



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**DISEÑO DE UN HUMEDAL DE TRATAMIENTO PARA
MITIGAR EL IMPACTO NEGATIVO POR EL VERTIDO
DE AGUAS RESIDUALES CLOACALES SOBRE EL
ARROYO LOS TRONCOS, LIMITE NORTE DE LA
COMUNA MATILDE, PROVINCIA DE SANTA FE.**

Emanuel Adrián Rodríguez

Trabajo Final remitido al Comité Académico de la Maestría
como parte de los requisitos para la obtención
del grado de
MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2025

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad
Universitaria, Paraje “El Pozo”,
S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Maestría en Gestión Ambiental

Diseño de un humedal de tratamiento para mitigar el impacto negativo por el vertido de aguas residuales cloacales e industriales sobre el arroyo Los Troncos, límite norte de la comuna de Matilde, provincia de Santa Fe

Emanuel Adrián Rodríguez

Director:

Dr. Hernán R. Hadad (IQAL, CONICET-UNL)

Co-directora:

Dra. María de las Mercedes Mufarrege (IQAL, CONICET-UNL)

Jurado Evaluador:

Dra. María Celeste Schierano (UTN Rafaela)

Dr. Raúl Comelli (FICH-UNL)

Dr. Andrés Maximiliano Attademo (FBCB-UNL)

ACTA DE EVALUACIÓN DE TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA

En la sede de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, en la ciudad de Santa Fe, a los seis días del mes de octubre del año dos mil veinticinco, se reúnen en forma online sincrónica los miembros del Jurado designado para la evaluación del Trabajo Final de Maestría en Gestión Ambiental titulado *“Diseño de un humedal de tratamiento para mitigar el impacto negativo por el vertido de aguas residuales cloacales sobre el Arroyo Los Troncos, límite norte de la Comuna Matilde, provincia de Santa Fe.”*, desarrollado por el Lic. Emanuel Adrián RODRÍGUEZ, DNI N° 33.931.892, bajo la dirección del Dr. Hernán Ricardo Hadad y la codirección de la Dra. María de las Mercedes Mufarrege. Ellos son: el Dr. Andrés Maximiliano Attademo, el Dr. Raúl Comelli, y la Dra. María Celeste Schierano.-----

La Presentación oral y defensa del Trabajo Final se efectúan bajo la modalidad online sincrónica según lo establecido por Resolución CS N° 382/21.

Luego de escuchar la Defensa Pública y de evaluar el Trabajo Final, el Jurado considera:

Que el tema de la propuesta es pertinente a los alcances de la carrera y el documento presenta en términos generales, consistencia teórica y metodológica. Además, la propuesta de trabajo es factible desde el punto de vista técnico y económico, acercando una solución a una problemática que resulta de interés medioambiental en la zona de estudio.

La presentación oral ha sido clara y concisa y las preguntas del jurado fueron respondidas con solvencia.

Por lo tanto, el Jurado aprueba el Trabajo Final con calificación 10 (Diez) Sobresaliente.

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente.-----

Dr. Andrés Maximiliano
Attademo

Dr. Raúl Comelli

Dra. Ma. Celeste Schierano



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Santa Fe, 6 de octubre de 2025.

Como miembros del Jurado Evaluador del Trabajo Final de Maestría titulado "*Diseño de un humedal de tratamiento para mitigar el impacto negativo por el vertido de aguas residuales cloacales sobre el Arroyo los troncos, límite norte de la Comuna Matilde, provincia de Santa fe*", desarrollado por el Lic. Emanuel Adrián RODRÍGUEZ, certificamos que hemos evaluado el Trabajo Final y recomendamos que sea aceptado como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Gestión Ambiental. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de la versión digital final del Trabajo Final ante el Comité Académico de la Maestría en Gestión Ambiental.

Dr. Andrés Maximiliano
Attademo-----
Dr. Raúl Comelli-----
Dra. Ma. Celeste Schierano

Santa Fe, 6 de octubre de 2025.

Certifico haber leído este Trabajo Final preparado bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptado como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Gestión Ambiental.

Dr. Hernán Ricardo Hadad
Director de Trabajo Final-----
Dra. Ma. de las Mercedes Mufarрге
Codirectora de Trabajo Final

Secretaría de Posgrado
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Ciudad Universitaria - C.C.217
Ruta Nacional 168 - Km 472,4
3000, Santa Fe, Argentina
+54 (0342) 4575233/245/246 int. 103
posgrado@fich.unl.edu.ar

DECLARACIÓN DEL AUTOR

Esta disertación ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Magíster en Gestión Ambiental ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en Repositorio Institucional de Acceso Abierto -RIAA- de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disponible a sus lectores bajo las condiciones estipuladas.

Citaciones breves de esta disertación son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para una citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concedidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.



Emanuel Adrián Rodríguez
Lic. En Cs. Ambientales
Mat. CIE 1-3116-4

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi director de proyecto final, Hernán Hadad y mi Co-directora Mercedes Mufarrege, por su valioso conocimiento, el tiempo brindado y la excelente predisposición en todo el proceso. Desde las prácticas profesionales realizadas en los laboratorios del IQAL (Instituto de Química aplicada del litoral) hasta la realización de este trabajo, su acompañamiento fue fundamental.

A las autoridades de la comuna de la localidad de Matilde, que siempre nos recibieron con gran amabilidad y nos brindaron toda la información disponible para poder resolver la problemática de la manera más adecuada y comprometida.

A mis padres, Aldo y Dora, que siempre me aconsejaron, apoyaron y me brindaron todas las herramientas necesarias para que pueda seguir estudiando; y a mi compañera de vida, Gabriela, por su constante presencia, aliento y por motivarme día a día a seguir capacitándome.

Índice General

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Planteo de la problemática.....	2
1.2 Justificación del Proyecto	2
Capítulo 2: Objetivos del Proyecto.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
2.3 Hipótesis:	4
Capítulo 3: Estado del Arte	5
Capítulo 4: Metodología.....	9
4.1 Actividades desarrolladas	
Capítulo 5: Marco Teórico	11
5.1 Localización geográfica.....	11
5.2 Medio abiótico y biótico.....	12
5.2.1 Tipo de suelo.....	12
5.2.2 Hidrografía.....	12
5.2.3 Clima.....	14
5.2.4 Vientos predominantes	15
5.2.5 Humedad.....	16
5.2.6 Precipitaciones	16
5.2.7 Evaporación	17
5.2.8 Valores medios de factores climáticos	17
5.2.9 Biodiversidad	18
5.3 Medio socioeconómico y cultural.....	18
5.3.1 Economía	18
5.3.2 Principales vías de acceso.....	18
5.4 Marco Normativo.....	19
5.4.1 Nivel Nacional:	19
5.4.2 Nivel Provincial:	19
5.4.3 Nivel Municipal:.....	20
5.4.4 Matriz Legal:	20

5.5 Humedales de tratamiento:	24
5.5.1 Tipos de HT:	26
5.5.2 HT de flujo libre superficial	26
5.5.3 HT de flujo de subsuperficial	27
5.5.4 HT de flujo subsuperficial vertical	27
5.5.5 HT de flujo subsuperficial horizontal	28
5.5.6 Pretratamiento y tratamiento primario:	30
5.5.7 Vegetación acuática	31
5.6 Procesos de remoción de contaminantes:	39
5.6.1 Sólidos en suspensión	39
5.6.2 Materia orgánica	40
5.6.3 Nitrógeno	40
5.6.4 Fósforo	41
5.6.5 Patógenos	43
5.6.6 Metales	43
Capítulo 6: Diagnostico del arroyo los Troncos y canal vinculado al vuelco de efluentes	45
Capítulo 7: Diseño del humedal	50
7.1 Regla general	51
7.2 Ecuaciones de regresión	52
7.3 Flujo a pistón $k-C^*$	53
7.4 Gráficos para cálculo por carga másica	54
7.5 Enfoque $P-k-C^*$	56
7.6 Dimensionamiento del humedal:	57
7.7 Diseño hidráulico	58
7.8 Elección del tipo de humedal y de las macrófitas a utilizar:	59
7.9 Dimensiones del HT propuesto:	59
7.10 Gastos constructivos y operacionales del HT a construir	61
Capítulo 8: Elaboración de conclusiones y recomendaciones	64
8.1 Conclusiones:	64
8.2 Recomendaciones	65

Capítulo 9: Bibliografía	66
Capítulo 10: Anexos	77
10.1 Anexo I – Población horizonte	77
10.1.1 Crecimiento de la población local	77
10.1.2 Método Aritmético.....	77
10.1.3 Método geométrico	78
10.1.4 Método exponencial.....	78
10.1.5 Análisis entre los diferentes métodos utilizados.....	79
10.2 Anexo II - Resultados de análisis químicos de efluentes	80
10.2.1 Análisis Químicos Punto 1	80
10.2.2 Análisis Químico Punto 2	81
10.2.3 Análisis Químico punto 3	82

Índice de Figuras:

Fig. 1. Localización de la ciudad de Santa Fe y de la localidad de Matilde.....	11
Fig. 2. Mapa de localización del acuífero guaraní.....	13
Fig. 3. Mapa de la cuenca A° los Troncos con las respectivas jurisdicciones de los comités de cuenca A° Malaquias- Los troncos.....	14
Fig. 4. Frecuencia media anual del viento en un gráfico rosa de los vientos, periodo 2010-2020. Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Estación Meteorológica Aeropuerto Sauce Viejo.....	16
Fig. 5. Esquema de un HT de flujo libre superficial (extraído de Nocetti, 2022).	26
Fig. 6. Esquema de un HT de flujo subsuperficial vertical.	28
Fig.7. Esquema de un HT de flujo subsuperficial horizontal	29
Fig. 8. Ejemplos de humedales construidos. (a) Humedal híbrido consistente en una etapa de humedal de flujo libre y otra de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (Ciudad de Santo Tomé, Santa Fe) (b) Humedal de flujo subsuperficial horizontal construido en México (fotografías: Hernán Hadad).	30
Fig. 9. Esquema que representa las diferentes formas de vida de las macrófitas en ambientes naturales.....	32
Fig. 10. Fotografías de macrófitas con diferentes formas de vida que comúnmente se encuentran en humedales naturales. (a) Flotantes libres: <i>Eichhornia crassipes</i> . (b) sumergidas con hojas flotantes: <i>Victoria cruziana</i> . (c) Emergentes: <i>Typha domingensis</i> . (d) Sumergidas: <i>Egeria najas</i> . (e) Leñosas (árboles): <i>Salix humboldtiana</i> (f) Leñosas (arbustos).	34
Fig. 11. Imagen satelital donde se observa el área donde se realizaron los muestreos cercanos a la localidad de “estación Matilde”.	45
Fig. 12. Imagen satelital donde se observa el punto de muestreo N°1.....	46
Fig. 13. Imagen satelital donde se observa el punto de muestreo N°2.....	46
Fig. 14. Imagen satelital donde se observa el punto de muestreo N°3.....	47
Fig. 15. Gráficos de carga de Wallace y Knight (2006).	56

Fig. 16. Esquemas del HT de flujo subsuperficial horizontal a construir. Imagen superior: vista de planta, Imagen inferior: vista de perfil..... 60

Índice de tablas:

Tabla 1. Frecuencia media anual del viento. Estación meteorológica Aeropuerto Sauce Viejo.	15
Tabla 2. Promedio mensual de evaporación, año 2018 (mm).	17
Tabla 3. Registro de valores medios de los diferentes factores climáticos durante un periodo de 2010-2020.	17
Tabla 4. Listado de especies de macrófitas utilizadas en HT en diferentes regiones del mundo... ..	35
Tabla 5. Parámetros medidos <i>in situ</i> en agua en los diferentes puntos de muestreo.	48
Tabla 6. Concentraciones de NTK y PT determinadas en muestras de agua en cada punto de muestreo (mg L ⁻¹).	48
Tabla 7. Concentraciones de NTK y PT determinadas en el sedimento de cada punto de muestreo (mg g ⁻¹).	48
Tabla 8. Concentraciones de metales determinadas en el sedimento de cada punto de muestreo (mg Kg ⁻¹) (ND = no detectado).	48
Tabla 9. Concentraciones de metales determinadas en tejidos vegetales de plantas de <i>S. americanus</i> colectadas en cada punto de muestreo (mg Kg ⁻¹) (ND = no detectado).	49
Tabla 10. Recomendaciones de diseño de la regla general para climas templados (extraído de Kadlec y Wallace, 2009).	51
Tabla 11. Ejemplo de ecuaciones de regresión para humedales de flujo horizontal.	52
Tabla 12. Presupuesto estimado de los gastos a realizar para la construcción y puesta en funcionamiento del HT propuesto.	62

Resumen

El presente proyecto propone mitigar y corregir los impactos negativos causados por el vertido de efluentes provenientes de pozos ciegos de las viviendas de la localidad de Matilde, Santa Fe, sobre el arroyo Los Troncos, a través del diseño de un humedal de tratamiento (HT). La implementación de un humedal de tratamiento permitirá remediar los efluentes antes de ser vertidos en el arroyo Los Troncos, cuenca en la cual tiene injerencia la comuna de Matilde, para intentar cumplimentar los parámetros de volcado según la normativa vigente. Como primera medida, se reunirá información relevante mediante revisión bibliográfica, análisis de imágenes satelitales, visitas al área de estudio, y reuniones con la autoridad comunal. Luego, se tomarán muestras ambientales a través de la colecta de agua, plantas y sedimento, para llevar a cabo su posterior análisis químico. Seguidamente, y en base a los datos que se obtengan en la instancia anteriormente mencionada, se procederá a realizar el diseño de un humedal de tratamiento. La utilización de humedales de tratamiento es una alternativa viable, ya que son sistemas eficientes que requieren bajos costos de inversión y además permiten reutilizar el agua tratada, brindando beneficios económicos, sociales y ambientales.

Palabras Claves: Humedales de tratamiento, Humedal de flujo subsuperficial horizontal, Fitorremediación, Macrófitas.

Abstract

This project aims to mitigate and correct the negative impacts caused by the discharge of effluent from residential cesspools in the town of Matilde, Santa Fe, into the Los Troncos Creek through the design of a treatment wetland (TW). The implementation of a TW will allow the remediation of effluent before it is discharged into the Los Troncos Creek, a watershed in which the Matilde commune has jurisdiction, in order to comply with discharge parameters according to current regulations. As a first step, relevant information will be gathered through a literature review, satellite image analysis, visits to the study area, and interviews with community authorities. Environmental samples will then be taken through the collection of water, plants, and sediment for subsequent chemical analysis. A TW design will then be carried out based on the data obtained in the aforementioned phase. The use of treatment wetlands is a viable alternative, as they are efficient systems that require low investment costs and also allow the reuse of treated water, providing economic, social, and environmental benefits.

Key words: *Treatment wetlands, Horizontal subsurface flow wetland, Phytoremediation, Macrophytes.*

Capítulo I: Introducción

El agua es crucial para la vida de todos los seres vivos que habitan el planeta. Este recurso permite el correcto funcionamiento de los procesos biológicos de los ecosistemas y, a su vez, permite la supervivencia de todas las especies (Tchobanoglous y Burton, 1996). Debido al impacto de la industrialización y del aumento de las poblaciones humanas se hace necesario una búsqueda de tratamientos alternativos para depurar las aguas de desecho y mejorar la calidad de los cuerpos de agua contaminados. La contaminación del agua, dificulta o impide su uso posterior lo que puede suponer un obstáculo serio para la salud y para el desarrollo socioeconómico, en especial en regiones donde este recurso es escaso (Beascochea et al., 2014).

El tratamiento de aguas residuales requiere ser atendido con procesos que puedan adaptarse a las condiciones técnicas, económicas y sociales de distintos sectores, sobre todo los que no cuentan con sistemas de drenaje y tratamiento de sus efluentes. Ante la falta de recursos, lo más frecuente es observar descargas líquidas directamente al ambiente sin recibir ningún tratamiento, debido a los costos que éstos conllevan para su construcción y mantenimiento.

La fitorremediación se refiere a la eliminación de contaminantes utilizando plantas terrestres para remediar suelos o plantas acuáticas para remediar aguas residuales (Prasad, 2007). Los humedales de tratamiento (HT) son utilizados como una técnica de fitorremediación para depurar diferentes tipos de efluentes en todo el mundo (Vymazal, 2024). Estos sistemas funcionan como un tratamiento secundario o terciario y se los utiliza desde hace décadas para la depuración de contaminantes provenientes de un amplio rango de efluentes (Knox et al., 2021; Lindelien et al., 2024). Los HT pertenecen a las denominadas Soluciones Basadas en la Naturaleza (Nature Based Solution, NBS) (Haddis et al., 2020; Ahmad y Abdullah, 2025) debido a que son sistemas diseñados y construidos por el hombre para utilizar los procesos naturales que eliminan los contaminantes del agua (Kadlec y Wallace, 2009; Vymazal, 2013). La fitorremediación con HT es una alternativa viable y adaptable para cubrir diferentes necesidades de tratamiento, ya que son sistemas eficientes que requieren bajos costos de inversión, y además permiten reutilizar el agua tratada, brindando beneficios económicos, sociales y ambientales (Wu et al., 2015). En estos sistemas, las plantas son el componente principal. Los HT son una tecnología muy adecuada para ser aplicada en las regiones tropicales y subtropicales debido a que las

especies vegetales son diversas y abundantes y las condiciones ambientales son muy favorables para su crecimiento (Rodríguez-Domínguez et al., 2020).

1.1 Planteo de la problemática

Debido al aumento de la industrialización y de las poblaciones humanas se vuelcan aguas residuales en muchos casos no tratadas, a cuerpos de agua naturales. El incremento excesivo de materia orgánica y de nutrientes en el agua (nitrógeno y fósforo) conduce a la eutrofización. Además, la falta de un tratamiento adecuado puede causar graves problemas sanitarios, como infecciones bacterianas (fiebres tifoideas, salmonelosis, cólera, gastroenteritis), infecciones virales (gastroenteritis, hepatitis A), parasitosis (coccidios, amebas, hidatidosis, cisticercosis, nematodosis).

En la zona de estudio del presente trabajo, se vuelcan al ambiente y sin tratar una cantidad aproximada de 81.000 L semanales de efluente proveniente de pozos negros de los vecinos locales. Estos líquidos son vertidos con camiones atmosféricos a un canal que desemboca en el arroyo Los Troncos, tributario del Río Coronda. Las fuentes de contaminación de este arroyo también provienen de otras industrias ubicadas en localidades vecinas que vuelcan al ambiente sus desechos sin tratar. La problemática a desarrollar se centra en la comuna de Matilde, Provincia de Santa Fe, en la cual, uno de los principales desafíos planteados por las autoridades es mitigar el impacto negativo causado por el vuelco de aguas residuales sin tratar en el arroyo Los Troncos.

1.2 Justificación del Proyecto

Argentina enfrenta varios desafíos en materia de seguridad hídrica. En un país con gran diversidad territorial e hidrológica, el 75 % del territorio posee características áridas, semiáridas y subhúmedas. Dentro de este escenario, la mayor parte del agua se destina a la producción agrícola e industrial. Apenas el 10% del agua se destina al consumo humano. Esta disparidad territorial de distribución y uso del agua se asocia a la presión sobre los recursos hídricos generados por la gran concentración urbana que presenta la Argentina. De acuerdo a las proyecciones 2020 del Instituto Nacional de estadísticas y Censos (INDEC), el 92% de su población se encuentra establecida en zonas urbanas, por encima de la media mundial (54%) y por encima de la propia región de la que forma parte (83%). En tanto que las poblaciones y los asentamientos urbanos continúan en aumento, esta dinámica demográfica plantea grandes desafíos relacionados a la disponibilidad y la

demanda actual y futura del agua. Según los datos provistos por la Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento (DNAPyS), el 11,3 % de la población que reside en zonas urbanas del país carece de acceso a agua potable y el 36,9% carece de acceso a cobertura cloacal. Según los últimos relevamientos realizados por la DNAPyS y considerando la población argentina del censo 2022, el 63,1% de las zonas urbanas poseen cobertura cloacal, lo que implica que alrededor de 15,7 millones de personas, carecen de acceso a redes cloacales, a la vez que se evidencian inequidades de cobertura a nivel regional y provincial.

Las aguas residuales que no se tratan adecuadamente se descargan en cuerpos de agua afectando su calidad y disponibilidad, generando efectos sumamente nocivos para la salud humana y el ambiente. Frente a estos escenarios, el uso de HT se presenta como una alternativa adecuada debido a las ventajas que posee su uso, tales como, bajos costos de instalación y mantenimiento y reúso del agua tratada, obteniendo beneficios económicos, sociales y ambientales.

Capítulo 2: Objetivos del Proyecto

2.1 Objetivo general

- Mitigar el impacto ambiental negativo provocado por el vertido de aguas residuales provenientes de los pozos ciegos en la localidad de Matilde (Santa Fe) por medio de la aplicación de un HT.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la cuenca del arroyo Los Troncos a través del análisis fisicoquímico del agua en diferentes puntos.

- Determinar los puntos de volcado de aguas residuales y obtener información a través de consultas y reuniones con las autoridades y pobladores locales.

- Obtener una caracterización de las aguas residuales volcadas sobre el arroyo Los Troncos a través de un análisis fisicoquímico completo.

- Diseñar un HT para llevar a cabo la remediación de las aguas residuales que se vierten en el arroyo Los Troncos.

2.3 Hipótesis:

Los HT se vienen aplicando en todo el mundo para la remediación de diferentes tipos de efluentes obteniendo resultados muy satisfactorios. Esto permite proteger a los ecosistemas naturales de los posibles impactos que genera el vertido de aguas residuales.

Se propone como hipótesis de trabajo que la aplicación de un HT será una herramienta eficiente para mitigar el impacto ambiental negativo provocado por el vertido de aguas residuales provenientes de los pozos ciegos en la localidad de Matilde (Santa Fe). El proyecto que se pretende desarrollar identificará algunas de las amenazas potenciales que sufre la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y aportará información de utilidad para el tratamiento de efluentes utilizando HT.

