

MANUAL DE DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL

TIPO LAGUNA SOMERA

04-07-2011

Cienciambiental Consultores S.A.

San Lorenzo 57, La Reina

(2) 9787168 – (2) 5813664

contacto@cienciambiental.cl

Tabla de contenidos

1.	Presentación.....	1
2.	Ecología de lagunas someras	2
2.1	Características generales y dinámica de los ecosistemas de lagunas someras.....	2
2.2	Medio Abiótico.....	3
2.2.1	Geomorfología e Hidrología	3
2.2.2	Calidad del Agua	4
2.3	Medio Biótico	6
2.3.1	Fitoplancton.....	7
2.3.2	Zooplancton.....	7
2.3.3	Flora.....	7
2.3.4	Fauna	8
2.4	Experiencias internacionales en manejo y gestion de lagunas someras.....	9
3.	Diseño del Humedal Artificial.....	11
3.1	Condiciones actuales de fauna y calidad de habitat	11
3.2	Objetivo	12
3.3	Ubicación y dimensiones.....	12
3.4	Medio Abiótico.....	13
3.5	Medio Biótico.....	15
4.	Plan de Manejo	18
4.1	Monitoreo.....	18
5.	Plan de contingencia	20
6.	Recomendaciones	21
7.	Equipo Especialistas	22
8.	Bibliografía	23
9.	FICHA TÉCNICA HUMEDAL ARTIFICIAL	24

1. PRESENTACIÓN

Este documento sirve de guía para la construcción de un humedal artificial en las futuras instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) La Cadellada, de la empresa SERVICOMUNAL SA.

El documento consta de dos partes; una primera donde se describen las bases teóricas y empíricas de la ecología de lagunas someras, con el objetivo de sentar las bases sobre las cuales se propondrá el diseño del humedal artificial. La idea es fundamentar cada decisión de diseño sobre sólidas bases ecológicas, entregándoles a los lectores del manual una serie de herramientas conceptuales para el manejo y monitoreo futuro del ecosistema artificial.

La segunda parte muestra el diseño propiamente tal, incluyendo los componentes del ecosistema artificial, tipo humedal de laguna somera, las acciones de monitoreo mínimas para obtener un adecuado manejo y algunas recomendaciones sobre qué hacer en caso de que el humedal no presente los resultados esperados.

2. ECOLOGÍA DE LAGUNAS SOMERAS

En términos generales, nuestro diseño propone la creación de una laguna somera, ecosistema del tipo humedal cuyos componentes, variables controladoras y dinámica en el tiempo están ampliamente estudiadas, tanto en la práctica como en la teoría (Scheffer & Van Nes, 2007; Scheffer, 1998). El presente documento describe, de modo resumido, la ecología de estas lagunas, para luego presentar el diseño del humedal en el anexo final.

2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES Y DINÁMICA DE LOS ECOSISTEMAS DE LAGUNAS SOMERAS

Los ecosistemas que a lo largo de este informe denominaremos como “lagunas someras” corresponden básicamente a lagunas con aguas de baja profundidad, entre los 0,4 y 2 m., con algunas características particulares que las diferencian de otros cuerpos de agua como lagos o lagunas más profundas. Primero, en las lagunas someras, la columna de agua nunca se estratifica, salvo durante algunas horas de los días más calurosos de verano. Esto provoca que la capa de mezcla cubra toda la columna de agua, lo que en palabras simples significa que el fondo y la superficie de la laguna están “conectadas”, ya que el fondo -los sedimentos- constantemente interactúan con la columna de agua, mediante flujos de nutrientes, sólidos en suspensión y/o detritus, a diferencia de un lago profundo tradicional, donde esto no ocurre (Scheffer, 1998). Segundo, las lagunas someras muestran una dinámica a nivel de ecosistema algo particular; muestran varios estados de equilibrio estable, claramente diferenciables a simple vista, alternando entre uno y otro según los niveles de nutrientes, turbidez y vegetación presente (Scheffer & Van Nes, 2007). Existen dos estados principales; el estado de aguas claras, con alta cobertura de macrófitas sumergidas y gran presencia de avifauna, y el estado de aguas turbias, sin macrófitas, aguas poco transparentes (café o verdes según la estación del año) y poca diversidad de avifauna (Figura 1).

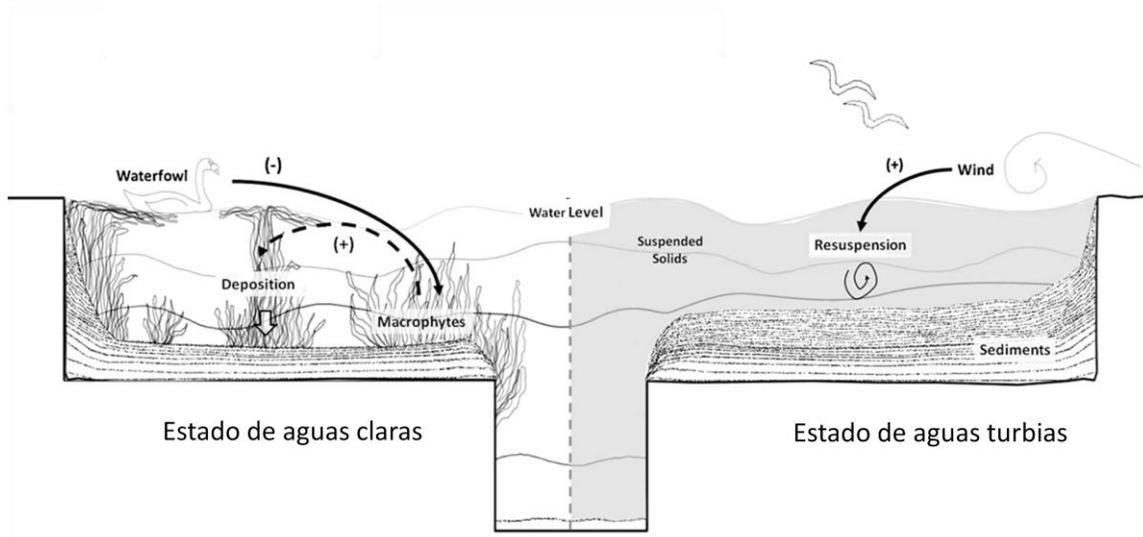


Figura 1. Dibujo de los dos estados típicos de lagunas someras; Aguas claras (izquierda) y aguas turbias (derecha). Fuente: Marin et al, 2009.

