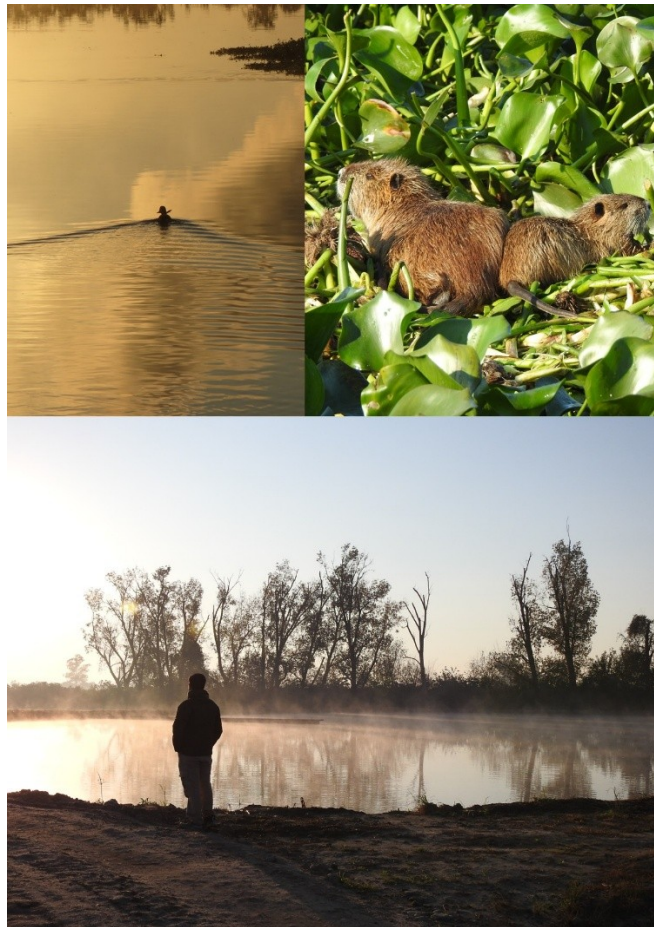


Tratamiento de Efluentes: un caso de estudio en la cuenca del Río Lules. Solución sostenible y su impacto en la biodiversidad

**INFORME FINAL DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL
SUPERVISADA PARA ACCEDER AL TÍTULO DE LICENCIADO
EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**



Lucas Alejo Madrid Mata

2025

Director: Dr. Alfredo Grau

Co-Director: Ing. Civil Héctor Rezzonico



Índice

Tratamiento de Efluentes: un caso de estudio en la cuenca del Río Lules. Solución sostenible y su impacto en la biodiversidad	1
Resumen	4
Abstract.....	4
Datos de la Empresa donde se realizó la PPS.	5
Objetivo general:	5
Objetivos específicos:.....	5
Introducción.....	5
Actividades	9
Resultados.....	9
1) Revisión bibliográfica:.....	9
2) Marco Legal regulador.....	15
3) Listado de especies con potencial fitorremediador.	17
4) Identificación de fauna.....	20
Agradecimientos	27
Bibliografía citada	27

Firmas del tribunal examinador

Dr. Mario Debes

Dra. Carolina Prado

Dra. Sara Isasmendi

Resumen

El manejo inadecuado de aguas residuales domésticas y no domésticas representa un problema crítico para la calidad de los cuerpos de agua en general, como ríos, arroyos, diques y en cuadros más agudos en embalses, este problema es frecuente en distintas cuencas hidrográficas de Argentina y del mundo. La cuenca del río Lules, no queda exenta de esta situación. Como parte de la Práctica Profesional Supervisada, colaboré en la propuesta e implementación de un canal de fitorremediación en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Bolsa, para abordar la gestión de efluentes domésticos utilizando los principios del tratamiento con humedales construidos.