Capítulo N° 3: Estado del Arte

Los HT funcionan como un tratamiento secundario o terciario y son utilizados desde hace décadas para remediar diferentes tipos de efluentes en todo el mundo (Vymazal, 2024). El principal componente biológico de los HT es la vegetación y su microbiota asociada. El rol de la vegetación no es sólo retener contaminantes en sus tejidos, sino también modificar la biogeoquímica del sistema, favoreciendo los procesos de depuración del agua (Gersberg et al., 1986). El sustrato de los HT permite la sustentación de las macrófitas, además de retener contaminantes eliminándolos del efluente. Los procesos que se ocurren en estos sistemas son complejos e incluyen sedimentación, filtración, volatilización, sorción por plantas y sedimento, procesos químicos como óxido-reducción, precipitación, ácido-base, complejamiento y procesos microbianos (Kadlec y Wallace, 2009; Liu et al., 2024; Werkneh, 2024).

El tipo de HT más adecuado a utilizar se elige de acuerdo al tipo de efluente, al caudal, a los contaminantes a eliminar, etc., y cada tipo de HT utiliza diferentes variantes de diseño, sustratos, plantas, etc. Los HT se clasifican de acuerdo al régimen de flujo (Kadlec y Wallace, 2009), el cual los divide en humedales de flujo superficial (presentan áreas de agua a cielo abierto y son de aspecto similar a los pantanos o lagunas naturales) y de flujo subsuperficial (el agua circula por debajo de la superficie). Estos últimos, a su vez, se dividen en flujo horizontal y flujo vertical, de acuerdo a como el agua los atraviesa. Otro tipo de HT son los sistemas de humedales de tratamiento flotantes, que emplean macrófitas emergentes soportadas por una estructura que flota sobre la superficie del agua (Landaverde et al., 2024). Las raíces se desarrollan debajo de la estructura flotante pudiendo tomar contaminantes directamente del agua, proporcionando una superficie extensa para el desarrollo del biofilm y reteniendo partículas finas suspendidas (Headley y Tanner, 2012). Otro caso lo constituyen los HT de lodos. En general, los biosólidos que podrían generarse en ciertos efluentes líquidos luego del tratamiento por métodos convencionales, están compuestos principalmente por materia orgánica, nutrientes, y otros contaminantes en menores proporciones. Estos biosólidos podrían tratarse por medio de los HT de lodos que tienen como objetivo reducir el contenido de agua de los biosólidos, concentrando y estabilizándolos en la superficie de los humedales (Nielsen y Stefanakis, 2020). Otros sistemas más complejos son los humedales híbridos, los cuales se diseñan combinando diferentes tipos de HT en serie, logrando que las ventajas de cada uno se complementen entre sí para lograr una mayor eficiencia (Vymazal, 2013; Maine et al., 2022).

A lo largo de los años, la aplicación de HT se ha expandido de efluentes cloacales a distintos tipos de efluentes, como los de escorrentía urbana, industriales, agrícolas, lixiviados de relleno sanitario, entre otros (Maine et al., 2006, 2009, 2017, 2022; Vymazal, 2013; Stefanakis et al., 2014; Verlicchi y Zambello, 2014; Zhang et al., 2014, 2020; Hadad et al., 2018, 2024; Schierano et al., 2020; Dotro et al., 2017; Alarcon et al., 2018; Horne et al., 2024; That y Hoang, 2024; Zeng et al., 2024). Más recientemente, se los comenzó a utilizar para tratar efluentes que contienen contaminantes emergentes (Kumar et al., 2019; Cao et al., 2024; Majumder et al., 2024; Teglia et al., 2024; Wei et al., 2024).

Vymazal y Kröpfelová (2015) y Wu et al. (2015) revisaron los antecedentes sobre el tratamiento de efluentes que utilizan HT en todo el mundo. Sin embargo, los casos son diferentes y específicos dependiendo del efluente a tratar. En América Latina, los HT han sido ampliamente implementados para la depuración de aguas residuales. Por ejemplo, Sandoval Herazo et al. (2021) estudiaron un HT para tratar efluentes de una granja porcina mezclados con aguas residuales domésticas. Estos autores concluyeron que los HT en climas tropicales son una buena opción para tratar las aguas residuales. En Argentina, se viene implementando esta metodología debido a su alta eficiencia, en relación a su bajo costo de construcción y de operación. En el país, nuestro grupo de trabajo comenzó a implementarlos desde hace décadas aplicándose en el tratamiento de efluentes de industrias metalúrgicas (Di Luca et al., 2011, 2017; Hadad et al., 2006, 2010, 2024; Maine et al., 2007, 2009, 2013, 2017; Mufarrege et al., 2011, 2015) lácteas (Nocetti et al., 2020, 2023, 2024), efluentes de un centro de cuidado de animales de una fábrica de alimentos para mascotas (Maine et al., 2022), entre otros.

Respecto a otro tipo de efluentes, se han llevado a cabo diferentes trabajos para estudiar la eficiencia de los HT en el lixiviado de rellenos sanitarios (Bakhshoodeh et al., 2020; Rodriguez-Dominguez et al. 2020; Camaño Silvestrini et al., 2019; Gutierrez et al. 2025). En el pasado los lixiviados de rellenos sanitarios se volcaban a humedales ubicados en terrenos adyacentes a los mismos. Se observó que la calidad química del agua mejoraba luego de atravesarlos (Higgins y Lugowski, 1996; La Forge, 1997). A partir de estos resultados, comenzó a desarrollarse el uso de HT para el tratamiento de este tipo de efluentes (Kadlec y Wallace, 2009). Las altas concentraciones de amonio, la DQO recalitrante y metales pesados en bajas concentraciones son las principales características del lixiviado (Wojciechowska et al., 2016). Se utilizaron sistemas híbridos (Speer et al., 2012; Pinedo-Hernandez et al., 2024), HT de flujo libre superficial (Akinbile et al., 2012; Foladori et al., 2013), HT de flujo subsuperficial horizontal (Nivala et al., 2007; Bialowiec

et al., 2012; Madera-Parra et al., 2015) ó HT de flujo vertical (Sochacki et al., 2014; Lavrova, 2016; A et al., 2017). Saeed et al. (2020) evaluó los efectos de la recirculación de efluentes en el rendimiento de HT híbridos para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en Bangladesh. Yalcuk y Ugurlu (2020) estudiaron la eficiencia de *Typha latifolia* y *Canna indica* sobre la eliminación de amonio, ortofosfato y DQO presentes en lixiviados. Los HT de flujo vertical han demostrado ser efectivos en la eliminación de amonio, el cual es un contaminante crítico en los lixiviados (Kadlec y Zmarthie, 2010; Stefanakis et al., 2014).

Respecto de efluentes que contienen metales, los humedales más utilizados son los HT de flujo libre horizontal (Hadad et al., 2006, 2018; Maine et al., 2006, 2009, 2017). Arivoli et al. (2015) aplicaron HT para la eliminación de metales de las aguas residuales de una industria de pulpa de papel. Dan et al. (2017) informaron que la secuenciación de HT por lotes con tres días de tiempo de residencia hidráulica fueron eficientes en la eliminación de Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn de lixiviados sintéticos. Otra de las investigaciones se realizó con el objetivo de estudiar la bioacumulación de contaminantes en diferentes compartimentos de plantas de *T. domingensis* y en sus sedimentos para el tratamiento de un efluente metalúrgico durante 5 años (Hadad et al., 2018).

En nuestra zona se han instalado numerosas fábricas de productos lácteos, donde es necesario optimizar los tratamientos de sus efluentes y de los biosólidos producidos. En estudios enfocados al tratamiento de efluentes de industrias lácteas en diferentes países, se utilizaron distintos tipos de humedales de acuerdo a los productos elaborados (Dipu et al., 2010; Comino et al., 2011; Mantovi et al., 2011; Patel y Dharaiya, 2014; Ahmad et al., 2019; Licata et al., 2022). Algunos de los estudios publicados pertenecen a nuestro grupo. Dichos trabajos consistieron en el estudio de un sistema de humedal híbrido para el tratamiento del efluente de una industria láctea de la región (Nocetti et al., 2020, 2023, 2024). Respecto de los HT flotantes, si bien su uso en el mundo se encuentra aplicado (Landaverde et al., 2024), se han usado mayoritariamente en los países en desarrollo (Weragoda et al., 2012; Prashant et al., 2013; Zhang et al., 2014; Ijaz et al., 2015). En nuestro país esta tecnología está siendo recientemente desarrollada por nuestro grupo (Di Luca et al., 2019; 2023, Mufarrege et al., 2023). En el caso de contaminantes emergentes, el uso de HT permitió la eliminación satisfactoria de diversos compuestos en varios países (Nivala et al., 2019; Santos et al., 2019; Delgado et al., 2020; Ramdat et al., 2022; Sun y Zheng, 2022). A escala local, el trabajo de Teglia et al. (2024) es una de las primeras experiencias enfocadas en la temática.

En la misma zona de estudio del presente proyecto, se realizó un estudio de la caracterización del sistema acuático del arroyo Los Troncos, previo a la confluencia con el canal de drenaje de San Carlos, mediante la evaluación *in situ* (mortalidad de fauna y de residuos de pesticidas) y bioensayos de ecotoxicidad en renacuajos (Cuzziol Boccioni et al., 2024). Los análisis realizados sobre agua y sedimentos dieron como resultados la detección de 9 pesticidas. La demanda biológica de oxígeno, el amoníaco y el recuento de coliformes registrados en el canal de San Carlos superaron excesivamente los límites para la protección de la vida acuática (Cuzziol Boccioni et al., 2024).

En los HT se producen diferentes mecanismos de eliminación de contaminantes dependiendo del tipo de sistema que se utilice, los sustratos y las plantas. Los compuestos nitrogenados se eliminan por nitrificación-desnitrificación, volatilización, sorción por las plantas y procesos anammox. En cambio, el P y los metales son sorbidos por las plantas y se acumulan en el sedimento en diferentes formas químicas. Las condiciones de pH, potencial redox, salinidad, temperatura, etc., influyen en estos procesos. El conocimiento de las condiciones necesarias para favorecer los distintos procesos contribuye al diseño y manejo de HT de aguas de diversas características. Por esta razón, los HT son eficientes en la depuración de diferentes tipos de efluentes si se utiliza el tipo de humedal, la especie vegetal, el sustrato adecuado y si se aplican acertados criterios de diseño y de operación para favorecer los procesos de remoción de contaminantes del agua.

Capítulo N° 4: Metodología

El proyecto se inició con la búsqueda de la información necesaria, la cual incluye: revisión bibliográfica y antecedentes de trabajos en la temática que permitan establecer el estado del arte. Luego se procedió a obtener datos ambientales de base para tener un conocimiento del estado inicial del entorno, el marco jurídico establecido por leyes a nivel provincial y nacional, y la información brindada por autoridades de la Comuna de Matilde como ser caudales de efluentes y frecuencias de volcados.

Posteriormente, se efectuó un relevamiento de campo con el fin de obtener datos primarios a través de la toma de muestras de aguas residuales y su posterior análisis fisicoquímico (DBO, DQO, oxígeno disuelto, temperatura, pH, conductividad, amonio, nitrato, nitrito y algunos metales pesados como cromo, níquel, y plomo), y microbiológico (coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*). Luego de establecer un diagnóstico de la problemática del entorno y de las aguas residuales a tratar, se realizó una propuesta de diseño del humedal más indicado para nuestro proyecto.

4.1 Actividades desarrolladas

Las actividades desarrolladas en el trabajo fueron las siguientes:

Revisión bibliográfica y búsqueda de antecedentes para la elaboración del estado del arte:

- Identificación de fuentes científicas y técnicas relevantes (artículos, libros, tesis, informes técnicos, normativas, etc.)
- Análisis de estudios previos sobre HT y tecnologías similares aplicadas a aguas residuales.
- Revisión de antecedentes de contaminación en cuerpos de agua similares al arroyo Los Troncos
- Sistematización de la información recopilada para la redacción del estado del arte

Determinación de los datos ambientales de base y marco jurídico:

- Caracterización del área de estudio como las condiciones climáticas, el suelo, la flora y la fauna dentro del ecosistema del proyecto y análisis del medio socioeconómico de Matilde.
- Revisión del marco legal aplicable: Normativas ambientales nacionales e internacionales sobre el tratamiento de aguas residuales, Límites permisibles de

contaminantes en efluentes y cuerpos de agua receptores, legislación sobre la construcción e implementación de humedales artificiales.

Recopilación de datos primarios y secundarios:

- Observación, estudios de campo, muestreo y análisis de agua del arroyo Los Troncos (para determinar la situación actual de contaminación), y muestreo y análisis de los efluentes residuales a tratar (información necesaria para el diseño del humedal).

Análisis de laboratorio:

- Determinación de parámetros físico-químicos de muestras tomadas en 3 puntos diferentes.

Diseño del HT:

- Proyección de la población horizonte a 20 años.
- Cálculo del área superficial requerida.
- Diseño hidráulico considerando caudales de entrada y de salida.
- Selección del tipo de HT más adecuado.
- Selección de las macrófitas más adecuadas a utilizar y su papel en la depuración del efluente.

Elaboración de recomendaciones:

- Síntesis de los hallazgos obtenidos durante la búsqueda de información
- Evaluación de la viabilidad del HT como solución para mejorar la calidad del agua del arroyo Los Troncos.
- Propuestas de medidas complementarias para reducir la contaminación del arroyo.
- Recomendaciones para la implementación y mantenimiento del HT.

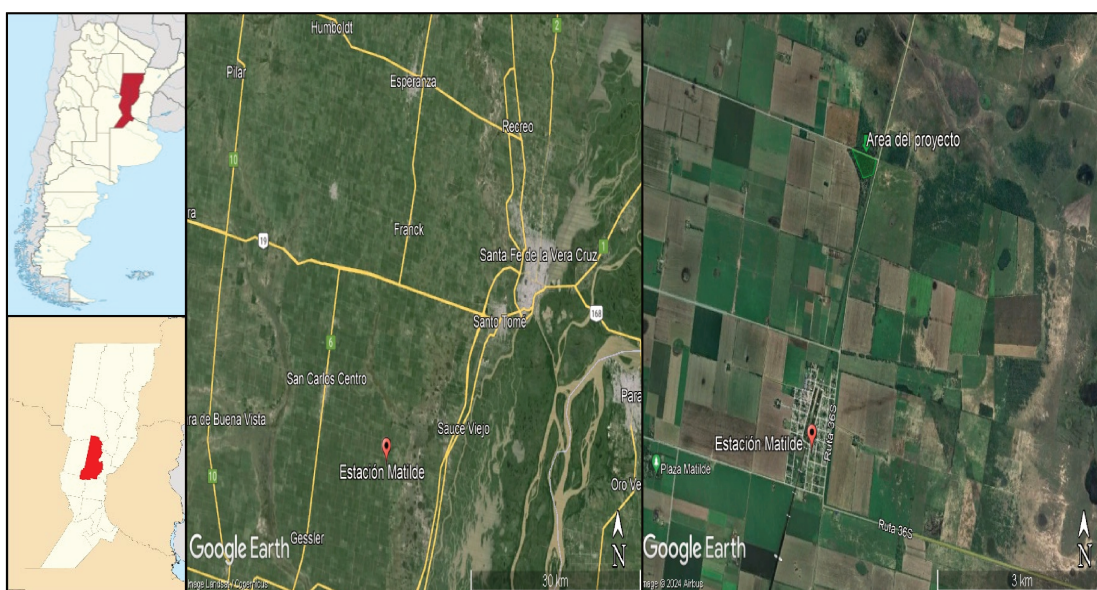
Capítulo N° 5: Marco Teórico

5.1 Localización geográfica

La problemática observada se localiza en la provincia de Santa Fe, la cual cuenta con una población de 3.195.000 habitantes y con una densidad poblacional de 24 habitantes/km².

La Comuna de la localidad de Matilde, también llamada Estación Matilde, se encuentra en el Departamento Las Colonias, Provincia de Santa Fe, a 35 km de la capital provincial (Fig. 1). La misma cuenta con una población total de 966 habitantes. Sus principales actividades económicas son la agricultura, la ganadería y la industria molinera. La comuna cuenta con un terreno de 300 m² para llevar a cabo la construcción del HT, a una distancia de 2 km del centro poblado y a 1,3 km del arroyo Los Troncos, localizado entre la ruta N° 36 y la vía de acceso hacia la localidad de San Agustín. Las coordenadas geográficas donde se realiza el vertido de los efluentes cloacales son las siguientes: Latitud -31.765270°; Longitud: -60.967963°.

Fig. 1. Localización de la ciudad de Santa Fe y de la localidad de Matilde.



5.2 Medio abiótico y biótico

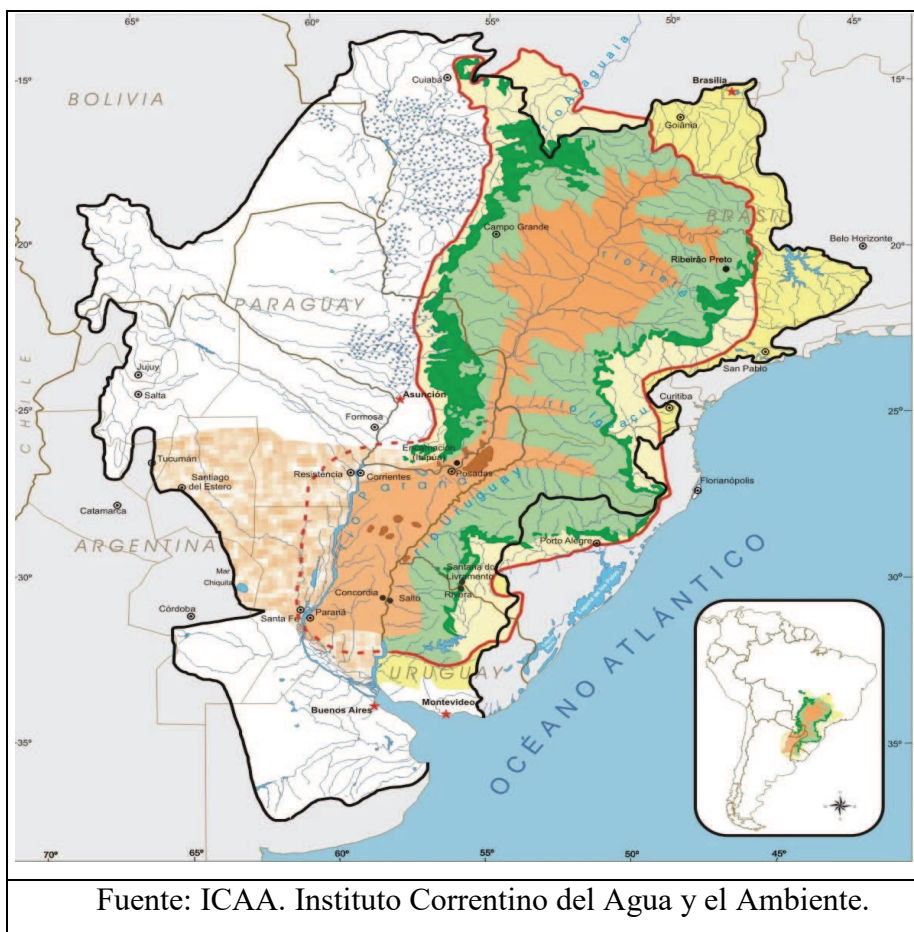
5.2.1 Tipo de suelo

El área contiene un suelo del tipo argiudol ácuico profundo, moderadamente bien drenado, ubicado en las pendientes bajas receptoras del agua de escurrimiento de sectores vecinos más elevados divisoria de agua de la cañada de Casalegno y de los planos bajos aledaños al río Coronda. Su productividad está relacionada con su moderado drenaje, no sólo por el dificultoso escurrimiento superficial del agua sino también por su lenta infiltración interna o conductividad hidráulica, motivada por la presencia de un horizonte B2t muy enriquecido en arcilla. El límite abrupto entre el B y A y el B2t es un signo de esta condición de dificultad que tiene el agua, el aire y las raíces para pasar de los horizontes superiores a los inferiores. Además, presentan ligeros signos de hidromorfismo evidenciando este lento drenaje. Esta ligera limitación se pone de manifiesto especialmente en períodos muy lluviosos o en años con exceso de precipitaciones y especialmente en invierno en los cultivos más sensibles (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA).

5.2.2 Hidrografía

El área en estudio se ubica dentro del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), el cual se encuentra localizado entre los paralelos 16° y 32° sur y los meridianos 47° y 60° Oeste, ocupando un área de alrededor de 1.100.000 km² (Fig. 2). Su superficie coincide con parte de la gran cuenca hidrográfica del Río de la Plata, extendiéndose desde la cuenca geológico-sedimentaria del Paraná hasta la cuenca Chacoparanaense.

Fig.Nº2. Mapa de localización del acuífero guaraní.



