

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Integración de economía circular y biodiversidad en humedales artificiales.

LIFE Renaturwat



CONAMA 2024

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

Autor Principal: Carmen Hernández Crespo (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València)

Otros autores: Nuria Oliver (Global Omnium Medioambiente S.L.); Miguel Añó (Empresa Mixta Valenciana de Aguas S.A.); Antonio Guillem y Sonia Fernández (Fundación Global Nature); Vicent Benedito, Enric Gil-Marínez y Miguel Martín (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València).

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y MÉTODOS	3
Acondicionamiento del fango de ETAP	3
Descripción de los humedales demostrativos	3
Métodos analíticos	5
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	5
Variables fisicoquímicas	5
Variables biológicas	7
CONCLUSIONES	8
BIBLIOGRAFIA	8

RESUMEN

El proyecto LIFE Renaturwat pretende demostrar que es posible obtener aguas residuales regeneradas de elevada calidad fisicoquímica y biológica mediante el empleo de humedales artificiales y un residuo industrial, el fango generado en las Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP). Este proyecto pone el foco en los pequeños y medianos municipios, aportando soluciones tecnológicamente adaptadas a ellos, ya que su construcción y mantenimiento son sencillos y consumen muy poca energía, se integran muy bien paisajísticamente y proveen múltiples servicios ecosistémicos (creación de empleo estable, mejora del hábitat y la biodiversidad, uso público para esparcimiento y actividades divulgativas, etc.). Además, contribuye a integrar los principios de la economía circular en el ciclo urbano del agua, ya que se valoriza un residuo que se genera en la etapa de potabilización al emplearlo en la etapa de depuración de aguas residuales. Por otro lado, la construcción de los humedales de renaturalización conlleva la creación de hábitats que favorecen el aumento de la biodiversidad en el entorno. Finalmente, se anticipa a los futuros requerimientos de la nueva Directiva de tratamientos de aguas residuales urbanas, que prevé la necesidad de dotar a las depuradoras de tratamientos cuaternarios para la eliminación de contaminantes emergentes, entre las principales novedades.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las actividades humanas requiere el empleo del agua con diferentes finalidades y destinos. En los núcleos de población, rurales y urbanos, este uso del agua da lugar a la generación de aguas usadas, denominadas aguas residuales urbanas. El tratamiento y depuración de estas aguas residuales es fundamental para evitar impactos negativos en los medios receptores de éstas.

Esta necesidad de tratamiento y sus especificaciones se encuentran reguladas a través de la Directiva europea 91/271/CEE, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, y la correspondiente legislación que la incorpora al ordenamiento español (Real Decreto-ley 11/1995; Real Decreto 509/1996). Tras tres décadas de aplicación, la Unión Europea ha alcanzado un alto nivel de cumplimiento en términos de recogida y tratamiento, llegando al 81%

CONAMA 2024

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

según el último informe sobre implementación de la Directiva [1]. Así mismo, la Directiva 91/271/CEE ha contribuido a conseguir los objetivos establecidos en la Directiva Marco de Aguas (Directive 2000/60/EC) y en otras normativas relevantes [2]. En 2019, la Comisión Europea inició un proceso de evaluación que puso de manifiesto la necesidad de actualizar la Directiva. Así, se identificaron tres fuentes de carga contaminante que debían ser evitadas: (1) los desbordamientos de los sistemas de saneamiento en tiempo de lluvia y las descargas de escorrentías urbanas contaminadas; (2) los vertidos procedentes de sistemas individuales de saneamiento desconectados de las redes de saneamiento y (3) las pequeñas aglomeraciones que no están completamente cubiertas por la directiva vigente, pero que constituyen una presión contaminante significativa sobre el 11% de las masas de agua de la Unión [2]. Además, se reconocieron otros aspectos clave a incorporar en la futura directiva, como la conveniencia de reducir la descarga de microcontaminantes y la emisión de gases de efecto invernadero, de avanzar hacia una economía más circular, de incorporar la responsabilidad ampliada del productor, o la idoneidad de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para conseguir varios de los objetivos planteados [2].