El objetivo principal fue mejorar la calidad del efluente final de la planta, utilizando un sistema sostenible y de bajo costo. Las actividades se centraron en asistir en el diseño y la construcción de un humedal de flujo superficial que sirviera de apoyo al procesamiento de efluentes, a modo de tratamiento terciario. Se identificaron, colectaron e implantaron especies vegetales nativas o naturalizadas con reconocida capacidad fitorremediadora: *Lemna* sp.; *Pontederia crassipes*, e *Hydrocotyle bonaerensis*. Como resultado se determinó un listado de plantas viable y el establecimiento de las comunidades vegetales para obtener los resultados deseados en función de los objetivos de la empresa. Sirviendo, además, como un modelo replicable para otras PTAR de la provincia. Al establecerse la comunidad vegetal del humedal se generaron las condiciones adecuadas para que la fauna nativa asociada a cuerpos de agua se instalara en el sitio, el grupo más representado fue el de aves registrándose 24 especies en las lagunas facultativas y el humedal.

Abstract

Inadequate management of urban and industrial wastewater is a critical problem for the quality of water bodies. This issue is common in several areas of Argentina. This situation is evident in the Lules River basin, which is affected by urban and industrial effluents and quarries.

As part of my supervised professional practice, I collaborated on the proposal and implementation of a phytoremediation channel at the La Bolsa Wastewater Treatment Plant (WWTP) to address effluent management using the principles of constructed wetland treatment. The main objective was to improve the quality of the final plant effluent using a sustainable and low-cost system.

The activities focused on assisting in the design and construction of a surface flow wetland to support effluent treatment as a tertiary treatment stage. Native or naturalized plant species with known phytoremediation capacity were identified, collected, and planted, including: *Lemna* sp., *Pontederia crassipes*, and *Hydrocotyle bonaerensis*.

As a result, a list of viable plants was determined to achieve the desired outcomes based on the company's objectives and the establishment of plant communities. This serves as a replicable model for other WWTPs in the province. Upon the establishment of the wetland's plant community, suitable conditions were created for native avifauna associated with water bodies to settle at the site, with over 22 species of aquatic birds being recorded in the facultative lagoons.

Datos de la Empresa donde se realizó la PPS

Las actividades de la Práctica Profesional Supervisada se llevaron a cabo en la Sociedad Aguas del Tucumán (SAT), una empresa dedicada a la gestión de los servicios de agua potable y saneamiento en la provincia. La PPS se desarrolló en el laboratorio principal de la gerencia de saneamiento y medio ambiente, en la Planta San Felipe y en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Bolsa-Lules.

Objetivo general y específicos de la PPS

Objetivo general:

- Asistir en el armado y diseño de un canal fitorremediador (humedal de flujo superficial) para mejorar la calidad del agua de salida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Bolsa, en Lules.

Objetivos específicos:

- Mejorar las condiciones de salida de las aguas tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Bolsa, Lules.
- Adquirir conocimientos sobre políticas/normativas nacionales y provinciales que regulen la calidad que deben alcanzar las aguas vertidas en la provincia de Tucumán para descargas en cuerpos de agua con usos no recreacionales.
- Confeccionar un listado de especies para la provincia de Tucumán, en función de sus capacidades en fitorremediación de acuerdo con la bibliografía y establecer las especies con un mejor desempeño en el sitio.
- Observar cambios en la biota asociados a la infraestructura de las lagunas de estabilización y al humedal.

Introducción

El agua es un recurso natural fundamental para la vida y el desarrollo de las actividades humanas (ONU, 2003), muy posiblemente el más valioso en el mundo, y uno de los más importantes, por no ponerlo como el más importante hoy en día, en la provincia de Tucumán. El consumo de agua *per cápita* en Tucumán es superior al recomendado por la OMS (Aguas del Tucumán, 2020; Fundación Miguel Lillo, 2018; La Gaceta, 2024). El Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSA) estima que el 80% del agua consumida ingresa al sistema de cloacas, con estos datos podemos estimar la cantidad de agua que llega a las cloacas tucumanas aproximadamente. Un dato para nada menor, ya que nos permite tomar conocimiento de la cantidad de agua consumida que luego debe ser reutilizada o pasar por un proceso de saneamiento. Esto plantearía una ampliación para el ciclo del agua que describe la biología en sus bases teóricas, ya que en este contexto cuando el agua se encuentra en estado líquido, se la utiliza en diferentes rubros, se la trata y se la devuelve a un cuerpo de agua receptor. La gestión inadecuada de las aguas residuales, que es un fenómeno global, tanto en aguas residuales domésticas como no domésticas, ha provocado un incremento en la contaminación de los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) disminuyendo su calidad y disponibilidad para fines varios (Arias Martínez et al., 2010; Rodríguez et al., 2010). La asamblea general de las Naciones Unidas enmarcó esta problemática dentro de los objetivos de desarrollo sostenible para 2030, como su sexto objetivo “agua limpia y saneamiento”, dentro del cual, están incluidos el acceso a agua

