





Recibido 24/06/2019  
Aceptado 28/06/2019

# PROPUESTA DE HUMEDALES ARTIFICIALES, IMPULSORES DE BIODIVERSIDAD, QUE DEPURAN AGUAS CONTAMINADAS PARA LA RECUPERACIÓN DE LAGUNAS URBANAS DE CONCEPCIÓN

A PROPOSAL FOR ARTIFICIAL WETLANDS, BIODIVERSITY DRIVERS  
THAT PURIFY POLLUTED WATERS FOR THE RECOVERY OF URBAN  
LAKES IN CONCEPCIÓN, CHILE

PEDRO EULOGIO CISTERNA-OSORIO

Doctor

Docente Dpto Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío  
Concepción, Chile

<https://orcid.org/0000-0003-0460-5640>  
[pcisterna@ubiobio.cl](mailto:pcisterna@ubiobio.cl)

LEONEL PÉREZ BUSTAMANTE

Doctor en Urbanismo

Decano Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Universidad de Concepción, Investigador y docente, Centro CEDEUS,  
Concepción, Chile

<https://orcid.org/0000-0001-6661-6260>  
[leperez@udec.cl](mailto:leperez@udec.cl)

## RESUMEN

Concepción posee cinco lagunas urbanas que cumplen diversos servicios ambientales (recreación, eventuales suministros de agua para fines variados, estanques de acumulación de aguas lluvias) pero muy particularmente constituyen espacios de biodiversidad, y es ahí donde radica su aporte sustancial y singular para la ciudad.

El objetivo de la investigación aquí presentada es demostrar cómo a partir del diseño y el uso de humedales artificiales, como tecnologías de tratamiento a las aguas que ingresan a las lagunas urbanas de Concepción, se genera un mejoramiento ambiental de estas lagunas y un incremento de la biodiversidad en el entorno. El análisis del cuerpo de agua se basa principalmente en un análisis planimétrico, a través de la observación y el registro fotográfico, y en un estudio de los indicadores de calidad fisicoquímica -tales como nitrógeno total (NT) y fósforo (P)- y ambiental, que se evaluará con la presencia de macrófitas. Dentro de los principales aportes constatados, destaca que la instalación de los humedales artificiales antes de la entrada a la laguna disminuye considerablemente el poder contaminante de las aguas ingresantes y, con ello, la cadena de deterioro termina, mejorando el ecosistema urbano. De esta forma, la propuesta deviene un eficiente instrumento para aumentar la biodiversidad y la calidad de vida de las personas.

## Palabras clave

biodiversidad, lagunas urbanas, humedales artificiales

## ABSTRACT

In Concepción, Chile there are five urban lakes that provide different environmental services (recreation, occasional water supplies for various purposes, rainwater accumulation ponds), but very specifically they constitute biodiversity spaces and this is where their substantial and unique contribution lies for the city. The objective of the research presented here is to demonstrate how, based on the design and use of artificial wetlands as technologies to treat the waters entering Concepción's urban lakes, an environmental improvement is made to these lakes and the biodiversity of the surrounding environment increases. The analysis of the bodies of water was mainly based on a planimetric analysis, through observation and a photographic record, and a study of physicochemical quality indicators - such as total nitrogen (TN) and phosphorus (P) - and environmental quality, which was evaluated with the presence of macrophytes. Among the main contributions established, it is noteworthy to mention that the installation of artificial wetlands before lake entrances significantly reduces the polluting power of incoming waters and the chain of deterioration ends, thereby improving the urban ecosystem. In this way, the proposal becomes an efficient instrument to increase biodiversity and people's quality of life.

## Keywords

biodiversity, urban lakes, artificial wetlands

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Concepción posee un conjunto considerable de recursos hídricos, los ríos Biobío y Andalién, el estero Nonguén y 5 lagunas urbanas: Tres Pascualas, Lo Galindo, Lo Méndez, Redonda y lo Custodio.

En cuanto a sus profundidades la Laguna Redonda es la que presenta una mayor profundidad, alcanzando los 19 metros en su nivel máximo, y la Laguna Lo Custodio es la de menor magnitud, con una altura de la columna de agua del orden de 1 metro.

Los lagos urbanos difieren mucho en su tamaño, profundidad, relación área drenada respecto a la superficie del espejo de agua, balance hídrico, ciclo de nutrientes, estado trófico, de los grandes lagos localizados en zonas rurales; sin embargo, en general, han recibido poca atención en los estudios limnológicos (García-Gil y Camacho, 2001). Ya sean de origen natural o contruidos por el hombre, son mayormente manejados para recreación, suministro de agua para riego u otro uso directo, con el consecuente control de nutrientes (Schurler y Simpson, 2001). Los lagos urbanos son ambientes acuáticos muy importantes para las grandes ciudades, ya que representan significativos lugares de esparcimiento para sus habitantes por lo cual son visitados frecuentemente por un gran número de personas (Schurler y Simpson, 2003). A menudo, presentan un estado hipereutrófico (Birch y McCaskie, 1999). Desde la antigüedad los lagos urbanos fueron utilizados para almacenar aguas lluvias, garantizando el suministro a la población y mejorando la calidad de vida los habitantes, lo que cambió en el siglo XX puesto que fueron contaminados debido a una mala gestión e intervención de los seres humanos (Naselli-Flores, 2008). Diversos investigadores constataron que este proceso de degradación se agravó con el cambio climático: el aumento de la temperatura y el cambio en el patrón de precipitación aceleran la eutrofización. Esta situación exige, ciertamente, la adaptación al cambio climático en la conservación y gestión de los lagos (Lu *et al.*, 2018). Otro estudio sostiene que en Concepción la temperatura media anual aumentará de los 13,0°C actuales hasta 15,6°C en 2080, y la radiación global horizontal lo hará de 355 a 366 W/m<sup>2</sup> (Rubio-Bellido, Pulido y Ureta, 2015), lo que refuerza la necesidad de implementar medidas concretas en este sentido, tales como el tratamiento a las aguas ingresantes.