En este sentido, el proyecto LIFE Renaturwat ofrece una alternativa interesante ante los preceptos que incorporará la futura Directiva de tratamientos de aguas residuales urbanas. El propósito del proyecto es desarrollar un sistema sostenible de renaturalización de las aguas residuales urbanas previamente depuradas a nivel de tratamiento secundario. Esto es, surge como un sistema de tratamiento terciario o cuaternario destinado a mejorar todavía más la calidad fisicoquímica del agua, pero también la calidad biológica, así como el hábitat y la biodiversidad del entorno. Se plantea, por tanto, como la creación de un ecosistema de transición entre las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) y el medio natural.

Mejorar las propiedades biológicas del agua depurada es de especial relevancia para aquellos cauces o medios receptores en los que el agua depurada constituye una fracción importante del caudal circulante o de los aportes a las masas de agua. La Directiva Marco del Agua tiene como objetivo alcanzar el buen estado de las masas de agua de la Unión, estableciendo indicadores biológicos para la clasificación del estado. Por ello, es más que recomendable verter el agua tratada con una buena calidad biológica, particularmente en aquellas masas de agua en las que las aportaciones hídricas tienen una importante componente procedente de las EDAR.

El proyecto LIFE Renaturwat propone la implementación de humedales artificiales, también llamados humedales de tratamiento o construidos, para la renaturalización de las aguas residuales depuradas. La configuración propuesta está compuesta por humedales de flujo subsuperficial, en los que el agua circula a través de un medio poroso constituido por un material adsorbente, seguidos de humedales de flujo superficial, en los que el agua circula sobre la superficie de un lecho, asemejándose más a los humedales naturales. Es en estos humedales de flujo superficial donde se consigue mejorar la calidad biológica del agua y el hábitat, lo que a su vez redundará en un aumento de la biodiversidad.

Una de las claves del LIFE Renaturwat reside en el origen del material poroso adsorbente empleado en la primera etapa de humedales. El material empleado es el fango generado en las Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), actualmente concebido como un residuo de estas instalaciones. Este fango se caracteriza por tener un bajo contenido en materia orgánica y nutrientes, pero un alto contenido en aluminio, que procede de los tratamientos de coagulación-floculación que forman parte del tratamiento de potabilización del agua, en los que normalmente se emplean sales de aluminio como coagulante. Este elevado contenido de aluminio confiere al fango una alta capacidad de adsorción de fósforo, de manera que, al ser

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

empleado como material filtrante en los humedales artificiales, adsorbe el fósforo todavía presente en las aguas residuales depuradas [3], [4]. Se consiguen así dos objetivos importantes: mejorar todavía más la calidad del agua depurada y valorizar un residuo, incorporando así los principios de la economía circular al ciclo urbano del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Acondicionamiento del fango de ETAP

El acondicionamiento del fango ha consistido en una deshidratación mediante centrífuga y posterior secado natural al aire libre, hasta alcanzar una humedad de entre un 10 y un 20%. Para ello, el fango se extendió en pilas que fueron periódicamente volteadas. Posteriormente, se transportó a una cantera cercana, donde se molturó mediante un molino de impacto y una tamizadora portátil. La granulometría obtenida varió entre partículas menores de 0.08 mm y 20 mm (Figura 1).



Figura 1. Imágenes del proceso de acondicionamiento del fango: secado al aire (izq.), molturado y clasificado (centro), aspecto final del fango granulado (dcha.).

Descripción de los humedales demostrativos

Demostrativo en la EDAR de Carrícola (Valencia).

La EDAR de Carrícola es de titularidad y gestión municipal, dando servicio a una población de entre 100 y 200 habitantes, dependiendo de la época del año. Una característica muy significativa de la EDAR de Carrícola es que su consumo energético es nulo, gracias a que el agua residual circula por gravedad y el sistema de humedales artificiales no requiere energía externa.