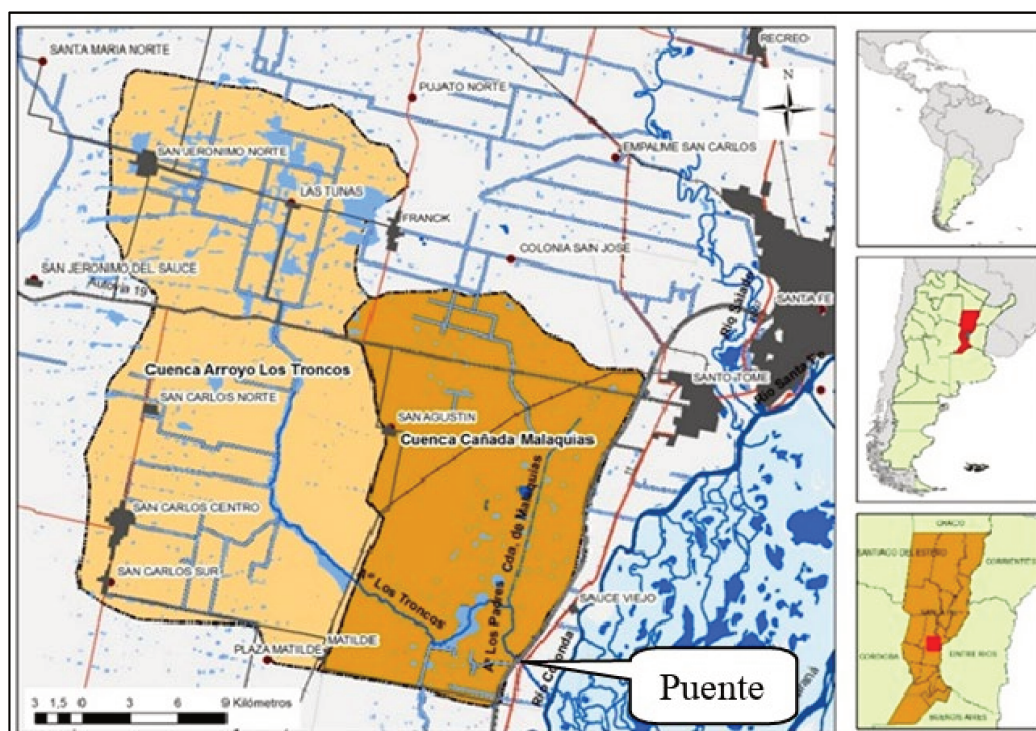
La cuenca del Arroyo Los Troncos se ubica en el sudeste del departamento Las Colonias (zona centro de la provincia de Santa Fe), abarcando una superficie de 500 km². En dicha cuenca se encuentran localizados los distritos de San Jerónimo Norte, Las Tunas, San Carlos Norte – Centro y Sur, Franck, Colonia San José y San Agustín.

Las escasas pendientes no permiten el movimiento de los excedentes hídricos hacia vías de escurrimientos naturales (Zimmermann, 1999), quedando en superficie por tiempos prolongados, y en muchas ocasiones, manteniendo al suelo encharcado y/o anegado dependiendo de su ubicación (loma, media loma y bajo tendido).

Desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico - hidráulico se puede diferenciar dos zonas/tramos, un tramo superior donde se encuentra la cabecera de la cuenca, tienen como límite inferior la Autovía N° 19, y se caracterizan por no tener un canal o cauce definido de jerarquía, sino que presenta bajos relativos y una serie de canales de distinto orden que tratan de conducir los excesos hacia dicha ruta. En esta se producen trasvases desde y hacia la cuenca. Y un tramo inferior que se desarrolla hacia el sur de la Autovía N° 19. En este tramo Los Troncos presenta un cauce bien definido, en cambio en

la subcuenca Malaquías se desarrolla una cañada que está localizada inmediatamente al oeste de la autopista y dada la escasa pendiente de esta zona, para situaciones de excesos, se producen desbordes laterales que son captados por algunas de las alcantarillas de drenaje de la autopista. El puente ubicado en la sección de control del Arroyo Los Padres en la autopista Rosario - Santa Fe, tiene una capacidad máxima en el orden de los 250 m³/s.

Fig. N°3. Mapa de la cuenca A° los Troncos con las respectivas jurisdicciones de los comités de cuenca A° Malaquias- Los troncos.



5.2.3 Clima

En la Provincia de Santa Fe se encuentran tres tipos distintos de clima: clima subtropical sin estación seca, clima tropical con estación seca y clima templado pampeano.

El clima subtropical sin estación seca, abarca una zona que comprende casi en su totalidad al departamento General Obligado y la porción norte del departamento San Javier, en el noreste de la Provincia. Sus características fundamentales son la escasa oscilación de la temperatura y las lluvias abundantes durante todo el año. Los veranos son muy cálidos, alrededor de 26° de temperatura media; los inviernos son muy suaves, con temperaturas medias superiores a 14°, por lo que las oscilaciones anuales son inferiores a 12°.

El clima tropical con estación seca, comprende la zona noroeste de la Provincia. Incluye la mayor parte de los departamentos 9 de Julio y Vera. La oscilación de la

temperatura es algo mayor que en el clima anterior y las lluvias son mucho más abundantes en el verano que en el invierno. Los valores de la temperatura son similares, pero a diferencia del clima subtropical sin estación seca, este clima presenta algunas heladas en invierno.

El clima templado pampeano, abarca todo el centro - sur de la Provincia, zona de estudio donde nos vamos a centrar. Se destaca por la inexistencia de cuatro estaciones bien definidas. Sólo se puede determinar una estación calurosa que abarca desde noviembre a marzo. Si bien la temperatura decrece rápidamente hasta alcanzar un mínimo en junio y julio, es notable la inestabilidad, que produce amplias variaciones de temperatura en muy pocas horas. Las lluvias oscilan entre los 800 y los 1000 mm anuales, y si bien no se puede hablar de una estación seca, las precipitaciones son más abundantes en verano que en invierno (Biasatti et al., 2016).

5.2.4 Vientos predominantes

La provincia se encuentra sometida al libre desplazamiento de las masas de aire polar provenientes de altas latitudes, así como de las cálidas y húmedas del anticiclón atlántico, todo ello provoca bruscos cambios de temperatura en el término de pocas horas.

Para la determinación de la frecuencia de los vientos predominantes se tomó un rango de 10 años, entre 2010 y 2020, tomados por la estación meteorológica N° 87371 del Aeropuerto Sauce Viejo, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional.

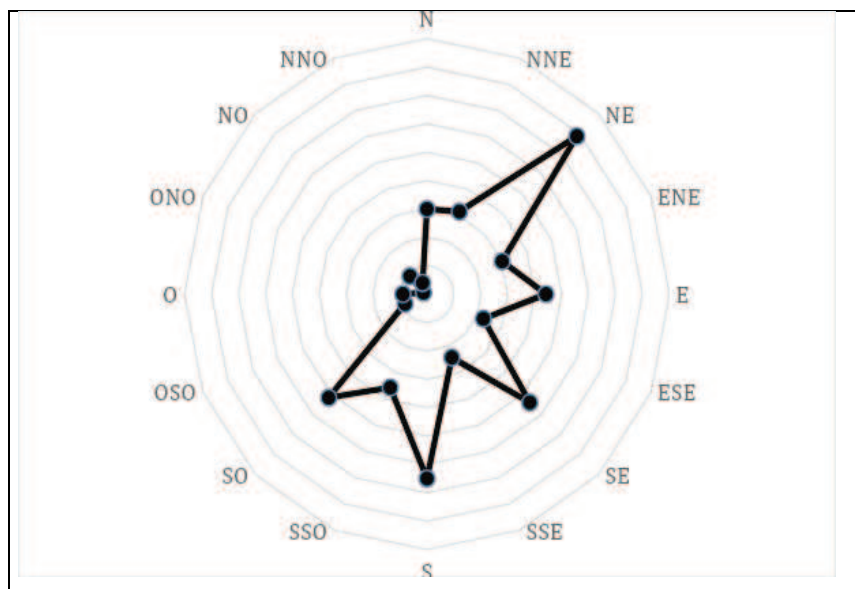
A continuación, en la Tabla 1, se pueden observar los promedios anuales, expresados en porcentaje de la frecuencia de los vientos para cada punto cardinal; mientras que en la Fig. 3 se plasman estos datos en un gráfico del tipo rosa de los vientos.

Tabla 1. Frecuencia media anual del viento. Estación meteorológica Aeropuerto Sauce Viejo.

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
6,0	6,3	15,7	6,0	8,8	4,5	10,8	4,8	13,0	7,1	10,3	1,8	1,8	0,3	1,8	0,9

Fig. 4. Frecuencia media anual del viento en un gráfico rosa de los vientos, periodo 2010-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Estación Meteorológica Aeropuerto Sauce Viejo.



Como se puede observar, el viento predominante de la región proviene del sector noreste, seguido por el viento del sector sur. Por otro lado, en los meses de invierno los vientos del sector sur, sureste y suroeste tienen una gran predominancia, mientras que en los meses de verano esta disminuye dándole más predominancia a los vientos del sector noreste y este.

5.2.5 Humedad

La humedad atmosférica presenta un valor promedio anual del 75%. A escala mensual, los valores más altos se registran en junio (81 %) y los más bajos en noviembre-diciembre (67%). En cuanto a la variación estacional, el verano es la estación con menor humedad relativa media (69,7%) y el invierno la mayor con una humedad relativa del (77%).

5.2.6 Precipitaciones

Un día mojado es un día con por lo menos 1 mm de líquido o precipitación equivalente a líquido. La probabilidad de días lluviosos en Matilde varía durante el año.

La temporada más mojada dura 6,8 meses, del 6 de octubre al 29 de abril, con una probabilidad de más del 21 % de que cierto día será un día mojado. El mes con más días mojados en Matilde es el mes de noviembre con un valor medio de 143 mm de precipitación.

La temporada más seca dura 5,3 meses, de mayo hasta septiembre. Por su parte, el

mes con menos días mojados en la localidad de Matilde es julio, con un promedio de 2,8 días con por lo menos 1 mm de precipitación.

5.2.7 Evaporación

En la Tabla 2 se muestran los promedios mensuales de evaporación en base a datos provistos por la Estación Meteorológica del INTA de la ciudad de Paraná, la cual es la estación más cercana a la zona de estudio.

Tabla 2. Promedio mensual de evaporación, año 2018 (mm).

<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Promedio anual</i>
5,9	5,9	4,8	3,1	1,6	1,6	1,4	2,6	3,5	4,1	5	5,5	3,75

5.2.8 Valores medios de factores climáticos

La Tabla 3 muestra un resumen de los valores medios de las variables climáticas para la ciudad de Santa Fe durante el periodo de 2010 a 2020.

Tabla 3. Registro de valores medios de los diferentes factores climáticos durante un periodo de 2010-2020.

Valor Medio:	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	26	24	23	19	15,5	12	12	14	16	19	22	24
Temperatura máxima (°C)	32	30	29	25	21	18	18	20	23	25	28	30
Temperatura mínima (°C)	20	19	18	14	11	7,9	7	8,3	11	14	17	19
Humedad relativa (%)	69	73	75	79	80,7	81	77	72	69	70	67	67
Velocidad del Viento (km/h) (2011-2020)	12	11	11	11	11,7	12	13	14	14	15	14	13
Nubosidad total (octavos)	2,9	3,1	2,9	3,3	3,7	3,9	4	3	3,2	3,5	3	3
Precipitación (mm)	99	118	138	128	52,1	33	25	32	49	115	143	143

5.2.9 Biodiversidad

La provincia de Santa Fe posee una ubicación geográfica particular, de transición desde la zona de montes chaqueños hasta la pampa húmeda, considerando también el sistema del Río Paraná a lo largo de sus casi 800 Km en su límite oriental (Biasatti et al., 2016).

El departamento Las Colonias, ubicado en la provincia de Santa Fe, cuenta con una variada flora y fauna, características de las ecorregiones Pampeana y del Espinal. Estas ecorregiones se caracterizan por tener una vegetación típica de llanuras, con pastizales, montes, y cursos de agua. Las especies vegetales se clasifican en grandes grupos como árboles, hierbas y pastos, y plantas acuáticas y palustres. La fauna se caracteriza por la presencia de una gran diversidad de aves y de otros grupos de vertebrados e invertebrados, muchos de ellos adaptados al medio acuático.

5.3 Medio socioeconómico y cultural

5.3.1 Economía

Los principales motores económicos de Matilde son la agricultura y la ganadería, como así también la fábrica de fideos Colonia Matilde, especializada en la elaboración artesanal de fideos secos; y el Molino Harinero Matilde. El molino tiene su origen en 1892, y funciona como una empresa familiar. En la actualidad realiza también acopio de cereales y posee una planta elaboradora de alimentos balanceados.

Lamentablemente, muchos ecosistemas fueron objeto de cambios socio-ambientales profundos en las últimas décadas. El modelo agro-exportador y el sistema productivo y de comercialización del complejo agroindustrial del país han impactado profundamente en el territorio modificando el soporte físico, la organización social, la demanda e instalación de infraestructura, entre otros aspectos (Biasatti et al., 2016).

5.3.2 Principales vías de acceso

Matilde se encuentra a 35 km al suroeste de la capital provincial, Santa Fe. Una de las principales vías de acceso al pueblo por el sector este es la RP N° 11, conectándose con la RP N° 36. También se puede acceder por la localidad de San Carlos Sur, a través de la RP 19. Una tercera vía de ingreso es a través de la RP N° 19 por la localidad de San Agustín,

uniendo ambos pueblos a través de un camino de tierra de Norte a Sur.

5.4 Marco Normativo

La adecuación a las diferentes normativas tanto del ámbito nacional, provincial como municipal, es primordial en cualquier emprendimiento o actividad, no sólo para evitar contravenciones a las normas, sino también para tomar una referencia de los mínimos cuidados que se deben tener para con el ambiente y la sociedad.

A continuación, se describen brevemente las legislaciones que, directa o indirectamente, se relacionan con el cuidado del ambiente y son aplicables a los efectos del presente proyecto.

5.4.1 Nivel Nacional:

Art.41 de la Constitución Nacional (1994): corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquellas alteren las jurisdicciones locales.

Ley N° 25.675 General del Ambiente (2002): establece los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada para el ambiente.

Ley N° 25.381. Régimen de libre acceso a la información pública (2005): establece los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable

Ley N° 25.688. Régimen de gestión ambiental de aguas (2002). Establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional.

Decreto N° 1.638/ Seguro ambiental (2012). Tiene por objeto garantizar el financiamiento de la recomposición del daño ambiental.

5.4.2 Nivel Provincial:

Ley N° 11.717: Medio ambiente y desarrollo sustentable (2012). Política de desarrollo integral, los principios rectores para preservar, conservar, mejorar y recuperar el medio ambiente, los recursos naturales y la calidad de vida de la población.

Ley N° 10.000. Protección de intereses difusos y acción popular (1987). Establece el recurso contencioso administrativo contra cualquier decisión, acto u omisión, que, violando disposiciones vigentes, lesionaren los intereses simples o difusos de los habitantes de la provincia de Santa Fe.

Ley N° 11.690. Agua Potable (1999): Se crea en el ámbito del Ministerio de Obras, Servicios Públicos y Vivienda el Fondo Provincial para el Abastecimiento de Agua Potable.

Ley N° 11.220. Prestación y regulación de los servicios sanitarios (1994): Dispone la regulación de la prestación del servicio y prevé los sistemas para la autorización de la provisión del servicio.

Decreto N° 1.358. ENRESS (2007). El objeto de la presente es la regulación de la prestación del servicio público de suministro de agua potable y desagües cloacales en la etapa de transición.

5.4.3 Nivel Municipal:

Ley N° 2.756. Orgánica de Municipalidades (2007): Establece normas sobre la creación, origen, naturaleza, autonomía, organización, finalidad, tipos, competencias, clasificación y régimen económico de las municipalidades.

Ord. N° 12.500. Diversidad biológica (1985): Crea el Comité Consultivo de la Diversidad Biológica y el Desarrollo Sustentable, que tiene los objetivos de preservar y conservar los diferentes recursos ambientales y promover el mejoramiento de la calidad de vida, entre otros.

5.4.4 Matriz Legal:

Jurisdicción	Tipo de Norma	ID. N°/Título	Año	Objeto que regula/ Breve descripción
Nacional	Administración y Planificación	Art. 41 de la constitución nacional	1994	Todos los habitantes tienen derecho de gozar un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano y de sus actividades
Nacional	Administración y Planificación	Ley N° 25.675	2002	Establece los presupuestos mínimos para el logro de una

		General del ambiente.		gestión sustentable y adecuada para el ambiente.
Nacional	Administración y Planificación.	Ley N° 25.381 Régimen de libre acceso a la información pública.	2005	Establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar el derecho de acceso a la información ambiental.
Nacional	Administración y Planificación.	Ley N° 25.612 Gestión integral de residuos industriales y actividades de servicio	2007	Establece los presupuestos mínimos de protección ambiental sobre la gestión integral de residuos de origen industrial y de actividades de servicio
Nacional	Administración y Planificación.	Ley N° 25.688 Régimen de gestión ambiental de aguas.	2002	Establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional.
Nacional	Administración y Planificación	Ley N° 25.916 Gestión de residuos domiciliarios	2004	Establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral de los residuos domiciliarios.

Nacional	Regulación Directa.	Ley N° 24.051/ Residuos Peligrosos	1991	Regula la generación, manipulación, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos.
Nacional	Administración y Planificación.	Ley N° 25.743 Protección del patrimonio arqueológico y paleontológico	2003	Es objeto de la presente ley la preservación, protección y tutela del Patrimonio Arqueológico y Paleontológico.
Provincial	Administración y Planificación.	Ley N° 11.717 Medio ambiente y desarrollo sustentable	2009	Establece en la provincia de Santa fe la política de desarrollo integral, los principios rectores para preservar, conservar, mejorar y recuperar el medio ambiente, los recursos naturales y la calidad de vida de la población.
Provincial	Administración y Planificación.	Ley N° 10.000 Protección de intereses difusos y	1987	Establece el recurso contencioso administrativo contra cualquier decisión, acto u omisión, que, violando disposiciones

		acción popular		vigentes, lesionaren los intereses simples o difusos de los habitantes de la provincia de Santa Fe.
Provincial	Administración y Planificación	Ley N° 11.690 Agua potable	1999	La presente ley crea en el ámbito del Ministerio de Obras, Servicios Públicos y Vivienda el Fondo Provincial para el Abastecimiento de Agua Potable.
Provincial	Regulación específica	Ley N° 11.220 Prestación y regulación de los servicios sanitarios	1994	La presente Ley dispone la regulación de la prestación del servicio y prevé los sistemas para la autorización de la provisión del servicio por los prestadores en todo el ámbito de la provincia de Santa Fe.
Provincial	Administración y planificación	Ley N° 2.756 Orgánica de Municipalidades	2007	Establece normas sobre la creación, origen, naturaleza, autonomía, organización, finalidad, tipos, competencias, clasificación y régimen económico de las municipalidades.

Provincial	Regulación específica	Decreto N° 1.358 ENRESS	2007	El objeto de la presente es la regulación de la prestación del servicio público de suministro de agua potable y desagües cloacales en la etapa de transición.
Provincial	Regulación directa	Resolución 1089	1982	Establece las condiciones que deberá ajustarse el efluente y el proyecto, construcción, reparación, modificación, mantenimiento de las instalaciones donde se tratará el mismo.

5.5 Humedales de tratamiento:

Los HT son áreas que se componen principalmente de lagunas inundadas de forma permanente o periódica con una profundidad menor a un metro, en los que se plantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática y en los que el tratamiento del agua residual se basa en procesos microbiológicos, biológicos, físicos y químicos. Su diseño puede ser muy variado, pero siempre incluye una impermeabilización del suelo para evitar la contaminación del manto acuífero. Estos sistemas se caracterizan además por tener un control del flujo del efluente en cuanto a su dirección, tiempo de retención y nivel del agua (Kadlec y Wallace, 2009). La superficie del humedal, así como el área a plantar, se determina de acuerdo al terreno disponible y al caudal y tipo del efluente a tratar.

En un HT, el influente es el agua residual que ingresa al humedal y que puede ser doméstica, industrial, o una mezcla, e incluso aguas de escorrentía procedentes de precipitaciones.

El sustrato o medio filtrante que se utiliza en los HT corresponde a los materiales que se colocan dentro del sistema cuya función es servir como soporte para las plantas y el desarrollo de microorganismos. Como sustrato puede utilizarse arena, grava, ciertos tipos de rocas, suelo, composta, etc. Generalmente, el sustrato se compone de diferentes capas de arena y grava con diferentes graduaciones, según las características del efluente a tratar. Por ejemplo, el uso de arena gruesa contribuye a la eficiencia de los procesos de tratamiento, proporcionando la superficie para el crecimiento microbiano y soportando la adsorción y los procesos de filtración (Hoffmann et al., 2012). La principal característica del sustrato es que debe ser permeable para permitir el paso del efluente a través de él. La importancia del sustrato radica en que soporta a la vegetación y a los microorganismos, influye en la circulación del agua a través del sistema, almacena contaminantes y acumula restos de la vegetación incrementando las fuentes de carbono (Arias et al., 2001). Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Lara-Borrero, 1999).

Respecto a la vegetación, la selección de las especies vegetales a utilizar en los HT es importante debido a que estas llevarán a cabo algunas de las funciones de depuración del efluente mediante procesos de adsorción, absorción, fijación, etc., de los contaminantes. Las plantas son organismos fotoautótrofos que tienen la capacidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el sustrato donde se encuentran las raíces, creando regiones aerobias donde los microorganismos se desarrollan y ocurren diversas reacciones de degradación de la materia orgánica (Delgadillo et al., 2010). Además de la vegetación, durante el tratamiento actúan diversos microorganismos, los cuales forman un consorcio que interviene estrechamente en los ciclos biogeoquímicos. Éstos se encargan de realizar el tratamiento biológico en las zonas del sustrato donde predomina el oxígeno que liberan las plantas por las raíces. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias et al., 2001). Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal.

5.5.1 Tipos de HT:

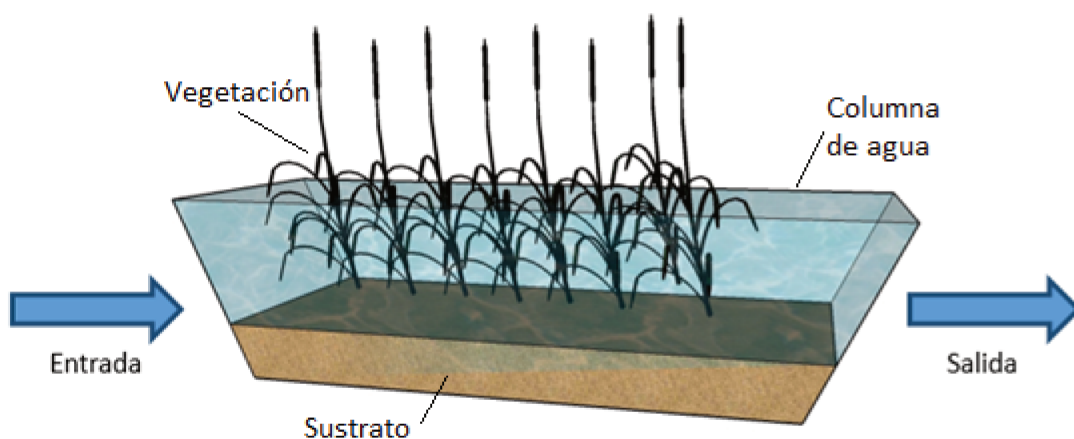
La operación y la eficiencia de los HT dependen en gran medida de la hidráulica del sistema, teniendo en cuenta esto, la clasificación más extendida consiste en HT de flujo libre superficial y HT de flujo subsuperficial. A continuación, se explicará cada uno de ellos.

