece como umbral mínimo un 10% del caudal medio anual, determinado a través de métodos hidrológicos, sin embargo, es necesario incorporar criterios ecosistémicos para su determinación. Por ejemplo, el régimen temporal definido por el hidrograma de cada río, debe mantenerse aún cuando se reduzcan los caudales.

### **3.6 Sistema alerta temprana**

El caudal es un buen indicador de la dinámica de los ríos, su seguimiento temporal permite identificar en forma temprana variaciones de origen natural o antrópico que pueden alterar su comportamiento ecológico.

Al disminuir los caudales adquiere mayor relevancia el control del aporte externo de nutrientes, frecuentemente el nitrógeno limita el estado trófico de los ríos.

### **3.7 Medidas de mitigación**

La restauración del caudal a su condición natural es la principal medida de mitigación en los ríos, sin embargo, existen otras medidas destinadas al mejoramiento de componentes específicos. La reforestación de las riberas con vegetación nativa, favorece el control de fuentes difusas de nutrientes, y aportes de sedimentos, manteniendo la entrada de materia orgánica a los ríos; principal fuente energética para la fauna acuática. La instalación de deflectores en el cauce (“boulders”), mejora las condiciones del hábitat para la fauna acuática.

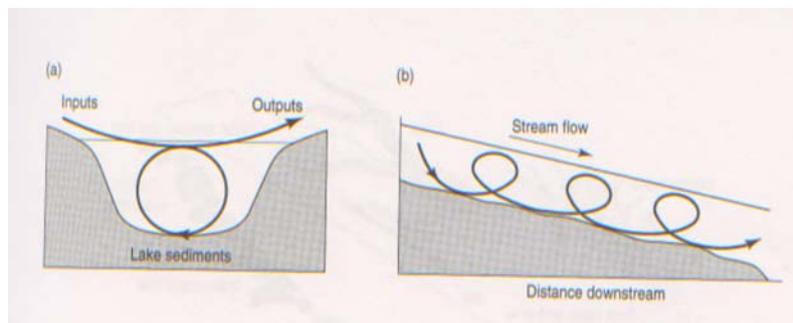
## 4. LAGOS EN CUENCAS EXORREICAS ANDINAS

### 4.1 Propiedades fundamentales

#### Características físicas de los lagos.

La principal característica de los lagos, es que son extensos volúmenes de agua almacenada, con altos tiempos de retención (Figura 4.1). Esta diferencia implica que las velocidades de flujo son bajas, midiéndose en término de centímetros por segundo o incluso milímetros por segundo. Esta diferencia con los ríos radica en que las especies presentes en lagos y embalses son diferentes, predominando las especies planctónicas por sobre las bentónicas.

**Figura 4.1.** Patrón de circulación en lagos (a) y ríos (b).

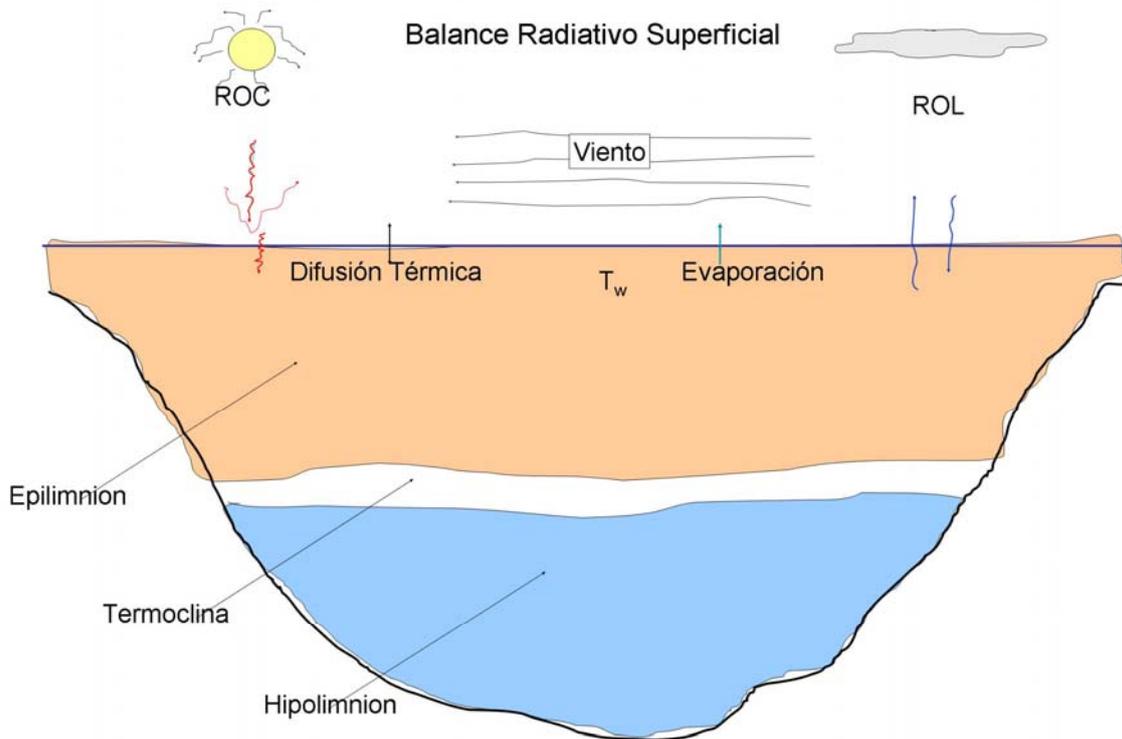


Desde el punto de vista físico, los agentes atmosféricos (viento, radiación solar) adquieren una importancia mayor respecto de la influencia de los caudales afluentes o efluentes en la dinámica de un lago o embalse. Un ejemplo de lo anterior resulta del estudio de la variación estacional de temperatura del cuerpo de agua. Para un lago temperado, es usual encontrar que la temperatura aumenta en verano, y disminuye en invierno por efecto del intercambio calórico entre la superficie del lago y la atmósfera. El aumento de la temperatura superficial durante el verano significa que la densidad del agua disminuye en la superficie respecto de la densidad del agua profunda. Este escenario de densidades es conocido como un escenario estable, ya que naturalmente los fluidos de menor densidad se ubican en las zonas altas y los de mayor densidad en la parte baja. Por lo tanto, si se desea mezclar la columna de agua es necesario entregar una cantidad de energía para “subir” el agua densa a la superficie y “bajar” el agua menos densa a la capa más profunda.

La cantidad de energía necesaria para producir la mezcla es directamente proporcional a la diferencia de densidades entre la zona superficial y la profunda del cuerpo de agua. Este proceso se conoce como estratificación (Figura 4.2), y nace del hecho que un cuerpo de agua estratificado puede considerarse como dos capas (estratos) de densidad homogénea que interactúan continuamente. Usualmente, el estrato superficial se conoce como epilimnion, el profundo como

hipolimnion y el intermedio como metalimnion o termoclina en caso que la estratificación sea por temperatura.

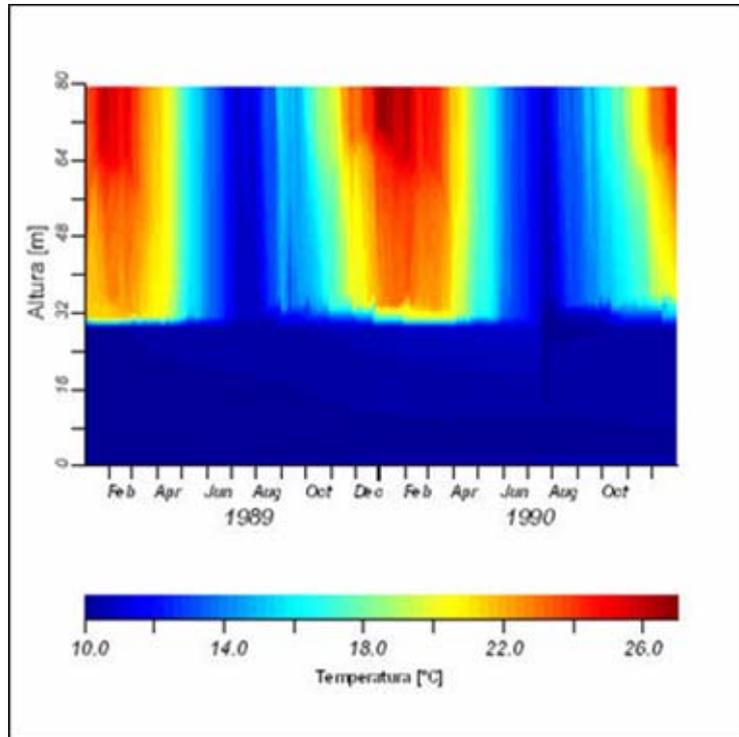
**Figura 4.2.** Esquema de estratificación de un lago por intercambio calórico con la atmósfera. ROC= radiación onda corta. ROL= radiación onda larga.



Durante el invierno, al disminuir la temperatura superficial del cuerpo de agua, aumenta también la densidad de esta capa, y por lo tanto, es posible que se produzca la mezcla total de la columna de agua en invierno. Este mismo escenario ocurre en lagos fríos que se congelan en superficie, pero la estratificación ocurre en invierno dado que la densidad alcanza un máximo para 4°C, por lo tanto, para temperaturas superficiales inferiores a este valor, ocurre el mismo fenómeno de estratificación con el agua menos densa en la zona superficial. A partir de esta característica, un lago o embalse se puede catalogar como: amictico en caso que nunca se mezcle, monomictico, en caso que la mezcla y estratificación de la columna de agua ocurra una vez al año, y polimictico en caso que el proceso ocurra varias veces en el año.

La Figura 4.3 muestra la variación temporal de perfiles simulados de la temperatura en un embalse de la zona central de Chile. En este se aprecia el ciclo mencionado anteriormente, es decir, la estratificación de la columna de agua en dos zonas durante el verano, y la mezcla de ésta en invierno.