potable, acceso a higiene básica y manejo adecuado del saneamiento, este último es el que menos avanzó en el mundo, con un progreso del 10% pasando de tratar el 48% total que se consume a tratar el 58%. Los efluentes tienen una composición de 99% agua y el 1% restante contiene una mezcla de sustancias orgánicas, inorgánicas y contaminantes emergentes que impactan negativamente en los ecosistemas acuáticos. El objetivo principal del tratamiento es remover ese porcentaje y dejar la mayor cantidad de agua posible.

La planta La Bolsa se encuentra en la cuenca del río Lules (Figura 1C) ubicada en el centro-oeste de la provincia de Tucumán, abarca una superficie de 958 km² y es la fuente principal de agua para importantes zonas urbanas y agrícolas de la llanura tucumana. Gran parte de su área superior se encuentra en la ecorregión de las Yungas, con precipitaciones que superan los 1000 mm anuales. Esta cuenca alberga diversas actividades agroindustriales y una creciente expansión urbana, lo que incrementa el aporte de contaminantes a los cursos de agua.

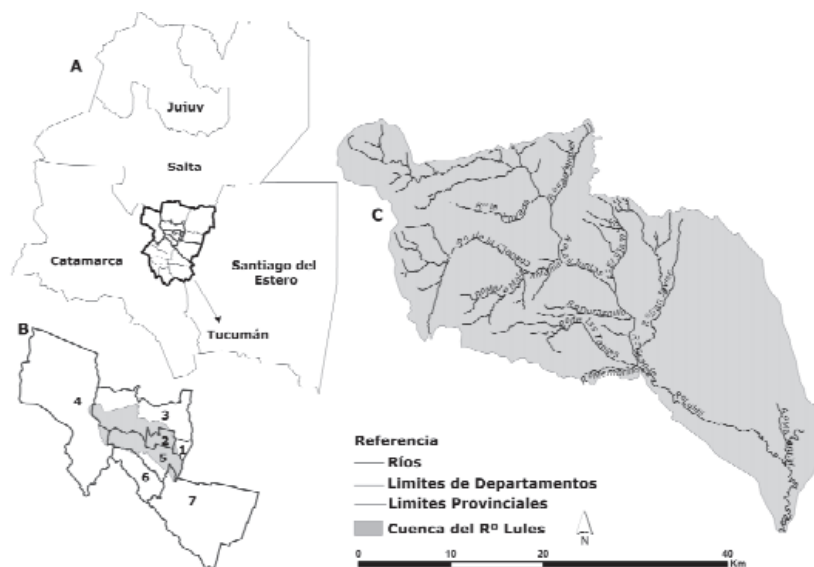


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Río Lules. **A.** Noroeste de la República Argentina. **B.** Departamentos de la cuenca de estudio en la Provincia de Tucumán: **1.** San Miguel de Tucumán; **2.** Yerba Buena; **3** Tafi Viejo; **4.** Tafi del Valle; **5.** Lules; **6** Famailla; **7.** Leales. **C.** Cuenca del Río Lules (Reproducido de la Figura 1 del capítulo "Cambio en la cobertura del suelo..." por García et al. (2012).)

Hay diferentes alternativas para la construcción de las plantas de tratamiento de efluentes, en general podemos pensar en dos, las que contemplan estructuras electromecánicas en su diseño (que también se basan en procesos biológicos, como la acción bacteriana, para la depuración) y las exclusivas de procesos biológicos, como las plantas de lagunas de estabilización como se da en el caso de la PTAR de Lules (Figura 2) utilizan como base teórica la autodepuración de los ríos y su dinámica biológica para crear y diseñar sus plantas. Las dos líneas sufren del mismo síntoma: la falta de cuidado, no solo en Tucumán, también en el país y en la región, ocurre lo mismo (Ministerio de Obras Públicas, 2023). Frente a esta problemática, han surgido sistemas de tratamiento sostenibles inspirados en procesos naturales, soluciones basadas en la naturaleza, como las define la ex World Wildlife Fund (WWF) actual One earth, “*Las soluciones basadas en la naturaleza se refieren a un conjunto de acciones o políticas que aprovechan el poder de la naturaleza para abordar algunos de nuestros desafíos sociales más urgentes, como la amenaza de la disponibilidad del agua, el creciente riesgo de desastres naturales o el cambio climático*”.