Estos sistemas regulan el clima urbano, poseen elementos vivos y no vivos con interacciones entre sí, que los hacen ecosistemas sostenibles; su biodiversidad es un importante elemento paisajístico en las ciudades y constituye, desde luego, un hábitat para una variedad de especies de flora y fauna (Robitu *et al.*, 2006). A pesar de los altos niveles de nutrientes y otros contaminantes, poseen mecanismos que resisten el deterioro de la calidad del agua, ya que vinculan la producción por fotosíntesis y descomposición de los contaminantes, y dada su dinámica, evolucionan lentamente con el tiempo y el clima (Martínez *et al.*, 2008).

Laguna	Área (m <sup>2</sup> )
Lo Galindo	39.000
Lo Méndez	52.000
Redonda	40.000
Lo Custodio	3800
Las Tres Pascualas	59000

Tabla 1. Cuerpos lacustres en Concepción. Fuente: Elaboración del autor

La abundancia específica algal depende de las condiciones ambientales que influyen sobre el crecimiento y desarrollo de distintas especies y sus variaciones estacionales (Raghavendra *et al.*, 2015).

La comunidad científica ha incrementado la preocupación por estos ecosistemas y compartido el saber, de modo tal que se traduzca en políticas locales, nacionales e internacionales, orientadas a protegerlos y conservarlos (Oertli *et al.*, 2009). La Convención por la Biodiversidad, sostiene, en esa línea, que es imprescindible “tomar acciones efectivas y urgentes para detener la pérdida de biodiversidad y asegurar que el 2020 los ecosistemas sean resilientes y continúen proporcionando servicios esenciales” (Faith, 2011). Ya que la mayoría de estos sistemas hídricos son de tamaño reducido, en ellos se pueden aplicar estudios a escala sobre la dinámica de otros cuerpos de agua de mayor tamaño (Labounty, 1995). Las lagunas se encuentran entre los hábitats urbanos menos estudiados (Gledhill y James, 2012), sus servicios ecosistémicos tienen un impacto sustancial en la calidad de vida en zonas urbanas y deben abordarse en la planificación del uso del suelo ya que proporcionan beneficios con valor recreacional y cultural (Bolund y Hunhammar, 1999).

En la ciudad, los parques juegan un papel esencial en la conservación de la biodiversidad del ecosistema urbano, actuando como islas dentro de la matriz urbana. Un parámetro de biodiversidad es precisamente el porcentaje de superficie con cobertura de agua dentro de un parque que, incorporando un hábitat singular, servirá de hogar a numerosas especies. Considerado como un indicador de funcionalidad ambiental, este parámetro confirma que la existencia del recurso agua es un atributo ambiental relevante (Hernández, 2009).

Uno de los principales usos del suelo que transforman el ambiente de forma drástica e irreversible es la construcción de ciudades. La urbanización modifica la mayoría de los componentes de la cuenca hidrográfica de los ecosistemas acuáticos, alterando especialmente su hidrología, calidad del agua, calidad del hábitat físico, conectividad hidrológica, procesos ecológicos y la biodiversidad (Hughes *et al.*, 2014). Uno de los fenómenos del desarrollo

urbano es que genera una fase inicial de movilización de sedimentos, causada por una mayor producción de estos sedimentos (del orden de 2 a 10 veces) (Chin, 2006) y, por consecuencia, se impactan los cuerpos lacustres existentes dentro de los límites de la ciudad.

Las cuencas hídricas de los lagos urbanos corresponden a territorio ocupado por la ciudad, de manera que el agua ingresante es un portador de los problemas de contaminación de la misma, que transporta sedimentos y afecta a la columna de agua, lo que aumenta su vulnerabilidad (Birch y McCaskie, 1999). La calidad del agua se ve afectada principalmente a través de la acumulación de nutrientes y otros contaminantes, por lo que en su mayoría se encuentran eutróficos. En efecto, los parámetros indicadores biológicos y fisicoquímicos evidencian que los lagos mesotróficos derivan a eutróficos (Figura 1) como consecuencia de la actividad antropogénica en su zona de captación, la cual acelera la tasa de eutrofización (Verma *et al.*, 2011).

Como resultado de la creciente urbanización, muchas especies ecológicamente sensibles, especialmente aquellas que dependen de hábitats particulares, experimentan pérdida y degradación del hábitat, lo que conduce a disminuciones de la población y extinciones locales (Shochat *et al.*, 2010). Mientras tanto, el aumento en el número de especies que pueden adaptarse al entorno urbano ha llevado a la homogeneización de dichas especies (McKinney, 2006). A medida que se intensifica la urbanización, las aves que viven en ecosistemas húmedos (Figura 2) enfrentan enormes desafíos ambientales (McKinney, 2015).