**Figura 4.3.** Perfiles de temperatura simulados para un embalse de la zona central de Chile.

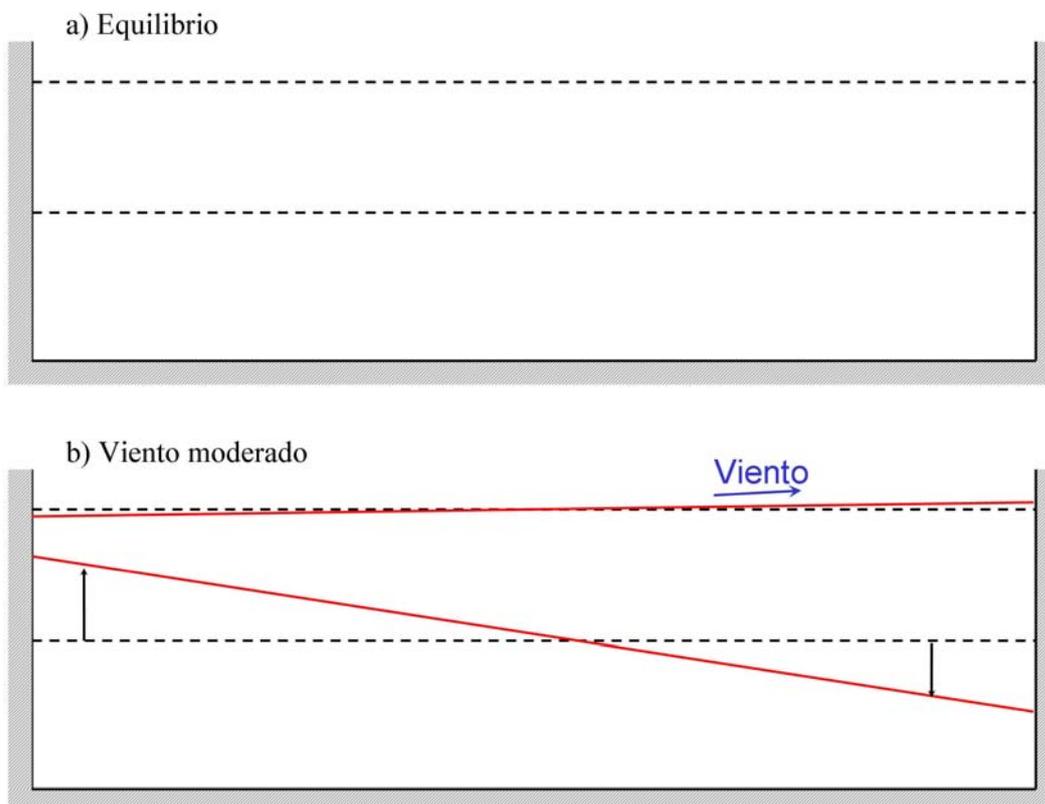


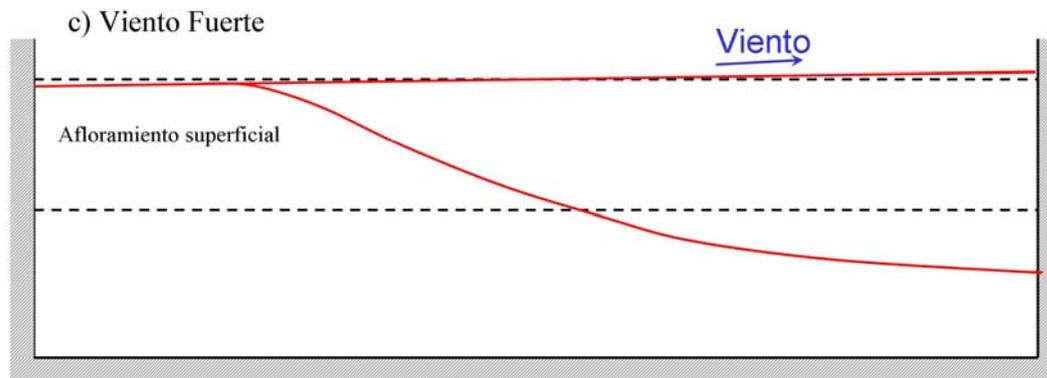
La existencia de un perfil estratificado en lagos o embalses tiene gran importancia en el comportamiento químico y biológico de éste, dado que, además de considerar al cuerpo de agua compuesto por dos o más estratos, el intercambio másico entre capas es muy bajo. Este comportamiento implica que la capa profunda se aísla respecto del intercambio con la atmósfera, en particular, el traspaso de oxígeno atmosférico. Al recibir poco oxígeno el hipolimnion, las reacciones químicas en los sedimentos lo consumen, y por lo tanto, es usual encontrar condiciones anóxicas en el hipolimnion, con la consiguiente liberación de nutrientes y gases tóxicos para la biota.

La mezcla de la columna de agua produce que la materia acumulada en el hipolimnion durante el período estratificado quede en contacto con la biota del epilimnion, empobreciendo además la calidad del agua superficial. Una pregunta importante de resolver es cuáles son las fuentes de energía externa que son capaces de inducir la mezcla total y parcial de la columna de agua estratificada. La respuesta es, que usualmente es el viento superficial. El efecto del viento en superficie se interpreta como un esfuerzo de corte (fuerza tangencial a la superficie). Esta fuerza superficial induce la generación de corrientes en el epilimnion en sentido del viento (Figura 4.4.a). Este movimiento transporta agua desde la zona viento arriba a la zona de viento abajo, zona donde se acumula el fluido. Este comportamiento implica que la termoclina se inclina en sentido contrario del viento (Figura 4.4.b). Si la magnitud del viento es lo suficientemente

grande, la inclinación de la termoclina puede ser tal que el agua del hipolimnion aflora en superficie (Figura 4.4.c), induciendo la mezcla parcial de la columna de agua. Finalmente, cuando el viento en superficie disminuye su magnitud ocurre que la termoclina tiende a una situación de equilibrio horizontal (Figura 4.4.a). Esta vuelta al equilibrio induce la oscilación de la masa de agua, corrientes internas y mezcla parcial del cuerpo de agua, dinámica que además puede estar afectada por la rotación de la tierra para lagos estratificados de dimensiones mayores a 5 Km. de longitud aproximadamente.

**Figura 4.4.** Inclinación de la termoclina por acción del viento. a) Situación de reposo. b) respuesta ante viento de moderada intensidad y c) afloramiento superficial del hipolimnion.





La principal relación existente entre los procesos físicos y respuesta química y biológica de un lago o embalse, es el tiempo de retención. Este parámetro se define como el cociente entre el volumen del cuerpo de agua y el caudal afluente, y da cuenta del tiempo medio que el agua está dentro del lago o embalse. La relación entre este parámetro y la dinámica químico-biológica es que, si el tiempo de retención es alto, entonces la dinámica del cuerpo de agua está gobernada principalmente por los procesos internos, por ejemplo, crecimiento del fito y zooplancton, reacciones químicas, entre otros. En caso contrario, para tiempos de retención bajos se obtiene que la dinámica del cuerpo de agua está gobernada principalmente por las condiciones de los afluentes que lavan continuamente el cuerpo de agua.

Entre las principales funciones de los lagos está la capacidad de producción de materia orgánica autóctona, proceso que se denomina eutroficación. Como ya se señaló anteriormente, la producción biológica en los lagos es regulada por factores externos como recursos hídricos y aportes de nutrientes, dando como resultado una acumulación progresiva de materia orgánica. Los lagos pasan de un estado de bajo contenido de materia orgánica (oligotrófico) hacia un estado de alto contenido de materia orgánica (eutrófico), siendo este proceso unidireccional e irreversible.

#### 4.2 Variables de estado

Para lagos ubicados en cuencas exorreicas se proponen las siguientes variables de estado:

- Producción primaria en la columna de agua: el nivel de producción primaria o estado trófico es un buen indicador de la condición global de los lagos, para lo cual podemos determinar genéricamente la concentración de los pigmentos fotosintéticos (ej. Clorofila a), o bien, medir la transparencia del agua mediante el disco Secchi.
- Condiciones de oxido-reducción en la interfase sedimento-agua: la estratificación vertical de la columna de agua, puede cambiar las

condiciones de oxido-reducción en la interfase sedimento-agua. Este proceso puede cambiar el comportamiento del lago, desde un sistema tipo sumidero a uno tipo fuente (“recarga interna”).

- Composición y abundancia de microalgas: este grupo de especies son indicadoras del estado trófico del lago.
- Composición y abundancia de peces: la caracterización de la fauna íctica en grupos funcionales, dependiendo de sus hábitos alimentarios (ej. herbívoros, piscívoros), permite evaluar los flujos de energía dominantes en el lago.

### **4.3 Factores forzantes**

A continuación se detallan los factores forzantes que regulan el comportamiento de los lagos:

- Caudal ríos tributarios: este factor afecta el balance hídrico, químico y la estructura espacial de los lagos. Es particularmente relevante el efecto del pulso de inundación (“crecidas”), debido a que puede modificar la estructura del lago, a través del arrastre de componentes bióticos y abióticos. En términos simples el lago puede ser “lavado” durante los eventos de crecidas. Lagos con tiempos de residencia menores a 15 días pueden ser afectados por cambios en el caudal de los ríos tributarios.
- Carga de nutrientes: los nutrientes regulan el estado trófico de los lagos, frecuentemente son el nitrógeno o el fósforo, en sus formas biodisponibles. Es importante señalar que esta condición es dinámica y depende de la concentración, sobre ciertos umbrales otros nutrientes o factores pueden llegar a ser limitantes. En general podemos establecer que concentraciones superiores a 50 ug/l de fósforo y 100 ug/l de nitrógeno, aceleran el proceso de eutroficación.
- Condiciones climáticas: las condiciones climáticas locales regulan la dinámica temporal de los lagos, factores como vientos o temperatura del aire, afectan la expresión de los componentes biológicos.

#### 4.4 Seguimiento ambiental

En la tabla 4.1 se propone el programa de seguimiento ambiental mínimo para lagos ubicados en cuencas exorreicas.

**Tabla 4.1.** Programa de seguimiento ambiental mínimo.

Variable	Diseño muestreo
Caudal	Controlar mensualmente en tributarios y desagüe
Nivel hidrométrico	Controlar mensualmente en cubeta principal del lago
Disco Secchi	Controlar mensualmente en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima)
Temperatura	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
pH	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Oxígeno disuelto	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Conductividad	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Potencial redox en sedimentos	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima), tributario y desagüe.
Clorofila a	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Nitrógeno orgánico total	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributarios y desagüe
Fósforo total	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributarios y desagüe
Composición y abundancia microalgas	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago (estación profundidad máxima, superficie y fondo), tributario y desagüe.
Composición y abundancia peces	Controlar en condiciones de mezcla y estratificación en cubeta principal del lago, tributario y desagüe.

#### 4.5 Criterios y umbrales

La dinámica espacio-temporal de los lagos es regulada por el tiempo de residencia del agua y el balance térmico, generando una alternancia entre condiciones de mezcla y estratificación de la columna de agua. En invierno el mayor caudal de los ríos y fuertes vientos mantienen mezclada la columna de agua, para luego dar paso a una columna estratificada cuando disminuyen los factores forzantes. Este patrón debe ser considerado al momento de diseñar un programa de monitoreo.

La relación entre las condiciones físicas y la dinámica biológica permite establecer que, si el tiempo de retención es mayor a 15 días, el cuerpo de agua está gobernado principalmente por procesos internos, como producción primaria. En este estado la concentración de nutrientes limita el crecimiento de las microalgas, hasta valores de fósforo y nitrógeno de 50 y 100 ug/L, respectivamente (Tabla 4.2). Tiempos de residencia menores a 15 días determinan el lavado continuo del cuerpo de agua.

**Tabla 4.2.** Valores límites de fósforo para clasificación del estado trófico de lagos.

#### VALORES LÍMITES PARA CLASIFICACIÓN TRÓFICA (OCDE, 1982)

Estado trófico	TP	Cl <sub>a</sub>	Cl <sub>a</sub> máx	Secchi	Secchi min.
Oligotrófico	<10	10	25	120	60
Mesotrófico	10-35	25-80	8-25	6-3	3-15
Eutrofico	35-100	8-25	25-75	3-15	15-0"
Hipertrofico	>100	25	>75	15	0"

[197 L anual]      Profundidad (m)

#### **4.6 Sistema alerta temprana**

El nivel de producción primaria es un buen indicador del estado ecológico de los lagos, su seguimiento temporal permite identificar en forma temprana perturbaciones de origen natural o antrópico. El grado de anoxia del hipolimnion permite determinar el estado trófico de los cuerpos de agua.

#### **4.7 Medidas de mitigación**

Las medidas de mitigación aplicadas frecuentemente en lagos, se centran en el control de los aportes directos y difusos de nutrientes. El tratamiento de RILes y la reforestación de la cuenca de avenamiento, son las medidas más utilizadas. Actualmente el control interno de nutrientes mediante el uso de dispositivos que modifican parcialmente las condiciones hidrodinámicas, están siendo aplicadas en forma exitosa.

## 5. BOFEDALES Y VEGAS EN CUENCAS ENDORREICAS

Las condiciones climáticas y geológicas en el norte de Chile han generado numerosas cuencas endorreicas, cuyo principal mecanismo de descarga es una alta tasa de evaporación, dando como resultado ambientes conocidos como salares. Los salares se encuentran ampliamente distribuidos en la región andina y pre-andina de la cordillera de Los Andes, los que frecuentemente son tipificados con una alta heterogeneidad espacial, ello debido a la ocurrencia de diversos tipos de vegetación, tales como bofedales y vegas.

Los humedales en los salares surgen frecuentemente debido al afloramiento del acuífero que genera una condición permanentemente saturada en el suelo. Desde el punto de vista de la conservación biológica de estos ecosistemas, los humedales incluyen diversos ensambles de taxa, entre las cuales son frecuentes tres especies de flamencos; *Phoenicopterus chilensis* (flamenco chileno), *Phoenicoparrus andinus* (flamenco andino) y *Phoenicoparrus jamesi* (flamenco de James), los que anidan y se alimentan en los salares. Además, los peces del género endémico *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae) presentan una distribución geográfica altamente restringida a los salares, lo que otorga una alta singularidad ecológica a estos ecosistemas altoandinos.