Frente a este problema la **fitorremediación**, una herramienta biotecnológica que utiliza plantas y microorganismos asociados para remover, degradar o secuestrar contaminantes, se presenta como una alternativa viable, pasiva y de bajo costo (Núñez López et al., 2004). Esta visión se alinea con las tendencias de infraestructura azul-verde (Pochodyła et al., 2021) que se la define por “ser una red interconectada de espacios naturales y semi-naturales, como parques, bosques, corredores verdes y otros elementos de vegetación, que se diseñan y gestionan para proporcionar beneficios ecológicos, sociales y económicos” (Comisión Europea [CE], 2013), como herramientas efectivas para la gestión del agua en áreas urbanas. Organismos internacionales como el Banco interamericano de desarrollo promueve activamente la innovación e implementación de estos sistemas descentralizados en Latinoamérica y el caribe para cerrar la brecha del acceso a saneamiento de la región (Altafin y Wilk, 2020). Los humedales naturales según el convenio RAMSAR (Convención Ramsar, 2007), que es el tratado intergubernamental que proporciona el marco para la conservación y el uso sostenible de los humedales y sus recursos, propone una definición amplia: “los humedales son las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros'. Por lo tanto, tal como lo define la Convención, los humedales incluyen una amplia variedad de hábitats continentales como marismas, turberas, llanuras aluviales, ríos y lagos, y áreas costeras como marismas saladas, manglares, llanuras intermareales de fango y lechos de pastos marinos, y también arrecifes de coral y otras áreas marinas de no más de seis metros de profundidad en marea baja, así como humedales artificiales tales como represas, embalses, arrozales y estanques y lagunas para el tratamiento de aguas residuales” (Convención Ramsar, 2016). Son de vital importancia tanto para los para los seres humanos como para la biodiversidad en su totalidad ya que poseen una amplia variedad de servicios ecosistémicos asociados, como lo son de sostén (biodiversidad, ciclos de nutrientes), como aprovisionamiento (agua potable, alimentos), culturales (recreación, valores estéticos) y reguladores (control de inundaciones, purificación del agua, secuestro de carbono) (Convención Ramsar, 2007). En este caso los humedales construidos buscan potenciar el servicio de depuración de agua, tanto la vegetación y sus organismos asociados actúan como un filtro biológico (Kadlec et al., 2000), para mejorar parámetros evaluados en las normativas tanto globales como nuestra normativa provincial (Ley provincial N° 6529 y SEMA 030) para calibrar la calidad de los tratamientos de depuración.

La propuesta de fitorremediación no solo busca una solución técnica, sino que también reconoce la importancia y el protagonismo de los procesos biológicos en el diseño de las plantas de tratamiento, ya que en la mayoría de los casos tanto las plantas modernas, como los lodos activados, se ven muy afectadas a lo largo del país y de la región por la falta de mantenimiento. Esto se debe a que en muchas ocasiones se encuentran en zonas poco accesibles y el personal encargado no cuenta con los conocimientos técnicos para llevar adelante el mantenimiento, o bien, los costes del mismo son muy elevados por lo que no se lleva adelante (Ministerio de obras publicas, 2023). En este contexto, los humedales construidos surgen como un alivio debido a sus bajos requerimientos de mantenimiento. En el caso de la Bolsa de Lules, la secuencia de imágenes (Figura 2) indica que la situación actual de la planta es muy positiva y probablemente con mejor funcionamiento comparada con el pasado. La planta de La Bolsa, al igual que otras plantas de tratamiento de efluentes, cuenta con una cercanía notable hacia otros sistemas de humedales naturales (Figura 3) y normalmente con el cuerpo de aguas receptores, del agua del proceso, y con estos, presenta una gran conectividad de fauna y de especies vegetales ribereñas. Esto, lejos de representar una desventaja, puede generar que estos sistemas antrópicos sean utilizados como

un posible sitio que aprovecha la presencia de fauna nativa para explorar acuerdos con empresas y/o entidades interesadas en la protección del medioambiente.