5.5.2 HT de flujo libre superficial

En apariencia y función son similares a los humedales naturales y también a los sistemas de lagunaje tradicionales. Se usan comúnmente para tratar fuentes no puntuales como las aguas pluviales urbanas, la escorrentía agrícola y efluentes que contienen metales, además de las aguas residuales municipales.

Su implementación se basa en una capa de suelo relativamente impermeable, o con una cubierta impermeable, zona de enraizamiento, vegetación, que favorece el crecimiento microbiano adjunto, y una lámina de agua visible a una altura relativamente superficial con unos 60-10 cm de profundidad (Fig. 5). El tratamiento se produce durante la circulación lenta del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación.

Fig. 5. Esquema de un HT de flujo libre superficial (extraído de Nocetti, 2022).



5.5.3 HT de flujo de subsuperficial

Este tipo consiste en un biofiltro relleno de un sustrato poroso (grava, arena, etc.). Siempre se utilizan macrófitas emergentes las cuales son plantadas en el sustrato y las aguas residuales fluyen a través del mismo de forma vertical u horizontalmente. En este sistema el nivel del agua se mantiene por debajo del sustrato. Estos tipos de HT se clasifican en humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical.

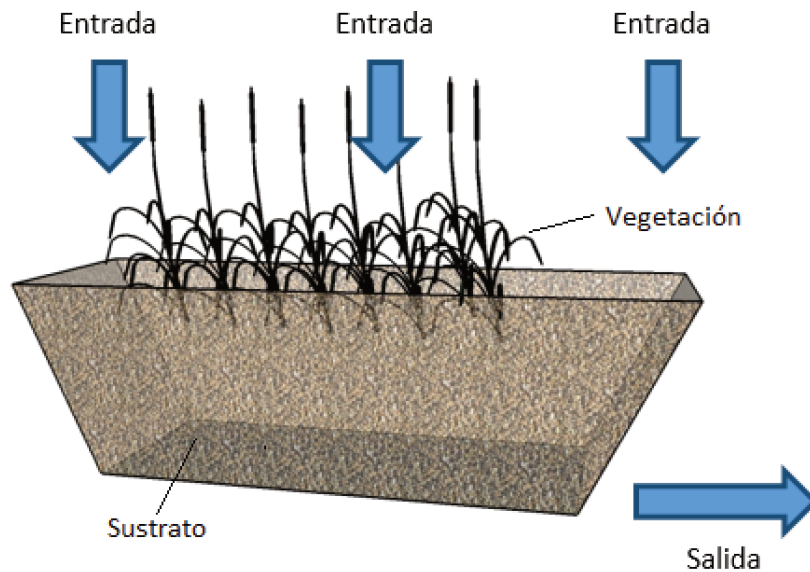
Entre otras ventajas, los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema en este tipo de HT, mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. También se elimina el riesgo de que las personas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada (Kadlec y Wallace, 2009).

5.5.4 HT de flujo subsuperficial vertical

Los humedales de flujo vertical generalmente se usan para tratar aguas residuales domésticas. Posteriormente al tratamiento primario, el efluente se descarga con volúmenes considerables con una determinada frecuencia sobre la superficie del sustrato para garantizar una buena y uniforme distribución sobre toda su superficie. El agua percola lentamente a través del sustrato y se recoge por medio de tuberías ubicadas en el lecho (Fig. 5). Entre cada carga de efluente, los poros del sustrato se llenan de aire, saturando de oxígeno el lecho y así sostener los procesos microbianos aerobios. El suelo debajo del HT debe impermeabilizarse por medio de una película impermeable plástica o membrana geotextil para evitar contaminación de las napas (Dotro et al., 2017).

Debido a las altas condiciones oxidantes dentro del lecho, estos sistemas son eficientes eliminando carbono orgánico (DBO y DQO). Los humedales de flujo vertical son también aptos cuando procesos estrictamente aerobios son necesarios como en el caso de la nitrificación. Por lo tanto, son normalmente usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, líquidos lixiviados de vertederos, y efluentes de industrias procesadoras de alimentos, los cuales usualmente contienen altas concentraciones de amonio y/o carbono orgánico.

Fig. 6. Esquema de un HT de flujo subsuperficial vertical (extraído de Nocetti, 2022).



5.5.5 HT de flujo subsuperficial horizontal

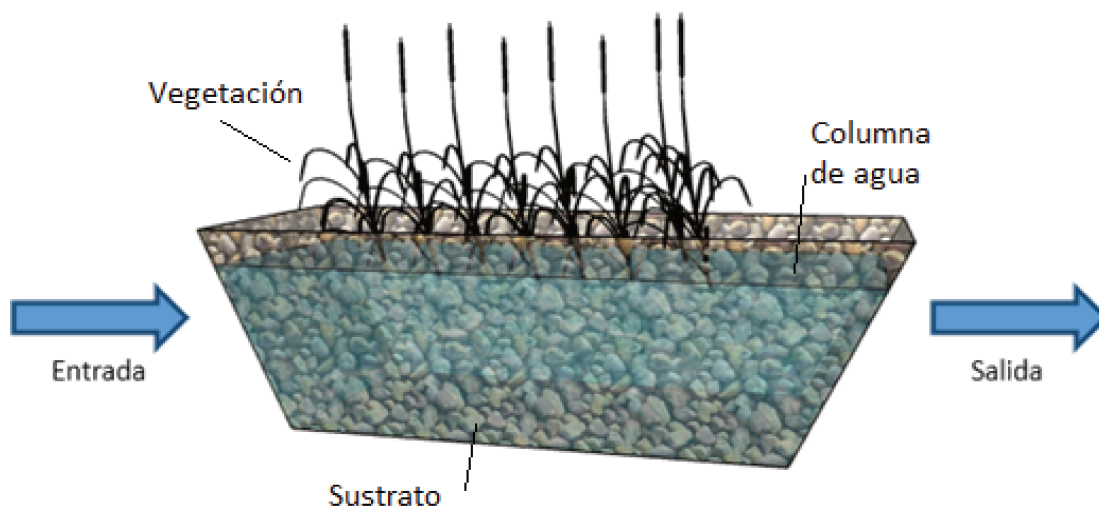
En este tipo de HT el efluente fluye desde su ingreso a través del sustrato en un recorrido horizontal hasta la tubería de drenaje por donde sale tratado. Durante este trayecto las aguas residuales entrarán en contacto con una red de zonas anaeróbicas, facultativas, y aeróbicas. Debido a que las raíces y rizomas de la vegetación liberan oxígeno al sustrato, las zonas aeróbicas se encuentran en la rizósfera, la cual es una zona ubicada alrededor de estos órganos subterráneos (Fig. 6).

Los humedales de flujo horizontal son usados para tratamiento secundario y terciario de agua residual doméstica, así como también para una variedad de efluentes industriales. Para el caso del tratamiento aguas residuales domésticas, el tratamiento primario se lleva a cabo generalmente mediante el uso de tanques sépticos o tanques Imhoff. Estos sistemas son ampliamente usados entre otros, en la República Checa, España, Portugal, Nicaragua y América del Norte (Dotro et al., 2017).

En los HT de flujo subsuperficial horizontal, el sustrato opera con flujo saturado y se encuentra plantado con macrófitas emergentes. Una tubería vertical instalada independientemente al lecho del humedal, controla el nivel de agua. El lecho se impermeabiliza del suelo por una lámina impermeabilizante plástica (Geomembrana HDPE) o una membrana de geotextil. La profundidad de la capa de sustrato es generalmente de 0,5 a 0,7 m y el nivel del agua es mantenido entre 5 y 10 cm por debajo

de la superficie. En aplicaciones de tratamiento terciario en el Reino Unido, la profundidad total de la excavación es de entre 1,0 a 1,5 m, de los que unos 0,60 m están rellenos con grava (Dotro et al., 2017). Estos sistemas son generalmente construidos con una pendiente de 1% para facilitar la circulación del efluente a tratar.

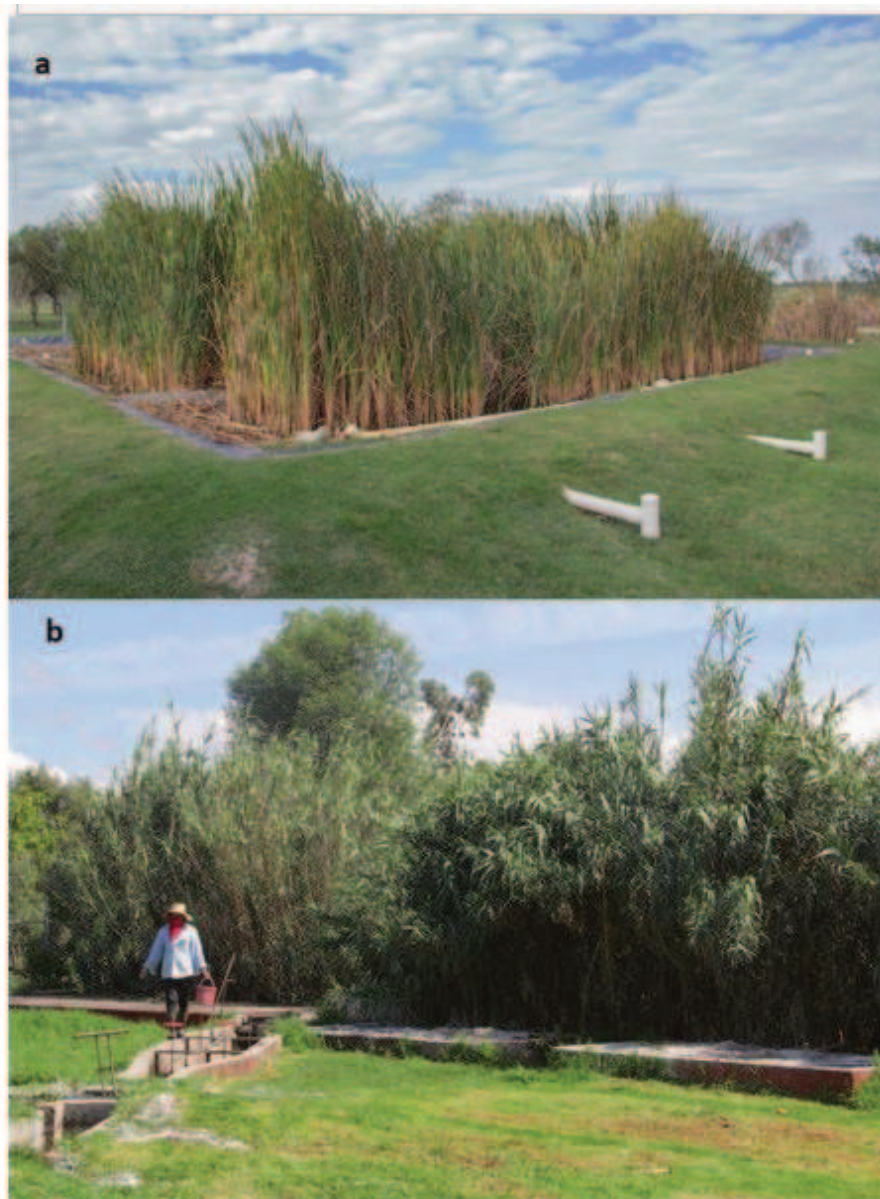
Fig.7. Esquema de un HT de flujo subsuperficial horizontal (extraído de Nocetti, 2022).



Durante la circulación del efluente a través de la rizósfera, ocurre la depuración de contaminantes mediante procesos físicos, químicos y microbiológicos. Estos HT pueden eliminar eficazmente contaminantes orgánicos. Debido a la limitada transferencia de oxígeno dentro del humedal, la eliminación de nutrientes (especialmente nitrógeno) es limitada, sin embargo, eliminan eficientemente nitratos.

Los HT son una alternativa eco-tecnológica para la purificación de todo tipo de aguas residuales. Están diseñados para que ocurran los procesos ecosistémicos de los humedales naturales, con el fin de que puedan tratar varios tipos de contaminantes simultáneamente a niveles satisfactorios, en comparación con otros sistemas de tratamiento convencionales (Idris et al., 2012). La Fig. 8 muestra a modo de estudio de ejemplos, diferentes casos de HT construidos en Latinoamérica.

Fig. 8. Ejemplos de humedales construidos. (a) Humedal híbrido consistente en una etapa de humedal de flujo libre y otra de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (Ciudad de Santo Tomé, Santa Fe) (b) Humedal de flujo subsuperficial horizontal construido en México (fotografías: Hernán Hadad).



5.5.6 Pretratamiento y tratamiento primario:

En la práctica, una consideración importante antes del vertido de un efluente crudo, es implementar un pretratamiento y/o un tratamiento primario. De esta manera, la aplicación del HT correspondería a un tratamiento secundario o hasta terciario del efluente que serviría como un pulido final o como un sistema de amortiguación o buffer frente a un eventual volcado accidental del efluente sin pretratamiento.

Todo tratamiento debe poseer un conjunto de elementos estáticos o dinámicos que

permitan eliminar los sólidos gruesos y finos (arenas), cuyo paso a los tratamientos posteriores dificultaría la operatividad de los mismos. También es necesario regular el caudal de entrada al humedal, para que no superen los criterios de diseño del mismo (Orozco Barrenetxea et al., 2011). Por esto, los distintos elementos de un pretratamiento son:

- Aliviaderos: permiten regular el caudal de funcionamiento del HT cuando se producen grandes incrementos de caudal por lluvias intensas.
- Tanques de homogeneización: empleados cuando llegan diferentes efluentes.
- Rejas y tamices: eliminan sólidos de tamaño grande y mediano.
- Desarenadores: eliminan sólidos finos y arenas.
- Desengrasadores: eliminan materia insoluble de menor densidad que el agua, la llamada materia flotante (grasas y aceites).

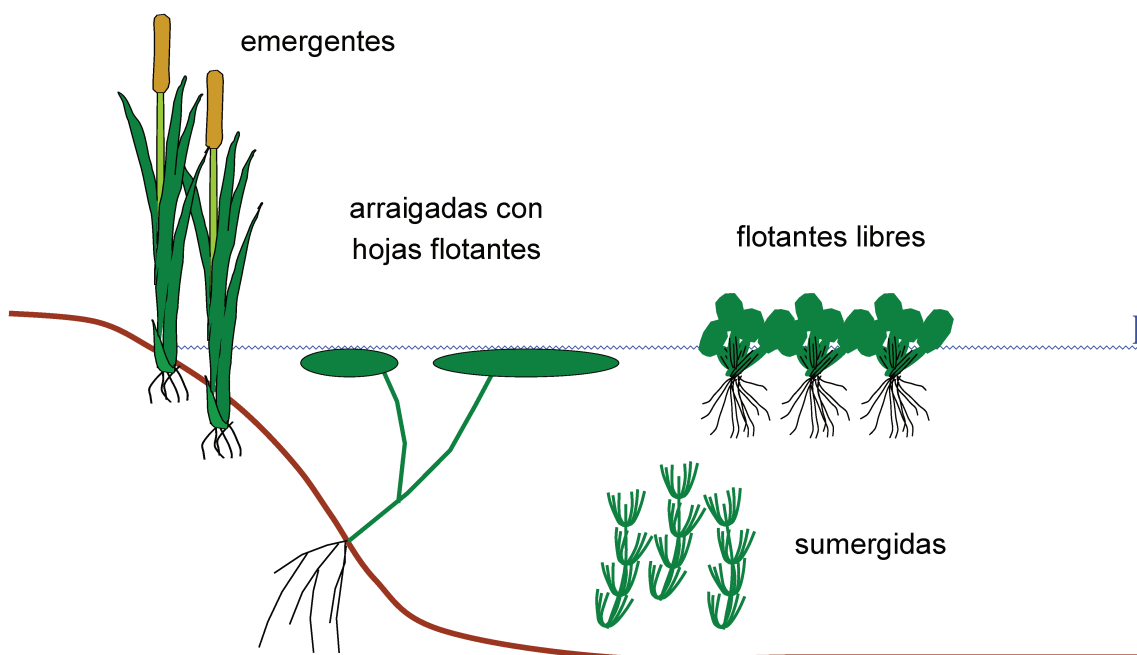
Por su parte, el tratamiento primario es el proceso o conjunto de procesos que tienen como objetivo la eliminación por medios físicos de los sólidos en suspensión más finos no eliminados en el pretratamiento. Lo constituye el denominado proceso de decantación o sedimentación, con o sin desengrase adicional (Orozco Barrenetxea et al., 2011).

5.5.7 Vegetación acuática

Las plantas que viven en ambiente acuáticos o de transición acuático/terrestre se denominan macrófitas, pudiendo desarrollarse en terrenos inundados o encharcados durante largos periodos de tiempo. En los humedales naturales de las regiones tropicales y subtropicales se desarrolla una vegetación acuática abundante y variada.

Las formas de vida de las macrófitas generalmente se clasifican según el lugar donde se produce la mayor parte de su tejido fotosintético en relación con la superficie del agua y si están o no enraizados en el sedimento o adheridos a otros sustratos, por ejemplo, a superficies rocosas (Hada y Maine, 2023). Las categorías comúnmente utilizadas son: emergentes, flotantes, sumergidas y enraizadas con hojas flotantes (Figs. 9 y 10).

Fig. 9. Esquema que representa las diferentes formas de vida de las macrófitas en ambientes naturales.



Las especies emergentes son plantas arraigadas que se desarrollan en los bordes de cuerpos de agua y son capaces de tolerar condiciones de inundación (Campbell et al., 2016). Las especies flotantes se desarrollan en zonas más profundas que las plantas emergentes. Las macrófitas que flotan libremente pueden desplazarse río abajo con la corriente y, a veces, también son arrastradas río arriba por la acción del viento. Las macrófitas sumergidas pueden mostrar partes aéreas en la superficie del agua, como flores o porciones de tallos, pero la mayor proporción se encuentra debajo de la superficie del agua y pueden o no enraizar en el fondo, dependiendo de la especie.

Una de las características más importantes que distinguen los humedales de tratamiento de otros tipos de tratamiento de efluentes, es la presencia de macrófitas. En un cuerpo de agua natural las diferentes macrófitas pueden encontrarse en una secuencia de crecimiento relacionado con el gradiente de profundidad del cuerpo de agua. En los humedales de tratamiento se intenta representar este gradiente plantando los diferentes tipos de macrófitas correspondiente a su forma de crecimiento (Hadad, 2018). Por ejemplo, en los bordes de un HT de flujo libre superficial sería deseable plantar especies emergentes, mientras que en las áreas centrales más profundas se desarrollarían especies que flotan libremente. Para lograr una mayor dispersión de plantas emergentes, una estrategia a aplicar

en HT de flujo libre superficial podría ser la adición de tabiques de suelo para disminuir la profundidad del agua (Maine et al., 2009).

Las plantas que crecen en HT tienen varias propiedades que las convierten en un componente esencial de estos sistemas (Brix, 1994). La comunidad macrofítica produce la mayor biomasa en comparación con otros grupos de organismos y, a través de su actividad metabólica, influye en la dinámica del sistema de diferentes maneras. Las macrófitas influyen en la biogeoquímica de los sedimentos, aumentando la diversidad del ambiente de la rizósfera y favoreciendo reacciones químicas y bioquímicas que mejoran la depuración, siendo el principal componente biológico de los humedales de tratamiento. La Tabla 4 muestra un listado de especies de macrófitas utilizadas en humedales de tratamiento en diferentes regiones del mundo.

Fig. 10. Fotografías de macrófitas con diferentes formas de vida que comúnmente se encuentran en humedales naturales. (a) Flotantes libres: *Eichhornia crassipes*. (b) sumergidas con hojas flotantes: *Victoria cruziana*. (c) Emergentes: *Typha domingensis*. (d) Sumergidas: *Egeria najas*. (e) Leñosas (árboles): *Salix humboldtiana* (f) Leñosas (arbustos): *Sesbania virgata* (Fotografías: H.R. Hadad).