El sistema Renaturwat implementado en la EDAR de Carrícola consta de dos humedales demostrativos de flujo subsuperficial vertical rellenos de fango de ETAP y dispuestos en serie (Figura 2). Cada uno de ellos tiene una superficie de 20 m² y fueron diseñados para que el agua pudiera fluir por gravedad de uno a otro y al siguiente elemento de la EDAR, con el fin de mantener el principio de consumo energético nulo con el que fue construida la EDAR original. Desde el fondo hasta la superficie, el humedal se estructura en tres capas: una base de grava gruesa drenante de 20 cm de espesor, una capa de fango de ETAP granulado de 80 cm de espesor, una capa de grava gruesa de 10 cm de espesor y una capa superficial de arena de 5 cm de espesor.

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.



Figura 2. Imágenes de los humedales demostrativos construidos en la EDAR de Carrícola. Humedal de flujo subsuperficial vertical 1 (izq.) y 2 (dcha.) conectados en serie, ambos con fango de ETAP.

El primer humedal funcionó de manera continua durante los primeros meses, encontrándose el medio poroso saturado de agua de manera continua, y posteriormente funcionó de manera secuencial, mediante llenados y vaciados parciales, mediante aperturas programadas de una electroválvula. A partir del segundo año, se puso en marcha el segundo humedal, que ha funcionado en modo secuencial desde su inicio. En el primero se plantaron *Iris pseudacorus*, *Narcissus spp.* y *Juncus subnodulosus* (1 planta/2 m²). En el segundo se plantó *Phragmites australis* (1 planta/m²).

Demostrativo en la EDAR de la urbanización Los Monasterios (Puçol, Valencia).

La EDAR de la Urbanización de Los Monasterios es un ejemplo de gestión social de los recursos hídricos ya que los propios vecinos son propietarios de la EDAR y se encargan de su gestión. Esta EDAR recoge el agua residual de una comunidad de unos 1000 habitantes equivalentes cuyo efluente, entre 100-120 m³/d, es empleado para usos urbanos como el riego de zonas verdes y fuentes urbanas ornamentales.



Figura 3. Imágenes de los humedales demostrativos construidos en la EDAR de Los Monasterios. Humedal de flujo subsuperficial vertical con fango de ETAP (izq.) y humedal de flujo superficial (dcha.)

El sistema Renaturwat implementado en la EDAR de Los Monasterios consta de dos líneas de tratamiento. La primera línea está compuesta por un humedal de flujo subsuperficial vertical con relleno de fango de ETAP de 60 m² (Figura 3). La disposición en altura es igual que en el caso de Carrícola, con una profundidad total de 1.15 m. En éste se plantó *Phragmites australis* (1 planta/m²). Su funcionamiento fue continuo durante el primer mes y secuencial a partir del

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

segundo mes en adelante, mediante ciclos de llenado y vaciado parcial, automatizados con electroválvulas y bombas temporizadas. En serie con el anterior, se construyó un humedal de flujo superficial de 50 m² con islas de vegetación (*Typha spp.*) y talud de entrada con pendiente tendida (5:1) para facilitar el acceso a la fauna (anfibios, reptiles, etc.). La segunda línea está compuesta únicamente por un humedal de las mismas características que el de la línea 1 pero que recibe el efluente del tratamiento secundario de la EDAR, sin pasar previamente por el humedal vertical con fango de ETAP. Esta segunda línea se construyó a modo de control, para poder comparar la calidad del agua, tanto desde un punto de vista fisicoquímico como biológico, de ambos humedales de flujo superficial, el que recibe agua de mejor calidad (línea 1) y el que recibe agua procedente del tratamiento secundario, de peor calidad (línea 2).

Métodos analíticos

Se han analizado diversas variables fisicoquímicas y biológicas en muestras tomadas en el influente y efluente de los distintos humedales construidos, con una frecuencia bimensual. También se monitorizaron indicadores biológicos, como los invertebrados acuáticos epibentónicos con frecuencia trimestral, las aves con frecuencia mensual y los anfibios, con frecuencia mensual durante la primavera del segundo año. El detalle sobre la metodología específica para cada variable se puede encontrar en una publicación de acceso abierto elaborada en el marco del proyecto [4].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables fisicoquímicas

Los resultados obtenidos hasta el momento, tras casi dos años de monitorización indican una alta eficiencia de remoción de fósforo total y reducciones moderadas de otras variables como la materia orgánica, expresada como DQO¹ y DBO₅², los sólidos en suspensión totales (SST) o el nitrógeno total (Cuadros 1 y 2).