Evolución de la planta La Bolsa - Lules a lo largo del tiempo



Figura 2: Secuencia de imágenes en el tiempo del sistema de lagunas extraídas de Google Earth Pro. A. Imagen histórica de planta en 2002; B. Imagen histórica de la planta en 2021; C. Imagen de la planta en 2025.



Figura 3: Imagen satelital de Google Earth Pro, fecha 3/3/2025. Cercanía de la planta a diferentes sistemas de humedales del rio Lules. El círculo rojo indica la ubicación de la planta.

Actividades

La realización de la PPS se llevó a cabo a través de las siguientes actividades:

1. **Revisión bibliográfica:** se realizó una búsqueda exhaustiva de información sobre los métodos utilizados para establecer lagunas de estabilización, la fitorremediación como técnica de depuración de efluentes, y su viabilidad para ser aplicados en plantas depuradoras.
2. **Marco legal:** se adquirieron conocimientos sobre las políticas y normativas nacionales y provinciales que regulan la calidad de las aguas vertidas.
3. **Selección de especies:** se realizó una búsqueda bibliográfica sobre especies de plantas acuáticas/semi acuáticas y palustres, nativas o naturalizadas en Tucumán, con propiedades fitorremediadoras.
 - **Colecta de especies:** se participó en la colecta y dirección de equipos en campo para la colecta de las especies seleccionadas. Se identificaron las especies en el terreno, se determinaron los sitios de ocurrencia para su posterior traslado y colocación en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).
 - **implantación de las especies en el canal:** Se plantaron o colocaron las especies en el canal de fitorremediación.
4. **Identificación de fauna:** se realizó la identificación de la avifauna asociada al sistema de lagunas para evaluar la potencialidad del humedal como núcleo de protección de la fauna nativa.

Resultados

1) Revisión bibliográfica:

1.1 Datos fisiológicos y ecológicos generales en los que se basa el sistema

Fisiológicos

Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología de biorremediación, que utiliza la capacidad fisiológica y bioquímica de las plantas y su interacción sinérgica con la comunidad microbiana de la rizosfera, lo que permite abordar la complejidad de las aguas residuales modernas, incluyendo aquellas con contaminantes farmacéuticos (Shah y Shah, 2020) o industriales. La problemática de los contaminantes se aborda a través de mecanismos que se agrupan en dos categorías estratégicas, definidas por el destino final del contaminante:

- **Estrategias de Contención:** estas técnicas inmovilizan los contaminantes *in situ*, reduciendo su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad sin eliminarlos físicamente del sitio. La principal técnica en esta categoría es la fitoestabilización.
- **Estrategias de Eliminación:** buscan la remoción física o la destrucción completa del contaminante del medio (suelo o agua). Incluyen mecanismos como la fitoextracción, fitodegradación, rizofiltración y fitovolatilización.

Esta distinción es crucial para seleccionar la metodología más adecuada según los objetivos específicos del proyecto de remediación, las características del sitio y el tipo de contaminante.

Mecanismo	Objetivo Principal	Contaminantes Típicos	Destino Final del Contaminante
Fitoextracción/fitoacumulación	Eliminación física	Metales pesados (Cd, Ni, Pb, Zn), Metaloides (As), Radionucleidos	Acumulado en la biomasa aérea, que se cosecha y trata
Fitoestabilización	Contención in situ	Metales pesados, Metaloides	Inmovilizado en el suelo y/o en las raíces de las plantas
Rizofiltración	Tratamiento de agua	Metales pesados, Radionucleidos	Adsorbido o absorbido por el sistema radicular
Biodegradación	Degradación	Contaminantes orgánicos (pesticidas, hidrocarburos, solventes)	Degradado a compuestos inocuos dentro de la planta
Biodegradación/fitoestimulación	degradación	Contaminantes orgánicos	Degradado por microorganismos en la rizosfera
Fitovolatilización	Transferencia	Mercurio (Hg), Selenio (Se), Compuestos orgánicos volátiles (TCE)	Transformado y liberado a la atmósfera en forma volátil