Ejemplos de lagunas someras existen miles, con cientos de artículos científicos e incluso libros dedicados a estudiar su ecología, lo que ha llevado a un fuerte desarrollo teórico y práctico sobre la dinámica de estos ecosistemas. Esta es una de las razones detrás de la decisión de recrear una laguna somera para el diseño de este humedal artificial. Para una extensa revisión sobre la ecología de lagunas someras se recomienda revisar el libro “Ecology of Shallow Lakes” de Marten Scheffer (Scheffer, 1998).

2.2 MEDIO ABIÓTICO.

El medio abiótico incluye todos los componentes del humedal artificial que no están vivos, pero que influyen de manera directa en la dinámica poblacional de las especies presentes en el ecosistema. Además, en el caso de lagunas someras, son capaces de determinar las funciones y servicios ecosistémicos que el humedal genera, como la de servir de hábitat para la avifauna local.

2.2.1 Geomorfología e Hidrología

Las principales variables a considerar en el diseño y construcción de la estructura de la laguna son la profundidad de la laguna y el área expuesta al viento, ya que lo que se busca es controlar la resuspensión de sedimentos (ver mas adelante), proceso controlado precisamente por estas dos variables. En términos coloquiales, el viento genera olas en la superficie de la laguna, y los sedimentos son resuspendidos cuando el movimiento provocado por estas olas “toca” el fondo

con suficiente fuerza para resuspender los sedimentos. Es decir, se requiere de un mínimo de velocidad de viento para que los sedimentos sean resuspendidos. Este mínimo depende de; profundidad de la laguna, área de “fetch” o superficie expuesta al viento, tipo de sedimento y la presencia o ausencia de vegetación sumergida.

Otra variable importante de controlar es el nivel del agua. Variaciones abruptas en el nivel de las aguas pueden provocar cambios catastróficos en una laguna somera. Disminuciones drásticas del nivel del agua tienen efectos mixtos. Pueden afectar negativamente las poblaciones de macrófitas sumergidas por efecto de la desecación, al exponerlas al efecto de las heladas o al facilitar la resuspensión de sedimentos. Por otra parte, la misma baja en el nivel del agua puede favorecer el reclutamiento de nuevos individuos si esta ocurre en Primavera (Scheffer, 1998). Asimismo, aumentos del nivel del agua pueden disminuir la penetración de la luz afectando la sobrevivencia de la vegetación sumergida.

Finalmente, otra variable que influye sobre la dinámica ecológica de esta clase de ecosistemas es el tiempo de residencia del agua en la laguna. El tiempo de residencia determina en parte el flujo de nutrientes en la laguna. A más tiempo de residencia, más posibilidades existen de que los nutrientes se hagan biodisponibles desde los dos principales flujos de nutrientes en una laguna somera; las descargas de agua y los sedimentos. Si la laguna recibe un agua rica en nutrientes, mientras más corto sea el tiempo de residencia, menos tiempo tienen los diferentes componentes bióticos del ecosistema para acceder a estos nutrientes. Adicionalmente, mientras menos tiempo esté el agua en la laguna, menos probabilidades habrá de que los sedimentos descarguen nutrientes al agua.

2.2.2 Calidad del Agua

2.2.2.1 Transparencia

En una laguna somera, el régimen lumínico está determinado por 3 factores; fitoplancton, sólidos en suspensión (SS) y detritus. Siendo que el diseño de este humedal apunta a una laguna de aguas claras, se debe tener particular cuidado en estas variables, y mantenerlas bajas siempre. El fitoplancton puede ser controlado mediante los niveles de fósforo (ver siguiente sección). Los sólidos en suspensión provienen principalmente de dos fuentes, del afluente y de los sedimentos, y una tercera fuente eventual sería el polvo en suspensión. A diferencia del fitoplancton, los SS se mantienen solo por un corto tiempo afectando la transparencia, ya que eventualmente se depositan en el fondo. Considerando la profundidad de estas lagunas, la mayoría de los tipos de SS se depositarían en menos de un día, siempre y cuando no exista resuspensión por viento. El

detritus tiene la ventaja de que su único origen, como factor que afecta la transparencia, proviene de los sedimentos, por lo que solo afecta la transparencia en eventos de vientos fuertes.

En resumen, para el diseño de este humedal artificial, se debe proteger la laguna del viento y evitar la descarga de grandes cantidades de SS o fósforo desde el afluente. Las medidas de diseño planeadas para lograr estos efectos serán descritas más adelante.

2.2.2.2 Nutrientes

En lagunas someras, son dos los nutrientes que deben ser monitoreados y controlados; el Fósforo y el Nitrógeno. El fósforo es el principal nutriente necesario para el crecimiento del fitoplancton. Un aumento descontrolado de la concentración de fósforo puede llevar a una explosión de fitoplancton -o florecimiento- que enturbia el agua y puede provocar un cambio de estado desde uno de aguas claras a uno de aguas turbias. Por estos motivos, el fósforo debe mantenerse en baja concentración. El fósforo en una laguna somera proviene de dos fuentes principales; del afluente de la laguna y de sus sedimentos, que pueden actuar como fuente o sumidero de fósforo según las condiciones de la laguna. El fósforo en el agua está presente en diferentes formas (Figura 2), y la única biodisponible directamente para el fitoplancton es el fósforo soluble reactivo. Una vez en el agua, el fósforo no utilizado por la biota es depositado en los sedimentos. Una vez ahí, puede almacenarse, quedando atrapado en los sedimentos como fósforo no-reactivo.