Conseguir una remoción de fósforo importante es uno de los principales objetivos del proyecto, ya que este nutriente suele ser el principal limitante de los procesos de eutrofización de las masas de agua receptoras de los vertidos de las EDAR. Por tanto, reducir su concentración es fundamental para evitar este grave problema de contaminación de las aguas. Las eficiencias alcanzadas son similares a las obtenidas en estudios en los que se empleaba óxido de hierro como material adsorbente [5]. Por otro lado, el hecho de que quede adsorbido en el fango de ETAP implica la fertilización del fango, de manera que su aplicación en terrenos agrícolas pasa a ser una alternativa interesante. Para evaluar la biodisponibilidad del fósforo adsorbido y la potencial asimilación de aluminio por parte de las plantas, se están llevando a cabo ensayos con cultivos (tomate y perejil) plantados sobre fango de ETAP saturado con fósforo y regados con distintos tipos de agua. Los resultados todavía no están disponibles para su publicación.

¹ DQO: demanda química de oxígeno.

² DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días.

CONAMA 2024

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

Como se puede observar en los Cuadros 1 y 2, las características de los influentes son considerablemente diferentes en las dos EDAR en cuanto a niveles de fósforo. Esta diferencia está siendo de gran utilidad para evaluar el funcionamiento del sistema en diferentes condiciones.

Cuadro 1. Resultados de las variables fisicoquímicas en los humedales de la EDAR de Carrícola. Se indican valores medios de 23 meses de funcionamiento. Notas: HFV1: humedal de flujo vertical 1 y HFV2: humedal de flujo vertical 2. El efluente del HFV1 se corresponde con el influente a HFV2. Entre paréntesis se indica la eficiencia de reducción del humedal (columna Efluente HFV1) y la global (columna Efluente HFV2).

Variable	Influente HFV1	Efluente HFV1	Efluente HFV2
Fósforo total (mg P/l)	6.73	2.36 (65%)	0.86 (87%)
Nitrógeno total (mg N/l)	50.5	45.1 (11%)	40.1 (19%)
DQO (mg/l)	45.1	30.9 (32%)	23.6 (48%)
DBO ₅ (mg/l)	14.7	10.0 (32%)	8.4 (43%)
SST (mg/l)	8.4	5.6 (34%)	5.0 (41%)

Cuadro 2. Resultados de las variables fisicoquímicas en los humedales de la EDAR de Los Monasterios. Se indican valores medios de dos años de funcionamiento. Notas: HFV: humedal de flujo vertical. HFS1 y HFS2: humedales de flujo superficial 1 y 2, respectivamente. El influente del HFS1 es muy similar al influente al HFV.

Variable	Influente HFV	Línea 1		Línea 2
		Efluente HFV	Efluente HFS1	Efluente HFS2
Fósforo total (mg P/l)	3.02	0.72	0.68	2.70
Nitrógeno total (mg N/l)	23.1	20.6	20.0	19.6
DQO (mg/l)	14.5	9.5	15.6	18.2
DBO ₅ (mg/l)	5.3	3.7	5.6	7.0
SST (mg/l)	5.1	2.8	7.4	8.0