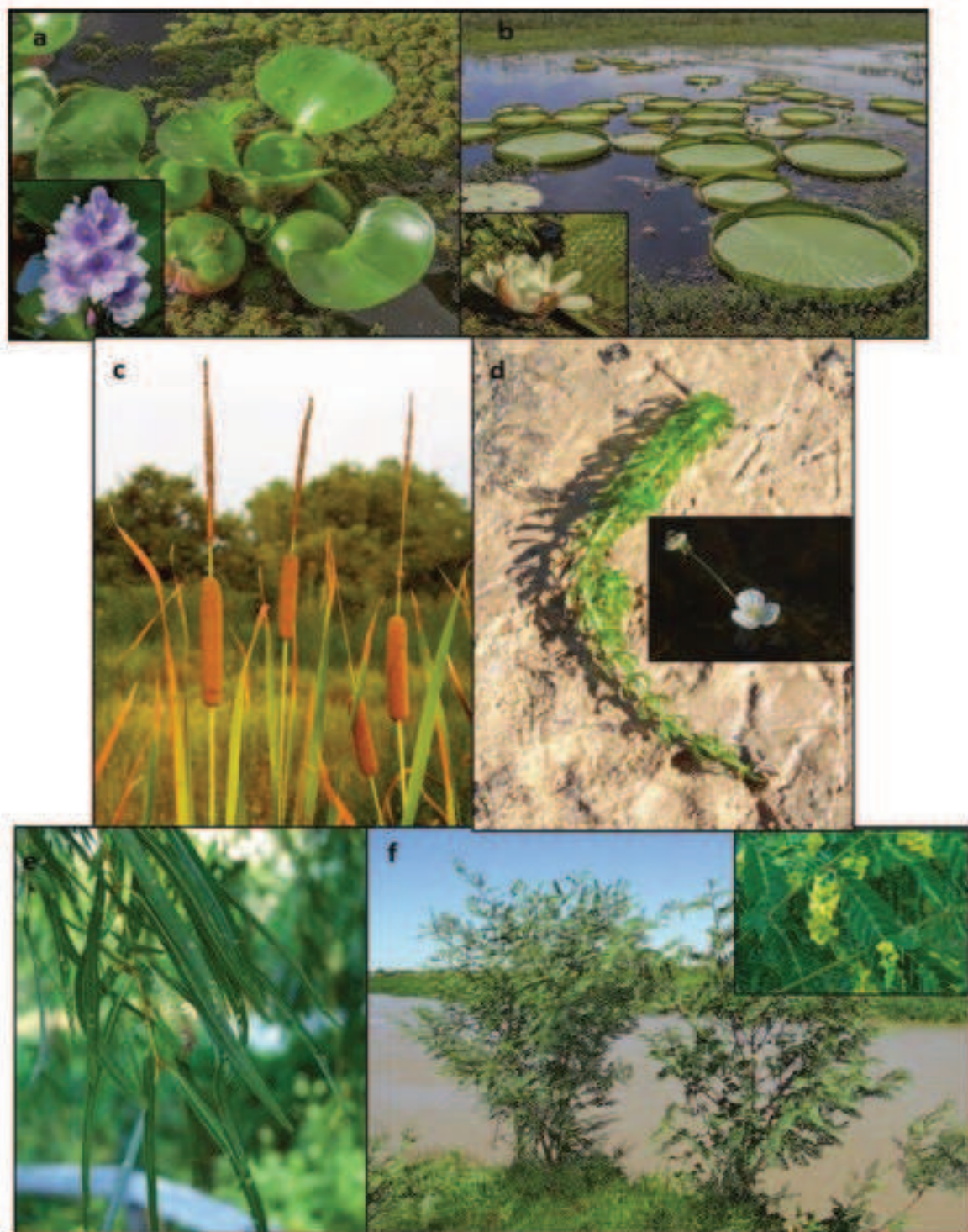


Tabla 4. Listado de especies de macrófitas utilizadas en HT en diferentes regiones del mundo.

Familia	Especies	Forma de crecimiento	Distribución	Invasiva
<i>Acanthaceae</i>	<i>Avicennia marina</i>	Árbol	África, Arabia, India, Australia, Islas del océano Índico	No
<i>Alismatáceas</i>	<i>Sagittaria Montevidensis</i>	Emergente	América del norte y del sur	SI
<i>Amarantáceas</i>	<i>Alternanthera Philoxeroides</i>	Emergente	América del norte y del sur	SI
<i>Amarilidáceas</i>	<i>Agapanthus Africanus</i>	Emergente	En todo el mundo, nativa de áfrica	SI
<i>Apiáceas</i>	<i>Eryngium Eburneum</i>	Emergente	América del sur	No
<i>Aráceas</i>	<i>Estratiotas de pistia</i>	Flotante	Pantropical	Si
	<i>Zantedeschia etiópica</i>	Emergente	América central y del sur, nativa de áfrica	Si
<i>Araliáceas</i>	<i>Hidrocotyle bonariensis</i>	Emergente	América del norte, del sur y áfrica	Si
	<i>Hidrocotyle ranunculoides</i>	Emergente	América del norte, del sur, en todo el	Si

			mundo	
<i>Cannáceas</i>	<i>Canna glauca</i>	Emergente	América del norte, del centro y del sur	No
	<i>Canna Indica</i>	Emergente	América del norte, del centro y del sur	No
<i>Ciperáceas</i>	<i>Cyperus alternifolius</i>	Emergente	Naturalizada de muchas regiones tropicales, nativa de Madagascar	Si
	<i>Cyperus Giganteus</i>	Emergente	América del norte, del centro y del sur	No
	<i>Papiro cyperus</i>	Emergente	América del Norte, américa del sur y de áfrica	Si
	<i>Schoenoplectus californicus</i>	Emergente	América del norte, del centro y del Sur	No
<i>Chenopodiaceae</i>	<i>Sarcocornia perenne</i>	Emergente	América del Norte y del Sur	No
<i>Compositae</i>	<i>Senecio bonariensis</i>	Emergente	América del Sur	No

<i>Iridaceas</i>	<i>Iris pseudacoro</i>	Emergente	América del Norte, del Centro y del Sur. Nativa de Europa	Si
<i>Marantacea</i>	<i>Thalia geniculata</i>	Emergente	Del sureste de América del norte y del Centro, y del Sur	No
<i>Onagráceas</i>	<i>Ludwigia peploides</i>	Emergente	América del norte, del Centro y del Sur	No
<i>Poáceas</i>	<i>Arundo donax</i>	Emergente	Amplia distribución en regiones subtropicales y tropicales del mundo	Si
	<i>Cortaderia selloana</i>	Emergente	Sudamérica	No
	<i>Himenacne abraza</i>	Emergente	América central y del sur	No
	<i>Panicum elephantipes</i>	Emergente	América central y del sur	Si
	<i>Paspalum repens</i>	Emergente	América del norte, del centro y del sur	Si
	<i>Phragmites australis</i>	Emergente	En todo el Mundo	Si

	<i>Vetiveria zizaniodes</i>	Emergente	Cultivada ampliamente en Asia	Si
<i>Poligonáceas</i>	<i>Polygonum punctatum</i>	Emergente	América del norte, del centro y del sur	No
<i>Pontederiáceas</i>	<i>Eichornia crassipes</i>	Flotación libre	Naturalizada en los trópicos del mundo, nativa de América del sur	No
	<i>Pontederia cordata</i>	Emergente	América del Norte, del centro y del Sur, África	Si
	<i>Pontederia rotundifolia</i>	Emergente	América del Centro y del Sur	No
<i>Salicaceas</i>	<i>Salix humboldtiana</i>	Árbol	América del Centro y del Sur	No
<i>Strelitziaceae</i>	<i>Strelitzia reginae</i>	Emergente	Ampliamente cultivada, originaria de Sudáfrica	Si
<i>Typhaceae</i>	<i>Typha angustifolia</i>	Emergente	Casi en todo el Mundo	Si
	<i>Typha domingensis</i>	Emergente	América del Norte, del Centro y del	Si

			Sur	
	<i>Typha latifolia</i>	Emergente	América del Norte, del Centro y del Sur, Norte de Europa	Si
<i>Zingiberaceae</i>	<i>Hedychium coronarium</i>	Emergente	Naturalizada en los trópicos, nativa de Indomalasia, Himalaya	Si

5.6 Procesos de remoción de contaminantes:

5.6.1 Sólidos en suspensión

Se denominan sólidos en suspensión a aquellos sólidos que quedan retenidos en un filtro estandarizado de tamaño de poro 1.2 μm . Los procesos que conducen a su remoción dependen del tipo de humedal y de la categoría de partículas que contenga el agua residual: sólidos sedimentables (tamaño $>100 \mu\text{m}$), partículas supracoloidales (1-100 μm), coloides (10-3 μm) y sólidos solubles ($<10^{-3} \mu\text{m}$). Los sólidos sedimentables caen al fondo del sistema fácilmente por gravedad, mientras que los coloides no.

En los HT de flujo superficial los sólidos en suspensión se eliminan por mecanismos de floculación/sedimentación y filtración/intercepción. Hay que señalar que además de los sólidos que contenga el influente el sistema puede también generarlos como consecuencia de restos de plantas, microorganismos y precipitados. La sedimentación ocurre como resultado de la gravedad, y en condiciones ideales se rige por la ley de Stokes, la cual indica que la velocidad de sedimentación es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. La floculación ocurre naturalmente por unión de partículas cargadas eléctricamente que colisionan entre sí, bien por el discurrir del agua, o bien por efecto de las partes sumergidas de las plantas. Una vez alcanzado un determinado tamaño de flóculo, éstos sedimentan. Se calcula que la sedimentación de sólidos sedimentables y partículas supracoloidales ocurre, en condiciones estándar, en

cerca de 3 días (Beascochea et al., 2014).

5.6.2 Materia orgánica

La eliminación de la materia orgánica en los HT es producto de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren de manera simultánea.

La materia orgánica se puede encontrar en forma de materia en suspensión sedimentable, la misma irá decantando en el fondo del humedal e irá experimentando procesos de degradación biológica por parte de los diferentes microorganismos presentes, tales como bacterias, protozoos y hongos (Kadlec y Wallace, 2009).

La materia orgánica biodegradable sirve como sustrato a múltiples organismos para desarrollarse. La disponibilidad de oxígeno en el influente, determinada a través de la DBO₅, condiciona el tipo de microorganismos que intervienen en la degradación de la materia orgánica. Los microorganismos aerobios requieren oxígeno como aceptor de electrones para desarrollarse y son muy eficientes en la transformación de la materia biodegradable en compuestos minerales, gases, y biomasa microbiana. Por ello, las condiciones de aerobiosis son más adecuadas para reducir la contaminación por materia orgánica, que las de anaerobiosis. Los microorganismos anaerobios utilizan compuestos diferentes al oxígeno como aceptores de electrones, por ejemplo, nitratos, carbonatos o sulfatos, dando lugar a compuestos reducidos del tipo de óxidos de nitrógeno, nitrógeno, azufre, tiosulfato. Estas reacciones son menos eficientes que las que ocurren en ambientes aerobios, y para que la reducción de la materia orgánica sea significativa tiene que liberarse metano o hidrógeno (Beascochea et al., 2014).

5.6.3 Nitrógeno

El nitrógeno en el agua se encuentra como amoníaco, nitritos y nitratos. Mediante la amonificación el nitrógeno orgánico se transforma en amoníaco, y su remoción en los HT transcurre principalmente mediante dos vías:

- Asimilación por parte de las propias plantas, luego de realizar cosecha y disposición final.
- Mediante procesos de nitrificación-desnitrificación. En la nitrificación se obtiene nitrógeno en forma de nitrato, eliminando de esta forma el exceso del nitrógeno presente en el agua, siendo la desnitrificación el proceso consecutivo en el cual las bacterias

heterótrofas en condiciones de anoxia, devuelven el nitrógeno a la atmósfera (Schlesinger y Bernhardt, 2013).

En los HT ocurren procesos de amonificación, nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno y asimilación por las plantas. La amonificación, también denominada hidrólisis o mineralización del nitrógeno orgánico, consiste en la transformación biológica del nitrógeno que está en la materia orgánica a nitrógeno amoniacal, proceso que ocurre durante la degradación de la materia orgánica. Puede ocurrir en condiciones aerobias o anaerobias; hay estudios que indican que en condiciones anaerobias la amonificación ocurre con más lentitud que en condiciones aerobias. La velocidad con que ocurre este proceso depende del pH, y aumenta con la temperatura. A modo de ejemplo, las aguas residuales domésticas se hidrolizan totalmente en 19 h a temperaturas de 11-14°C. El amonio formado puede sufrir procesos subsecuentes, como inmovilización por intercambio catiónico, volatilización en forma de amoníaco gaseoso, absorción por organismos fotosintéticos, asimilación por microorganismos y nitrificación. La nitrificación es el proceso de conversión biológica del amonio a nitrato por parte de microorganismos aerobios nitrificantes, suspendidos en el agua o situados en las biopelículas de las superficies sumergidas. El proceso se realiza en dos fases; la primera es la oxidación del amonio a nitrito por bacterias del género *Nitrosomonas*, y la segunda, la del nitrito a nitrato por bacterias del género *Nitrobacter*, entre otras. Se requieren condiciones aerobias, del orden de 4,3 g de O₂ para oxidar 1 g de nitrógeno amoniacal a nitrato y suficiente alcalinidad, del orden de 7,14 g CaCO₃⁻. El ion nitrato, al contrario que el amonio, no se inmoviliza en el sustrato, sino que permanece en el agua; de allí puede ser absorbido por plantas o microorganismos, o ser reducido (desnitrificación). La desnitrificación, o reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso, se produce en condiciones anaerobias por microorganismos –bacterias heterótrofas– que utilizan el nitrato como aceptor de electrones y el carbono orgánico como donante electrónico; es decir, son condiciones indispensables la ausencia de oxígeno y la disponibilidad de carbono orgánico (Beascochea et al., 2014).

5.6.4 Fósforo

El fósforo se encuentra en las aguas residuales en forma de fosfatos, ya sea disueltos o en partículas. Los fosfatos se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro- meta- y poli-fosfatos) y fosfatos en compuestos orgánicos (fósforo orgánico). Los fosfatos orgánicos se forman por procesos biológicos, y en el agua residual son componentes de

restos de alimentos y otros residuos orgánicos y organismos. El fósforo inorgánico del agua residual procede generalmente de productos de limpieza; otra fuente posible son los fertilizantes agrícolas.

El fósforo, junto el nitrógeno, es uno de los elementos más importantes en los ecosistemas. Sin embargo, a diferencia de nitrógeno, no hay un compuesto gaseoso significativo del fósforo que cierre el ciclo. El fósforo suele eliminarse por absorción directa por parte de las plantas, por adsorción por medio del sustrato (partículas de arcilla, hierro y aluminio) y precipitación con hierro, aluminio y calcio. Así pues, el principal mecanismo de remoción de fósforo de las aguas residuales necesariamente está basado en la acumulación en sedimentos y biomasa.

El fósforo que está en forma de partículas (sólidos) puede depositarse por sedimentación en el fondo del HT, o bien quedar atrapado en la biomasa de las plantas emergentes y adherirse en la superficie que forman las biopelículas, y desde allí quedar susceptible a sufrir otros procesos de tipo biológico. Con respecto al fósforo soluble, hay que resaltar que su dinámica es compleja, e incluye procesos físico-químicos de adsorción/absorción, intercambio, precipitación, solubilización, y reacciones redox. Los procesos de adsorción se dan sobre biopelículas en plantas y biomasa en descomposición y sobre los sedimentos del humedal. En los sedimentos suele ocurrir un intenso intercambio de fósforo con la columna de agua. Las condiciones básicas favorecen la formación de fosfatos de calcio insolubles; en condiciones ácidas pueden ocurrir precipitados de hierro y aluminio. Cuando hay cambios de pH los precipitados pueden solubilizarse. El fosfato adsorbido en las arcillas puede liberarse por intercambio de aniones, o por un bajo potencial redox. Por ejemplo, en condiciones reductoras, los compuestos con hierro férrico se reducen a compuestos de hierro ferroso, que son más solubles y liberar el ión fosfato. También en condiciones anóxicas los fosfatos férricos y aluminicos pueden hidrolizarse ocasionando la solubilización de fosfatos (Beascochea et al., 2014).

El fósforo orgánico disuelto, fósforo orgánico en partículas y fósforo insoluble no están disponibles para las plantas, a menos que sean transformados en fósforo inorgánico soluble. En el humedal estas transformaciones pueden ocurrir por la intervención de microorganismos que se hayan suspendidos y en biopelículas sobre superficies de plantas emergentes y en los sedimentos. Una vez solubilizado, puede ser asimilado por plantas y otros organismos como bacterias, algas y, por lo tanto, ser temporalmente retirado del agua. La mayor extracción de fósforo sucede durante el período de crecimiento de las plantas. Después, si no se retira la biomasa vegetal en otoño e invierno, el fósforo volvería al sistema

debido a la vejez y muerte de los tejidos vegetales, que se incorporan al agua. Sin embargo, también parte del fósforo que devuelven los restos vegetales al sistema puede pasar a formar deposiciones en los sedimentos, dando lugar a su inmovilización (Di Luca et al., 2017).

5.6.5 Patógenos

Las aguas residuales pueden contener un amplio espectro de organismos patógenos, entre los que se incluyen helmintos, protozoos, hongos, bacterias o virus. Sin embargo, para caracterizar rutinariamente el grado de contaminación del agua únicamente se realiza la determinación de un grupo de microorganismos que sirva como índice de contaminación fecal, ya que la caracterización completa sería inabordable económicamente. El indicador más común utilizado es el recuento de coliformes fecales, que en los influentes de los humedales oscila entre 0,8 y 7,0 colonias/100 mL. Los patógenos pueden encontrarse en la fracción de sólidos del influente o en suspensión en el agua (Beascochea et al., 2014).

La eliminación de los microorganismos patógenos se considera compleja porque depende de varios factores. En los HT de flujo subsuperficial la mayor eficiencia de remoción se debe a la granulometría del sustrato poroso sobre el cual se crean ambientes favorables para que los procesos biológicos se lleven a cabo y puedan reducir la cantidad de coliformes en el agua (Tchobanoglous y Burton, 1996).

5.6.6 Metales

Algunos de los metales que puede contener un influente son necesarios en una cierta concentración para el crecimiento de plantas y otros organismos, pero en concentraciones altas pueden resultar tóxicos, como, por ejemplo, el cromo, cobalto, cobre, cinc. Otros, en cambio, no tienen papel biológico y son tóxicos en cantidades muy pequeñas, como el arsénico, mercurio o cadmio. Cuando se sabe fehacientemente que el agua residual tiene contaminación significativa por metales, es necesario llevar a cabo tratamientos específicos de descontaminación.

Los procesos de remoción de metales de tipo físico-químico son: intercambio catiónico y formación de quelatos con el sustrato o con los sedimentos, la unión con materiales húmicos y la precipitación de sales insolubles como sulfatos o carbonatos. Estos procesos conducen a una acumulación en el fondo del humedal, y, por tanto, a la separación

de los metales de la columna de agua. Si los sedimentos o el sustrato del humedal se remueven puede ocurrir la resuspensión de los metales y ocasionalmente su solubilización (Beascoechea et al., 2014).

Capítulo N° 6: Diagnostico del arroyo los Troncos y canal vinculado al vuelco de efluentes

Las siguientes actividades se realizaron por el tesista en el marco de la práctica profesional final correspondiente a la Maestría en Gestión Ambiental (FICH, UNL), la cual se realizó en el Instituto de Química Aplicada del Litoral (IQAL, CONICET-UNL), ubicado en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ, UNL).

Para llevar a cabo los muestreos a campo se utilizaron los siguientes materiales: wader, botellas etiquetadas, guantes, botas de goma, GPS y vehículo para viajar.

Los puntos de muestreo fueron los siguientes (Figs. 11 a 14):

Punto 1: Canal donde se produce el vertido de los efluentes cloacales (Latitud -31.765270°; Longitud: -60.967963°)

Punto 2: Primer puente del camino desde Matilde hacia San Agustín (Latitud -31.761016°; Longitud: -60.965275°)

Punto 3: Arroyo Los Troncos, segundo puente del camino Matilde-San Agustín (de sur a norte) (Latitud: -31.756889°; Longitud: -60.961641°)

Fig. 11. Imagen satelital donde se observa el área donde se realizaron los muestreos cercanos a la localidad de “estación Matilde”.



Fig. 12. Imagen satelital donde se observa el punto de muestreo N°1.



Fig. 13. Imagen satelital donde se observa el punto de muestreo N°2.



Fig. 14. Imagen satelital donde se observa el punto de muestreo N°3.



En los puntos de muestreo 2 y 3 se tomaron muestras de sedimento y vegetación. En el punto 1 no se tomaron estas muestras debido a la ausencia de vegetación. En cada punto todas las muestras fueron tomadas por triplicado. Previo al transporte al laboratorio, las muestras de agua fueron refrigeradas. La especie vegetal muestreada fue *Schoenoplectus americanus* la cual era la especie dominante en cada punto de muestreo.

Se realizó un análisis físico-químico completo de las muestras de agua de cada punto, determinando de esta manera la Temperatura, OD, conductividad, y pH in situ utilizando una sonda multiparamétrica, y metales a través espectrofotometría de absorción atómica o espectrometría de emisión de plasma. En las muestras de vegetación y sedimento se determinaron las concentraciones de nitrógeno total Kjeldahl (NTK), fósforo total (PT) y metales (Cr, Pb, Cd, Ni, Cu y Zn) en diferentes tejidos. Las concentraciones de clorofila *a* fueron determinadas en las partes aéreas de las plantas. Todas las determinaciones analíticas se realizaron de acuerdo a APHA (2012) y USEPA (1994).

Los resultados de las determinaciones analíticas en las muestras de agua, plantas y sedimento se muestran en las tablas a continuación (Tablas 5 a 9). Además, se incluye un anexo al final del documento con los resultados de los análisis físico-químicos completos realizados en las muestras de agua.

Tabla 5. Parámetros medidos *in situ* en agua en los diferentes puntos de muestreo.

Puntos de muestreo	pH	Conductividad ($\mu\text{mho cm}^{-1}$)	OD (mg L^{-1})
1	$4 \pm 0,02$	5870 ± 120	$3,78 \pm 0,130$
2	$8,1 \pm 0,010$	$1268 \pm 90,0$	$0,100 \pm 0,001$
3	$7,9 \pm 0,010$	$2510 \pm 85,0$	$6,98 \pm 0,350$

Tabla 6. Concentraciones de NTK y PT determinadas en muestras de agua en cada punto de muestreo (mg L^{-1}).

Puntos de muestreo	NTK	PT
1	$294,9 \pm 15,4$	$0,282 \pm 0,050$
2	$25,9 \pm 2,69$	$14,6 \pm 0,304$
3	$2,65 \pm 0,030$	$12,3 \pm 0,245$

Tabla 7. Concentraciones de NTK y PT determinadas en el sedimento de cada punto de muestreo (mg g^{-1}).

Puntos de muestreo	NTK	PT
1	$1,06 \pm 0,010$	$0,632 \pm 0,116$
2	$0,54 \pm 0,005$	$0,737 \pm 0,055$
3	$0,94 \pm 0,015$	$3,12 \pm 0,013$

Tabla 8. Concentraciones de metales determinadas en el sedimento de cada punto de muestreo (mg Kg^{-1}) (ND = no detectado).

Puntos de muestreo	Cr	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn
1	$0,0205$ $\pm 0,0007$	$0,026$ $\pm 0,0$	ND	$0,002$ $\pm 0,0$	$0,017$ $\pm 0,0007$	$0,032$ $\pm 0,0007$
2	$0,0235$ $\pm 0,0007$	$0,03$ $\pm 0,0$	ND	$0,01$ $\pm 0,0$	$0,021$ $\pm 0,0$	$0,051$ $\pm 0,0$
3	$0,0205$ $\pm 0,0007$	$0,0355$ $\pm 0,004$	ND	$0,002$ $\pm 0,0$	$0,018$ $\pm 0,0$	$0,040$ $\pm 0,002$

Tabla 9. Concentraciones de metales determinadas en tejidos vegetales de plantas de *S. americanus* colectadas en cada punto de muestreo (mg Kg⁻¹) (ND = no detectado).