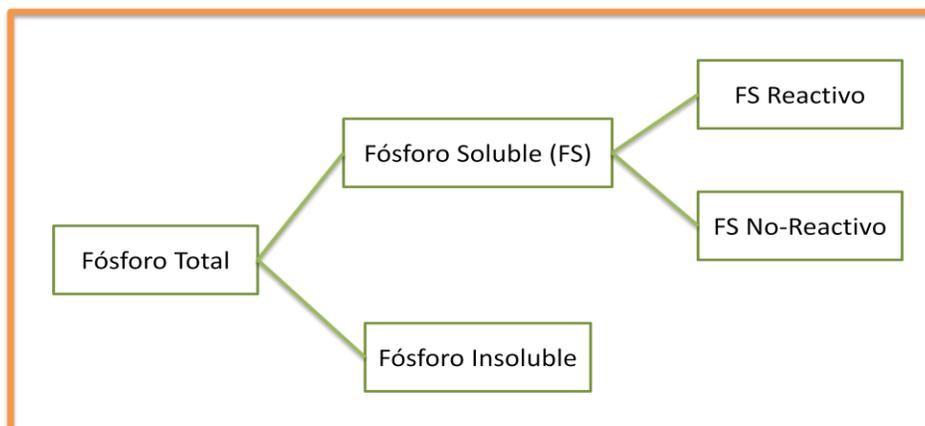


Figura 2. Distintas formas de fósforo en la columna de agua.

Para que esto ocurra deben cumplirse dos condiciones; la presencia de Hierro y un ambiente aeróbico. Cuando estas condiciones se cumplen, los sedimentos actúan como un sumidero de fósforo, capturándolo. Sin embargo, este proceso “carga” los sedimentos con fósforo, y en cualquier evento en que esas condiciones no se cumplen (ej. en primavera cuando aumenta la actividad de descomposición, provocando un ambiente anaeróbico en los sedimentos), el fósforo es liberado de vuelta a la columna de agua, actuando como fuente de nutrientes. Un esquema simplificado se muestra en la Figura 3.

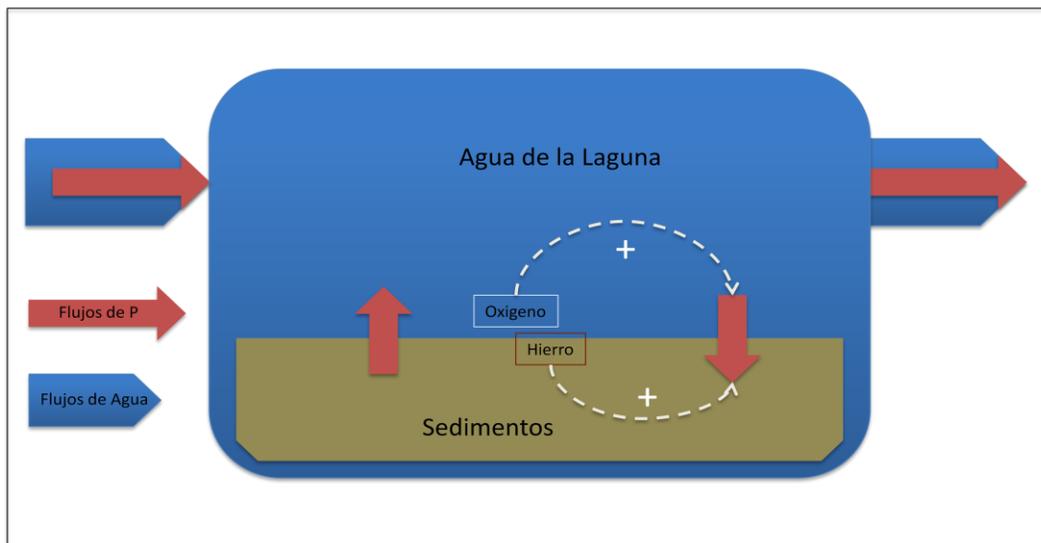


Figura 3. Principales flujos de fósforo y agua en la laguna.

El nitrógeno por su parte es principalmente utilizado por las plantas para su crecimiento. Sin embargo, no se registran casos de cambios de estado provocados por exceso de nitrógeno, por lo que altos niveles de este nutriente no deberían provocar grandes cambios.

2.3 MEDIO BIÓTICO

El medio biótico corresponde a las especies de flora y fauna con que se pretende poblar el humedal, y cómo estas interactúan con el medio abiótico. Existen ciertas especies, que actúan

como “especies ingenieras”¹ del ecosistema, determinando con su presencia el estado del humedal artificial (Yarrow et al, 2009).

2.3.1 Fitoplancton

El fitoplancton en lagunas someras es uno de los componentes del medio biótico mas importantes, al ser un gatillante clásico de los cambios de estado desde un estado de aguas claras a uno de aguas turbias. El mecanismo más estudiado y observado empíricamente es el siguiente: un aumento paulatino del nivel de fósforo en el agua -o eutrofización-, hasta cruzar cierto umbral, provoca un florecimiento explosivo de fitoplancton, disminuyendo drásticamente la penetración de la luz en la columna de agua. Esta disminución afecta la fotosíntesis de las macrófitas sumergidas. Al desaparecer las plantas, los sedimentos vuelven a estar disponible para la resuspension por efecto del viento, generando un ciclo de retroalimentación positiva que disminuye aún más la penetración de la luz. De esta manera, solo se necesita que esto ocurra en una zona de la laguna para que finalmente se enturbie la laguna completa. Este estado de aguas turbias se mantiene ya que el fósforo de los sedimentos también es resuspendido, lo que provoca que la alta concentración de fitoplancton se mantenga en el tiempo (Marin et al, 2009).

2.3.2 Zooplancton

El zooplancton es el controlador natural de los florecimientos de fitoplancton. Este es su papel fundamental en una laguna somera. Además, sirven de alimento para peces. Otra interacción a destacar es la del zooplancton con la vegetación sumergida; esta actúa como refugio del zooplancton frente a sus depredadores. Entonces, al aumentar la sobrevivencia del zooplancton, la vegetación sumergida también sirve para controlar los niveles de fitoplancton.