Los humedales son ecotonos entre dos ecosistemas, por lo cual presentan características estructurales y funcionales que emergen de los sistemas adyacentes. Su función ha estado asociada principalmente a la transferencia de material orgánico e inorgánico, favoreciendo el flujo y la transformación de materiales.

### 5.1 Propiedades fundamentales

El clima característico del altiplano chileno es de tipo Desértico y Estepárico de Altura. Las condiciones climáticas generales están moduladas por el efecto de la altura: la temperatura es baja, el aire es seco y de una presión relativamente baja comparado con las condiciones a nivel del mar. Las temperaturas mínimas diarias son en general inferiores a 0°C, pudiendo descender a valores por debajo de -10°C durante el invierno. El periodo de lluvias se concentra en el verano (diciembre - marzo) cuando llegan a la zona masas de aire húmedas provenientes de la cuenca amazónica. Este periodo se identifica como "invierno altiplánico" y específicamente en Chile, como "invierno boliviano". A diferencia de las lluvias asociadas a sistemas frontales, en esta región la precipitación se asocia a la formación de nubosidad cumuliforme durante la tarde, cuando el calentamiento del suelo favorece el desarrollo de movimientos ascendentes.

El clima en el altiplano tiene 2 atributos relevantes: i) presenta precipitaciones estivales controladas por los procesos de transporte de humedad desde el Amazonas, y ii) dada las condiciones desérticas, la oscilación térmica tanto a nivel

diario como estacional es alta, aunque los valores medios anuales son más bien bajos.

Un punto importante en el análisis de los ecosistemas acuáticos altoandinos es que, como indica su nombre, se desarrollan por lo general en alturas que superan los 2300 msnm (metros sobre el nivel del mar). Este hecho tiene consecuencias directas en diversos procesos que controlan su dinámica, siendo la principal consecuencia el que, al ser la presión atmosférica menor que en las tierras bajas, la concentración de oxígeno en el aire disminuye considerablemente, afectando por ejemplo, la concentración de oxígeno del agua. Cabe mencionar que a 3000 msnm, la presión atmosférica es aproximadamente igual al 70% de la que se registra en el mar, reducción válida también para la concentración de oxígeno.

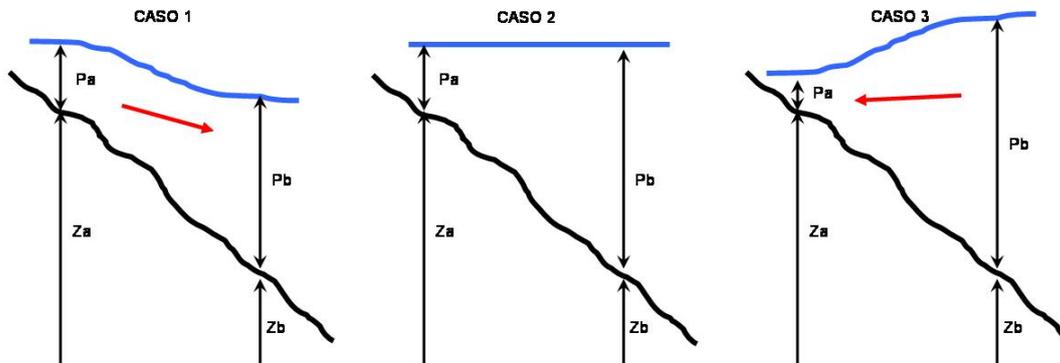
### **5.1.1 Hidrogeología**

Previo al análisis de la hidrogeología de los salares, es necesario definir algunos conceptos básicos relacionados con la dinámica física del escurrimiento, tanto superficial como subterráneo.

Primero, un término usualmente utilizado en ingeniería hidráulica es la presión. Por ejemplo, en el caso de un estanque en reposo se tiene que la presión aumenta a medida que aumenta la profundidad. Este hecho se relaciona con que, en un lugar dado de este estanque, la presión equivale a la fuerza que ejerce el volumen de agua sobre dicho punto. Este hecho permite traducir la presión a una distancia equivalente a la altura de agua que explica dicha presión.

Por otro lado, para definir la dirección de circulación del agua entre dos puntos (A y B, Figura 5.1), es necesario analizar cual es la diferencia de presiones entre ambos puntos y la diferencia de cotas, en particular, la suma de la presión ( $P_a$  y  $P_b$ ), expresadas en términos de altura y la cota ( $Z_a$  y  $Z_b$ ), medida desde un lugar fijo, conocido como DATUM. De esta forma, si esta suma es mayor en A que en B, el escurrimiento va desde la zona alta (A) hacia la zona baja (B) (CASO 1), tendiendo a llenar la zona de menor altura. En caso que la suma sea igual en A y B, no existe movimiento del fluido (CASO 2). Finalmente, si la suma de estas dos alturas es mayor en B que en A, el flujo va de B hacia A (CASO 3).

**Figura 5.1.** Esquema de sentido del escurrimiento para diferentes escenarios.

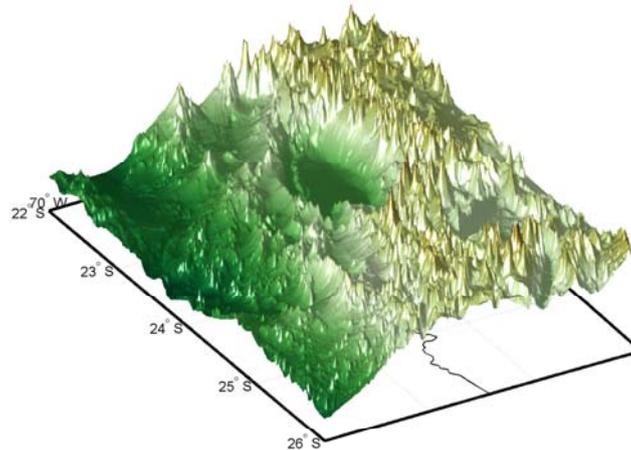


La dinámica anterior es válida también para los acuíferos subterráneos que pueden estar confinados o no. El confinamiento del acuífero es asimilable al escurrimiento en tuberías dado que es usual encontrar capas de suelo impermeables, asimilable a las paredes de las tuberías. Por el contrario, la dinámica de los acuíferos no confinados es similar a la que ocurre en un flujo superficial donde el terreno está formado por aquel estrato profundo de baja permeabilidad, nombrándose a la superficie del escurrimiento para el cálculo de la presión como el nivel freático. Existen diversas maneras de definir este nivel freático, siendo una usualmente utilizada como aquella superficie definida por tener humedad del 100%. Hacia arriba de este nivel definido a partir del 100% de humedad, la cantidad de agua en el suelo disminuye paulatinamente hasta llegar al 0%, correspondiendo a una zona no saturada. Esta región no saturada se desarrolla por efectos capilares, y puede tener alturas de algunos metros.

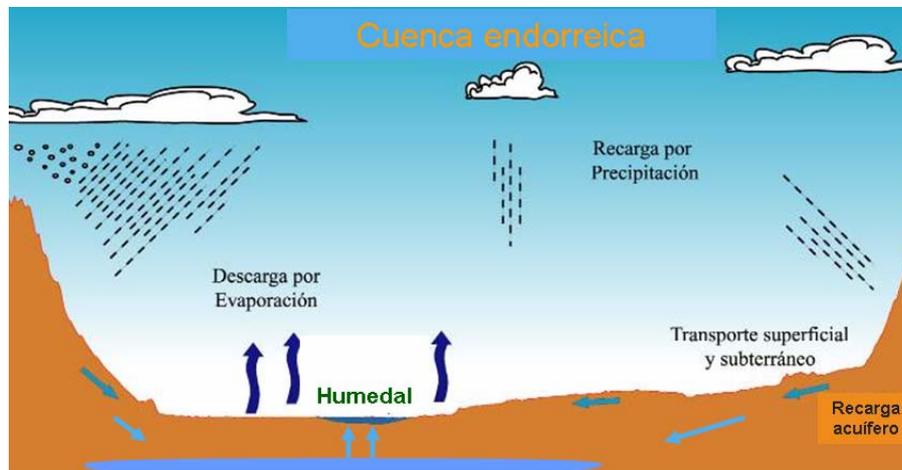
En la Figura 5.2 se muestra la topografía de la región cercana al salar de Atacama, donde se aprecia el hecho que la cuenca asociada a este salar es endorreica o cerrada, ya que el agua que precipita en ésta escurre superficial o subterráneamente hasta la parte baja donde se ubica el salar de Atacama, y en general, todos los salares del norte de Chile (Figura 5.3).

A nivel subterráneo, la dinámica es similar a la que ocurre en superficie, es decir, el agua que precipita en la cuenca, en particular en las zonas altas de ésta, infiltra y escurre subterráneamente hasta las zonas bajas donde se encuentran los salares. La posibilidad que el agua fluya superficialmente en las cuencas endorreicas andinas es baja ya que, al ser el terreno desértico con alta evaporación, ésta rápidamente se evapora o infiltra, resultando que el agua se almacena en los acuíferos subterráneos.

**Figura 5.2.** Cuenca endorreica del salar de Atacama.



**Figura 5.3.** Balance hídrico en una cuenca endorreica.

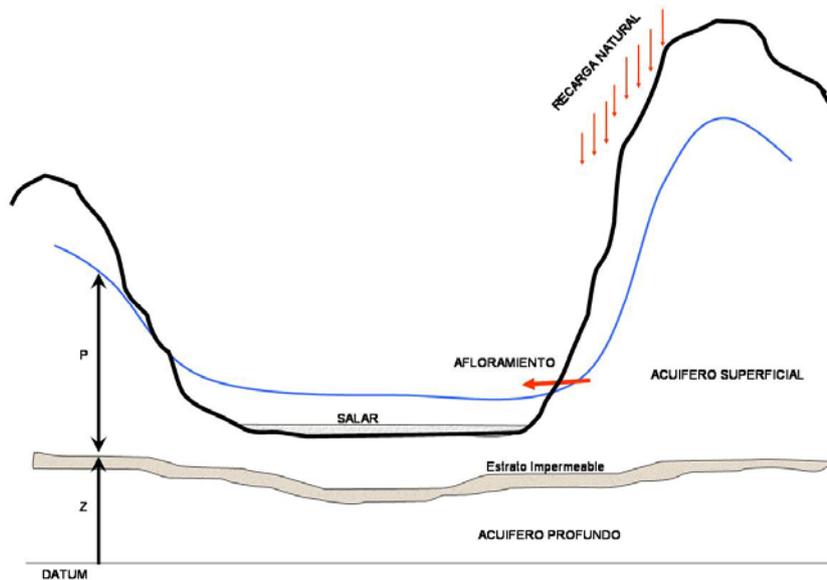


Desde el punto de vista hidrogeológico, las costras salinas de los salares se consideran como estratos impermeables que confinan el acuífero subterráneo. Este hecho significa que es usual encontrar que la presión en los salares sea positiva, es decir, la altura de presión más la cota del fondo se encuentra por sobre el nivel del terreno. La cota del fondo corresponde en este caso al estrato impermeable que se encuentra en profundidad.

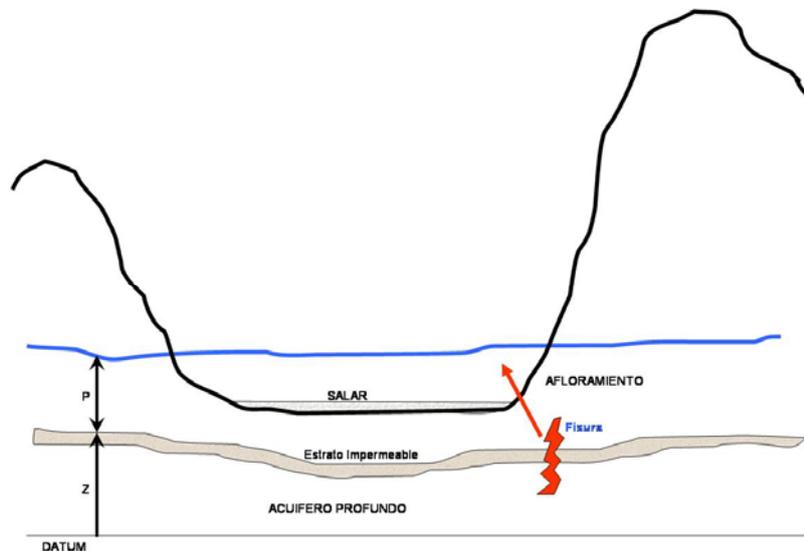
Un esquema genérico del nivel de presión en un eje de la cuenca endorreica se muestra en Figura 5.4, que muestra también el porqué el afloramiento del agua ocurre en los contornos de los salares. En los bordes del salar el nivel del acuífero es superior al nivel del terreno y habiendo fisuras del estrato confinante se producen afloramientos (Figura 5.5).