## ASPECTOS METODOLÓGICOS

En concreto, esta investigación se plantea desde una perspectiva integral, esto es, una que busca una ciudad sustentable y que potencia la biodiversidad, vinculando en el análisis y la síntesis en torno a un recurso natural amenazado, las lagunas de Concepción, así como también el conocimiento tecnológico del tratamiento de las aguas contaminadas, con el fin de recuperar estos cuerpos de agua urbanos y de aportar así a la gestión sustentable de la ciudad de Concepción.

Para el estudio y el diagnóstico del estado de las lagunas, en este trabajo se realizó un análisis bibliográfico que profundizó en los avances técnicos en el tratamiento de las aguas contaminadas; integrando asimismo el método de la observación y, como instrumento de registro, la fotografía. La hipótesis que se plantea es que, con la instalación previa de sistemas de tratamiento de aguas residuales, humedales de flujo sub-superficial, se recuperará la calidad ambiental de estas lagunas, espacios ambientales amenazados, y se logrará que estos cuerpos de agua urbanos sean sustentables y potencien la biodiversidad.



Figura 1. Eutrofización en Laguna Lo Custodio (2019), con urbanización muy cercana. Fuente: Fotografía de P. Cisterna.



Figura 2. Garza en Laguna Lo Custodio (2019), que desafía la condición ambiental. Fuente: Fotografía de P. Cisterna.

De este modo, se propone aplicar tecnologías de tratamiento a las aguas que ingresan a las lagunas urbanas de Concepción, con el objetivo de analizar si el proceso aplicado es sustentable y si provocará un mejoramiento ambiental de las lagunas y un incremento de la biodiversidad en el entorno.

El diseño metodológico considera además la evolución que han tenido ambas componentes y su complementariedad. El análisis del cuerpo de agua se basa fundamentalmente en un análisis planimétrico, observación y registro fotográfico, y en los indicadores de calidad fisicoquímica, tales como nitrógeno total (NT) y fósforo (P), y ambiental, que se medirá con la presencia de macrófitas. El análisis de la dimensión tecnológica se refiere al tipo de tratamiento, a sus parámetros de diseño, al tiempo de residencia hidráulico y a las eficiencias de remoción de contaminantes esperadas de DQO, NT, P, y al crecimiento de las plantas.

## DESARROLLO

### ESTADO DE LAS LAGUNAS DE CONCEPCIÓN

Las lagunas de Concepción estuvieron olvidadas, quedaron atrapadas por un tejido urbano marginal y espontáneo que nunca reconoció su presencia, sus hermosas cualidades. El mayor daño se dio producto de haber sido sometidas al vaciamiento de las aguas servidas de las viviendas que las rodeaban, que al no contar con una urbanización adecuada ni con una planificación que permitiera la recuperación de sus bordes para las personas, provocaron un efecto muy negativo para su sustentabilidad (Ramos, 2002; Parra, 2009), originado por un intensivo crecimiento urbano, basado en las edificaciones.

Las urbanizaciones principales en Concepción se caracterizan por tener una fuerte presencia de humedales con una cercanía evidente (Valdovinos, 2006). Además, en las comunas de Concepción, Hualpén, Talcahuano, Chiguayante y San Pedro de la Paz se constata que el surgimiento de zonas urbanas con presencia de elementos naturales es mayor, pues se persigue así mejorar la calidad de vida de los habitantes (Rojas, Muñoz y García, 2009).

Por tanto, las cuencas de las distintas lagunas urbanas de Concepción se han ido modificando sustancialmente, dado el progresivo cambio en los usos y coberturas del suelo. Estas modificaciones incluyen el desarrollo de actividades contaminantes, producto del crecimiento urbano, lo que, sumado a las intervenciones efectuadas en los límites de los cuerpos lacustres, han provocado la desaparición de la diversa vegetación que las circunda; área que, generalmente, se ha sustituido con césped y otras estabilizaciones artificiales. Estos cuerpos lacustres han recibido descargas de aguas lluvia de la ciudad y, como ya se ha mencionado, eventualmente de aguas servidas. Lo anterior se ha traducido en una disminución de la biodiversidad, del valor estético y recreativo de estos cuerpos de agua, restringiendo las alternativas de uso y limitando las actividades que los ciudadanos pueden hacer en el entorno y al interior de ellos. En el caso de las lagunas urbanas de Concepción, se ha realizado un seguimiento y monitoreo de los parámetros relevantes que nos informan del estado de situación de 5 lagunas de esta ciudad.

De acuerdo a los resultados (Tabla 2), se puede concluir que estos cuerpos de agua se encuentran en condiciones eutróficas a hipereutróficas. Por consiguiente, la sustentabilidad de las lagunas de Concepción, está en una condición de riesgo, lo que debe ser revertido ya que estas generan entornos de biodiversidad y son de gran interés desde una perspectiva económica, estética, ambiental y ecológica.