2.3.3 Flora

2.3.3.1 Superficial Terrestre

La flora superficial terrestre cumple principalmente dos funciones respecto a la dinámica de la laguna somera. Primero, sirve como hábitat y sitio de nidificación para especies de avifauna. Su otra función es la de proteger la superficie de la laguna del efecto del viento. Especies leñosas y/o arbustivas como el Guayacán (*Porlieria chilensis*), el Algarrobo (*Prosopis chilensis*), el Cenizo

¹ Una especie es considerada una “ingeniera ecosistémica” cuando son organismos capaces de crear o modificar hábitat (Jones et al, 1994).

(*Atriplex phillipi*), la Tatora (*Typha angustifolia*) o la Cola de Zorro (*Cortaderia araucana*), presentes en el ecosistema del humedal Batuco, son algunos ejemplos de especies que cumplen estas funciones.

2.3.3.2 Macrófitas

La vegetación sumergida actúa como un ingeniero del ecosistema en una laguna somera, determinando con su presencia el estado de esta. Sus efectos son múltiples, y serán tratados someramente en esta sección. Para una revisión más completa ver Yarrow et al, 2009.

La presencia de algunas macrófitas sumergidas como las del género *Egeria*, *Chara*, o el Pinito de Agua, que forman densos parches verdes bajo la superficie del agua, tiene varios efectos. Primero, eliminan la resuspensión por viento de los sedimentos, al impedir mecánicamente que las olas generadas lleguen al fondo. Producto de este efecto, aumentan la depositación de sedimentos, aumentando la transparencia del agua. En términos de nutrientes, actúan como sumideros de nitrógeno, disminuyendo la concentración de este nutriente en el agua. En el caso del fósforo, sus efectos son mixtos. Al disminuir la resuspensión, inhiben el flujo de fósforo desde los sedimentos al agua. Sin embargo, producen detritus, que aumenta las probabilidades de anoxia en los sedimentos y la liberación de fósforo desde el fondo. Adicionalmente, este tipo de macrófitas puede obtener sus nutrientes tanto de la columna de agua como de los sedimentos, generando un flujo lento de fósforo desde los sedimentos -al utilizarlo para su crecimiento- a la columna de agua -cuando el detritus generado por la planta es descompuesto en el fondo de la laguna y liberado al agua.

2.3.3.3 Otras especies acuáticas

Existe otro estado de equilibrio asociado a otra especie acuática, las del género *Nymphaea* (Nenúfares o Lirios de agua). En este estado de equilibrio, una comunidad de *Nymphaea* cubre total o parcialmente la laguna, como se puede ver en algunos parques botánicos o en algunos cuerpos de agua en la ciudad de Valdivia y otras zonas del sur de Chile.

2.3.4 Fauna

2.3.4.1 Peces

Los efectos de la presencia de peces en una laguna somera va a depender de la dieta de estos, principalmente divididos en 2 grupos; bentívoros y zooplanctívoros. Los peces bentívoros consumen invertebrados bentónicos, y mientras forrajea levantan grandes cantidades de sedimentos, resuspendiendo fósforo y disminuyendo la claridad del agua. Experimentos de

biomanipulación en la que se retiran los peces de la laguna ha logrado grandes efectos en aumentar la transparencia del agua. Sin embargo, a bajas densidades su efecto casi desaparece. Por su parte, los peces zooplanctívoros pueden provocar florecimientos algales si su densidad es demasiado alta, al disminuir la presencia del zooplancton, el controlador natural del fitoplancton.

2.3.4.2 Anfibios y reptiles

La principal función de anfibios y reptiles es la de controlador natural de insectos. Son eficaces depredadores de moscas, mosquitos, zancudos, arañas, etc. A la vez sirven de alimento para varias especies de avifauna, como la Garza Cuca.

2.4 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN MANEJO Y GESTION DE LAGUNAS SOMERAS.

La experiencia internacional en manejo y gestión de lagunas someras muestra que esta clase de ecosistemas son una buena elección como alternativa de diseño de un humedal artificial, por varias razones. Primero, la mayoría de las lagunas someras estudiadas -en Holanda- son ecosistemas artificiales. La mayoría de éstas surgieron a partir de la construcción de pólders² a finales de la década del 50 (Scheffer, 1998), y desde entonces han sido intensamente monitorizadas y estudiadas para comprender su funcionamiento, permitiendo el desarrollo de toda una teoría respecto de la existencia de estados estables alternativos en la dinámica de los ecosistemas (Scheffer & Carpenter, 2003). Existe una gran base de datos con información de monitoreos desde los años 70 hasta la fecha para más de 180 lagunas someras, múltiples experiencias de biomanipulación de lagunas someras y mucha información respecto de cómo esta clase de ecosistemas responde a diferentes alternativas de manejo. De esta manera, toda esta experiencia internacional de más de 50 años en manejo y gestión de lagunas someras artificiales puede servir de base empírica y teórica para el manejo de esta clase de humedales artificiales.

Segundo, aún hoy existe una conferencia anual sobre lagunas someras³, centrada en el manejo, restauración y conservación de este tipo de lagunas, lo que significa que todavía sigue apareciendo información sobre el tema, se están ejecutando experimentos, probando estrategias de manejo y conservación en diferentes lagunas someras a lo largo del mundo.

² Un polder es un término holandés que describe las superficies terrestres ganadas al mar.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%B3lder>

³ <http://www.shallowlake2011.com/Default.aspx>

En vista que los resultados en la construcción de lagunas artificiales en Chile, como medida de compensación ambiental, no ha presentado resultados satisfactorios, los especialistas encargados, con formación académica específica, aplicarán el conocimiento teórico y la experiencia internacional a este diseño, considerando las particularidades de clima, topografía, vegetación y especies locales, con el objetivo de lograr una laguna somera que cumpla con los objetivos ambientales propuestos.

3. DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL

3.1 CONDICIONES ACTUALES DE FAUNA Y CALIDAD DE HABITAT

En la actualidad, tanto las piscinas de estabilización como el tranque San Rafael comprenden cuerpos de agua poco profundos, en cuyos contornos se aprecia una franja delgada de vegetación dominada por organismos de hábito arbustivo. En el tranque, y en menor medida en la piscina 3, estos bordes sirven como refugio para algunos ejemplares de avifauna que se registran en el lugar, como la tagua (*Fulica armillata*) y el pato cuchara (*Anas platalea*). Actualmente no se aprecia dominancia de plantas palustres (Helófitas) en las riberas, a pesar de registrarse este tipo de organismos en orillas de canales y esteros en el área circundante (Figura 4).



Figura 4. Vista general de las condiciones actuales del tranque San Rafael

Las condiciones del agua en las distintas piscinas y el tranque San Rafael son de alto contenido de nutrientes y fitoplancton, caracterizándose por poseer un intenso color verde (Figura 5). La presencia de aves es casi exclusiva del tranque, distribuyéndose la mayoría de los ejemplares en él. La abundancia de aves se va reduciendo hacia las piscinas de estabilización 3 y 2, en ese orden, probablemente debido a la decreciente calidad del agua que presentan respectivamente dichas piscinas.



Figura 5. Detalle de características del agua en el tranque San Rafael.

3.2 OBJETIVO

El diseño propuesto en este informe enumera las características que debería tener la laguna 2, de la PTAS La Cadellada, para que ésta se convierta en un humedal artificial del tipo laguna somera, con alta biomasa de macrófitas sumergidas y riberas de flora nativa, de manera que el humedal artificial se integre como un nuevo sitio disponible para la avifauna del ecosistema humedal Batuco. El objetivo de este diseño es la restauración de este lugar para servir como hábitat de las especies de avifauna presentes actualmente en el Tranque San Rafael y que forme parte del sistema de lagunas del humedal Batuco.

Los sistemas de aguas claras se caracterizan por sustentar una mayor biodiversidad de aves que los sistemas de aguas turbias, al poseer una mayor diversidad de recursos disponibles como alimento para la avifauna: varios tipos de macrófitas, peces y un bentos con mayor diversidad (Scheffer, 1998). De esta manera, si bien el área del nuevo humedal es menor a la del Tranque San Rafael, el diseño propuesto implica un mejor hábitat y de una mejor calidad.

3.3 UBICACIÓN Y DIMENSIONES

El lugar a utilizar para el diseño de este humedal artificial es una laguna de tratamiento de la PTAS La Cabellada, de más de 110.000 m², que será secada y subdividida para albergar el nuevo humedal. La profundidad de la laguna existente es de 1,5 m.

La laguna artificial cubrirá una superficie de 50.500 m² con una profundidad de 0,4 a 0,8m.

3.4 MEDIO ABIÓTICO.

3.4.1.1 Geomorfología e Hidrología.

Se propone la creación de una laguna somera de máximo 1,0 m. de profundidad, con dos niveles, de manera de generar una caída de agua que aumente los niveles de oxígeno del agua de la laguna. Una parte de la laguna, donde el agua será ingresada, deberá tener 80 cm. de profundidad. Se deberá construir un pretil que genere una caída de agua de aproximadamente 40 cm. De esta manera, el resto de la laguna tendrá aproximadamente 40 cm de profundidad.

Los caudales de entrada y salida deben ser diseñados de manera de minimizar el tiempo de residencia del agua en la laguna, considerando que la descarga, a pesar de cumplir con la norma DS 90, tendrá niveles de nutrientes que pueden causar la eutrofización de la laguna. Adicionalmente, considerando que los sedimentos sobre los que se construirá son ricos en fósforo, un tiempo de residencia corto disminuye la liberación de fósforo desde los sedimentos. Con los caudales actuales proyectados para la operación del humedal artificial (20 l/s) el tiempo de residencia de sus aguas es de 15 días aproximadamente.

Considerando que una incorrecta hidrodinámica puede afectar negativamente el funcionamiento de la laguna, es importante que el diseño incorpore parámetros de circulación. Frente a esto, la propuesta es la existencia de entradas y salidas de agua paralelas, de manera de generar patrones de circulación homogéneos. De esta manera se evitaría la existencia de zonas del humedal artificial que acumulen sedimentos o materia orgánica. El peligro de la existencia de estas zonas es la formación de eventos de anoxia.

Para proveer un máximo de ribera aprovechable para la avifauna, se propone agregar pretilos de material compactado, para los que se utilizarán taludes variables, generando condiciones de ribera y playas aprovechables por las especies acuáticas que se desea atraer.

En algunos sectores del contorno del humedal artificial se proveerán condiciones de playa, formando la ribera con taludes tendidos que permitan la proliferación de invertebrados, los que actuarán como atractivo para especies playeras presentes en el sistema del humedal.

3.4.1.2 Calidad de Agua

La calidad de aguas a verter sobre el humedal artificial cumplirá con la tabla 3 del Decreto Supremo 90/00, que regula la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres. Estos límites se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres

CONTAMINANTE	UNIDAD	EXPRESION	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	1
Arsénico	mg/L	As	0,1
Cadmio	mg/L	Cd	0,02
Cianuro	mg/L	CN ⁻	0,5
Cobre Total	mg/L	Cu	0,1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000-70 *
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr ⁶⁺	0,2
Cromo Total	mg/L	Cr Total	2,5
DBO ₅	mgO ₂ /L	DBO ₅	35
Estaño	mg/L	Sn	0,5
Fluoruro	mg/L	F ⁻	1
Fósforo	mg/L	P	2
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	5
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	2
Manganeso	mg/L	Mn	0,5
Mercurio	mg/L	Hg	0,005
Molibdeno	mg/L	Mo	0,07
Níquel	mg/L	Ni	0,5
Nitrógeno Total ¹ **	mg/L	N	10
PH	unidad	pH	6,0 - 8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,2
SAAM	mg/L	SAAM	10
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Sedimentables	ml/1/h	S SED	5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ²⁻	1000
Sulfuros	mg/L	S ²⁻	1
Temperatura	°C	T°	30
Zinc	mg/L	Zn	5

3.4.1.3 Nutrientes

La descarga de aguas proyectadas a verter sobre el humedal artificial cumplirá con el DS 90/00, lo que implica un máximo de 2 mg/l de Fósforo y 10 mg/l de Nitrógeno. Estos niveles son altos para una laguna de aguas claras, por lo que hay que tomar varias medidas de diseño que ayuden a paliar esta alta carga de nutrientes. Adicionalmente, los sedimentos sobre los que se hará la laguna son ricos en fósforo y nitrógeno, generando una carga adicional de nutrientes.