Cabe mencionar que en la realidad el afloramiento del agua subterránea ocurre solo en algunos lugares puntuales del perímetro de los salares y no repartido homogéneamente en todo el perímetro. Este hecho se explica porque el agua escurre por aquellos lugares de menor resistencia. En el escurrimiento subterráneo vertical, la resistencia al flujo del agua está inversamente relacionada con el diámetro característico del sustrato, donde los sustratos más gruesos ejercen menor resistencia al escurrimiento.

**Figura 5.4.** Esquema de afloramiento de aguas subterráneas de acuífero superficial.



**Figura 5.5.** Esquema de afloramiento de aguas subterráneas de acuífero profundo confinado.

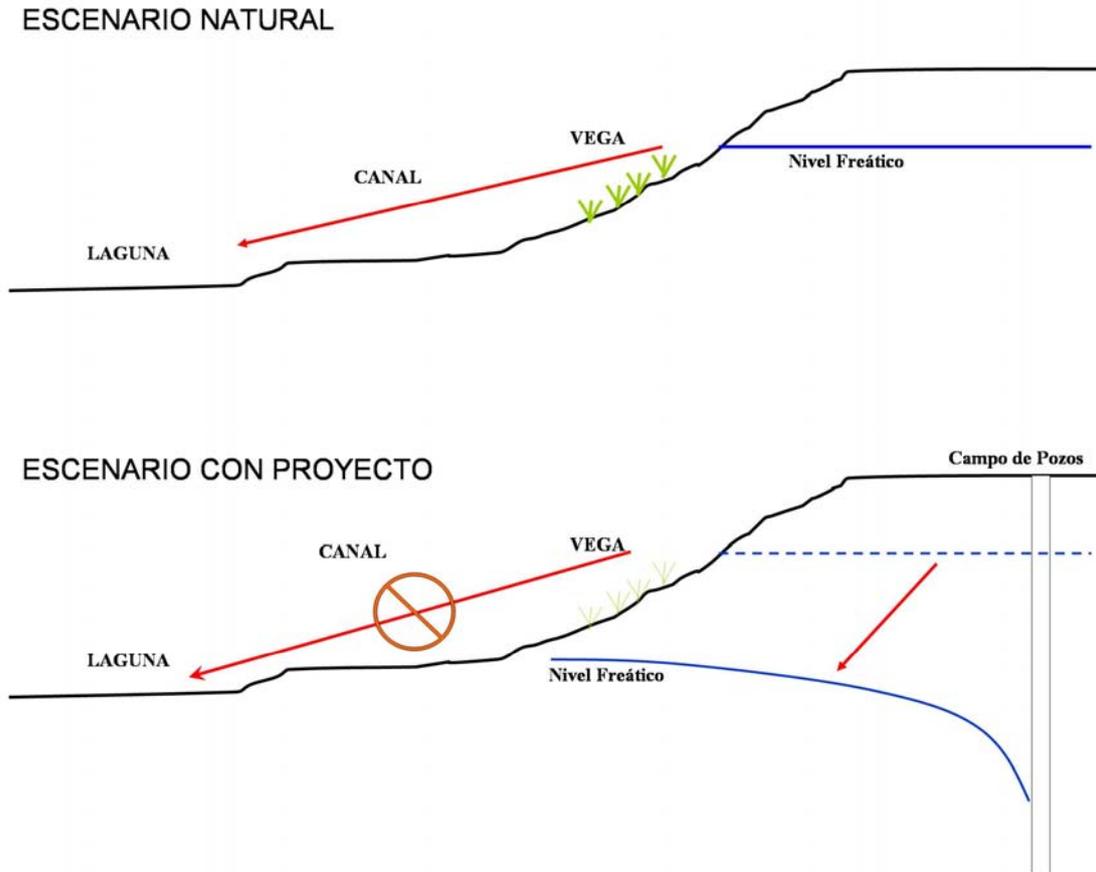


En caso que exista un aumento de la recarga natural de los acuíferos, el nivel freático o de presión en el salar aumenta, resultando que el caudal que surge en las vertientes aumenta ya sea porque puntos de afloramiento más altos entran en contacto con el agua (zonas de granulometría más gruesa), o bien, porque el caudal que es vertido desde el acuífero confinado depende de la altura de presión sobre el punto de afloramiento, resultando que a mayor recarga, mayor presión y por lo tanto mayor el caudal en las vertientes. Este proceso logra que los sistemas en forma natural tiendan al equilibrio entre el caudal recargado y las pérdidas por evaporación del agua de las vertientes.

El escenario descrito es válido para las condiciones naturales del escurrimiento, condiciones donde existe el balance de masa entre el agua que reciben los acuíferos y la que escurre superficialmente que en definitiva se evapora y sale de la cuenca. La pregunta es cuál es el efecto de la extracción subterránea del recurso hídrico.

Bajo el mismo concepto de embalse subterráneo que aumenta o disminuye de volumen en función de la recarga, en caso que exista alguna extracción subterránea del recurso, el nivel de este embalse disminuye con la consiguiente disminución del caudal en las vertientes, y en caso que la disminución del nivel de presión sea bajo la cota de terreno, el escurrimiento superficial se interrumpe (Figura 5.6)

**Figura 5.6.** Efecto de la extracción del recurso subterráneo en escurrimiento superficial. Comparación entre escenario natural y con extracción.

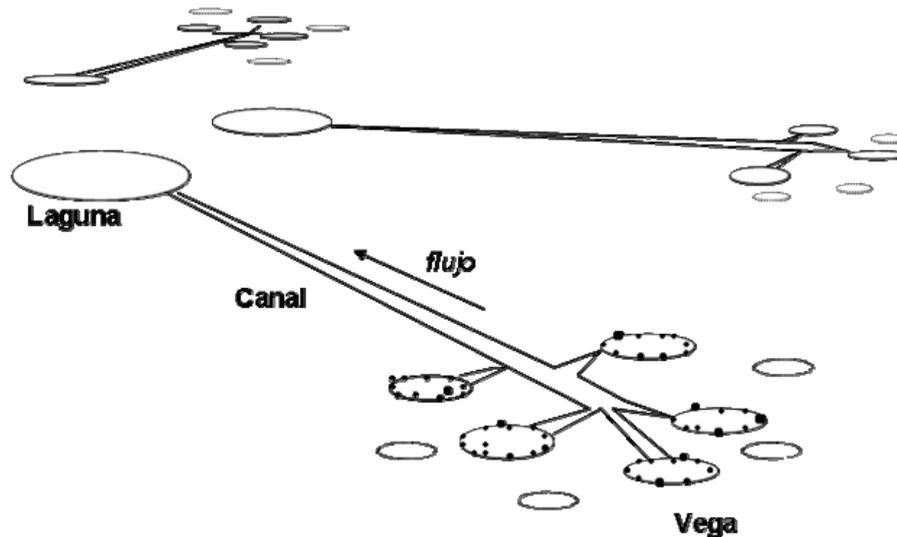


Las escalas de tiempo asociadas a este fenómeno son grandes, ya sea porque las velocidades en el acuífero subterráneo son mucho menores a las que se registran en superficie, como también el hecho que el volumen embalsado en el subsuelo es grande, de manera que para producir cambios efectivos del nivel de presión es necesario extraer grandes cantidades del recurso. Estas escalas son válidas tanto para los procesos de cuantificación de la extracción como para la recarga natural.

### **5.1.2 Características físicas de meso y micro escalas de los humedales altoandinos.**

El afloramiento del agua subterránea en el perímetro de los salares permite el desarrollo de un escurrimiento superficial cerrado donde es posible distinguir una zonificación espacial en tres regiones: un bofedal o vega, un canal y una laguna terminal (Figura 5.7). La causa de esta división estructural se explica en diferencias de la pendiente del terreno en el eje longitudinal, la que es mayor en la zonas de las vegas que en la laguna terminal.

**Figura 5.7.** División estructural en vega, canal y laguna terminal de humedales altiplánicos.



El afloramiento del agua subterránea, si bien está restringido a una región en particular del salar, puede ocurrir en forma puntual en una vertiente o de forma difusa en varios puntos (Figura 5.7). Posteriormente, dadas las diferencias de pendiente del terreno, el escurrimiento aumenta la velocidad y naturalmente tiende a canalizarse en pocos cauces principales. Al disminuir las pendientes del terreno, el escurrimiento tiende disminuir su velocidad y aumentar la superficie inundando grandes extensiones.

Las características de cada una de estas zonas se describen a continuación:

**Vega o bofedal:** zona cercana al afloramiento que se encuentra generalmente fuera del salar, donde el confinamiento del acuífero superficial que genera la costra salina es bajo. Al no encontrarse el acuífero confinado el nivel freático se encuentra cercano a la superficie del terreno, y por lo tanto, los niveles de humedad del suelo son adecuados para el crecimiento de la vegetación.

**Canal-Laguna:** canales y lagunas tienen características hidrodinámicas que permiten diferenciarlos, sin embargo, existe un continuo de procesos a lo largo del eje longitudinal que impide su análisis por separado. El principal eje conductor es el hecho que a lo largo del escurrimiento la evaporación del fluido es un fenómeno que actúa constantemente. La evaporación es la difusión de agua hacia la atmósfera y por lo tanto depende de los niveles de turbulencia atmosférica. Por otro lado, la evaporación afecta solamente a los compuestos volátiles, no así a otras especies químicas como sales y nutrientes. De esta forma, al ocurrir la evaporación del fluido, simultáneamente aumenta la concentración de sales.

Este hecho junto con el transporte mecánico de sal por difusión y advección, explican el que la salinidad y otros compuestos químicos aumenten su concentración a lo largo del eje longitudinal del escurrimiento, alcanzando las concentraciones mayores en la zona de la laguna. Si la salinidad del agua sobrepasa un cierto valor, aproximadamente 200 g/l, comienzan a ocurrir procesos de precipitación de sales. Dado que estas concentraciones son posibles de registrar en los lugares más alejados de la vertiente, la precipitación de sales explica la presencia de costras salinas en dichos lugares y los cambios temporales registrados en el tamaño y forma de las lagunas/canales. La evaporación es un fenómeno que es inversamente proporcional a la salinidad del agua, es decir, a mayor salinidad menor es la tasa efectiva de evaporación, alcanzando un valor nulo para salinidades del orden de 200 g/l, aproximadamente.

### **5.1.3 Características ecológicas de los humedales altoandinos.**

Los humedales altoandinos están ubicados preferentemente en cuencas donde la evaporación del agua es la principal pérdida del sistema. Este proceso genera gradientes espaciales, desde los puntos de afloramiento de aguas subterráneas (“surgencias”) hacia los sectores de menor altitud (“lagunas de evaporación”), dando como resultado humedales con una extensión areal reducida<sup>11</sup>, debido a la limitación en la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y a los gradientes de salinidad. Desde un punto de vista ecológico, estos sistemas tienen una elevada riqueza de especies, en respuesta a la heterogeneidad espacial, constituyendo áreas de concentración de la biodiversidad en la región altiplánica (“hot spot”). La estrecha relación que se genera entre las comunidades biológicas y el medio físico, determinan la existencia de dinámicas únicas en cada ecosistema, sobre la base de la sustentabilidad temporal que le imprimen los afloramientos de aguas subterráneas.