Puntos de muestro	órgano	Cr	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn	P
2	Hoja	0,051 ± 0,003	0,0085 ± 0,0007	ND	0,011 ± 0,0	0,0055 ± 0,0007	0,062 ± 0,006	3,58 ±0,284
	Raíz	0,081 ± 0,008	0,0225 ± 0,0007	ND	0,0145 ± 0,0007	0,015 ± 0,0	0,0585 ± 0,0007	2,87 ± 0,163
3	Hoja	0,040 ± 0,003	0,010 ± 0,0	ND	0,015 ± 0,0	0,006 ± 0,0	0,0665 ± 0,0007	2,37 ± 0,120
	Raíz	0,0315 ± 0,002	0,0305 ± 0,0007	ND	0,015 ± 0,001	0,0185 ± 0,0007	0,0605 ± 0,005	2,98 ± 0,020

Capítulo N° 7: Diseño del humedal

Hay muchas formas de dimensionar y diseñar un HC. En las últimas décadas, los enfoques de diseño han evolucionado desde una simple regla general a enfoques basados en regresión e incluso hasta cálculos más avanzados que tienen en cuenta factores tales como la tasa de carga hidráulica, flujo no ideal, concentración de fondo y meteorización del contaminante. Para cualquier diseño de humedal, es esencial tener en cuenta que los parámetros de diseño publicados se basan en datos operativos de sistemas reales a nivel mundial. Kadlec y Wallace (2009) recomiendan realizar una breve verificación para garantizar que se evite la extrapolación de datos durante el proceso de diseño. Las ecuaciones y/o los parámetros de diseño solo deben aplicarse a los nuevos diseños que se encuentren dentro del rango de los conjuntos de datos de los que se derivaron. El nuevo diseño debe estar dentro de las condiciones físicas y operativas de los datos de origen, las que incluyen:

- Tipo de humedal
- Concentraciones de entrada y salida
- Cargas hidráulicas y másicas
- Tamaño, relación de aspecto y profundidad
- Clima y pérdidas y/o ganancias de agua asociadas (lluvia, evapotranspiración, etc.)
- Ecología y comunidad vegetal

Los enfoques de diseño más comunes incluyen:

- Regla general (conocida también como “reglas de dedo” “Rule of the thumb”)
- Ecuaciones de regresión
- Flujo a pistón $k-C^*$
- Gráficos de carga
- $P-k-C^*$

A partir de estos enfoques de diseño, sólo las reglas generales y los gráficos de carga son aplicables a los HT de flujo vertical. Todos los demás enfoques sólo son aplicables a los HT de flujo libre y de flujo horizontal. En la práctica, la mayoría de los HT están diseñados para eliminar múltiples contaminantes. Al igual que con otras tecnologías de tratamiento, el diseñador debe realizar los cálculos para todos los contaminantes de interés y seleccionar el

diseño resultante que permita eliminar todos los contaminantes.

7.1 Regla general

La regla general es un enfoque de diseño prescriptivo basado en una aplicación particular de humedal en una región climática o geográfica específica. Muy a menudo, este enfoque se utiliza para una tecnología de humedal único en una guía local o nacional (Brix y Johansen, 2004). En general, el consejo para diseño se da en términos de requisitos de área por persona equivalente ($\text{m}^2/\text{hab-eq}$), pero también se puede dar, por ejemplo, como una velocidad de carga superficial ($\text{g DBO}_5/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ o $\text{g} \cdot \text{DQO}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$). La Tabla 10 presenta una selección de recomendaciones de diseño por “regla general” dadas como área de humedal requerida por persona equivalente ($\text{m}^2/\text{hab-eq}$). Este enfoque es una forma práctica de comenzar un procedimiento de diseño y puede ser efectivo cuando hay un conocimiento sustancial acumulado sobre la aplicación de la tecnología en la región bajo consideración. Sin embargo, se debe tener cuidado en que estas recomendaciones de diseño no se extrapolen a situaciones en las que las condiciones de contorno (tecnología de pretratamiento, generación de aguas residuales per cápita, clima, etc.) difieren mucho de aquellas bajo las cuales se crearon las recomendaciones.

Tabla 10. Recomendaciones de diseño de la regla general para climas templados (extraído de Kadlec y Wallace, 2009).

País	Tecnología	Área superficial específica ($\text{m}^2/\text{hab-eq}$)
Austria	Flujo vertical	4
Dinamarca	Flujo horizontal	5
	Flujo vertical	3
Alemania	Flujo vertical	4
Francia	Flujo vertical tipo francés	2

Los valores de diseño presentados aquí están relacionados con los países de clima templado (con estaciones marcadas). Para las regiones de clima cálidos, las cargas pueden ser más altas y los requisitos de área más bajos. Por lo tanto, es esencial deducir criterios de diseño adecuados para estas regiones. El lector debe consultar la literatura regional pertinente para representar mejor la realidad esperada en las condiciones de terreno.

Ventajas del enfoque de la regla general:

- Es muy fácil de usar

Desventajas del enfoque de la regla general:

- No tiene en cuenta las diferentes prácticas de uso de agua, tecnologías de pretratamiento, clima o concentraciones de aguas residuales afluentes.
- No tiene en cuenta el flujo no ideal.
- No considera la geometría de la celda del humedal ni los enfoques de diseño específicos para minimizar el riesgo de colmatación.

7.2 Ecuaciones de regresión

Las ecuaciones de regresión también se han utilizado para diseñar HT. Estas ecuaciones se generan a partir de una gran colección de datos. Generalmente requieren uno o dos valores de entrada (concentración de entrada o carga másica, y posiblemente tasa de carga hidráulica) y producen una estimación de la concentración de efluente esperada. La Tabla 11 proporciona algunos ejemplos de ecuaciones de regresión para diseñar un humedal de flujo horizontal. Se puede encontrar una extensa lista de ecuaciones de regresión en Rousseau et al. (2004).

Tabla 11. Ejemplo de ecuaciones de regresión para humedales de flujo horizontal.

Parámetro	Ecuación a, b	b Rango de entrada a,b	Rango de salida a,b	R ²
DBO5	$M_o = (0.13 \times M_i) + 0.27$	$6 < M_i < 76$	$0.32 < M_o < 21.7$	0.85
	$C_o = (0.11 \times C_i) + 1.87$	$1 < C_i < 330$	$1 < C_o < 50$	0.74
DQO	$M_o = (0.17 \times M_i) + 5.78$	$15 < M_i < 180$	$3 < M_o < 41$	0.79
SST	$M_o = (0.048 \times M_i) + 4.7$	$3 < M_i < 78$	$0.9 < M_o < 6.3$	0.42
	$C_o = (0.09 \times C_i) + 0.27$	$0 < C_i < 330$	$0 < C_o < 60$	0.67
NT	$M_o = (0.67 \times M_i) - 18.75$	$300 < M_i < 2,400$	$200 < M_o < 1,550$	0.96
PT	$M_o = (0.58 \times M_i) - 4.09$	$25 < M_i < 320$	$20 < M_o < 200$	0.61
	$C_o = (0.65 \times C_i) + 0.71$	$0.5 < C_i < 19$	$0.1 < C_o < 14$	0.75

^a M_i y M_o son cargas másicas afluente y efluente del sistema, respectivamente, en kg/ha·d (Vymazal, 1998).

^b C_i y C_o son concentraciones afluente y efluente del sistema, respectivamente, en mg/L (Brix, 1994).

Ventajas de usar ecuaciones de regresión:

- Son fáciles de usar.
- Toman en cuenta la calidad del agua afluente.
- Inherentemente toman en cuenta la concentración de fondo (C^*) porque las ecuaciones se crearon a partir de datos reales de calidad del agua de sistemas a escala real.

Desventajas del uso de ecuaciones de regresión:

- Sólo son aplicables si el diseño del nuevo humedal cae dentro del rango de datos a partir del cual se crearon las ecuaciones de regresión.
- Muchas ecuaciones de regresión fueron creadas a partir de sistemas de humedales para tratamiento muy grandes, y pueden no aplicarse a sistemas más pequeños.
- El caudal no siempre se considera.
- El área del humedal no puede determinarse a partir de ecuaciones que solo correlacionan la concentración o la masa.

7.3 Flujo a pistón k - C^*

El enfoque k - C^* de flujo a pistón de primer orden, tiene en cuenta las concentraciones afluentes y efluentes, así como la concentración de fondo, pero supone una hidráulica de flujo a pistón ideal. Actualmente, los ingenieros diseñadores utilizan menos este enfoque, pero todavía se informa a menudo en la literatura. La ecuación, adaptada para incorporar C^* , se puede utilizar para resolver el área del humedal, A , de la siguiente manera:

$$A = \frac{PQ_i}{k_A} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right) = \frac{PQ_i}{k_v h} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

donde:

P = número de tanques en serie o factor de dispersión

Q_i = Caudal afluente, m^3/d

C_o = concentración de salida o efluente, mg/L

C_i = concentración de entrada o afluente, mg/L

C^* = concentración de fondo, mg/L

k = constante de cinética de primer orden, m/año

K_v = coeficiente de reacción volumétrico de primer orden, 1/d.

h = profundidad media del agua en el HC(m)

kA = coeficiente superficial de primer orden modificado, m/d

Además, la ecuación puede usarse para corregir el coeficiente de velocidad de reacción superficial kA a las condiciones climáticas (por anticipado) para el nuevo diseño de humedal.

Ventajas del enfoque de pistón $k-C^*$:

- Tiene en cuenta la concentración del afluente (C_i), la concentración de fondo (C^*), y el coeficiente de velocidad de reacción superficial (kA).
- Puede tener en cuenta el factor de corrección de la temperatura (θ).

Desventajas del enfoque de pistón $k-C^*$:

- No tiene en cuenta el flujo no ideal, lo cual genera un riesgo, especialmente cuando se deben alcanzar bajas concentraciones de los efluentes.
- No hay información sobre qué valor de kA elegir (por ejemplo, cuando se informa un rango de coeficientes de velocidad de reacción).

La suposición de un sistema hidráulico de flujo a pistón ideal se ha informado ampliamente en la literatura como inexacta (Kadlec, 2000), y por lo tanto ya no se recomienda su uso.

7.4 Gráficos para cálculo por carga másica

Otro enfoque posible es el uso de gráficos de carga másica. El manual de diseño de HT a pequeña escala escrito por Wallace y Knight (2006) se creó a partir de una recopilación de datos sobre la calidad del agua de más de 1.500 sistemas a pequeña escala en todo el mundo. Los datos se usaron para crear gráficos de dispersión que muestran tasas de carga másica del afluente versus concentraciones de los efluentes. Este manual de diseño es el primero de su tipo en considerar el concepto de tolerancia al riesgo en el diseño de humedales.

Los gráficos de carga de Wallace y Knight (2006) proporcionan una visualización de la tolerancia al riesgo del diseño, incluidas las líneas que corresponden al percentil 50, 75 y 90 de los datos recopilados (Fig. 15). Usando estos gráficos, se puede elegir el diseño de un nuevo humedal para tratamiento a pequeña escala en función de la tasa de carga másica del afluente, la concentración deseada de los efluentes y la tolerancia al riesgo. Un diseño

elegido basado en el percentil 50 indica que un sistema alcanzaría la concentración del efluente deseada el 50% del tiempo. Se predeciría que un diseño elegido basado en la línea del percentil 90 alcanzaría la concentración de efluente deseada el 90% del tiempo (por ejemplo, nueve de cada diez veces), pero requeriría un área mucho más grande.

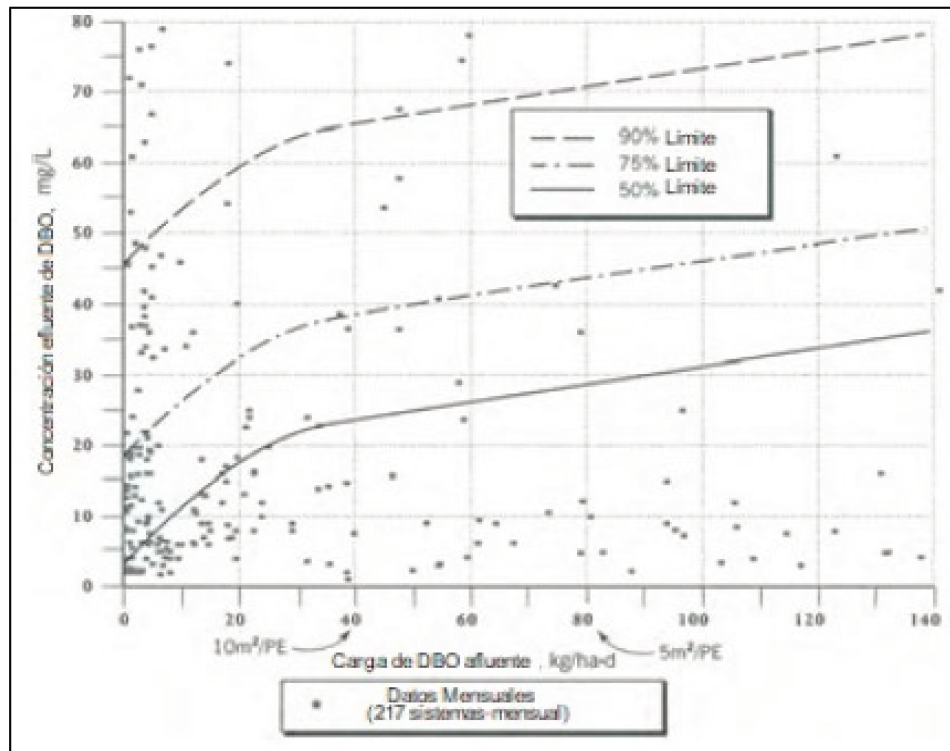
Ventajas del enfoque de los gráficos para cálculo por carga másica:

- Considera la concentración afluente y efluente (C_i and C_o), así como el caudal de entrada (Q_i).
- Inherentemente considera la concentración de fondo (C^*) y el flujo no ideal porque los gráficos se crearon a partir de datos de calidad del agua de sistemas a escala real.
- Permite al diseñador elegir el nivel de tolerancia al riesgo para un diseño dado.

Desventajas del enfoque de los gráficos para cálculo por carga másica:

- No tiene en cuenta explícitamente los coeficientes de velocidad de reacción (k_A o k_V) o de corrección de temperatura (θ).
- No considera explícitamente la geometría de la celda del humedal ni los enfoques de diseño específicos para minimizar el riesgo de obstrucción. Esto debe verificarse por separado.

Fig. 15. Gráficos de carga de Wallace y Knight (2006).



7.5 Enfoque P-k-C*

Esta es una ecuación de primer orden modificada con una concentración de fondo distinta de cero, la cual modela al humedal como una serie, corrigiendo las desviaciones del flujo real.

El área del humedal A se puede calcular reorganizando la Ecuación:

$$A = \frac{PQ_i}{k_A} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right) = \frac{PQ_i}{k_V h} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

Donde:

C_o = concentración de salida o efluente, mg/L

C_i = concentración de entrada o afluente, mg/L

C^* = concentración de fondo, mg/L

h = profundidad de agua del humedal, m

k_A = coeficiente superficial de primer orden modificado, m/d

k_V = coeficiente de reacción volumétrico de primer orden, 1/d

P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional

Q = caudal de entrada, m³ /d

7.6 Dimensionamiento del humedal:

En primer lugar, se calcula el área superficial requerida mediante el modelo de diseño de remoción del contaminante limitante, luego se realiza el dimensionamiento teniendo en cuenta el diseño hidráulico, para finalmente hacer la revisión de él o los modelos de remoción y sus eficiencias.

Este método (Reed et al., 1995) sigue una cinética de primer orden, involucra una constante de reacción que depende de la temperatura, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\ln Ca}{Ce} = KT \cdot TRH$$

donde:

Ca: Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

Ce: Concentración del contaminante en el efluente, mg/l

KT: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹

TRH: tiempo de retención hidráulico, d

Se debe tener en cuenta que los detritos de las plantas y otras sustancias orgánicas presentes de manera natural contribuyen con DBO₅ y nutrientes al sistema, por lo que existe una concentración de fondo por debajo de la cual no se deben diseñar estos sistemas (Crites et al., 2006).

El Tiempo de retención hidráulico del sistema se calcula con la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q}$$

donde:

L: Longitud de la celda de humedal, m

W: Ancho de la celda de humedal, m

y: Profundidad de la lámina de agua, m

n: Porosidad del sustrato filtrante, expresado como decimal.

Q: Caudal promedio del sistema, m³/d.

Dado que el caudal de entrada al sistema puede ser diferente al de salida, debido a las pérdidas y ganancias relacionadas con precipitación y evapotranspiración, es recomendable calcular el caudal promedio del sistema basándose en datos medidos localmente. Para un diseño preliminar se puede suponer que el caudal de entrada es igual al de salida.

7.7 Diseño hidráulico

El diseño hidráulico de un HT es fundamental para su buen funcionamiento. El agua fluye a través del humedal y debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos.

La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema, por lo que se hace necesario que el fondo del humedal tenga la pendiente necesaria para permitir su vaciado completo cuando así se requiera.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. Relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son las recomendadas, porque si bien relaciones mayores asegurarían el flujo a pistón, con el tiempo, cuando se cumulen residuos de vegetación se presentarán inundaciones en la parte alta del humedal. Es aconsejable usar el gradiente hidráulico más pequeño posible para tener una reserva en caso de necesitarse ajustes futuros. Una relación largo-ancho $\leq 3:1$ suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo-eficiencia, pero otras combinaciones de longitud y gradiente hidráulico son posibles también de modo que se pueda ajustar la forma del humedal al sitio y su topografía.

La máxima pérdida de carga disponible es igual al total de la profundidad del agua (y) del humedal que equivaldría a $m=100\%$. Este no sería un diseño conservador, porque el humedal podría estar seco al final y no tendría capacidad de reserva si la resistencia al flujo aumentara en el futuro.

7.8 Elección del tipo de humedal y de las macrófitas a utilizar:

Para este proyecto se opta por diseñar un humedal de flujo subsuperficial horizontal como alternativa para tratar las aguas residuales en estudio. Este tipo de HT tiene ventajas, tales como la minimización de olores desagradables, bajo costo de operación y de mantenimiento, siendo estéticamente agradable y contribuyendo potencialmente a constituir un hábitat para la biodiversidad local.

De acuerdo a los datos recabados y a los análisis realizados, el HT se construirá en el predio de la Comuna de la localidad de Matilde. El efluente a tratar será transportado por camiones atmosféricos hasta el HT. Se evaluará el pretratamiento a realizar antes de ser volcado al HT.

En cuanto a la elección de la especie de macrófita se ha optado por *S. americanus* ya que fue la especie dominante en la zona. De todas maneras, una especie alternativa en el caso de no encontrar disponibilidad en campo, sería *Typha domingensis* debido a las ventajas que presenta esta macrófita para el tratamiento de aguas residuales (Mufarrege et al., 2016, 2018, 2021).

7.9 Dimensiones del HT propuesto:

Para favorecer la circulación del efluente a tratar y evitar la formación de cortocircuitos hidráulicos, se propone que las medidas del HT sean de:

Longitud: 15 m

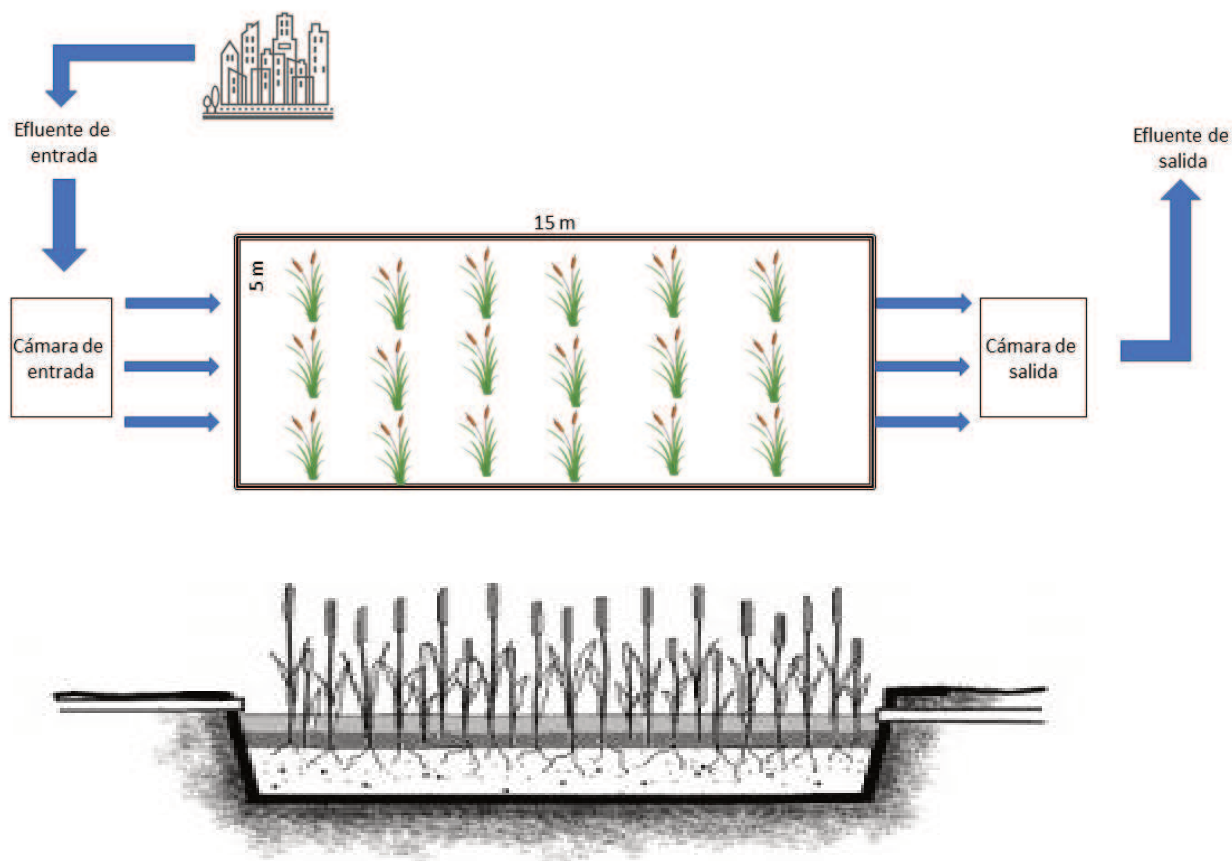
Ancho: 5 m

Profundidad: 0,6 m

La Fig. 16 muestra esquemas del sistema propuesto. Las dimensiones de excavación deben permitir la instalación del lecho junto con un borde libre en su parte superior. En este diseño, se ha determinado un borde libre de 0,2 m, lo que resulta en una profundidad total de excavación de 0,8 m. De esta profundidad, 0,6 m corresponde al sustrato (compuesto por 0,5 m de zona saturada y 0,1 m de zona no saturada), mientras que los 0,2 m restantes corresponden al borde libre.