Por esta razón, se recomienda el diseño en dos niveles. La idea es generar dos zonas en el humedal. El primer nivel, de ingreso de las aguas, tendrá una gran cobertura de helófitas o radicantes emergentes (Hauenstein, 2006) de manera de capturar la mayor cantidad de nutrientes posible antes de que el agua llegue a la laguna en sí. De esta manera el agua de alimentación pasará por un proceso de disminución de nutrientes y oxigenación antes de pasar a la laguna.

3.4.1.4 Instalaciones

En el sector medio del humedal artificial se proveerá un centro de observación de aves, formado por una construcción ligera, en la que se utilizarán materiales y revestimientos armónicos con el entorno y amigables con el medio ambiente, instalación que permitirá la observación y estudio de las especies que habiten o utilicen el humedal construido, sin perturbar sus actividades naturales, con un rango de observación que cubrirá la superficie del espejo de agua y sus riberas. En una de las esquinas del humedal, se levantará además una pasarela de observación, de madera, que permita internarse cómodamente en el sector del totoral sin afectar a las especies que allí se encuentren.

3.5 MEDIO BIÓTICO.

3.5.1.1 Fauna

La propuesta de diseño contempla la introducción de fauna íctica local de las que ya están presentes en el ecosistema del humedal Batuco como: Pejerrey chileno (*Basilichthys* sp.), la Pocha (*Cheirodon pisciculus*) o la Gambusia común (*Gambusia holbroki*).

Adicionalmente, el humedal artificial debería ser colonizado naturalmente por anfibios y reptiles, desde la zona del Tranque San Rafael y los canales de regadío existentes en las cercanías del nuevo ecosistema. La función de estas especies es la de controlador natural de mosquitos y moscas, además de alimento para la avifauna.

3.5.1.2 Flora

El diseño del humedal artificial procurará la creación de micro-hábitat de tipo litoral, generando zonas de playa con aguas someras, de manera similar a las condiciones naturales de los humedales en sus riberas. Además, para la forestación se utilizarán especies vegetales nativas, o introducidas, siguiendo un esquema escalonado, de tal manera de construir un buffer, o zona de amortiguación, similar a las formaciones naturales, con una faja arbórea/arbustiva, que utilizará especies resistentes a condiciones de saturación de suelos, hierbas litorales y plantas hidrófitas.

Para la conformación del buffer se seleccionarán especies propias de esta zona, que faciliten la actividad o instalación de especies animales específicas, proponiéndose el siguiente esquema:

- Un sector externo compuesto por una faja arbórea/arbustiva con, por ejemplo: *Acacia caven* (espino), *Salix humboldtiana* (sauce amargo) - que es utilizado por la garza cuca para su nidificación-, especies del tipo mirtáceas, como *Luma apiculata* (arrayán o chequén) y arbustos como *Cressa truxillensis* (retamo);
- Una zona de ribera, con hierbas litorales como *Eleocharis*, *Scirpus* o *Juncus*, (estoquilla)
- Un sector inundado, con especies hidrófitas como *Cortaderia araucana* (cola de zorro) y *Typha angustifolia* (totora).
- Un área sumergida, con alguna macrófita hidrófita sumergida, que cubra toda el área del humedal. Hay que considerar la dinámica estacional de esta clase de macrófitas en la elección de la especie a utilizar.

3.5.1.3 Resultados esperados

La imagen objetivo para el diseño de este humedal artificial es la de una laguna somera, con abundante vegetación superficial y sumergida, la presencia de anfibios nativos en las riberas, fauna íctica local en sus aguas y una abundante avifauna que se alimente y anide en la laguna. Para lograr esto, la propuesta de diseño, se resume de manera esquemática, en la Figura 6.