Las comunidades biológicas en los humedales de cuencas endorreicas, están distribuidas en subsistemas (“compartimientos”), donde se desarrollan tramas tróficas específicas a las condiciones locales (Figura 5.8). Los subsistemas son: i) ecosistema acuático con baja salinidad, ii) ecosistema acuático con alta salinidad y iii) un cinturón de vegetación hidrófila terrestre que rodea fundamentalmente las lagunas con baja salinidad. Las interacciones entre los subsistemas son bajas, dado que están definidas por los límites de tolerancia ambiental de las especies. Es importante destacar que la interacción entre el escurrimiento de las aguas y la evaporación, producen fuertes gradientes de salinidad en el agua y suelo. Por ejemplo, en las lagunas cercanas a la vertiente podemos encontrar valores de 1100 uS/cm. hasta 100.000 uS/cm. en las zonas de evaporación. Estos gradientes afectan en forma significativa la distribución espacial de los organismos, razón por la cual han sido denominados como ambientes extremos.

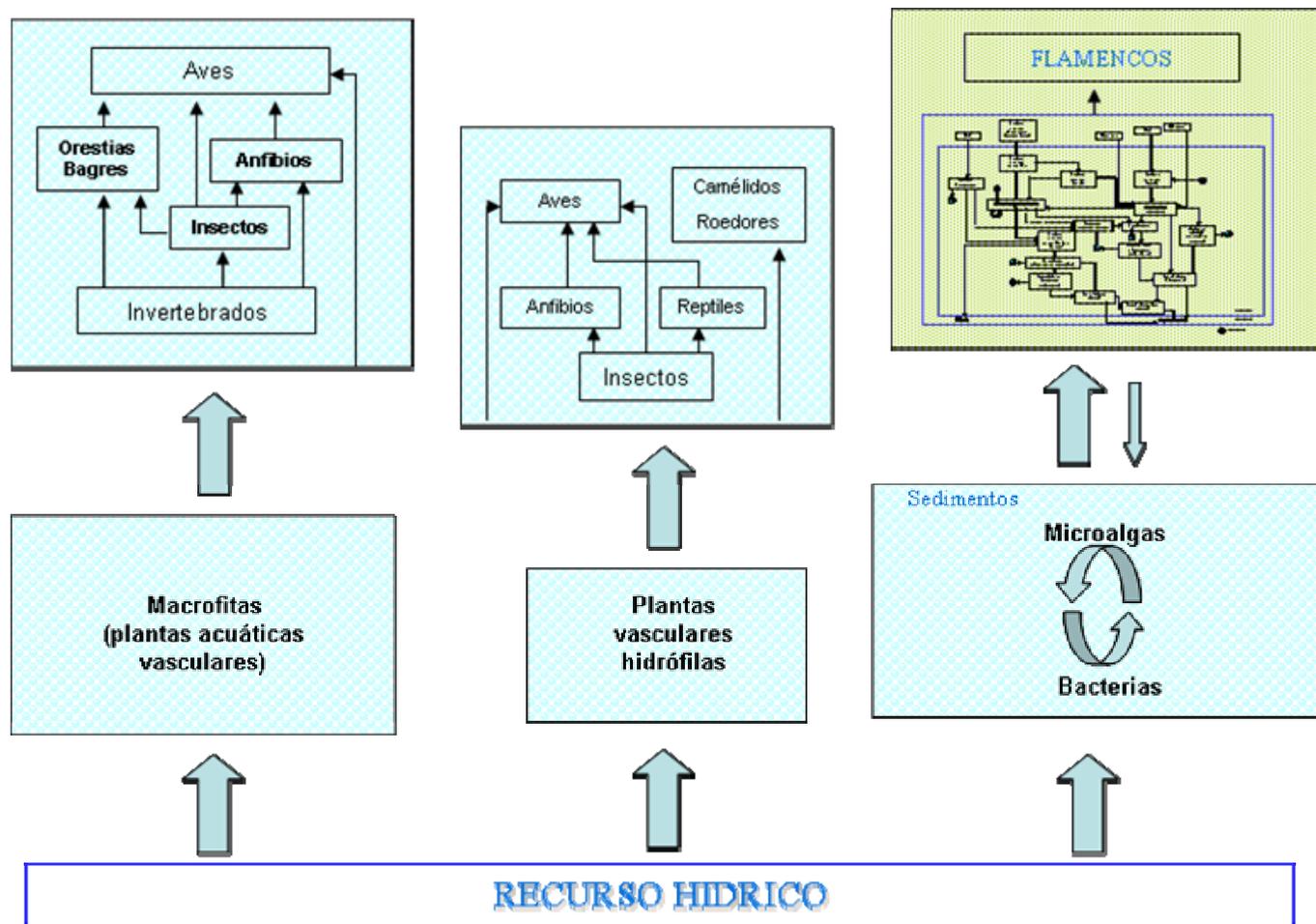
A continuación se describen conceptualmente los atributos estructurales y funcionales de cada uno de los subsistemas:

---

<sup>11</sup> Humedales constituidos por cuerpos de agua (lóticos y lénticos) y la vegetación azonal que los rodea.

**Ecosistema acuático de baja salinidad:** tiene un tiempo de residencia bajo, donde los patrones de escurrimiento del agua y el sustrato determinan la distribución de la vegetación vascular acuática, base de la trama trófica que sostiene a la avifauna (ej. taguas, patos). La producción primaria de este tipo de vegetación está en estrecha relación con los niveles de turbulencia del ambiente, relacionado con la velocidad y profundidad del escurrimiento. Los niveles de turbulencia están relacionados con los procesos de intercambio de masa de oxígeno desde la planta hacia el medio ambiente, haciéndolos más eficientes a medida que éstos son mayores. Sin embargo, esta relación creciente entre la velocidad del agua y la producción de las plantas tiene una limitante superior por fenómenos de arrastre del escurrimiento, es decir, si los niveles de turbulencia son muy altas, a pesar de mejorar la producción primaria de la vegetación, son capaces de erosionar el terreno impidiendo el crecimiento de la ésta. Las macrófitas constituyen la principal fuente de carbono del sistema, sustentando una rica fauna de invertebrados donde se entrelazan herbívoros (aves) y consumidores secundarios (peces y anfibios). Los predadores tope del ecosistema estarían compuestos por aves ictiófagas, que además podrían consumir juveniles de anfibios. Ocasionalmente es posible encontrar ganado doméstico consumiendo macrófitas directamente desde los cursos de agua.

**Figura 5.8.** Tramas tróficas en cada compartimiento asociado a la fuente de recursos hídricos en las cuencas endorreicas.



**Ecosistema acuático de alta salinidad:** tiene un tiempo de residencia mayor con predominio de los componentes planctónicos y bentónicos. El mayor tiempo de residencia favorece la evaporación del agua y la precipitación de sales, modificando las condiciones de hábitat a tipo léntico, respecto de las existentes en los ecosistemas tipo río que dominan en la vecindad de la vertiente. La relevancia ambiental de este sistema acuático es que mantiene estacionalmente poblaciones de flamencos, las cuales se alimentan y reproducen. La trama trófica que sostiene a las poblaciones de flamencos, se basa en la producción primaria de las microalgas que se desarrollan en las lagunas (“microalgas bentónicas”), las que acopladas con diferentes grupos funcionales de bacterias producen el carbono suficiente para la fauna de invertebrados y aves que los utiliza como principal recurso alimentario.

La relación existente entre la disponibilidad del recurso hídrico y el ecosistema acuático, es el que la producción de biomasa de los microorganismos bentónicos, principalmente fitobentos, está estrechamente relacionada con los niveles de luminosidad, temperatura, salinidad y disponibilidad de nutrientes. La concentración natural de nutrientes es usualmente superior a los valores limitantes, por ende, la producción primaria depende principalmente de factores físicos. Factores como, la temperatura y luminosidad son agentes que no sufren mayores variaciones espaciales, pero sí cambios considerables a nivel temporal, tanto a nivel subdiario como estacional.

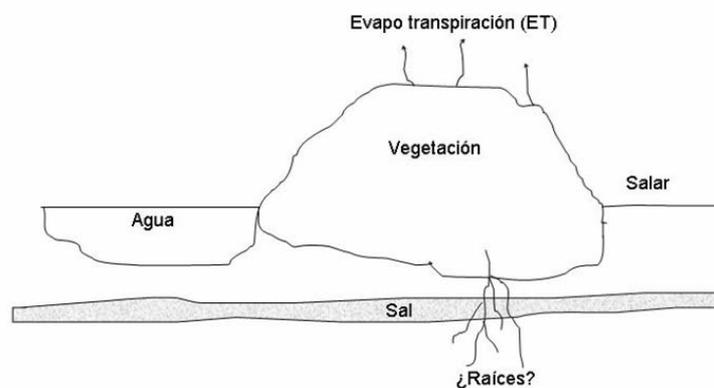
El escurrimiento se caracteriza por presentarse en zonas con baja pendiente, donde la capacidad de almacenamiento de calor en la columna de agua es despreciable. Por lo tanto, la temperatura está gobernada directamente por el intercambio calórico con la atmósfera y los sedimentos, dando como resultado una distribución homogénea en el espacio. La radiación solar presenta el mismo patrón espacial de la temperatura. En cambio, la salinidad del agua varía fuertemente con el caudal de las vertientes. Cuando el caudal disminuye, la zona de mayor salinidad migra aguas arriba, disminuyendo la extensión de las zonas con salinidades bajas, usualmente asociadas a mejores condiciones de hábitat para organismos bentónicos.

**Vegetación hidrófila (ripariana):** En las vegas o bofedales es posible encontrar diversos tipos de vegetación en función de la disponibilidad del recurso hídrico. Por un lado, existen aquellas estrechamente relacionadas con el recurso (hidrófilas), ya sea por la necesidad de captar agua desde el espesor saturado (bajo el nivel freático) o directamente desde el escurrimiento superficial (Figura 5.9), esta vegetación se encuentra confinada a una banda angosta en torno al escurrimiento. Por otro lado, existen otras especies con menores requerimientos, que pueden captar agua desde la atmósfera o desde un suelo con humedad baja. Este comportamiento permite plantear que en torno al escurrimiento superficial existen franjas con condiciones adecuadas para el crecimiento de los distintos tipos de vegetación existentes en las vegas.

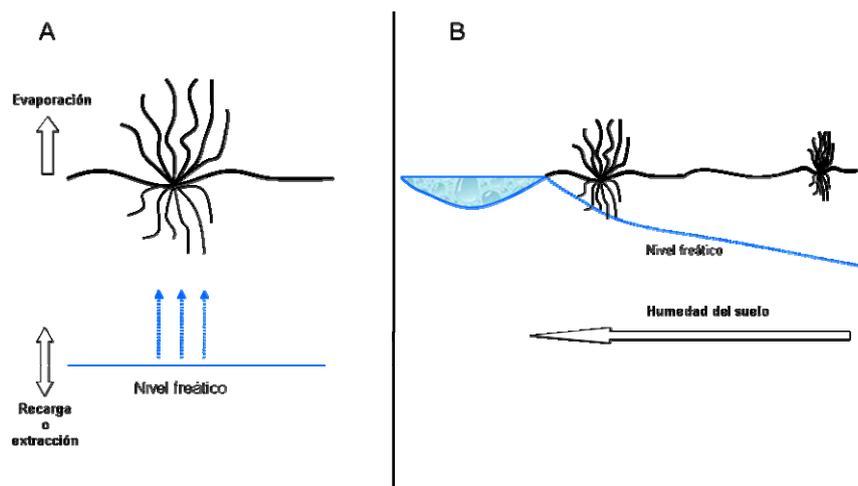
La dinámica del espesor de estas franjas, *hipotéticamente*, está en estrecha relación con el nivel freático, siendo esta relación positiva, es decir, a menor profundidad del nivel freático, mayor el espesor de las franjas de distintos tipos de vegetación. Por lo

tanto, dada la relación directa entre ésta y el nivel freático o humedad del suelo, la reducción del nivel freático por efectos de la extracción subterránea ejerce un efecto directo sobre la extensión vegetacional de las vegas, disminuyendo el espesor de las franjas. En la Figura 5.10 se muestra un esquema del perfil transversal al escurrimiento en la zona de la vega, mostrando el nivel freático y las franjas de vegetación mencionadas.