Tabla 1: Las formas de fitorremediación (Glick, 2003; Núñez López, 2004)

Ecológicos

1.2 Autodepuración de los ríos:

La autodepuración se define como la capacidad inherente de una fuente hídrica para absorber, asimilar o degradar las diversas cargas contaminantes que recibe a lo largo de su recorrido natural. Este proceso no es resultado de un único mecanismo, sino de un conjunto sinérgico de fenómenos interdependientes: físicos, químicos y, de manera primordial, biológicos. Los contaminantes, principalmente de origen orgánico, son transformados en compuestos más simples e inofensivos, permitiendo que el río recupere sus características naturales aguas abajo de una descarga.

Representa un servicio ecosistémico de valor incalculable. La capacidad de un río para degradar la materia orgánica de forma natural, mitiga los impactos de la contaminación y mantiene la salud del ecosistema, lo que a su vez sustenta la biodiversidad y los usos humanos del agua. Los casos de ríos que perdieron esta capacidad, como el Rin, en Europa (El periódico *ABC Color*, 2014), demuestran que el colapso de este servicio conduce a una degradación ambiental severa que afecta a la flora, la fauna y la calidad del agua. La restauración de estos ríos, como en el caso del Rin, que requirió una inversión de 50.000 millones de euros durante 20 años, es una tarea titánica y costosa. Esta experiencia histórica subraya la idea de que la protección preventiva del servicio de autodepuración, a través de la gestión de vertidos, es una estrategia ambiental y económica mucho más eficiente que la

costosa y prolongada remediación posterior. Con este principio básico de la limnología, conseguimos pasar a la siguiente etapa histórica en el que la ingeniería en el afán de dar una solución promueve la tecnología de:

1.2.1 Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización son uno de los sistemas más comunes para el tratamiento biológico de efluentes (Mara, D. 2004). Son grandes reservorios de poca profundidad excavados en la tierra donde las aguas residuales se retienen durante un período determinado para que procesos naturales las depuren. Este proceso involucra una compleja interacción entre factores físicos, químicos y biológicos. El funcionamiento se basa en una simbiosis entre bacterias y algas.

Las bacterias anaeróbicas en primera instancia, descomponen materia orgánica en compuestos más simples como dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), mientras que las bacterias aerobias, oxidan la materia orgánica de las aguas residuales. En este proceso, liberan compuestos como dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3) y fosfatos. Las algas utilizan estos compuestos y la luz solar para realizar la fotosíntesis. Como resultado, producen el oxígeno que las bacterias aerobias necesitan para seguir descomponiendo la materia orgánica. De esta manera, se crea un ciclo auto sostenible que estabiliza la materia orgánica y elimina contaminantes. Se las puede disponer en serie (Figura 4) para asegurar que el agua fluya de una laguna a la otra, cada laguna tiene un rol en la depuración del agua.

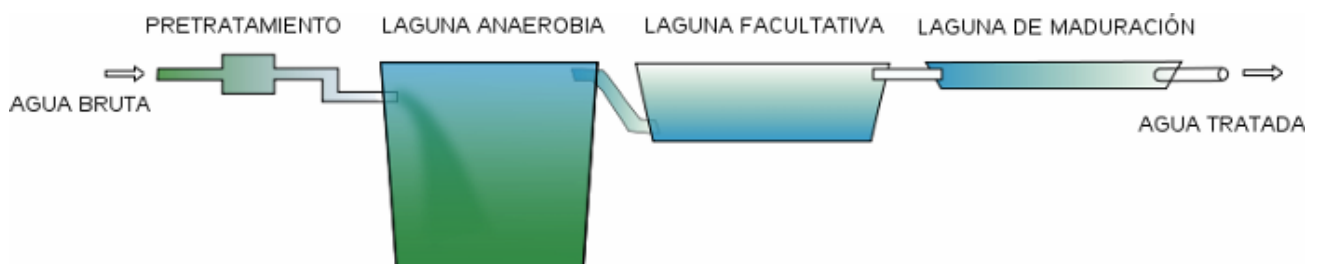


Figura 4: Secuencia básica de lagunas de estabilización (tomado de las clases de U.N.T. – F.A.C.E.y T. Dpto. Construcciones y Obras Civiles HIDRÁULICA APLICADA II)

Tipos de Lagunas

Dependiendo de la profundidad y la carga orgánica, en las lagunas conviven diferentes tipos de bacterias, lo que da lugar a distintas zonas y tipos de lagunas.