El hecho de que no se alcancen eficiencias de remoción tan elevadas para el resto de las variables está asociado a que las concentraciones de entrada ya son muy bajas, en el caso de la DQO, la DBO₅ y los SST. En el caso del nitrógeno, existen dos explicaciones diferentes para los humedales construidos en sendas EDAR. En la EDAR de Carrícola, el nitrógeno que llega a los humedales está principalmente en forma de nitrógeno amoniacal. Para lograr reducir su concentración de manera significativa debe tener lugar en primer lugar el proceso de nitrificación, mediante el cual es transformado en nitritos y nitratos, para posteriormente poder desnitrificar, transformándose en nitrógeno gas. El primer paso no se está consiguiendo de forma significativa, bien debido a la escasez de oxígeno disuelto bien a la escasa presencia de bacterias nitrificantes. En este caso, se está trabajando para mejorar las condiciones de oxigenación en los humedales y favorecer el crecimiento de las bacterias nitrificantes. Mientras que en la EDAR de Los Monasterios, el nitrógeno entra ya en forma de nitratos, que no son reducidos de manera significativa probablemente por una limitación del proceso de desnitrificación debido a las bajas concentraciones de materia orgánica que llegan al humedal, ya que éste es un proceso que

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

requiere de carbono orgánico para tener lugar. En este otro caso, se espera que conforme se vaya produciendo cierta acumulación de materia orgánica en el lecho filtrante se vaya posibilitando el proceso de desnitrificación. También se podría aportar materia orgánica llevando al humedal una pequeña fracción del influente general a la EDAR y reducir así el consumo energético del tratamiento secundario.

También se han monitorizado diversos contaminantes emergentes, como fármacos y sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS). Sin embargo, las concentraciones se han encontrado por debajo del límite de detección tanto en los influentes como en los efluentes. Es posible que, al tratarse de zonas muy residenciales, con un uso del agua doméstico, no se aporte suficiente cantidad de estos contaminantes como para que éstos sean detectados en las aguas residuales depuradas a nivel de tratamiento secundario. El hecho de que se encuentren en concentraciones no detectables es un indicador importante de la buena calidad de las aguas presentes en los humedales construidos, de manera que no se está impactando con estos contaminantes sobre la flora y la fauna que está colonizando los mismos.

VARIABLES BIOLÓGICAS

Los resultados del seguimiento de macroinvertebrados acuáticos indican que el humedal de flujo superficial que recibe el agua de mejor calidad (humedal flujo superficial 1), procedente del humedal vertical con fango de ETAP, obtiene unos índices de diversidad mejores que el humedal que recibe directamente el efluente del tratamiento secundario (humedal flujo superficial 2). Estos resultados ponen de manifiesto el interés de incorporar este tipo de sistemas a las EDAR, para mejorar la calidad biológica del agua que es descargada al medio natural.

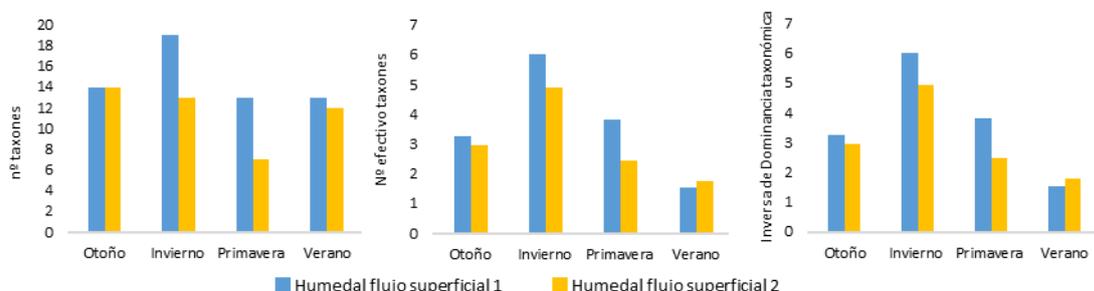


Figura 4. Resultados de los índices de biodiversidad obtenidos en los dos humedales de flujo superficial construidos en la EDAR de Los Monasterios. El nº efectivo de taxones (gráfico central) indica cuántas especies están bien representadas del total de especies. La dominancia taxonómica (gráfico derecho) indica cuantas especies son dominantes.

Además de los invertebrados acuáticos también se han realizado actuaciones destinadas a la mejora del hábitat para los anfibios. El propio diseño de los humedales de flujo superficial estuvo inspirado en las necesidades de la fauna para poder desarrollarse adecuadamente (taludes tendidos, islas para solearse constituidas por grava de distintos tamaños, vegetación helófitas y sumergida, etc.). Las ranas, sapos y reptiles han colonizado los humedales espontáneamente.