**Figura 5.9.** Relación entre la vegetación hidrófila y los recursos hídricos superficiales y subsuperficiales.

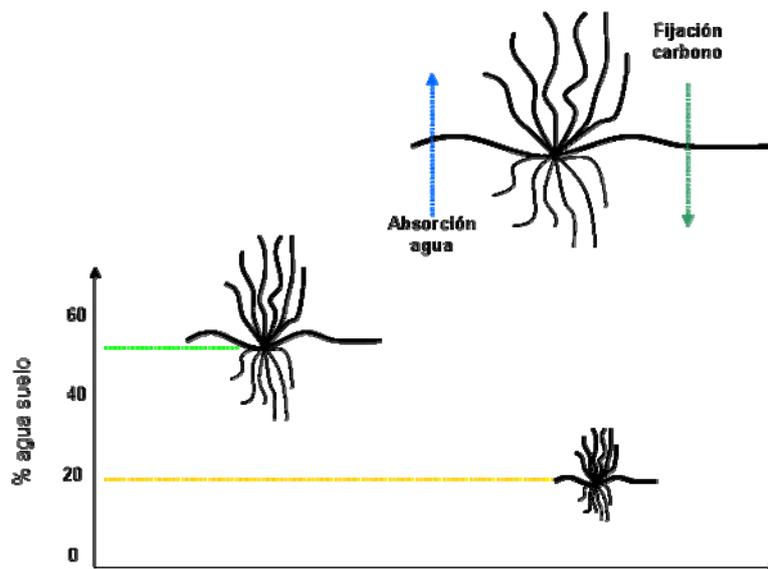


**Figura 5.10** Esquema de un perfil vertical (A) y transversal (B) al escurrimiento en vegas.

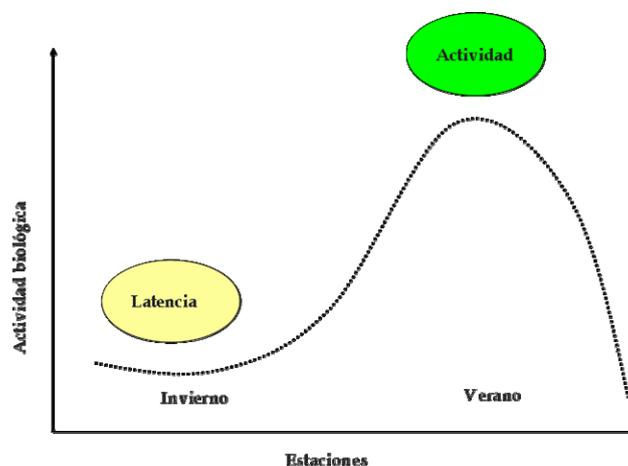


Los requerimientos hídricos de la vegetación están dados por los niveles de actividad fotosintética y el estado ecofisiológico que presenten las plantas, características que son especie específicas. En términos generales es posible señalar que para fijar carbono las plantas deben absorber una cantidad similar de agua, por ende, una reducción en la disponibilidad de agua necesariamente se traduce en una reducción de la actividad fotosintética (Figura 5.11). Estacionalmente los requerimientos hídricos de la vegetación cambian significativamente, debido a que las bajas temperaturas que se registran en invierno, inducen que la vegetación entre en un estado de latencia, reduciendo su nivel de actividad biológica (Figura 5.12).

**Figura 5.11.** Demanda hídrica de la vegetación.



**Figura 5.12.** Dinámica temporal de la actividad biológica de la vegetación hidrófila presente en los humedales altoandinos.



Las condiciones ambientales que dominan los sistemas hídricos ubicados en los salares, son consideradas como extremas para el desarrollo de los organismos, debido a que presentan una elevada variabilidad espacial y temporal. A pesar de que los organismos que habitan estos sistemas presentan frecuentemente rangos de tolerancia ambiental amplios, estos son significativamente menores que la variabilidad natural, lo cual se traduce en una distribución en parches y un permanente recambio estacional de las especies. Desde un punto de vista ecológico, los ecosistemas acuáticos que se encuentran en los salares tienen una elevada riqueza de especies, en respuesta a la heterogeneidad espacial. Sin embargo, la estructura de los ecosistemas cambia frecuentemente en función de las variaciones temporales del ambiente físico. La estrecha relación que se genera entre las comunidades biológicas y el medio físico, determinan la existencia de dinámicas únicas en cada ecosistema.

De lo anterior se desprende que las perturbaciones exógenas, como los eventos climatológicos estocásticos, serían las principales fuerzas reguladoras de los humedales presentes en los salares a gran escala.

Las interacciones biológicas (“factores endógenos”), regularían la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos durante periodos breves de tiempo. Este mecanismo resultaría en una baja capacidad de respuesta de los ecosistemas a las perturbaciones, en términos de la estabilidad temporal de la composición de especies.

En consecuencia, las especies han desarrollado diversas estrategias como procesos migratorios (ej. flamencos), estadios de resistencia por medio de huevos, esporas o procesos de diapausa (ej. diatomeas, invertebrados acuáticos), latencia (vegetación hidrófila).

Una disminución natural en la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales provocará una compresión de los ecosistemas (superficie y estructura), para expandirse posteriormente cuando éstos aumenten. El efecto sinérgico que se genera entre eventos de tipo natural y la explotación de aguas subterráneas, puede llevar a los humedales a un nuevo estado funcional, probablemente asociado con una reducción en la producción biológica de los sistemas, lo que conlleva cambios en la composición de especies, efecto que puede ser amortiguado por la redundancia<sup>12</sup> presente en sus estructuras internas.

---

<sup>12</sup> Redundancia: grupo de especies que no necesariamente están emparentadas taxónicamente y cumplen la misma función ecológica.

## 5.2 Variables de estado

Para los humedales ubicados en cuencas endorreicas, se proponen las siguientes variables de estado:

- Cobertura vegetación hidrófila: la cobertura de la vegetación hidrófila activa es un buen indicador de la condición global del humedal, variaciones en la disponibilidad de recursos hídricos afectan tempranamente la condición ecofisiológica de la vegetación.
- Superficie lagunas: la superficie de las lagunas es el resultado del balance entre los caudales provenientes desde las vertientes y la evaporación. La extensión areal de las lagunas afecta la disponibilidad de hábitat para las especies acuáticas y la avifauna.
- Cobertura macrófitas: las macrófitas son los productores primarios que sustentan la trama trófica del compartimiento hídrico de baja salinidad. La composición específica de macrófitas es un aspecto relevante a considerar como hábitats y oferta de alimento para la avifauna, pero como variable de estado es más relevante la cobertura total.
- Biomasa microalgas: las microalgas bentónicas sostienen la avifauna que se alimenta en las lagunas con alta salinidad, por ende, variaciones en la biomasa de microalgas afectarán la capacidad de carga del humedal.
- Composición y abundancia de la avifauna: la caracterización de la avifauna, permite evaluar el estado de los hábitats (capacidad de carga) y los flujos de energía dominantes en el humedal.

## 5.3 Factores forzantes

A continuación se detallan los factores forzantes que regulan el comportamiento de los humedales:

- Caudal vertientes: el caudal de las vertientes es una condición básica y necesaria para la sustentabilidad de los humedales, dado que su origen corresponde a aguas subterráneas que afloran a la superficie, estos aportes son relativamente constantes en calidad y cantidad. Cualquier cambio en el caudal de las vertientes puede afectar la estructura y funcionamiento del humedal, aún cuando existe un rango de variación que puede ser absorbido por la capacidad de resiliencia y resistencia de los sistemas biológicos.
- Nivel freático: el nivel freático del acuífero superficial sirve de fuente hídrica para la vegetación hidrófila y como basamento hidráulico para el escurrimiento superficial que presentan los humedales. Variaciones en el nivel freático puede

afectar la disponibilidad de agua para la vegetación y/o la pérdida hídrica por infiltración desde las lagunas.

- **Humedad y salinidad del suelo:** estas variables describen la disponibilidad de agua y salinidad en los rizomas de la vegetación hidrófila. Condición que puede estar dada por el agua subterránea, o bien, por aportes laterales subsuperficiales desde la cuenca de avenamiento. El estrato donde se desarrolla el rizoma de la vegetación hidrófila corresponde a 1 – 2 m de espesor, sin embargo, la mayor biomasa de raíces se concentra en el primer metro de profundidad. No debemos olvidar, tal como se señaló anteriormente que la capilaridad que ocurre a partir del nivel freático no supera más allá de 1 o 2 m.
- **Condiciones climáticas:** las condiciones climáticas locales regulan la dinámica temporal de los humedales, factores como las precipitaciones o temperatura del aire, afectan la expresión de los componentes biológicos.

#### 5.4 Seguimiento ambiental

En la tabla 5.1 se propone el programa de seguimiento ambiental mínimo para humedales altoandinos.

**Tabla 5.1.** Programa de seguimiento ambiental mínimo.

Variable	Diseño muestreo
Caudal	Controlar mensualmente en vertientes
Nivel freático	Controlar en periodo de actividad y latencia de la vegetación hidrófila
Humedad y salinidad del suelo	Controlar en periodo de actividad y latencia de la vegetación hidrófila
Área laguna terminal	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas.
Conductividad eléctrica	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas, en sector canal y laguna.
Altura de escurrimiento	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas, en sector canal y laguna.
Composición y cobertura vegetación hidrófila	Controlar en periodo lluvioso y al final periodo de latencia
Cobertura macrófitas	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas
Composición y abundancia fauna íctica	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas
Composición y abundancia de avifauna	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas
Biomasa microalgas bentónicas	Controlar en periodo lluvioso y de bajas temperaturas

## 5.5 Criterios y umbrales

Los bofedales y vegas son humedales que dependen del afloramiento de agua subterránea, como condición basal para su sustentabilidad. Sin embargo, las condiciones climáticas regulan la variabilidad temporal. El patrón temporal está dado por 2 periodos: i) un periodo de mayor actividad biológica, dado por la ocurrencia de precipitaciones durante el invierno boliviano e incremento en la temperatura y, ii) un periodo de menor actividad o latencia, donde los organismos reducen su actividad debido a bajas temperaturas del aire. Durante el periodo de latencia se mezclan 2 procesos ecofisiológicos, una condición de estrés térmico por bajas temperaturas y estrés hídrico por déficit de agua. Espacialmente se produce una segregación, donde los ecosistemas hidrófilos dulceacuícolas se localizan en la vecindad de las surgencias y los ecosistemas hálinos más distantes, en función del gradiente de salinidad del agua y suelo. En el agua se han determinado valores de 13 g/l de salinidad, como umbrales de separación entre ecosistemas dulceacuícolas y hálinos.

De este modo, para evaluar la condición ambiental de este tipo de humedales es necesario utilizar como criterio, un periodo de mayor actividad entre diciembre-abril, y un periodo de latencia entre mayo-noviembre. Estos periodos están definidos para humedales ubicados a alturas mayores de 3.500 m.s.n.m, a menores alturas, se mantienen los periodos pero disminuyen las diferencias entre los estados de latencia y actividad.

Los umbrales ambientales están definidos por la superficie de los componentes del humedal: superficie de lagunas terminales, vegetación azonal hidrófila<sup>13</sup> y vegetación zonal (ej. pajonal hídrico). La definición de la superficie a conservar depende de cada humedal, es posible plantear la superficie actual, o bien, un rango establecido en función de la superficie histórica. Para analizar cambios en superficie históricos se utilizan frecuentemente imágenes satelitales Landsat, disponibles aproximadamente desde 1985. Es importante señalar que a una escala de tiempo mayor, este tipo de humedales probablemente se seca, proceso que forma parte de su dinámica natural.

Los niveles freáticos son un referente ambiental importante para la vegetación hidrófila de bofedales y vegas, si consideramos que el ascenso capilar del agua no supera en promedio los 50 cm. y que la longitud promedio de raíces de la vegetación hidrófila no supera 1 m, es posible plantear como umbral un nivel freático entre 1 a 1.5 m de profundidad. Niveles freáticos por debajo de 1.5 m de profundidad, provocan el "colgamiento" de la vegetación hidrófila, desconectando la vegetación de los recursos hídricos subterráneos. Es importante señalar que estos umbrales deben ser calibrados para cada humedal en particular, en función del tipo de vegetación.