- **Lagunas Anaerobias:** Son profundas (3 a 4 metros) y reciben altas cargas de contaminantes. No tienen oxígeno disuelto. En el fondo, las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica en un proceso similar a la digestión, produciendo metano y otros compuestos. Son muy eficientes para una primera etapa de tratamiento intensivo.

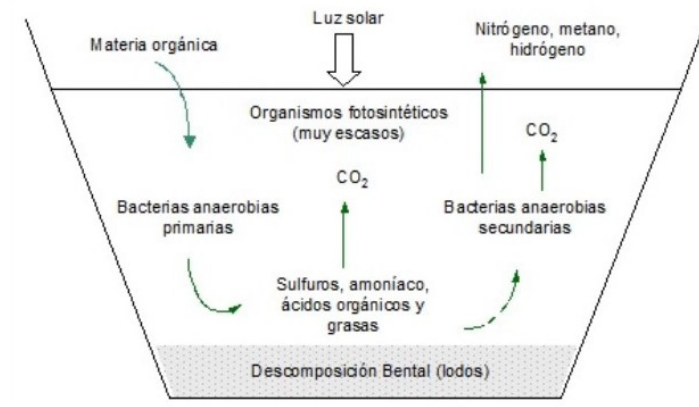


Figura 5: Representación gráfica de una laguna anaeróbica y sus procesos metabólicos asociados. (Mara, D. 2004)



Figura 6: Imagen satelital de las lagunas anaeróbicas de la PTAR- La Bolsa, de Google earth, 03/03/2025

Largo: 64 m; Ancho: 100 m; Profundidad 3.5 m; Volumen total: 22.400 m³

- **Lagunas Facultativas:** Son las más comunes, con profundidades intermedias (1.5 a 2.2 metros). Tienen una zona superior aerobia, donde ocurre la simbiosis entre algas y bacterias gracias a la penetración de la luz solar, y una zona inferior anaerobia donde se descomponen los sólidos sedimentados.

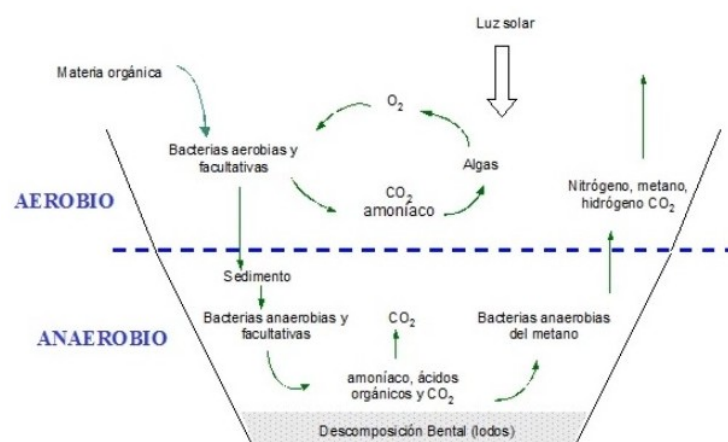


Figura 7: Representación gráfica de una laguna facultativa y sus reacciones metabólicas. (Mara, D. 2004)