T	Laguna Redonda	Laguna Lo Méndez	Laguna Lo Galindo	Laguna Lo Custodio	Laguna Tres Pascualas
Nitrógeno (µg/L)	306 -500	420 - 1.720	1560 -13630	380 - 600	1.060 - 2.590
Fósforo (µg/L)	20 - 30	40 - 100	90 - 700	50 - 120	40 - 150
Clorofila a (µg/L)	7,12 - 9,63	5,44 - 66,08	17,79 - 606,91	1,9 - 2,78	2,5 - 42,68
Transparencia (m)	1,23 - 4,0	1,0 - 6,3	1,2 - 3,0	0,3 - 0,9	1,03 - 1,93

Tabla 2. Calidad de agua cuerpos lacustres en Concepción. Fuente: Baeza, 2011, pp 11

A pesar del contexto planteado, igualmente estas lagunas han sido parte de la historia de Concepción y están en la memoria ciudadana de sus habitantes: con el paso del tiempo ha ido creciendo la preocupación por ellas y se ha manifestado el interés por recuperarlas.

Ya en el plan regulador de 1960 se destacaban, en el diagnóstico, una serie de singularidades, que identificaban a Concepción: el valor del paisaje natural configurado por el Río Biobío y varias lagunas que en ese momento no presentaban los niveles de contaminación actuales. Se hablaba de una nueva imagen de ciudad, se destacaba la idea de estructurar un sistema de parques conectado por vías lentas y arboladas que articularían las áreas verdes y libres, existentes y potenciales. Dicho sistema de parques uniría al Parque Ecuador con la Universidad de Concepción y, a través de la calle Janequeo, con la laguna Las Tres Pascualas (Muñoz, 1995). La intervención en el sistema de espacios verdes es, efectivamente, una de las más factibles de materializar, ya que puede realizarse tanto en urbanizaciones existentes como en asentamientos nuevos, procurando de manera sencilla y relativamente rápida el mejoramiento en las condiciones de vida de sus habitantes (Kurbán, 2017), pero requiere gestores políticos comprometidos.

Atendiendo y complementando lo anterior, es prioritario que los planificadores y diseñadores urbanos valoren y rescaten los importantes elementos del urbanismo azul, ese nuevo concepto de la planificación urbana y territorial que estudia y maneja los cuerpos de agua urbanos de manera independiente, sin supeditarlos a otras estructuras urbanas, como la infraestructura verde, sino que los plantea como autónomos, realzando su importancia para beneficio de las urbes, proporcionada por su gran potencial estético, cultural, psicológico, educativo, espiritual, ecológico, ambiental, biológico y geoquímico (Molina y Rubio, 2016). De hecho, la voluntad comunitaria de rescatar estas lagunas, en su más amplia dimensión, ha estado siempre presente, pero las medidas concretas de conservación y recuperación han estado ausentes: eso explica su actual estado de eutrofización y de carga orgánica.

En un experimento realizado en el lago Dugie, ubicado en Olsztyn, Polonia, en la década de 1950 y 1960, este fue utilizado como colector de aguas residuales domésticas y de tormenta, lo cual lo condujo a su completa degradación. El lago fue restaurado, luego, con métodos de aireación artificial e inactivación de fósforo. Antes de la restauración, la concentración promedio de fósforo orgánico en la capa de agua superficial ascendía a 0.166 mg/l P-org y la de nitrógeno orgánico, a 3.0 mg N-org/l. Después de la restauración, estos valores disminuyeron a 0.058 mg/l P-orgánico y 2.0 mg/l de N-orgánico (Grochowska, Brzozowska y Parszuto, 2014). La alternativa más idónea y eficaz para enfrentar el problema de eutrofización en cuerpos de agua son las que están enfocadas en la remoción neta de nutrientes, única forma



Figura 3. Laguna Lo Galindo (2019), humedal natural en crecimiento incontrolado de espadañas y otras especies. Fuente: Fotografía de P. Cisterna.



Figura 4. Humedal de flujo subsuperficial con crecimiento controlado y acotado de espadañas. Fuente: Elaboración de los autores.

de generar una recuperación permanente de un cuerpo de agua. También se plantea regenerar la capacidad de los humedales adyacentes a los cuerpos de agua, para retener y amortiguar los ingresos difusos (Figura 3). La reconstitución de la macrófita arraigada es un factor clave para producir estados claros permanentes en las lagunas pampeanas, y una de las maneras más adecuadas de controlar la carga interna de nutrientes en el sedimento a través de la cosecha equilibrada de dichas macrófitas (Elisio, 2017).

En los casos que no se cuenta con humedales naturales se debe recurrir a humedales artificiales (Figura 4), como hábitat de macrófitas, los cuales desempeñan un papel importante en la alimentación, la reproducción y la vida de las aves, más aún cuando la expansión urbana se ha apoderado de los humedales en las últimas décadas, lo que ejerce una presión enorme sobre estos ecosistemas y, por lo tanto, sobre las comunidades de aves (Mao et al., 2018). Las actividades humanas, especialmente la conversión y degradación de hábitats, están causando disminuciones en la biodiversidad global, pero medidas de mitigación efectivas pueden generar cambios favorables en la biodiversidad (Newbold et al., 2015).



Figura 5. Laguna sin medida de mitigación. Fuente: Elaboración de los autores.