---

<sup>13</sup> Vegetación azonal: organismos que dependen de recursos hídricos superficiales.

### 5.6 Sistema alerta temprana

Existen varios tipos de indicadores ambientales que pueden ser utilizados en un sistema de alerta temprana:

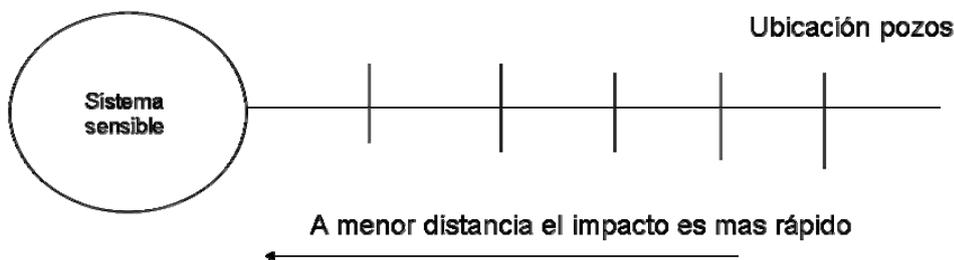
Areal: superficie de lagunas terminales, vegetación azonal hidrófila y vegetación zonal.

Salud de la vegetación: corresponde a la condición ecofisiológica o fenológica de la vegetación hidrófila durante el periodo de crecimiento o mayor actividad. La vegetación que se encuentra en el borde externo del humedal, es la más sensible a variaciones en la disponibilidad de los recursos hídricos, debido a que por efectos topográficos locales se encuentra en el límite de acceso a recursos hídricos subterráneos, variaciones menores en la disponibilidad de agua afectan la salud de la vegetación.

Nivel freático: profundidad del nivel saturado de agua en la zona donde se encuentra la vegetación hidrófila.

La escala de tiempo a la cual se produce efectos sobre los humedales por extracción de agua subterránea, depende de la distancia de los pozos de bombeo (Figura 5.13).

**Figura 5.13.** Tiempo de respuesta de un sistema sensible a la ubicación de pozos de extracción de agua subterránea.



### 5.7 Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación de bofedales y vegas están centradas en la restitución hídrica. Existen varios ejemplos donde la restitución superficial de agua permitió la conservación y/o recuperación de los humedales (ej. Salar de Punta Negra y Coposa). Sin embargo, es importante señalar que la reposición de agua debe considerar los requerimientos específicos de cada componente del humedal. Para el ecosistema acuático es suficiente con aportes puntuales en sitios donde originalmente drenaba el agua, en cambio, para la vegetación hidrófila se requiere un suministro más amplio que permita cubrir toda su extensión. El riego debe considerar aportes superficiales y subsuperficiales, asemejándose a un régimen natural. El caudal a suministrar debe

corresponder a la demanda hídrica específica del ecosistema acuático y vegetación hidrófila. La calidad del agua a suministrar debe ser similar a la original, principalmente referido a la salinidad.

## 6. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La información ambiental disponible debe ser sistematizada en una base de datos y presentada en mapas temáticos a una escala adecuada. Los datos deben ser analizados en función del grado de homogeneidad interna de los humedales, interacciones entre variables abióticas y bióticas.

### 6.1 Estadística descriptiva

Para evaluar la ocurrencia de cambios ambientales en los humedales derivados de procesos naturales o antrópicos, podemos usar el método AD-CI (Antes-Después-Control-Impacto) modificado por Stewart-Oaten et al. 1986<sup>14</sup>. El diseño AD-CI permite la evaluación de potenciales impactos ecológicos mediante la colecta sincrónica de datos en áreas denominadas Control e Impacto, ambas áreas monitoreadas antes y después del emplazamiento y operación del proyecto.

Tres pruebas están asociadas con el análisis ADCI, correspondientes a determinar los efectos Antes-Después (AD), Control-Impacto (CI) y el efecto interacción (Antes-Después-Control-Impacto, AD-CI).

A través de este diseño se cuantifica el aporte relativo del efecto espacial y del efecto temporal sobre el patrón de variación de las variables de estado y con el factor AD-CI se estima el impacto total del proyecto.

El análisis requiere la colecta de series de datos pareados de la variable de control (y) durante un periodo anterior y posterior al proyecto. El diseño permite detectar dos fuentes de variabilidad, una principal denominada Antes y Después (AD) y una secundaria denominada Control-Impacto (CI). El resumen del análisis se describe en Tabla 6.1 y Figura 6.1.

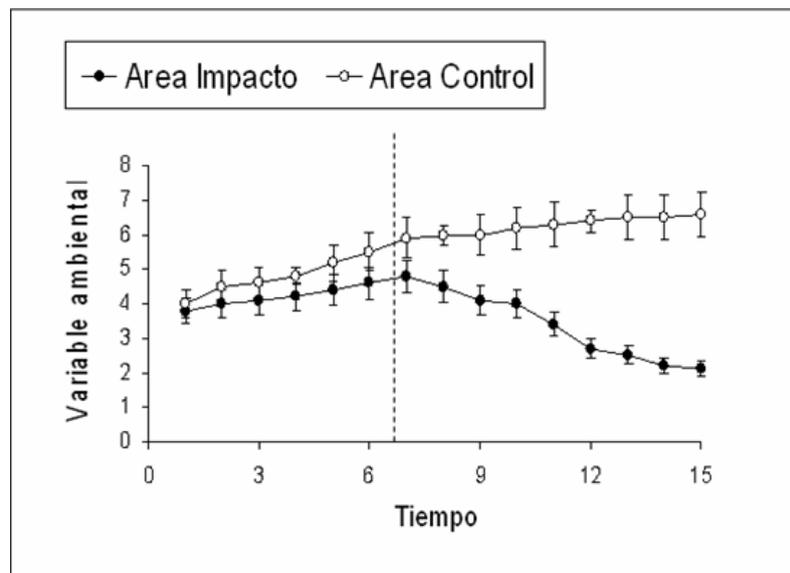
---

<sup>14</sup> Stewart-Oaten A., W.W. Murdoch & K.R. Parker. 1986. Environmental impact assessment: pseudoreplication in time? Ecology 67: 929-940.

**Tabla 6.1.** Diseño estadístico del método AD-CI

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
Antes-Después (AD)	SCAD	1	CMAD	CMAD/CME <sub>1</sub>	P <sub>AD</sub>
Error <sub>1</sub>	SCE <sub>1</sub>	n+m-2	CME <sub>1</sub>		
Control-Impacto (CI)	SCCI	1	CMCI	CMAD/CME <sub>2</sub>	P <sub>CI</sub>
AD – CI	SCAD-CI	1	CMAD-CI	CMAD-CI/CME <sub>2</sub>	P <sub>AD-CI</sub>
Error <sub>2</sub>	SCE <sub>2</sub>	n+m-2	CME <sub>2</sub>		
Total	SCT	2n + 2m - 1			

**Figura 6.1.** Expresión gráfica del método AD-CI



## 6.2 Estadística multivariada

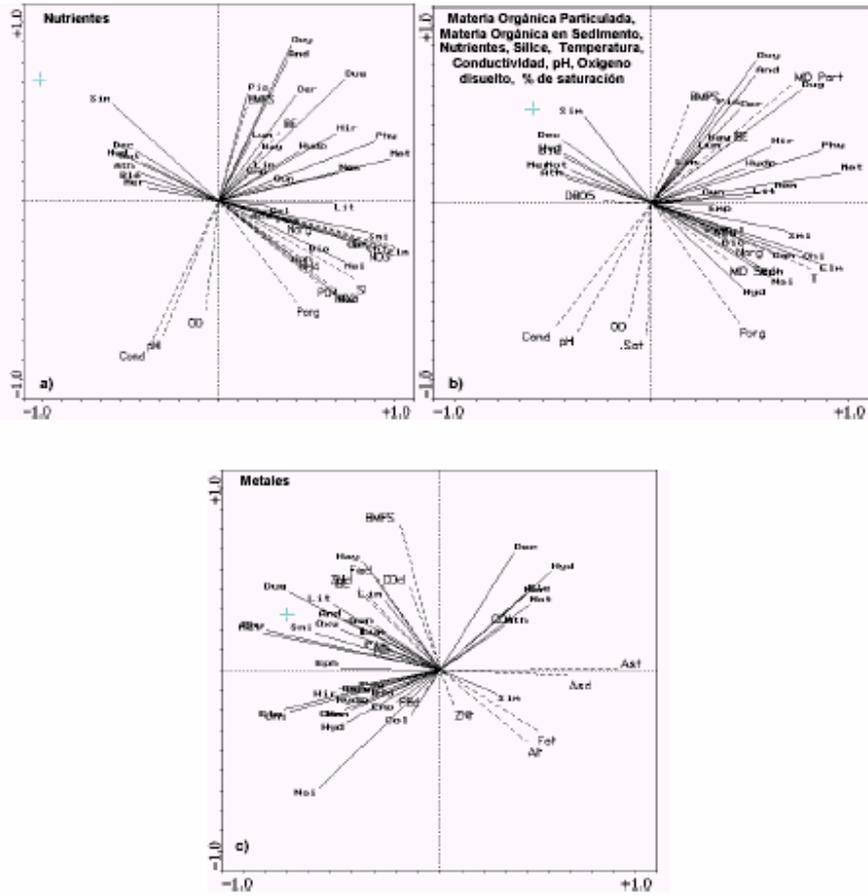
Para el análisis de la información se pueden utilizar diferentes técnicas estadísticas exploratorias y análisis de tipo directo multivariados para realizar comparaciones espaciales y temporales intra e inter humedales. Los análisis pueden estar orientados a identificar similitud en el comportamiento espacial y temporal entre los humedales, establecer la interacción entre las variables físico-químicas y biológicas, entre otras. Se puede aplicar un análisis de componentes principales (ACP) para detectar fuentes de variación espacial entre los humedales, a través del análisis de parámetros ambientales y taxa mediante el programa estadístico SYSTAT (Wilkinson et al. 1992).

Para establecer potenciales asociaciones entre variables ambientales y los taxa se pueden utilizar análisis de ordenación: a) análisis de correspondencia canónica (ACC) aplicado sobre la presencia/ausencia de los taxa y b) análisis de redundancia (AR), aplicado sobre valores de abundancia absoluta, los que deben ser transformados ( $\log(x+1)$ ) para normalizar y estabilizar la varianza. Se puede utilizar el programa CANOCO versión 4.02 (Ter Braak & Smilauer 1999).

En el análisis de correspondencia canónico (ACC) supone una respuesta unimodal de los taxa (puntos) con respecto a la combinación lineal de cada variable ambiental (flechas). A través de la proyección ortogonal sobre cada flecha (variable ambiental) se establece una posición relativa de cada punto (taxa), lo cual permite establecer mayor o menor grado de correlación dependiendo de su cercanía a la punta de la flecha. También es posible establecer una correlación positiva o negativa según su ubicación respecto de la dirección de la flecha. Una posición del punto cercana al centro del diagrama indicará escasa o ninguna correlación con variables ambientales.

El análisis de redundancia (AR) es descrito a través de diagramas de ordenación y se basa en una respuesta lineal de la abundancia de los taxa frente al rango de cada variable ambiental. En estos diagramas aparecen puntos que representan a los sitios de muestreo y flechas que representan a los taxa y a las variables ambientales. A través de los diagramas es posible detectar correlación entre sitios, taxa y variables ambientales. Flechas señalando en la misma dirección indican correlación positiva y en dirección opuesta correlación negativa. A mayor longitud de la flecha mayor es la variabilidad explicada por cada taxa y variable ambiental, siendo por ello estas variables las de mayor poder explicativo en el diagrama (Figura 6.2).

Figura 6.2. Análisis estadístico de los datos mediante método Canónico.



## 7. INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA IMPLEMENTAR UN PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL

En la Tabla 7.1 se indican los instrumentos mínimos que se requieren para realizar una evaluación ambiental de los humedales.