Para optimizar la distribución del afluente y la recolección del efluente, es recomendable incluir zonas de amortiguación en los puntos de entrada y salida del humedal. Estas zonas deben contener rocas de mayor tamaño, y tener una dimensión que generalmente varía entre 0.5 y 1.0 metros de longitud. En este diseño, se ha establecido una longitud de 0.8 metros. El tamaño de las rocas utilizadas en estas áreas puede oscilar entre 10 y 20 cm.

Fig. 16. Esquemas del HT de flujo subsuperficial horizontal a construir. Imagen superior: vista de planta, Imagen inferior: vista de perfil.



El HT a construir será similar al que se muestra en la Fig. 17, el cual corresponde a un caso real de estudio en un centro de cuidado de mascotas de una fábrica de alimentos balanceados, que el equipo de trabajo monitoreó previamente.

Fig. 17. Fotografía de un HT de flujo subsuperficial horizontal construido en una industria real el cual fue monitoreado previamente por el equipo de trabajo.



Luego de la construcción del HT y de la aclimatación de las plantas, se propone llevar a cabo el monitoreo y mantenimiento del sistema. Esto se realizará tomando muestras mensuales de los efluentes, de las plantas y del sustrato de la entrada y salida al humedal. En cuanto al mantenimiento, se propone realizar cosechas periódicas de las partes aéreas vegetales a fin de evitar su descomposición durante las estaciones frías del año.

7.10 Gastos constructivos y operacionales del HT a construir

Se calcularon los costos de inversión necesarios para la implementación del HT. Se incluyeron en la estimación los costos asociados al uso del terreno requerido para la adecuación de la infraestructura, así como los gastos en mano de obra y maquinaria empleada en la construcción. Además, se consideraron los costos de los materiales utilizados, incluyendo la geomembrana para el revestimiento.

Asimismo, se tomaron en cuenta los costos relacionados con la adquisición del material vegetal, incluyendo el transporte y las actividades de carga y descarga desde el sitio

de origen hasta la infraestructura. La Tabla 12 muestra un presupuesto estimado de los gastos a realizar para la construcción y puesta en funcionamiento del HT.

Tabla 12. Presupuesto estimado de los gastos a realizar para la construcción y puesta en funcionamiento del HT propuesto.

Costos construcción		
Rubro	Característica	costo
Traslado de las maquinarias (retroexcavadora + mini cargadora)	Suponiendo una distancia de 200 km totales (ida y vuelta)	\$ 605.000
Excavación de la celda	Tiempo calculado por 8 h de trabajo	\$ 3.600.000
Localización y replanteo	Clavos de acero, estacas, herramientas, etc.	\$ 400.000
Impermeabilización con Geomembrana 500 µm	Valor aprox. por m ² de \$10.800	\$4.795.200
Sustrato de grava (5 - 80 mm)	Valor por m ³ de \$55.000	\$24.420.000
2 tanques cisterna tricapa de 1000 L	Valor calculado por 2 tanques más el flete 50 Km	\$ 400.000
Caños awaduct + pvc+ accesorios	Valor aproximado de caños más accesorios	\$ 300.000
Subtotal de infraestructura		\$34.520.000
imprevisto (10%)	Se calculó un 10% del subtotal de la infraestructura	\$ 3.452.000
Personal constructivo	4 ayudantes * 160 h totales	\$4.832.800
Personal profesional + administración	4 profesionales + 2 administrativos (1 mes)	\$7.200.000
Colecta, transporte, carga y descarga de macrófitas	Suponiendo 2 viajes de (60 km c/u, ida y vuelta)	\$648.000
Costo total		\$50.652.800

Costos puesta en funcionamiento y mantenimiento posterior		
Rubro	Característica	costo
Cosecha de macrófitas (anual)	Cosecha cada 4 meses, incluye	\$2.401.200

	maquinaria y mano de obra	
Extracción de sedimentos de las cámaras	Cada 4 meses, incluye mano de obra	\$ 1.260.000
Monitoreo de parámetros de calidad	Mano de obra e insumos	\$2.700.000
Costo total		\$6.361.200

Capítulo N° 8: Elaboración de conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones:

- **Factibilidad técnica y ambiental del humedal de tratamiento (HT):**

El proyecto desarrollado demuestra que el uso de un HT de flujo subsuperficial horizontal es una alternativa técnica y ambientalmente viable para el tratamiento de las aguas residuales de la localidad de Matilde. Su implementación permitirá reducir significativamente la carga contaminante que actualmente se está vertiendo al arroyo los Troncos.

- **Eficiencia de remoción de los contaminantes:**

Un HT diseñado adecuadamente puede remover eficientemente sólidos en suspensión, materia orgánica (DBO, DQO), nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y patógenos, mejorando de manera apreciable la calidad del efluente antes de su vuelco, así cumplir con los parámetros de vuelco impuestos por la normativa local.

- **Bajo costo de ejecución y mantenimiento**

A diferencia de otras alternativas de tratamiento, el HT requiere costos de operación y mantenimiento notablemente menores, lo que lo convierte en una opción sustentable y accesible para pequeñas comunidades.

- **Resultados de los análisis:**

Una vez realizados los análisis físico químicos se pudo constatar que el cuerpo receptor presenta una carga contaminante elevada excediendo los valores normales permisibles (DBO, DQO, pH) por la legislación provincial, comprometiendo al sistema acuático y a la salud de la población.

- **Beneficios sustentables**

La construcción del HT no solo contribuirá a la mejora de la calidad del arroyo los Troncos, sino también preservará la biodiversidad local y la salud de la población. Al mismo tiempo ofrece la posibilidad de utilizar el efluente tratado para fines de riego.

- **Cumplimiento de normativa**

El proyecto se enmarca dentro del cumplimiento de las normativas a nivel nacional, provincial y local, lo que fortalece la viabilidad del proyecto.

8.2 Recomendaciones

- **Implementación del HT como solución a la problemática:**

Se recomienda a las autoridades de la comuna de Matilde la construcción de un humedal subsuperrficial de flujo horizontal como solución prioritaria a la problemática planteada.

- **Ampliación a futuro del sistema de tratamiento:**

Debido al crecimiento de la población futura y para evitar cortocircuitos en el sistema, se sugiere la posibilidad, a futuro, de expandir el humedal artificial o construir humedales complementarios, así aumentar la capacidad de carga del humedal y aumentar la calidad del efluente.

- **Nexo entre instituciones académicas y científicas:**

Fomentar la colaboración entre instituciones académicas y científicas para favorecer las capacidades técnicas locales y brindar capacitaciones de operación y mantenimiento del humedal.

- **Construcción de modelo a escala:**

Antes de la construcción del humedal diseñado, se recomienda la construcción del humedal a escala pequeña para probar su funcionamiento y eficiencia.

- **Uso alternativo del agua tratada:**

Se deberá evaluar la posibilidad reutilizar el agua tratada para riego de predios pertenecientes a la comuna y/o espacios verdes, con el fin de promover un uso integral de la misma.

Capítulo N° 9: Bibliografía

- A, D., Oka, M., Fujii, Y., Soda, S., Ishigaki, T., Machimura, T., Ike, M., 2017. Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Sci. Tot. Environ.* 584–585, 742–750.
- Ahmad, T., Aadil, R.M., Ahmed, H., Ur Rahman, U., Soares, B.C., Souza, S.L., Pimentel, T.C., Scudino, H., Guimaraes, J.T., Esmerino, E.A., Freitas, M.Q., Almada, R.B., Vendramel, S.M., Silva, M.C., Cruz, A.G. 2019. Treatment and utilization of dairy industrial waste: a review. *Trends Food Sci. Technol.* 88, 361–372.
- Ahmad, I., Abdullah, N. 2025. Nature-Based technologies for wastewater treatment and bioenergy production. IWA Publishing.
- Akinbile, C.O., Yusoff, M.S., Ahmad Zuki, A.Z. 2012. Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by *Cyperus haspan*. *Waste Manag.* 32(7), 1387-139.
- Alarcón, M.T., Zurita, F., Lara-Borrero, J., Vidal, G. 2018. Humedales de Tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 271 p.
- APHA. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, New York. 1268 p.
- Arias, C.A., del Bubba, M., Brix, H. 2001. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Res.* 35(5), 1159-1168.
- Arivoli, A., Mohanraj, R., Seenivasan, R. 2015. Application of vertical flow constructed wetland in treatment of heavy metals from pulp and paper industry wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 17, 13336-43.
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R.M., Babaei, A.A., Vymazal, J., Paydary, P. 2020. Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecol. Eng.* 146, 105725.
- Beascoechea, E.M., Miguel Muñoz, J., Curt Fernández de la Mora, M.D. 2014. Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Proyecto LIFE.
- Bialowiec, A., Davies, L., Albuquerque, A., Randerson, P.F. 2012. The influence of plants on nitrogen removal from landfill leachate in discontinuous batch shallow constructed wetland with recirculating subsurface horizontal flow. *Ecol. Eng.* 40, 44-52.

- Biasatti, N.R., Rozzatti, J.C., Fandiño, B., Pautaso, A., Mosso, E., Marteleur, G., Algarañaz, N., Giraudo, A., Chiarulli, C., Romano, M., Ramírez Llorens, P., Vallejos, L. 2016. Las ecorregiones, su conservación y las áreas naturales protegidas de la provincia de Santa Fe. Ministerio de Medio Ambiente, Santa Fe.
- Breitholtz, M., Nēaslund, M., Stråe, D., Borg, H., Grabic, R., Fick, J. 2012. An evaluation of free water surface wetlands as tertiary sewage water treatment of micropollutants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 78, 63–71.
- Brix, H. 1994. Constructed wetlands for municipal wastewater treatment in Europe. In: *Global wetlands: old world and new*. Mitsch, W.J. (ed.) Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 325-333 p.
- Brix, H., Johansen, N.H. 2004. Danish guidelines for vertical flow wetland systems. *Okologisk byfornyelse og spildevandsrenslinier* N 52. Miljøstyrelsen Miljøministeriet, Aarhus, Denmark.
- Busch, M. 2020. Ecología General-Teoría de modelos de crecimiento: Modelos geométrico y exponencial.
- Camaño Silvestrini, N.E., Maine, M.A., Hadad, H.R., Nocetti, E., Campagnoli, M.A. 2019. Effect of feeding strategy on the performance of a pilot scale vertical flow wetland for the treatment of landfill leachate. *Sci. Tot. Environ.* 648, 542-549.
- Campbell, D., Keddy, P.A., Broussard, M., McFalls-Smith, T.B. 2016. Small changes in loading have large consequences: experimental data from ten wetland plants. *Wetlands*. 36, 457–466.
- Cao, M., Sy, N.D., Yu, C.P., Gan, J. 2024. Removal of neonicotinoid insecticides in a large-scale constructed wetland system. *Environ. Pollut.* 344, 123303.
- Comino, E., Riggio, V., Rosso, M. 2011. Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland. *Ecol. Eng.* 37, 1673-1680.
- Crites, R.W., Middlebrooks, J., Reed, S.C. 2006. *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, USA. 527 p.
- Cuzziol Boccioni, A.P., Peltzer, P.M., Attademo, A.M., Leiva, L., Colussi, C.L., Repetti, M.R., Russell-White, K., Di Conza, N., Lajmanovich, R.C. 2024. High toxicity of agro-industrial wastewater on aquatic fauna of a South American stream: Mortality of aquatic turtles and amphibian tadpoles as bioindicators of environmental health. *Water Environ Res.* 96(3), e11010.
- Dan, A., Oka, M., Fujii, Y., Soda, S., Ishigaki, T., Machimura, T., Ike, M. 2017. Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow

- constructed wetlands. *Sci. Tot. Environ.* 584-585, 742-750.
- Delgado, N., Bermeo, L., Hoyos, D.A., Peñuela, G.A., Capparelli, A., Marino, D., Navarro, A., Casas-Zapata, J.C. 2020. Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands. *Water Res.* 187, 116448.
- Di Luca, G.A., Maine, M.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Sánchez, G.C., Bonetto, C.A. 2011. Metal retention and distribution in the sediment of a constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Ecol. Eng.* 37, 1267-1275.
- Di Luca, G.A., Maine, M.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Pedro, M.C., Sánchez, G.C., Caffaratti, S.E. 2017. Phosphorus distribution pattern in sediments of natural and constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 108, 227-233.
- Di Luca, G.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Maine, M.A. 2019. Nitrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland. *Sci. Tot. Environ.* 650(1), 233-240.
- Di Luca, G.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Maine, M.A., Nocetti, E., Montañez, F., Campagnoli, M.A. 2023. Cr(III) and Cr(VI) removal in floating treatment wetlands (FTWs) using *Typha domingensis*. *Int. J. Phytorem.* 25(13), 1819-1829.
- Dipu, S., Anju, A., Kumar, V., Gnana Thanga, S. 2010. Phytoremediation of dairy effluent by constructed wetland technology using wetland macrophytes. *Global J. Env. Res.* 4(2), 90-100.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., von Sperling, M. 2017. Biological wastewater treatment series. Vol. 7: Treatment Wetlands. IWA Publishing. London.
- Foladori, P., Ruaben, J., Ortigara, A.R.C. 2013. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater. *Biores. Tech.* 149, 398-405.
- Gersberg, R.M., Elkins, B.V., Lyon, S.R., Goldman, C.R. 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Res.* 20, 363-368.
- Gutierrez, G., Schierano, M.C., Griffa, C., Boglione, R. 2025. Horizontal subsurface constructed wetlands for landfill leachate treatment: substrate selection and macrophyte adaptation study. *J. Environ. Eng.* 151(5), 04025017.
- Hadad, H.R. 2018. Clasificación de la vegetación en los humedales de tratamiento. En: *Humedales de Tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina* (Alarcón-Herrera, M.T., Zurita, F., Lara-Borrero, J., Vidal, G.

- eds.). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. pp. 34-44.
- Hadad, H.R., Maine, M.A., Bonetto, C. 2006. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Chemosphere*. 63(10), 1744-1753.
- Hadad, H.R., Mufarrege, M.M., Pincioli, M., Di Luca, G.A., Maine, M.A. 2010. Morphological response of *Typha domingensis* to an industrial effluent containing heavy metals in a constructed wetland. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 58(3), 666-675.
- Hadad, H.R., Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Maine, M.A. 2018. Long-term study of Cr, Ni, Zn, and P distribution in *Typha domingensis* growing in a constructed wetland. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25(18), 18130- 18137.
- Hadad, H.R., Maine, M.A. 2023. Tropical and subtropical wetland plant species used for phytoremediation in treatment wetlands. In: *Wetlands for remediation in the tropics* (Lobato de Magalhães, T., Otte, M.L. eds.). Springer. pp. 31-50.
- Hadad, H.R., Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Sánchez, G.C., Caffaratti, S.E., Maine, M.A. 2024. Response of *Typha domingensis* during an accidental discharge of high Cr(VI) concentration in a full-scale treatment wetland. *J. Environ. Chem. Eng.* 12, 112378.
- Haddis, A., Van der Bruggen, B., Smets, I. 2020. Constructed wetlands as nature-based solutions in removing organic pollutants from wastewater under irregular flow conditions in a tropical climate. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 20, 38-47.
- Headley, T.R., Tanner, C.C. 2012. Constructed wetlands with floating emergent macrophytes for stormwater treatment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 42, 2261–2310.
- Higgins, J., Lugowski, A. 1996. The use of a natural forested wetland for landfill leachate polishing in a cold climate. *Proceedings of Constructed Wetlands in Cold Climates: Design, Operation, Performance Symposium*. The Friends of St. George: Niagara-on-the-lake, Ontario, Canada.
- Hoffmann, C.C., Heiberg, L., Audet, J., Schønfeldt, B., Fuglsang, A., Kronvang, B., Bering Ovesen, N., Kjaergaard, C., Bruun Hansen, C.H., Jensen, H.S. 2012. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water. *Ecol. Eng.* 46, 75-87.

- Horne, A., Beutel, M., Woodside, G. 2024. The Prado Wetlands: 24 years of river diversion treatment wetlands reducing nitrate and phosphate while increasing an endangered bird. *Ecol. Eng.* 200, 107174.
- Idris, S.M., Jones, P.L., Salzman, S.A., Croatto, G., Allinson, G., 2012. Evaluation of the giant reed (*Arundo donax*) in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of dairy processing factory wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 19(8), 3525–3537.
- Ijaz, A., Shabir, G., Khan, Q.M., Afzal, M. 2015. Enhanced remediation of sewage effluent by endophyte-assisted floating treatment wetlands. *Ecol. Eng.* 84, 58–66.
- Kadlec, R.H. 2000. The inadequacy of first-order treatment wetland models. *Ecol. Eng.* 15, 105-120.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D. 2009. *Treatment wetlands*, 2nd. ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Kadlec R.H., Zmarthie A. 2010. Wetland treatment of leachate from a closed landfill. *Ecol. Eng.* 36, 946-957.
- Knox, A.S., Paller, M.H., Seaman, J.C., Mayer, J., Nicholson, C. 2021. Removal distribution and retention of metals in a constructed wetland over 20 years. *Sci. Tot. Environ.* 796, 149062.
- Kumar, R., Sarmah, A.K., Padhye, L.P. 2019. Fate of pharmaceuticals and personal care products in a wastewater treatment plant with parallel secondary wastewater treatment train. *J. Environ. Manag.* 233, 649–659.
- La Forge, M.J. 1997. Attenuation of landfill leachate by a natural marshland system. *Proceedings of Leachate Wetlands Conference*, Romulus, Michigan.
- Landaverde, A.C., Strosnider, W.H.J., White, S.A. 2024. Plant suitability for floating treatment wetland applications in brackish waters. *Ecol. Eng.* 200, 107183.
- Lara-Borrero, J. 1999. *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales*. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Lavrova, S. 2016. Treatment of landfill leachate in two stage vertical-flow wetland system with/without addition of carbon source. *J. Chem. Technol. Metall.* 51(2), 223-228.
- Licata, M., Farruggia, D., Tuttolomondo, T., Iacuzzi, N., Leto, C., Di Miceli, G. 2022. Seasonal response of vegetation on pollutants removal in constructed wetland system treating dairy wastewater. *Ecol. Eng.*, 182, 106727.
- Lindelien, C.M., Xu, X., Peck, E. 2024. Metal removal by two constructed wetlands in the southeastern US: Implications on metal remediation, *Ecol. Eng.* 201, 107210.

- Liu, S., Zhang, Y., Feng, X., Pyo, S.H. 2024. Current problems and countermeasures of constructed wetland for wastewater treatment: A review. *J. Water. Process. Eng.* 57, 104569.
- Madera-Parra, C.A., Peña-Salamanca, E.J., Peña, M.R., Rousseau, D.P.L., Lens, P.N.L. 2015. Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in constructed wetlands. *Int. J. Phytorem.* 17, 16-24.
- Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sánchez, G., Bonetto, C. 2006. Nutrient and metal removal in a constructed wetland for waste-water treatment from a metallurgic industry. *Ecol. Eng.* 26, 341-347.
- Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sánchez, G. 2007. Temporal and spatial variation of phosphate distribution in the sediment of a free surface water constructed wetland. *Sci. Tot. Environ.* 380, 75-83.
- Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sánchez, G., Bonetto, C. 2009. Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. *J. Environ. Manag.* 90(1), 355-363.
- Maine, M.A., Hadad, H.R., Sánchez, G.C., Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Caffaratti, S.E., Pedro, M.C. 2013. Sustainability of a constructed wetland faced with a depredation event. *J. Environ. Manag.* 128, 1-6.
- Maine, M.A., Hadad, H.R., Sánchez, G.C., Di Luca, G.A., Mufarrege, M.M., Caffaratti, S.E., Pedro, M.C. 2017. Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecol. Eng.* 98, 372-377.
- Maine, M.A., Hadad, H.R., Sanchez, G.C., Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Schierano, M.C., Nocetti, E., Caffaratti, S.E., Pedro, M.C. 2022. Constructed wetlands plant treatment system: An eco-sustainable phytotechnology for treatment and recycling of hazardous wastewater. In: *Phytoremediation technology for the removal of heavy metals and other contaminants from soil and water* (Kumar, V., Shah, M., Shahi, S., eds.). Elsevier. 481-495 pp.
- Majumder, A., Kumar Gupta, A., Otter, P., Roher, D., Bhatnagar, A., Khalil, N., Bresciani, R., Arias, C.A. 2024. Combination of advanced biological systems and photocatalysis for the treatment of real hospital wastewater spiked with carbamazepine: A pilot-scale study. *J. Environ. Manag.* 351, 119672.