## CONTAMINACIÓN DE LAS LAGUNAS

### SITUACIÓN SIN INTERVENCIÓN

La presencia de contaminantes, tales como materia orgánica -nutrientes en las aguas que ingresan a las lagunas-, es la que desencadena procesos bioquímicos como la eutrofización, originada por la presencia de nitrógeno y fósforo, o bien, la putrefacción, que ocurre cuando llegan cargas considerables de materia orgánica las cuales consumen el oxígeno, desencadenando inicialmente procesos aeróbicos y, una vez agotado el oxígeno, procesos anaeróbicos que liberan olores desagradables e impactan ambientalmente la zona del entorno (figura 5).

Balance de masa en laguna por cargas contaminantes que portan aguas ingresantes: (ecuación 1)

$$dM/dt = M1 - M2 - M_b \text{ (fotosíntesis) (1)}$$

M1: Flujo másico de aguas ingresantes a laguna

M2: Flujo másico de salida de la laguna

$M_b$ : Masa orgánica biodegradada/Masa de nutrientes capturada para proceso de fotosíntesis.

La materia orgánica biodegradada se transforma en  $CO_2$  y, con los nutrientes que portan las aguas residuales, se desencadena la fotosíntesis que ocurre en el interior de la laguna, con la producción de materia vegetal. En cuanto a los nutrientes, sucede que los compuestos nitrogenados desaparecen, como tales, pero dan origen a biomasa vegetal que se acumula en la laguna, generándose lo que conocemos como “eutrofización”, crecimiento masivo de microalgas y de diversas especies de macrófitas y plantas acuáticas. Como se ve, esta dinámica es progresivamente contaminante y acumuladora de biomasa al interior de la laguna. Sin una apropiada intervención, esta situación consolida los procesos de pérdida de valor de estos cuerpos de agua urbanos, su estética paisajística, y limita sus servicios ambientales, afectando negativamente la calidad de vida de sus habitantes y, por supuesto, su condición ambiental (Figura 6).



Figura 6. Laguna Lo Custodio, sin intervención. Fuente: Elaboración de los autores.

### SITUACIÓN CON INTERVENCIÓN

En vista de lo anterior, la recuperación y protección ambiental de las masas de agua superficiales son de la mayor importancia, lo que abre ventanas para la investigación y generación de propuestas capaces de recuperar ecosistemas acuáticos que ahora están seriamente dañados, a causa de los niveles avanzados de eutrofización que presentan.

[1] Número de registro de patente: 503, INAPI, Chile, febrero 2018.

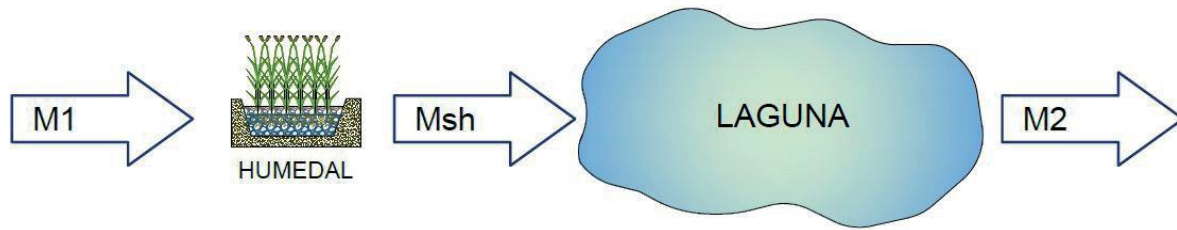


Figura 7. Intervención mediante humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Elaboración de los autores.

Es pertinente, entonces, intervenir la dinámica de las lagunas y cortar la cadena de acumulación ascendente de biomasa que se va dando en ellas, para lo cual se requiere eliminar los contaminantes que ingresan a las mismas, mediante un sistema de tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, las tecnologías de tratamiento de aguas residuales y sus (Rodrigues, Borques-Martins y Zilio, 2018) mecanismos depuradores presentan mayor o menor aplicabilidad en determinados contextos territoriales. En el caso de las lagunas, la tecnología de humedales artificiales de alto rendimiento<sup>1</sup> (Cisterna *et al.*, 2019), que incluye un dispositivo de entrada y salida, resulta idónea para su protección y recuperación, además de constituir un sistema de tratamiento de aguas residuales de bajo costo de inversión, operación y mínimo consumo energético. Desde el punto de vista urbano-ambiental, este tratamiento da origen a una combinación laguna-humedal que es armónica paisajísticamente y potencia la biodiversidad. La presencia de este tipo de hábitat particulares (humedales, pastizales, terrenos boscosos), distribuidos en la matriz urbana, podría amortiguar los efectos nocivos de la urbanización en las aves (Rodrigues, Borg(Rodrigues, Borques-Martins y Zilio, 2018) es-Martins y Zilio, 2018) y otros seres vivos de manera que el humedal, además de tratar las aguas, genera un hábitat que debe considerarse desde la planificación urbana por sus efectos en la urbe (Mao 2018).

Específicamente, los humedales de flujo subsuperficial horizontal pueden alcanzar, gracias a la aplicación de este sistema, niveles significativos de reducción de la contaminación: 90% de DBO, 60-80% de Nitrógeno, 40-65% de fósforo (Crites y Tchobanoglous, 2000). Lo que condiciona los rendimientos es la referencia del parámetro a eliminar usado para el diseño. Ahora bien, en nuestra experiencia con humedales de alto rendimiento, se logra aquí un mayor nivel de remoción de nutrientes que en los humedales convencionales (Cisterna *et al.*, 2018).