Por otro lado, se ha colaborado con la Conselleria de Medio Ambiente de la Comunidad Valenciana para la introducción de una especie de anfibio protegida, el gallipato (*Pleurodeles walt*). En las primeras consultas realizadas, los técnicos de la Conselleria identificaron el interés

CONAMA 2024

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

de la introducción debido a que las charcas naturales temporales, que había en el área geográfica donde se han construido los humedales, habían ido desapareciendo debido a las largas sequías. Por tanto, los humedales construidos representaban un potencial hábitat para esta especie. Se han realizado varias sueltas a lo largo del proyecto. Entre marzo y mayo de 2024 se realizaron muestreos para ver si los individuos introducidos permanecían en los humedales. Se encontraron dos individuos adultos y una larva. Los individuos adultos se encontraban en fase reproductora. Este hallazgo constituye un éxito para el proyecto, ya que muestra que algunos de los ejemplares introducidos han sobrevivido y permanecido en el hábitat, lo que indica que el hábitat es adecuado, y además pueden reproducirse allí mismo.

Además, se cuantificó la presencia de otros anfibios, con un total de 262 individuos adultos de rana común (*Pelophylax perezi*) en el humedal 1 de Los Monasterios y 170 en el humedal 2. En un humedal de flujo superficial existente, con anterioridad al proyecto, en el entorno de la EDAR de Carrícola se encontraron 39 adultos de rana común, 1 de sapo común (*Bufo spinosus*) y 1 de culebra de agua (*Natrix maura*).

Con relación a las aves, se han censado un total de 22 especies en la EDAR de Los Monasterios y 25 especies en la EDAR de Carrícola. Aunque el reducido tamaño de los humedales no constituye un hábitat suficiente para las aves, sí que se ha observado que éstas los utilizan como fuente de agua y alimento, ya que representan puntos de agua permanentes en zonas semiáridas con escasez de masas de agua. Se puede encontrar mayor detalle sobre las especies y patrones observados en una reciente publicación de acceso abierto [4].

CONCLUSIONES

La combinación de humedales de distintos tipos, flujo subsuperficial con fango de ETAP y superficial, contribuye de manera significativa a mejorar la calidad fisicoquímica y biológica del agua depurada. Esta mejora es especialmente importante para aquellos ecosistemas receptores en los que el agua procedente de las EDAR representa una importante fracción de las aportaciones. Además, su implementación en el entorno de las EDAR supone la creación de hábitat para distintas especies de flora y fauna, con el consecuente aumento de la biodiversidad. La generación de estos nuevos puntos o masas de agua de buena calidad ayuda a mitigar la pérdida de masas de agua naturales asociada a la sequías tan prolongadas y severas que viene sufriendo esta región mediterránea.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Fribourg-Blanc, N. Dhuygelaere, and J. M. Berland, "2th Technical Assessment of UWWTD Implementation EU Report-Final Version," 2024. doi: 10.2779/318637.
- [2] General Secretariat of the Council, "Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast)," 2024.
- [3] C. Hernández-Crespo, N. Oliver, M. Peña, M. Añó, and M. Martín, "Valorisation of drinking water treatment sludge as substrate in subsurface flow constructed wetlands for upgrading treated wastewater," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 158, pp. 486–494, 2022, doi: 10.1016/j.psep.2021.12.035.

CONAMA 2024

INTEGRACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR Y BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

- [4] C. Hernández-Crespo *et al.*, “Integrating circular economy and biodiversity in upgrading full-scale constructed wetlands (LIFE Renaturwat),” *Ecol. Eng.*, vol. 204, no. January, 2024, doi: 10.1016/j.ecoleng.2024.107263.
- [5] M. Martín, S. Gargallo, C. Hernández-Crespo, and N. Oliver, “Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewaters by a vertical flow constructed wetland,” *Ecol. Eng.*, vol. 61, 2013, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.046.