- Mantovi, P., Piccinini, S., Marmiroli, M., Marmiroli, N. 2011. Constructed wetlands are suitable to treat wastewater from Italian cheese productions. *Water Practice Technol.* 6(3), wpt2011045.
- Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Hadad, H.R., Maine, M.A. 2011. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity. *Ecotoxicology*. 20, 457-465.
- Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Hadad, H.R., Sanchez, G.C., Pedro, M.C., Maine, M.A. 2016. Effects of the presence of nutrients in the removal of high concentrations of Cr(III) by *Typha domingensis*. *Environ. Earth Sci.* 75(10), 887-894.
- Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Di Luca, G.A., Sanchez, G.C., Maine, M.A., Caffaratti, S.E., Pedro, M.C. 2018. Organic matter effects on the Cr(VI) removal efficiency and tolerance of *Typha domingensis*. *Water Air Soil Poll.* 229, 384.
- Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Hadad, H.R., Maine, M.A. 2021. Exposure of *Typha domingensis* to high concentrations of multi-metal and nutrient solutions: Study of tolerance and removal efficiency. *Ecol. Eng.* 159, 106118.
- Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Carreras A.A., Hadad H.R., Maine, M.A., Campagnoli, M., Nocetti, E. 2023. Response of *Typha domingensis* Pers. in floating wetlands systems for the treatment of water polluted with phosphorus and nitrogen. *Environ. Sci. Poll. Res.* 30(17), 50582-50592.
- Nielsen, S., Stefanakis, A.I. 2020. Sustainable dewatering of industrial sludges in sludge treatment reed beds: Experiences from pilot and full-scale studies under different climates. *App. Sci.* 10(21), 7446.
- Nivala J., Hoos, M.B., Cross, C., Wallace, S., Parkin, G. 2007. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Sci. Tot. Environ.* 380(1-3), 19-27.
- Nivala, J., Kahl, S., Boog, J., van Afferden, M., Reemtsma, T., Müller, A. 2019. Dynamics of emerging organic contaminant removal in conventional and intensified subsurface flow treatment wetlands. *Sci. Tot. Environ.* 649, 1144-1156.
- Nocetti, E., Maine, M.A., Hadad, H.R., Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Sánchez, G.C. 2020. Selection of macrophytes and substrates to be used in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of a cheese factory wastewater. *Sci. Tot. Environ.* 745, 141100.
- Nocetti, E. 2022. Sistema de humedales para la depuración de efluentes de una industria láctea. Tesis de Doctorado en Ingeniería, Mención Ambiental, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.

- Nocetti, E., Hadad, H.R., Di Luca, G.A., Mufarrege, M., Maine, M.A. 2023. Pollutant removal modeling in a hybrid wetland system for industrial wastewater treatment. *J. Water Process Eng.* 53, 103794.
- Nocetti, E., Hadad, H.R., Di Luca, G.A., Mufarrege, M.M., Maine, M.A. 2024. Performance of a multi-stage hybrid wetland system for the treatment of a dairy effluent. *J. Water Process Eng.* 58, 104797.
- Orozco Barrenetxea, C. 2011. Contaminación ambiental: una visión desde la química. Thomson. Madrid. 682 p.
- Patel, P.A., Dharaiya, N.A. 2014. Constructed wetland with vertical flow: A sustainable approach to treat dairy effluent by phytoremediation. *Int. J. Eng. Sci. Inn. Tech.* 3(1), 509-512.
- Pinedo-Hernandez, J., Marrugo-Negrete, J., Pérez-Espitia, M., Durango-Hernández, J., Enamorado-Montes, G., Navarro-Frómata, A. 2024. A pilot-scale electrocoagulation-treatment wetland system for the treatment of landfill leachate. *J. Environ. Manag.* 351, 119681.
- Prasad, M.N.V. 2007. Aquatic plants for phytotechnology. In: *Environmental bioremediation technologies* (Singh, S.N., Tripathi, R.D. eds.). Springer. 259-274 p.
- Prashant, S.K., Sharma, J.K., Singh, N., Ram, H. 2013. Treatment of wastewater and restoration of aquatic systems through an ecotechnology based constructed treatment wetlands-a successful experience in Central India. *Water Sci. Technol.* 68(7), 1566–1573.
- Ramdat, N., Wang, Z.J., Huang, J.C., Wang, Y., Chachar, A., Zhou, C., Wang, Z. 2022. Effects of enrofloxacin on nutrient removal by a floating treatment wetland planted with *Iris pseudacorus*: Response and resilience of rhizosphere microbial communities. *Sustainability.* 14(6),144-1156.
- Reed, S.C., Crites, R.W., Middlebrooks, E.J. 1995. *Natural systems for waste management and treatment*. 2nd. ed. McGraw-Hill. New York. 433 p.
- Rodriguez-Dominguez, M.A., Konnerup, D., Brix, H., Arias, C.A. 2020. Constructed wetlands in Latin America and the Caribbean: A review of experiences during the last decade. *Water.* 12(6), 1744.
- Rousseau, D.P.L., Vanrolleghem, P.A., De Pauw, N. 2004. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Water Res.* 38(6), 1484-1493,
- Saeed, T., Miah, M.J., Majed, N., Hasan, M., Khan, T. 2020. Pollutant removal from

- landfill leachate employing two-stage constructed wetland mesocosms: co-treatment with municipal sewage. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27(22), 28316–28332.
- Sandoval Herazo, L., Zurita, F., Nani, G., Del Angel-Coronel, O., Aguilar, F.A. 2021. Treatment of swine effluent mixed with domestic wastewater and vegetation development in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow wetlands. *Ecol. Eng.* 173, 106432.
- Santos, F., Almeida, C.M.R., Ribeiro, I., Ferreira, A.C., Mucha, A.P. 2019. Removal of veterinary antibiotics in constructed wetland microcosms-response of bacterial communities. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 169, 894-901.
- Schierano, M.C., Panigatti, M.C., Maine, M.A., Griffa, C.A., Boglione, R. 2020. Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake. *J. Environ. Manag.* 272, 111094.
- Schlesinger, W.H., Bernhardt, E.S. 2013 *Biogeochemistry: An analysis of global change*. 3rd. ed. Elsevier. 688 p.
- Sochacki, A., Surmacz-Górska, J., Faure, O., Guy, B. 2014. Polishing of synthetic electroplating wastewater in microcosm upflow constructed wetlands: Metals removal mechanisms. *Chem. Eng. J.* 242, 43-52.
- Speer, S., Champagne, P., Anderson, B. 2012. Pilot-scale comparison of two hybrid-passive landfill leachate treatment systems operated in a cold climate. *Biores. Technol.* 104, 119-126.
- Stefanakis, A., Akratos, C.S., Tsihrintzis, V.A. 2014. *Vertical flow constructed wetlands. Eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. Elsevier. 378 p.
- Sun, W., Zheng, Z. 2022. Research on removal of fluoroquinolones in rural domestic wastewater by vertical flow constructed wetlands under different hydraulic loads. *Chemosphere.* 303, 135100.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. 1996. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Vol. 2, 3era. ed. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hill. México D.F.
- Teglia, C.M., Hadad, H.R., Uberti-Manassero, N., Siano, A.S., Repetti, M.R., Goicoechea, H.C., Culzoni, M.J., Maine, M.A. 2024. Removal of enrofloxacin using *Eichhornia crassipes* in microcosm wetlands. *Environ. Sci. Poll. Res.* 31, 14845–14857.
- That, L.T., Hoang, H.Y. 2024. Utilizing a settling pond-based constructed wetland for the treatment of shrimp aquaculture wastewater – From laboratory to field scale: A case study in Ben Tre Province, Vietnam. *Ecol. Eng.* 199, 107172.
- USEPA, 1994. Method 200.2: Sample preparation procedure for spectrochemical

- determination of total recoverable elements. Rev. 2.8. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA.
- Verlicchi, P., Zambello, E. 2014. How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review. *Sci. Tot. Environ.* 470, 1281–1306.
- Vymazal, J. 2013. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Res.*, 47, 4795-4811.
- Vymazal, J. 2024. Natural and constructed wetlands for ecosystem restoration (at the occasion of 30 years anniversary of Ecological Engineering journal). *Ecol. Eng.* 107188.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L. 2015. Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen. *Ecol. Eng.* 84, 202-208.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R. (Eds.). 1998. *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden. 366 p.
- Wallace, S., Knight, R. 2006. *Small scale constructed wetland treatment systems: Feasibility, design criteria, and O&M requirements*. Water Environment Research Foundation. Alexandria, Virginia, 350 p.
- Wei, H., Hashmi, M.Z., Wang, Z. 2024. The interactions between aquatic plants and antibiotics: Progress and prospects. *Environ. Pollut.* 341, 123004.
- Weragoda, S.K., Jinadasa, K.B.S.N., Zhang, D.Q., Gersberg, R.M., Tan, S.K., Tanaka, N., Jern, N.W. 2012. Tropical application of floating treatment wetlands. *Wetlands*. 32(5), 955–961.
- Werkneh, A.A. 2024. Decentralized constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries: Field-scale case studies, overall performance and removal mechanisms. *J. Water Process. Eng.* 57, 104710.
- Wojciechowska, E., Gajewska, M., Ostojski, A. 2016. Reliability of nitrogen removal processes in multistage treatment wetlands receiving high-strength wastewater. *Ecol. Eng.* 98, 365-371.
- Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kusch, P., Kipkemoi, W., Masi, F., Dong, R. 2015. Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: challenges, operational strategies and overall performance. *Environ. Pollut.* 201, 107–120.
- Yalcuk, A., Ugurlu, A. 2020. Treatment of landfill leachate with laboratory scale vertical flow constructed wetlands: plant growth modeling. *Int. J. Phytorem.* 22(2), 157-

- Zeng, L., Liu, X., Ma, J., Yang, J., Zhou, A. 2024. Current progress on manganese in constructed wetlands: Bibliometrics, effects on wastewater treatment, and plant uptake. *Environ. Res.* 249, 118382.
- Zhang, D.Q., Jinadasa, K.B., Richard, M.G., Liu, Y., Ng, W.J., Tan, S.K. 2014. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries: a review of recent developments (2000- 2013). *J. Environ. Manag.* 141, 116–131.
- Zhang, X., Wang, T., Xu, Z., Zhang, L., Dai, Y., Tang, X., Tao, R., Li, R., Yang, Y., Tai, Y. 2020. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal. *Chem. Eng. J.* 379, 122363.

Capítulo N° 10: Anexos

10.1 Anexo II – Población horizonte

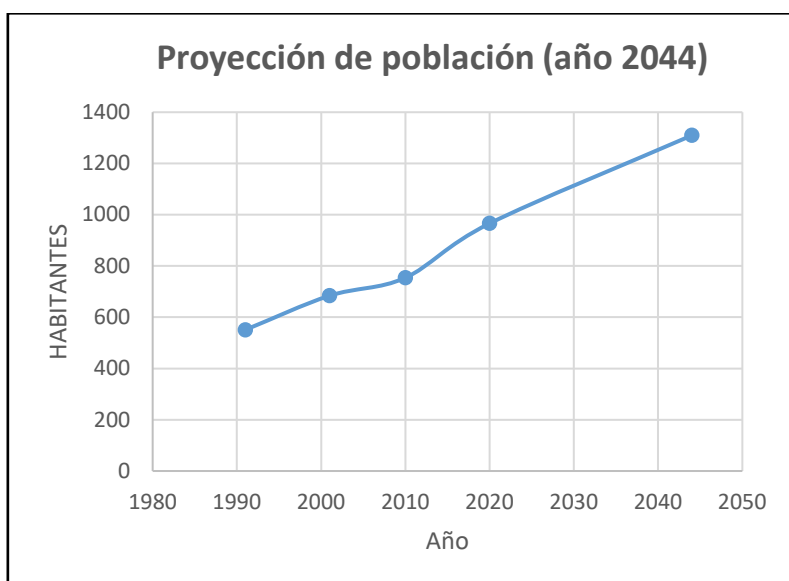
10.1.1 Crecimiento de la población local

La cantidad de agua residual generada está directamente relacionada con el tamaño de la población. Por esta razón, debe tenerse en cuenta el crecimiento de la población a futuro ya que, tanto la composición como el volumen de las aguas residuales, pueden cambiar con el crecimiento de la población. Al incrementar la población, aumenta la carga orgánica y los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, lo que puede requerir un ajuste en el diseño para asegurar una descontaminación efectiva.

Para realizar un análisis de la demanda a futuro, se aplicaron diversas tasas de crecimiento, utilizando distintos métodos. De modo de poder encontrar aquella curva de crecimiento poblacional que reflejará con mayor similitud el aumento de población en el futuro de la localidad de Matilde, se utilizaron varias metodologías distintas para su cálculo:

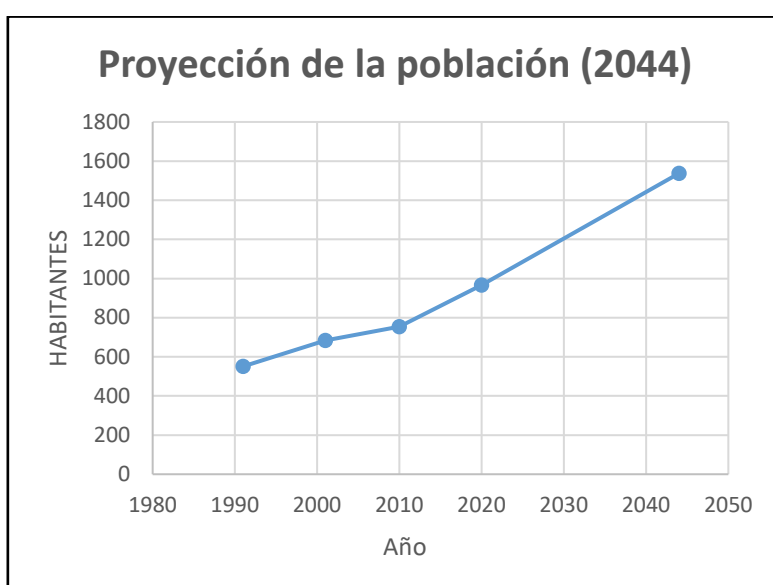
10.1.2 Método Aritmético

Año	Población	Tuc	Tci	Puc	Pci	Tf	Pf
1991	551	2020	1991	966	551	2044	1309
2001	684	2010	1991	754	551	2044	1117
2010	754	2001	1991	684	551	2044	1256
2020	966					K	1228
2044	1309					Pf	1309



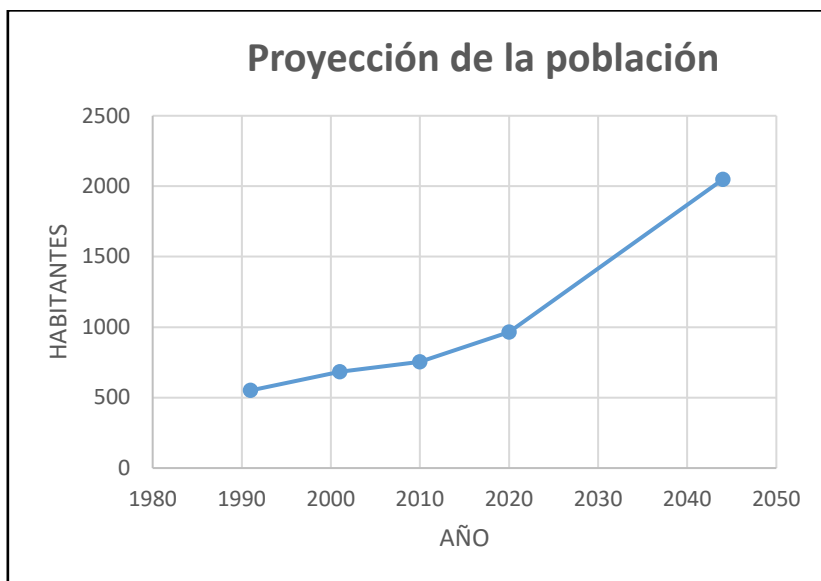
10.1.3 Método geométrico

Año	Población	Tuc	Tci	Puc	Pci	Tf	r	Pf
1991	551	2020	1991	966	551	2044	0,0195	1537
2001	684	2010	1991	754	551	2044	0,0166	1322
2010	754	2001	1991	684	551	2044	0,0219	1733
2020	966				551	2044	K	0,020
2044	1537						Pf	1537



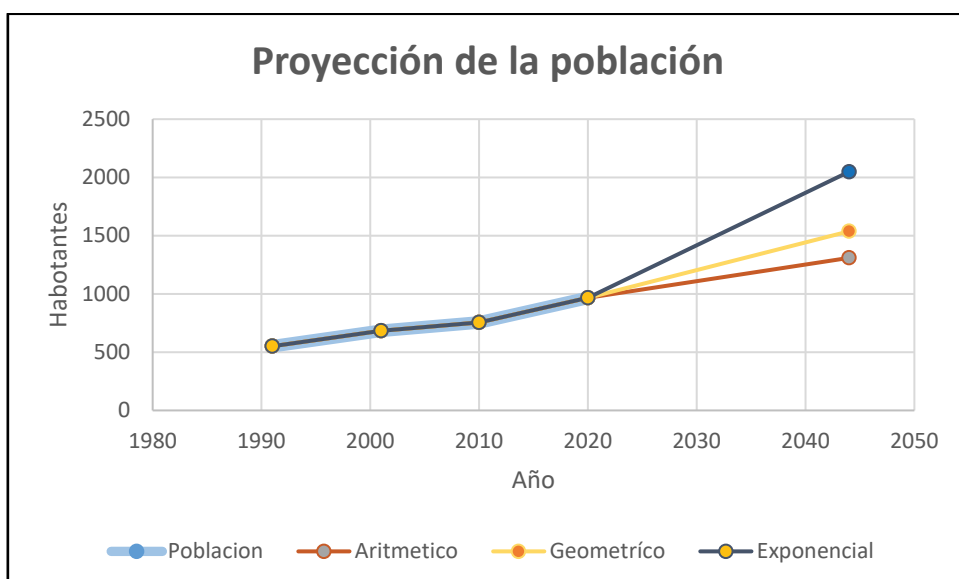
10.1.4 Método exponencial

Año	Población	P _{cp}	P _{ca}	P _{ci}	T _{cp}	T _{ca}	T _{ci}	Tf	k
1991	551	966	754	551	2020	966	1991	2044	0,00024
2001	684	754	684	551	2010	754	1991	2044	0,00008
2010	754	684	551	551	2001	684	1991	2044	0,00016
2020	966							k	0,02478
2044	2049							Pf	2048,62390



10.1.5 Análisis entre los diferentes métodos utilizados

Censos poblacionales		Método Aritmético		Método Geométrico		Método Exponencial	
Año	Población	Año	Población	Año	Población	Año	Población
1991	551	1991	551	1991	551	1991	551
2001	684	2001	684	2001	684	2001	684
2010	754	2010	754	2010	754	2010	754
2020	966	2020	966	2020	966	2020	966
		2044	1309	2044	1537	2044	2049



10.2 Anexo II - Resultados de análisis químicos de efluentes

10.2.1 Análisis Químicos Punto 1

Todas las determinaciones cuantitativas se llevaron a cabo utilizando las técnicas propuestas por APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2012, 22nd Edition, Amer. Publ. Health Assoc.

CONTROL DE CALIDAD DE EFLUENTES

Solicitante: Hernán Hadad

Muestra: efluente Matilde 1

Extraída, conservada y transportada por: el solicitante

Resultados:

pH (unidades de pH).....	4,0
Conductividad ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$ 25° C).....	5.870
Alcalinidad ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{CaCO}_3$).....	ND (0,5)
Carbonatos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{CO}_3^{2-}$)	ND (0,5)
Bicarbonatos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{HCO}_3^{-1}$)	ND (0,5)
Cloruros ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{Cl}^-$)	1.237,4
Nitratos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NO}_3^-$)	69,9
Nitritos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NO}_2^-$).....	ND (0,003)
Amonio ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NH}_4^+$)	150,1
DBO ₅ ($\text{mg l}^{-1} \text{O}_2$).....	22.000
DQO ($\text{mg l}^{-1} \text{O}_2$).....	25.150



Dra. María Alejandra MAINE

Lab. Química Analítica

Facultad de Ingeniería Química. UNL

10.2.2 Análisis Químico Punto 2

Todas las determinaciones cuantitativas se llevaron a cabo utilizando las técnicas propuestas por APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2012, 22nd Edition, Amer. Publ. Health Assoc.

CONTROL DE CALIDAD DE EFLUENTES

Solicitante: Hernán Hadad

Muestra: efluente Matilde 2

Extraída, conservada y transportada por: el solicitante

Resultados:

pH (unidades de pH).....	8,1
Conductividad ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$ 25° C).....	1.268
Alcalinidad ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{CaCO}_3$).....	353,4
Carbonatos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{CO}_3^{-2}$)	ND (0,5)
Bicarbonatos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{HCO}_3^{-1}$)	431,8
Cloruros ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{Cl}^-$)	209,3
Nitratos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NO}_3^-$)	22,5
Nitritos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NO}_2^-$).....	ND (0,003)
Amonio ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NH}_4^+$)	2,35
DBO ₅ ($\text{mg l}^{-1} \text{O}_2$).....	160,0
DQO ($\text{mg l}^{-1} \text{O}_2$).....	422,5



Dra. María Alejandra MAINE

Lab. Química Analítica

Facultad de Ingeniería Química. UNL

10.2.3 Análisis Químico punto 3

Todas las determinaciones cuantitativas se llevaron a cabo utilizando las técnicas propuestas por APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2012, 22nd Edition, Amer. Publ. Health Assoc.

CONTROL DE CALIDAD DE EFLUENTES

Solicitante: Hernán Hadad

Muestra: efluente Matilde 3

Extraída, conservada y transportada por: el solicitante

Resultados:

pH (unidades de pH).....	7,9
Conductividad ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$ 25° C).....	2.510
Alcalinidad ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{CaCO}_3$).....	396,0
Carbonatos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{CO}_3^{2-}$)	ND (0,5)
Bicarbonatos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{HCO}_3^{-1}$)	483,1
Cloruros ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{Cl}^-$)	388,7
Nitratos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NO}_3^-$)	7,4
Nitritos ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NO}_2^-$).....	ND (0,003)
Amonio ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{NH}_4^+$)	7,7
DBO ₅ ($\text{mg l}^{-1} \text{O}_2$).....	14,1
DQO ($\text{mg l}^{-1} \text{O}_2$).....	83,0



Dra. María Alejandra MAINE

Lab. Química Analítica

Facultad de Ingeniería Química. UNL