La carga contaminante ingresante determina la magnitud del impacto en la laguna y sus alrededores, por ende,

estos sistemas deben ser instalados antes del ingreso de las aguas a las lagunas, con el objeto de disminuir considerablemente su poder contaminante y su impacto. Así, se logra trasladar la zona de eutrofización al humedal artificial (Figura 7), que en consecuencia es la zona de tratamiento previa y además, hábitat para seres vivos que le dan biodiversidad a la ciudad.

#### Balance en el humedal

$$dM/dt = M1 - Msh - M_b \text{ (fotosíntesis)}$$

M1: Flujo másico de entrada

Msh: Flujo másico de salida de humedal

$M_b$ : Masa capturada por proceso de fotosíntesis en humedal

En el humedal se estimula un proceso de eutrofización dirigido, que disminuye la carga orgánica y de nutrientes en las aguas, reduciendo ostensiblemente la carga contaminante que ingresa finalmente a la laguna.

#### Balance de masas en laguna

$$dM/dt = Msh - Ms2 + M_{c_L} \text{ (fotosíntesis)}$$

Msh: Flujo másico de entrada a la laguna/Flujo másico tratado en humedal

M2: Flujo másico de salida de laguna

$M_{c_L}$ : Masa capturada por proceso de fotosíntesis en laguna

Como Msh es de menor magnitud, ya que posee una carga contaminante menor (figura 7), se asume que es de una magnitud similar a Ms2 y, por tanto,  $dM/dt$  se aproxima a 0 de acuerdo al balance de masas, con lo cual se reduce ostensiblemente el proceso de eutrofización dentro de la laguna y en consecuencia  $M_{c_L}$ .  $M_{c_L}$

La Figura 8 evidencia la calidad de un agua tratada en un humedal artificial localizado en Canteras, comuna de Quilleco, y la calidad previa antes de ingresar al mismo; de esta manera, se proyecta y visualiza la diferencia entre las situaciones con y sin intervención.





Figura 8. Muestras de agua de salida y entrada a humedal Canteras Quilleco (2019). Fuente: Fotografía de P. Cisterna.



Figura 11. Vista panorámica de la laguna Lo Custodio y entorno urbano. Fuente: Pedro Cisterna

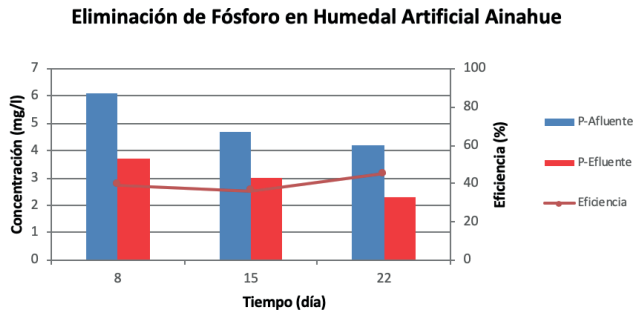


Figura 9. Remoción de nitrógeno total en humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Elaborado por P. Cisterna.

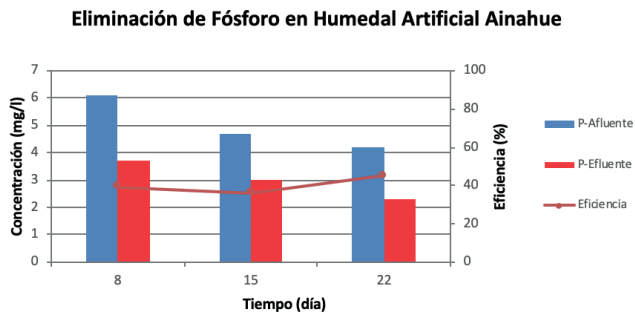


Figura 10. Remoción de nitrógeno total en humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Elaboración de P. Cisterna.



Figura 12. Plano de planta de laguna y humedal proyectado. Fuente: Autores



Figura 13. Vista proyectada de laguna con humedal incorporado. Fuente: Elaborado por P. Cisterna en base a Google Earth.

Por último, se expone la remoción de nitrógeno y fósforo en el humedal de flujo subsuperficial en Ainahue, Comuna de Hualqui, el que fue diseñado con el propósito de eliminar materia orgánica (DQO), para la que alcanzó una eficiencia por sobre el 90%; y, para la remoción de los nutrientes, logró una eficiencia del orden 40% que, no obstante, es capaz de optimizarse y llegar a un 70% (Figuras 9 y 10).

#### Ubicación de lagunas e instalación de humedales artificiales.

En la Figura 11 se muestra la ubicación de las lagunas urbanas en Concepción, que son las zonas donde se deben instalar humedales de flujo subsuperficial para la protección y conservación de las mismas.

#### Análisis de caso Laguna Lo Custodio: Propuesta de recuperación.

En aras de diseñar un humedal para esta laguna, se debió considerar el área tributaria de la misma y definir un criterio de dimensionamiento del humedal en función de eventos de pluviosidad de magnitud considerable. En esta región la pluviosidad máxima que se alcanza en el año es del orden de 1400 mm y los meses más lluviosos, de hasta los 300 mm, de manera que, para un día, se asumió una pluviosidad

de 50 mm, que representa una lluvia de gran magnitud. Para el dimensionamiento se considera que la primera media hora de este tipo de evento lluvioso, ya que el porta la carga contaminante que corresponde al periodo de lavado del suelo, las aguas posteriores son básicamente aguas lluvias con una carga contaminante despreciable las que serán by paseadas.