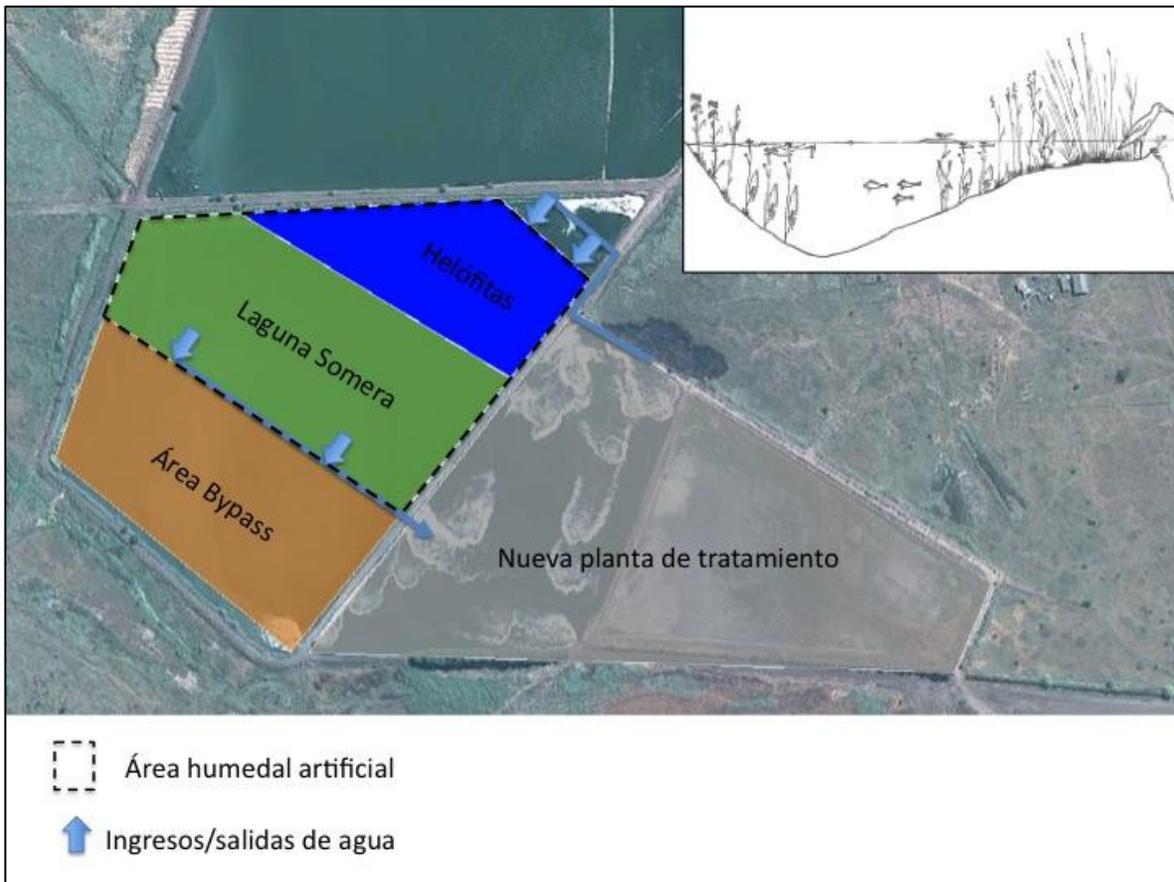


Figura 6. Esquema humedal artificial. El cuadro superior derecho muestra un corte transversal del humedal. Las áreas de las diferentes secciones del humedal que muestra la figura son sólo como referencia.

4. PLAN DE MANEJO

4.1 MONITOREO

Para el manejo y mantención del humedal artificial se propone un monitoreo como mínimo estacional, de las siguientes variables indicadores del estado de la laguna somera: turbidez, clorofila-a, sólidos en suspensión, oxígeno disuelto, fósforo total y nitrógeno total. Complementariamente se podrá muestrear invertebrados bentónicos, que como bioindicadores de la calidad de agua del humedal artificial (Figuroa et al, 2003; 2007), servirán para diagnosticarla sin la necesidad de muestreos más intensos (ej. de metales). Estas servirán como variables diagnóstico del estado del ecosistema. Adicionalmente, se propone dos inspecciones visuales a la semana para ver el estado del humedal artificial, con especial atención a la transparencia del agua, la presencia de olores, el estado de las macrófitas sumergidas y la aparición de florecimientos algales. De esta manera, el control de estas variables mediante acciones de manejo (cambios al nivel de agua, biomanipulación, etc.) permitirá recuperar el estado del humedal en casos de eventos inesperados (eventos climáticos, aumentos no planificados del caudal, empeoramiento de la calidad de agua, etc.)

Adicionalmente, se debe realizar un monitoreo de fauna estacional (para todas las estaciones, 4 veces al año) para asegurar que el hábitat artificial sea utilizado por la fauna local. En este punto es importante poder confirmar que la fauna local -en particular aquella en estado de conservación- sea capaz de utilizar el nuevo hábitat, asegurando así el cumplimiento de los objetivos de la medida de compensación. Con esto en cuenta, se elaboró el siguiente índice, aplicable a cada especie;

Especie:	
Cat. de Conservación	
Presencia/Ausencia (1/0)	
Abundancia ⁴ (Baja=1; Media=2; Alta=3)	
Nidificación (Si=2; No=0)	
Puntaje (0 a 6)	

⁴ Los criterios para definir las categorías de abundancia podrán ser definidas posteriormente (ej. por quienes realicen el primer monitoreo), pero deben quedar explícitos y ser utilizados de manera permanente.

Si aplicamos este índice a la línea de base del Tranque San Rafael, se obtiene un puntaje actual aproximado de 70, con un *mínimo* de 52 y un *máximo* de 148, según los supuestos que se tomen al calcular el índice. Hay que tener en cuenta que la línea de base no contempla abundancia, por lo que se asumieron ciertos supuestos para calcular el *puntaje actual*:

De las 24 especies de aves, 1 de mamíferos y un reptil identificadas en el Tranque según la línea de base, se consideró;

- 4 especies de aves con alta abundancia, 5 con abundancia media y 10 con abundancia baja.
- 4 especies nidificando en el Tranque, supuesto en base a que se han avistado crías de algunas especies.
- Tanto el mamífero como el reptil se consideró en baja abundancia y sin presencia de crías.
- Para estimar el *máximo puntaje* se asumió que las 24 especies estaban en alta abundancia y nidificando en el Tranque. Para el *mínimo* se asumió que las 24 especies estaban presentes en baja abundancia, sin nidificación.

Teniendo esto en cuenta, nuestra propuesta es la siguiente: se podrá considerar como cumplida la medida de compensación si al tercer (3) año de funcionamiento del humedal artificial, al realizar el monitoreo de fauna se obtenga un puntaje entre los 60 y los 80 puntos, tomando en cuenta la variabilidad natural de esta clase de sistemas, y que la línea de base, sobre la que está basado el puntaje actual del Tranque San Rafael, es solo una “instantánea” del ecosistema.

Considerando que el diseño, construcción y manejo de ecosistemas artificiales es una tarea compleja, se propone implementar un esquema de *manejo adaptativo* del humedal artificial. Esta estrategia entiende cada acción de manejo como un experimento, donde basado en el estado actual del ecosistema a manejar (en base a la información de monitoreo) se proponen pasos a seguir, en función de hipótesis científicas que permitan corroborar lo que se sabe sobre la dinámica del ecosistema. Así, los resultados de estos “experimentos”, o acciones de manejo, con un adecuado diseño, nos permiten corroborar o descartar las hipótesis sobre las que se sustenta el manejo del humedal. De esta manera, cada acción de manejo aumenta el conocimiento sobre el ecosistema manejado, mejorando la efectividad de las acciones desarrolladas a futuro.