**Tabla 7.1.** Instrumentos necesarios para evaluar los humedales.

INSTRUMENTO	USO
Sonda multiparámetro (pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad)	Diagnóstico de las condiciones físico-químicas básicas del agua
Disco Secchi	Permite determinar el grado de turbidez del agua
Botella Van Dor con mensajero	Permite obtener muestras discretas a diferentes profundidades
GPS	Permite obtener la posición de las estaciones de muestreo en un sistema de coordenadas universal
Escandallo o barra metrada	Permite obtener la profundidad
Huincha de medir	Permite obtener medidas morfométricas de los cuerpos de agua.
Libreta apuntes y guía de evaluación ambiental	Permite determinar la condición ambiental del humedal.

## 8. FICHA BÁSICA DE EVALUACIÓN

Se propone realizar un análisis cualitativo y valoración jerárquica, mediante métodos de evaluación rápida de la condición ambiental de los humedales. A continuación se señalan los criterios que se utilizarán para evaluar la condición ambiental de los sitios de estudio:

Flujos de materia orgánica de origen antrópico: Los humedales sustentan su estructura y funcionamiento a partir de los flujos de materia orgánica proveniente de los ecosistemas terrestres, en donde la calidad y cantidad de la materia orgánica que ingresa a los humedales se relaciona estrechamente con la estructura interna de los ecosistemas acuáticos. Por ende, cambios en la calidad y cantidad de la materia orgánica modifican potencialmente la composición de especies en los humedales. La presencia de vegetación exótica, obras civiles para retención o desvío de las aguas y descarga de Riles, afectan significativamente los flujos de materia orgánica.

Análisis de la heterogeneidad espacial de los humedales a nivel de paisaje: por heterogeneidad a nivel de paisaje debemos entender la configuración de ecosistemas, la presencia de meandros, lagunas, brazos secundarios, entre otros. En términos técnicos se establece la relación que a mayor diversidad hidráulica se genera mayor riqueza biológica.

Vegetación hidrófila: la estructura vertical y horizontal de la vegetación ripariana, determina la disponibilidad de alimento y refugio para la fauna terrestre.

Presencia de Zonas Buffer: Las zonas buffer amortiguan perturbaciones originadas en los ecosistemas terrestres. Esta función es desarrollada fundamentalmente por la vegetación hidrófila, a mayor extensión de vegetación hidrófila mayor es la capacidad de resiliencia de los humedales.

Pulso inundación (régimen hidrológico): El pulso de inundación genera eventos que modifican en forma significativa los humedales, dependiendo de la morfología de las cubetas y del tiempo de residencia, ocurrirán modificaciones en la estructura y funcionamiento del ecosistema.

Conectividad intersistémica: Entre los diferentes ecosistemas existe flujo de materiales, energía y especies, los cuales son fundamentales para la estructura y funcionamiento de los humedales. La interrupción de los flujos debido a diferentes actividades de origen antrópico, como los caminos, badenes, forestación con especies exóticas, proyectos inmobiliarios, entre otros, altera la sustentabilidad de los ecosistemas.

Grado de naturalidad: El paisaje de los humedales puede ser alterado por numerosos factores, como deforestación, movimientos de tierra, caminos, residuos sólidos y líquidos, construcciones, entre otros. Cada uno de ellos contribuye potencialmente a aumentar la vulnerabilidad de los ecosistemas.

La aplicación de esta metodología tiene dos etapas, la primera se debe llevar a cabo en gabinete y corresponde al cumplimiento de los siguientes pasos:

- Definición del área de estudio, sus límites y marco administrativo en que se inserta.
- Recopilación y revisión de información previa del área de estudio en relación a las temáticas que se abordan (biodiversidad, geomorfología, hidrología, uso de suelos, etc.)
- Apoyo de material gráfico como fotos aéreas y cartografía temática.
- Identificación de los actores relevantes vinculados a la temática ambiental, gestión administrativa y residentes del área involucrada en el estudio (autoridades, pobladores, ONG, etc.).

La segunda etapa corresponde al trabajo de terreno, en el cual se deberá dar cumplimiento a los siguientes requerimientos:

- Contar con un mínimo de tres evaluadores, para realizar valoraciones en forma independiente.
- Reconocer y recorrer al menos el 80% del área de estudio.
- Realizar reuniones con los actores relevantes identificados en la etapa anterior.
- Registrar gráficamente (cámara de video o fotográfica) el paisaje, los elementos naturales del sistema a evaluar, y las especies de flora y fauna más representativas del área de estudio.

La valoración de cada índice, será medida según identificación de las categorías que se consideraron para cada uno, con su respectivo valor (Tabla 8.1). Este valor fluctuará entre 0 y 3. El valor máximo (3), corresponderá en aquellos casos en que la variable implique un sistema severamente impactado o que exhibe atributos negativos, así, un valor mínimo (0), corresponderá al otro extremo, en que el sistema presenta una condición más favorable con la biodiversidad que sustenta, o bien exhibe mayor riqueza, todo lo cual refleja una mejor calidad ambiental.

La valoración final corresponderá a un valor entre 0 y 1, el cual se obtiene al dividir el puntaje total ( $\Sigma$  del puntaje de todos los índices), por la  $\Sigma$  de los puntajes valorados. La  $\Sigma$  de todos los máximos puntajes medidos es 32.

La interpretación del valor final, corresponderá al “Grado de Vulnerabilidad del Ecosistema”, un valor igual a 0 significará una baja vulnerabilidad del ecosistema con un bajo a inexistente grado de deterioro (o una calidad ambiental buena) y un valor 1, será una alta vulnerabilidad del ecosistema con un alto grado de deterioro (o baja calidad ambiental). El Grado de Vulnerabilidad se relaciona inversamente con la riqueza de especies asociadas directamente con los ambientes acuáticos (ver línea base), ya que el índice mide la relación entre la heterogeneidad estructural y funcional y el nivel de perturbación antrópica que presentan los humedales. De este modo, un ecosistema que presente una elevada heterogeneidad espacial y temporal, y además, un bajo nivel de intervención antrópica, presentara potencialmente una mayor riqueza y una mayor resiliencia a las perturbaciones.

En el caso que un índice, a través de las variables que lo fundamentan, no sea evaluado o bien no se aplique, no deberá considerarse su valor máximo dentro del dividendo de la fórmula y así no será representado en el valor final.

**Tabla 8.1.** Criterios de valoración ambiental para los humedales.

<b>I.- Existencia de flujos de materia orgánica de origen antrópico hacia el humedal desde sistemas terrestres y fluviales:</b>		
CATEGORÍA	VARIABLE	VALORACIÓN
A	No existe evidencia.	0
B	- Presencia de plantaciones de especies exóticas - Presencia de pozos de extracción de agua en área adyacente.	1
C	Aporte de Riles en el cauce de tributarios del humedal o directamente sobre éste.	3
<b>II.- Heterogeneidad espacial del humedal a nivel de paisaje:</b>		
A	Espejo de agua irregular, con numerosos meandros formando islas y brazos.	0
B	Presencia de un espejo de agua de forma regular	3
<b>III.- Vegetación Ripariana:</b>		
A	Vegetación ripariana de altura superior a los 20 cm. desde el suelo y con una cobertura superior al 50%.	0
B	Vegetación ripariana presenta alturas sobre los 20 cm. desde el suelo y con una cobertura inferior al 50%.	1
C	Ausencia de vegetación ripariana.	3
<b>IV.- Zona Buffer:</b>		
A	Presencia de una franja continua de vegetación asociada al cuerpo de agua, superior a 12 metros de ancho desde el espejo de agua hacia el área adyacente.	0
B	Ausencia de zona buffer.	3

<b>V.- Pulso de Inundación:</b>		
A	Evidencia de crecidas o inundaciones del espejo de agua (algas suspendidas sobre la vegetación macrófita, ripariana o en la zona buffer; formación de terrazas en las riberas del cuerpo de agua).	0
B	Evidencia de flujos marinos hacia o desde el cuerpo de agua (conexión directa, presencia de relieves irregulares en la zona de contacto o transición).	1
C	Sin evidencia.	3
<b>VI. Conectividad Intersistémica</b>		
A	Flujos materia y especies no están interrumpidos	0
B	Presencia de barreras temporales que fragmentan el paisaje, interrumpiendo el flujo de especies.	2
C	Presencia de barreras permanentes que fragmentan el paisaje, interrumpiendo el flujo de especies	3
<b>VII.- Grado de Naturalidad:</b>		
A	Sin perturbación	0
B	Evidencia de deforestación en la cuenca.	1
C	Evidencia de movimientos de áridos en el cauce del río.	2
D	Evidencia de movimientos de tierra en el humedal.	3
E	Presencia de caminos u otro elemento que interrumpen los flujos hídricos hacia o desde el humedal.	3

## 9. GLOSARIO

Un aspecto fundamental de esta guía corresponde al uso de definiciones operacionales, para la interpretación correcta de los conceptos que aquí se entregan.

**Lagunas costeras:** corresponde a humedales ubicados en cuenca exorreicas costeras con escasas precipitaciones, donde las principales entradas hídricas provienen del mar. La vinculación con el mar en la mayoría de los casos es de tipo temporal y sistemática, con tiempos de residencia altos.

**Ríos:** son humedales con bajo tiempo de residencia y que en su mayoría dependen de los aportes de materia orgánica alóctona para su funcionamiento (metabolismo heterotrófico). Con excepción de aquellos tramos con baja pendiente y alta radiación, donde la producción primaria interna sostiene al ecosistema acuático (metabolismo autotrófico).

**Lagos:** corresponde a humedales con alto tiempo de residencia, ubicados en cuencas exorreicas con elevadas precipitaciones. Los aportes hídricos y materiales provenientes de los tributarios regulan frecuentemente su funcionamiento.

**Bofedales y/o vegas:** corresponden a humedales donde la principal fuente hídrica proviene de aguas subterráneas. Presentan tiempos de residencia bajos y un acoplamiento funcional entre la vegetación ripariana y los cuerpos de agua.

**Ecosistemas:** son sistemas conceptuales que representan parcialmente la naturaleza, constituidos por elementos bióticos y abióticos que interactúan recíprocamente en el tiempo y el espacio. La definición de los límites del ecosistema depende fundamentalmente de la pregunta planteada por el investigador o el fenómeno que se intenta explicar.

**Estructura:** es la configuración específica de los ecosistemas, que esta dada por los componentes bióticos y abióticos y sus interacciones. Un cambio en la configuración se traduce en un cambio del ecosistema.

**Funcionamiento:** es la expresión dinámica de la estructura y por ende, existe una coherencia y dependencia con una determinada configuración del ecosistema.

**Variable de estado:** es aquella variable que representa el comportamiento global del ecosistema, pudiendo corresponder a un componente biótico y/o abiótico, o a una integración de los mismos.

**Factor forzante:** es aquella variable que regula el funcionamiento o expresión dinámica del ecosistema.

**Cuenca hidrográfica:** corresponde a la superficie del terreno que aporta recursos hídricos y materiales a los humedales.

**Cubeta:** corresponde al perímetro mojado de los humedales, frecuentemente la morfología de la cubeta afecta el funcionamiento de los mismos.

**Metabolismo autotrófico:** esta relacionado con el origen del carbono o materia orgánica que sostiene al humedal, que en este caso corresponde a la producción primaria planctónica y/o bentónica.

**Metabolismo heterotrófico:** la principal fuente de carbono o materia orgánica es alóctona, donde el funcionamiento del humedal depende en forma estricta de la entrada de materia orgánica proveniente de los ecosistemas terrestres.

**Perturbación:** es un factor o proceso que altera el comportamiento normal de los ecosistemas, pudiendo ser de origen natural (ej. crecidas) o antrópico (ej. contaminación).

**Embalse:** Gran depósito que se forma artificialmente, por lo común cerrando la boca de un valle mediante un dique o presa, y en el que se almacenan las aguas de un río o arroyo, a fin de utilizarlas en el riego de terrenos, en el abastecimiento de poblaciones, en la producción de energía eléctrica.