Por otra parte, se debió determinar el área tributaria de esta laguna que se estimó en 0.10 km<sup>2</sup>, es decir 100000 m<sup>2</sup>, asumiendo un factor de escorrentía de 0,55. Las aguas lluvias en esta condición crítica llegan a los 2750 m<sup>3</sup>/día, con un caudal horario de 110 m<sup>3</sup>/h (figura 12). Así, el volumen para media hora en condición crítica es de 55 m<sup>3</sup>. Dada la baja concentración de contaminantes en esta condición, se consideró un tiempo de residencia de dos días, que es considerablemente alto. Por tanto, el volumen calculado fue de 110 m<sup>3</sup>, cifra que supone un humedal de 35 metros de largo por 5 metros de ancho, y una profundidad de 0,6 m.

La instalación del humedal artificial da origen a una zona verde notoria y evidente que potenciará la biodiversidad y modificará el paisaje de este tradicional barrio de Concepción.

## CONCLUSIONES

Desde la práctica, la aplicación de avances tecnológicos como humedales de flujo subsuperficial para tratar las aguas ingresantes a los cuerpos de agua, resulta consistente y viable técnicamente en el caso específico de las lagunas urbanas de Concepción.

Los resultados obtenidos muestran que estos humedales artificiales son los que asumen el sacrificio de la contaminación de las aguas y liberan a las lagunas en una fracción importante de la contaminación que portan las aguas ingresantes.

También se observa que los humedales construidos son una solución dada por la naturaleza que hace posible controlar y acotar el crecimiento de las macrófitas hasta los límites de los cuerpos de agua.

Finalmente, la experiencia llevada a cabo permite concluir que la instalación de estos sistemas antes de la entrada a la laguna, disminuye considerablemente su poder contaminante y, con ello, la cadena de deterioro se quiebra, para mejorar el ecosistema urbano. Se trata, en definitiva, de un efectivo instrumento para aumentar la biodiversidad y la calidad de vida de las personas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ingenieros Civiles, Claudio Garcia y Flavio Moncada de la Universidad del Bío-Bío por su colaboración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAEZA, Carolina. Importancia y uso de los sistemas lacustres de la VIII región, con énfasis en los sistemas urbanos del gran Concepción. Concepción: Universidad de Concepción, 2011.

BIRCH, Stephen y MCCASKIE, Janice. Shallow urban lakes: a challenge for lake management. *Hydrobiologia*, 1999, vol. 395, n° 396, pp. 365-377.

BOLUND, Pert y HUNHAMMAR, Sven. Ecosystem services in urban áreas. *Ecological Economics* 29, 1999, pp. 293-301.

CISTERNA, Pedro; BAEZA M; LAZCANO, Verónica; QUIJADA, Sergio y HENRÍQUEZ A, N. Increase removal nitrogen efficiency of a horizontal subsurface flow wetlands by means of innovating of the effluent capture and evacuation device. Thesaloniki, Grecia: Fifth International Conference on Small and Decentralized Water and Wastewater Treatment, 2018.

CISTERNA, Pedro; LAZCANO, Verónica; SILVA, Gisela; LLANOS, Mauricio y FUENTES, Ignacio. Innovative effluent capture and evacuation device that increases COD removal efficiency in subsurface flow wetlands. *Processes*, 2019, vol.7, n° 7, pp. 418.

CHIN, Anne. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 2006, vol. 79, n° 3-4, pp. 460-487.

CRITES, Ron y TCHOBANOGLOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill, 2000.

ELISIO, Santiago; VALBUENA, Lisandro; BUFFONE Bárbara y ANDRINOLO Darío. El sistema renal hídrico: una herramienta para la recuperación de humedales pampeanos. En: IV Congreso Anual Científico y Tecnológico de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de Quilmes, 2017.

FAITH, Daniel. Higher-Level Targets for Ecosystem Services and Biodiversity Should Focus on Regional Capacity for Effective Trade-Offs. *Diversity*, 2011, vol. 3, pp. 1-7.

GARCÍA-GIL, Jesús y CAMACHO, Antonio. Anaerolimnología: Pequeña guía para el muestreo en aguas microaeróbicas y anóxicas en lagos y embalses estratificados. *Limnetica*, 2001, vol. 20, n° 1, pp. 179-186.

GLEDHILL, David y JAMES, Philip. Socio-economic variables as indicators of pond conservation value in an urban landscape. *Urban Ecosystems*, 2012, vol. 15, n° 4 pp. 849-861.

GROCHOWSKA, Jolanta; BRZOZOWSKA, Renata y PARSZUTO, Katarzyna. The influence of different recultivation techniques on primary production processes in a degraded urban lake. *Oceanological and Hydrological Studies*, 2014, vol. 43, n° 3, pp. 211-218.

HERNÁNDEZ, Agustín. Calidad de vida y medio ambiente urbano. Indicadores locales de sostenibilidad y calidad de vida urbana. *Revista INVI*, 2009, vol. 24, n° 65.

HUGHES, Robert; DUNHAM, Susie; MAAS-HEBNER, Kathleen; YEAKLEY, Alan; HARTE, Michael; MOLINA, Nancy; SHOCK, Clinton y KACZYNSKI, Victor. A review of urban water body challenges and approaches: rehabilitation and remediation. *Fisheries*, 2014, vol. 39, n° 1, pp. 18-29.