5. PLAN DE CONTINGENCIA

En caso que el diseño propuesto no entregue los resultados esperados, se proponen una serie de medidas como parte de un plan de contingencia.

El principal riesgo asociado al diseño del humedal propuesto es su transformación en una laguna de aguas turbias, o verdes. Esta transformación tendría asociada, posiblemente, una mortandad puntual de peces y migración de avifauna (Scheffer, 1998). La zona más somera del humedal artificial, con cobertura de helófitas, no debería verse afectada por estos florecimientos. Pueden ocurrir florecimiento temporales durante Primavera, frente a los que no debería ser necesario tomar ninguna acción de manejo. En el caso de que el evento permanezca por más de una temporada, será necesario activar el plan de contingencia. Con estos antecedentes, el plan de contingencia tiene dos etapas; Limpieza y Restauración.

Limpieza: En esta etapa es importante retirar rápidamente los peces muertos y cualquier otro elemento que pueda empeorar la calidad del agua producto de su putrefacción (exceso de algas, macrófitas desraizadas, etc.) Se recomienda también disminuir los niveles de agua al mínimo posible para mejorar la condiciones de luz de la columna de agua. Esta etapa debe ejecutarse apenas ocurra el florecimiento, que de ocurrir, sería en primavera o verano.

La limpieza se efectuará manualmente, utilizando mallas o ganchos, procurando no remover el sedimento, retirando los elementos a desechar en una balsa flotante.

Restauración: La etapa de restauración debe ejecutarse a fines del invierno o principios de la primavera. Lo primero es bajar los niveles del agua hasta exponer los sedimentos, ya que facilita el reclutamiento de nuevos individuos de macrófitas (Scheffer & Van Nes, 2007). Luego hay que replantar el fondo del humedal con la especie de macrófitas sumergida utilizada anteriormente, de manera de recuperar su cobertura. Luego hay que volver a inundar el humedal con agua tratada de la planta, asegurándose que la luz penetre hasta el fondo de la laguna, de manera que la macrófitas recupere su cobertura, lo que debería ocurrir a fines de la primavera. Una vez recuperada la cobertura de la macrófitas en el humedal artificial, se debería repoblar con fauna íctica local, en tamaños juveniles.

Adicionalmente, si al tercer año el humedal artificial no es colonizado por anfibios y reptiles, se hará una campaña de rescate y relocalización de estas especies desde el Humedal Batuco y en las cercanías del Tranque San Rafael hasta el nuevo humedal.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar la experiencia de la creación de este humedal artificial como una oportunidad para desarrollar investigaciones en Ecología de lagunas someras. Son pocos los lugares de esta naturaleza en Chile, y pocas las experiencias exitosas de restauración o diseño de ecosistemas artificiales en Chile. Un convenio con alguna empresa, universidad o fundación que realice investigaciones en este tipo de ecosistemas podría ser un posible esquema para la ejecución de esta recomendación. Las actividades de investigación podrían ser financiadas mediante exenciones tributarias o mediante la postulación a fondos CORFO de innovación en la empresa.

7. EQUIPO ESPECIALISTAS

El equipo de especialistas a cargo del diseño de este humedal artificial está compuesto por:

- Italo Serey, Doctor en Ciencias Naturales. Biologie Vegetal, Ecologie. 1978. Universidad de Rennes, Francia.
- Antonio Tironi, PhD (c) en Ecología y Biología Evolutiva. Universidad de Chile, 2011
- Sergio Moraga, MSc. (c) en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile.
- Alex Oporto, MSc. en Ciencias, mención Ecología. Universidad de Chile, 2010.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Figueroa R., Palma A., Ruiz V., Niell X. 2007. Análisis comparativo de índices bióticos utilizados en la evaluación de la calidad de las aguas en un río mediterráneo de Chile: río Chillán, VIII Región. *Revista Chilena de Historia Natural* 80: 225-242
2. Figueroa R., Valdovinos C., Araya E., Parra O. 2003. Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua del sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 76: 275-285.
3. Hauenstein E. 2006. Visión sinóptica de los macrófitos dulceacuícolas de Chile. *Gayana* 70(1): 16-23.
4. Marin, VH., Tironi, A., Delgado, LE., Contreras, M., Novoa, F., Torres-Gomez, M., Garreaud, R. 2009. On the sudden disappearance of *Egeria densa* from a Ramsar wetland site of Southern Chile: a climatic event trigger model. *Ecological Modelling* 220: 1752–1763.
5. Scheffer M, Carpenter SR. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution* 18: 648-656.
6. Scheffer M, van Nes EH. 2007. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia* 584: 455-466.
7. Scheffer M. 1998. *Ecology of Shallow Lakes*. Chapman and Hall, Londres.
8. Yarrow, M., Marin, VH., Finlayson M., Tironi, A., Delgado, LE., Fischer F., 2009. The ecology of *Egeria densa* Planchon (Liliopsida: Alismatales): an ecosystem engineer in the Río Cruces wetland, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 299-313.

9. FICHA TÉCNICA HUMEDAL ARTIFICIAL

FICHA TÉCNICA HUMEDAL ARTIFICIAL / FICHA PARA MONITOREOS

Caracterización de la Laguna		Fecha:	
Área (m ²)	50.500		
Profundidad (m)	Máximo	Mínimo	Promedio
	0,8	0,4	0,52
Playa (m)	800		
Nutrientes (mg/L)	Fósforo T	Nitrógeno T	
pH			
Turbidez (m)			
Clorofila-a (mg/l)			
SST (mg/l)			
Oxígeno Disuelto (mg/l)			
DBO (mgO ₂ /l)			
Caracterización del afluente			
Caudal (l/s)	20		
Nutrientes (mg/L)	FT	NT	
	2	10	
pH	6,0 – 8,5		
SST (mg/l)	80		
DBO (mgO ₂ /l)	35		
Caudal de salida (l/s)	14		
Tiempo de Residencia (días)	15		
Flora Superficial (sp)			
Flora Sumergida (sp)			
Fauna Íctica (sp;kg/m ³)			