INAPI. Instituto Nacional de Propiedad Industrial, Chile, 2018. Disponible en: <https://www.inapi.cl/>

KURBÁN, Alejandra. Confort térmico en espacios verdes urbanos de ambientes áridos. *Hábitat Sustentable*, 2017, vol. 7, n° 1, pp. 32-43.

LABOUNTY, Joseph. What's an urban lake worth? *Lakeline*, 1995, vol. 15, pp. 6-7.

LU, Xiaotian; LU, Yonglong; CHEN, Deliang; SU, Chao; SONG, Shuai; WANG, Tiejue; TIAN, Hanqin; LIANG, Ruoyu; ZHANG, Meng y KHAN, Kifayatullah. Climate change induced eutrophication of cold-water lake in an ecologically fragile nature reserve, *Journal Environmental Sciences*, 2018, vol. 75, pp. 359-369.

MAO, Qian; LIAO, Chencan; WU, Zhaolu; GUAN, Wenbo; YANG, Wenda; TANG, Yuqin y WU, Gang. Effects of Land Cover Pattern Along Urban-Rural Gradient on Bird Diversity in Wetlands. *Diversity* [en línea], 2018, vol. 11, n° 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/d11060086>

MARTÍNEZ, María; RODRÍGUEZ, Armando; VÁSQUEZ, Alfonso y SÁNCHEZ, María del Rosario. Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico. *Hidrobiológica*, 2008, vol. 18, n° 1, pp. 1-13.

MCKINNEY, Michael. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. Bio- logical Conservation. *Scientific Research*, 2006, vol. 127, n° 3, pp. 247-260.

MCKINNEY, Michael. Wetlands as habitat in urbanizing landscapes: Patterns of bird abundance and occupancy. *Landsc. Urban Plan*, 2015, vol. 100, pp. 144–152.

MOLINA, Luis y RUBIO, Diego. Elementos de Urbanismo Azul: Lagos naturales y artificiales. *Fundación Universidad de América*, 2016, vol. 2, n° 9, pp. 22-44.

MUÑOZ, María Dolores. El plan regulador de Concepción - 1960. *Arquitecturas del Sur*, 1995, vol. 12, n° 24.

NASELLI-FLORES, Luigi. Urban Lakes: Ecosystems at Risk, Worthy of the Best care. En: SENGUPTA, M. y DALWANI, R. (eds.), Proceedings of Taal 2007: The 12th World Lake Conference, 2008, pp. 1333-1337.

NEWBOLD, T.; HUDSON, L.N.; HILL, S.L.L.; CONTU, S et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, vol. 520, pp. 45–50.

OERTLI, Beat; CÉRÉGHINO, Régis; HULL, Andrew y MIRACLE, Rosa. Pond conservation: from science to practice. *Hydrobiologia*, 2009, vol. 634, n° 1-9.

PARRA, Óscar. *Situación ambiental de las Lagunas de Concepción*. Resumen ponencia. Seminario Recuperemos las Lagunas para los Habitantes de Concepción. Eula, 2009.

RAMOS, Leonel. Concepción, su planeamiento y el reconocimiento de su marco geográfico. *Urbano*, 2002, vol. 5, n° 6, pp. 94-99.

RAGHAVENDRA, M.; NANDINI N.; VIJAYKUMAR, M. y BHEEMAPPA K. Seasonal Variation of Phytoplankton Diversity in Anhepalaya Lake, Bengaluru Urban, India. *International Journal of Advanced Research*, 2015, vol. 3, n° 6, pp. 2400-2405.

ROBITU, Mirela; INARD, Christian; MUSY, Marjorie y GROLEAU, Dominique. Modeling the influence of vegetation and water ponds on urban microclimate. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, n° 4, pp. 435-447.

RODRIGUES, Aline Goulart; BORGES-MARTINS, Márcio y ZILIO, Felipe. Bird diversity in an urban ecosystem: the role of local habitats in understanding the effects of urbanization. *Iheringia, Sér. Zool*, 2018, vol. 108.

ROJAS, Carolina; MUÑOS, Iván y GARCÍA, Miguel Ángel. Estructura Urbana y policentrismo en el Área Metropolitana de Concepción. *Eure*, 2009, vol. XXXV, n° 105, pp. 47-70.

RUBIO-BELLIDO, Carlos; PULIDO, Jesús y URETA-GRAGERA, María. Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en Concepción y Santiago, Chile. *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5, n° 2, pp. 32-41.

SCHUELER, Tom and SIMPSON, Jon. Why urban lakes are different. *Watershed Protection Techniques*, 2001, vol. 3, n° 4, pp.747-750.

SHOCHAT, Eyal; LERMAN, Susannah; ANDERIES, John y WARREN, Paige. *Et al.* Competition, and Biodiversity Loss in Urban Ecosystems. *Bioscience*, 2010, vol. 60, n° 3, pp. 199-208.

VERMA, Sanyogita; CHAUDHARIL, P.R.; SINGH, R.K. y WATE, S.R. Studies on the ecology and trophic status of an urban lake at Nagpur city, India. *Rasayan J. Chem*, 2011, vol. 4, n° 3, pp. 652-659.