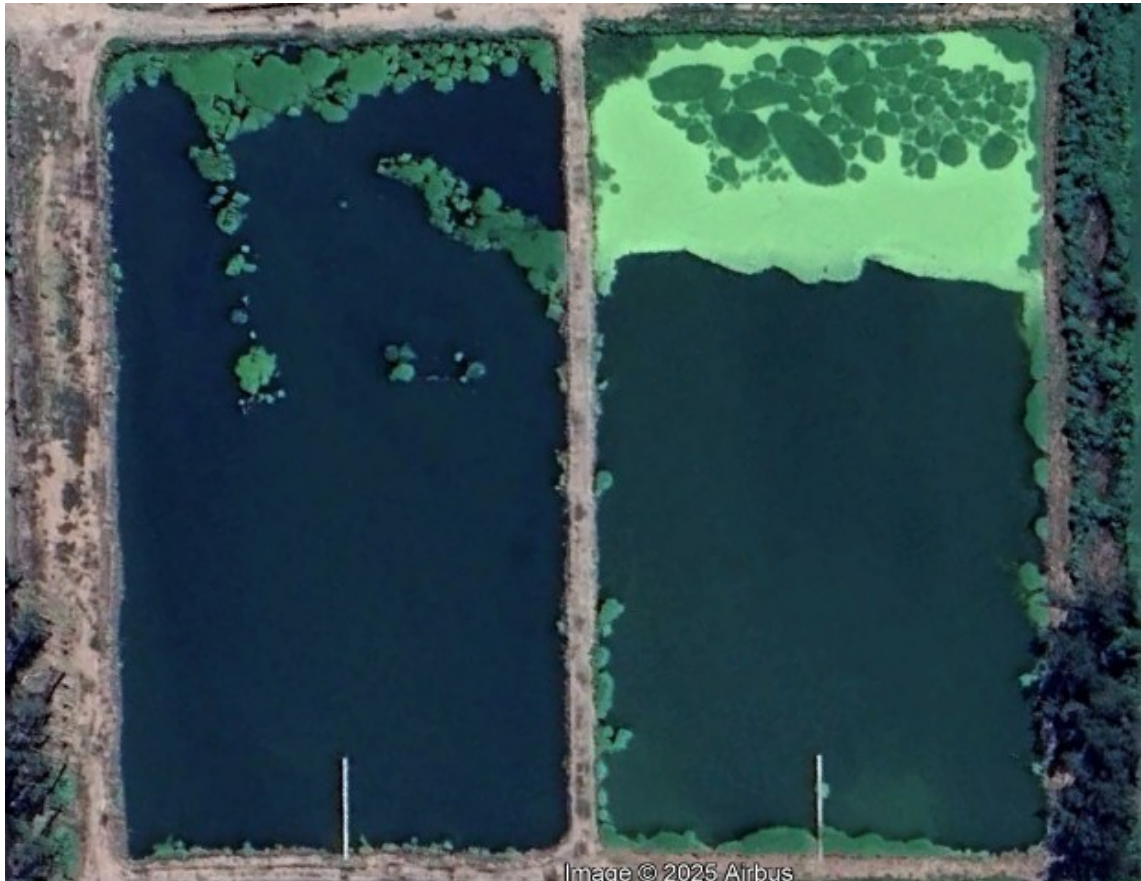


Figura 8: Imagen satelital de las lagunas facultativas de la PTAR- La Bolsa, de Google earth, 03/03/2025. Largo: 180 m, ancho: 100 m y una profundidad: de 3 m con un volumen de 54.000 m³.

- **Lagunas Aerobias** (o de Maduración): Son poco profundas (1 a 1.5 metros), lo que permite que la luz solar penetre hasta el fondo y haya oxígeno en todo el volumen de agua. Se usan como etapa final del tratamiento, principalmente para la eliminación de patógenos, ya que la radiación solar tiene un efecto desinfectante.

La planta al no contar con este tipo de lagunas, optó por innovar en el tratamiento terciario e incorporar el:

Sistema de Fitorremediación

Humedales depuradores

Diferentes autores han recopilado exhaustivamente la eficiencia de estos humedales para el tratamiento de aguas residuales (Arias Martínez et al., 2010; Castillo-Valenzuela et al., 2017; Kadlec y Wallace, 2009; Glick, 2003; Elfanssi et al., 2018; Worku et al., 2018; Zhang et al., 2007), destacando su capacidad para la remoción de nutrientes (Vymazal, 2007) a largo plazo y su rol en replantear los paisajes de aguas residuales hacia estrategias más estéticas y funcionales (Smith, 2009). Dentro de los conocimientos técnicos para la construcción de humedales depuradores de aguas residuales partimos de 3 diseños generales,

los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) siglas en ingles por “Horizontal subsurface flow” (Figura 9), los de flujo vertical (VF por sus siglas en inglés) (Figura 10) y los humedales de flujo superficial libre (FWS) por sus siglas en inglés (Figura 11)

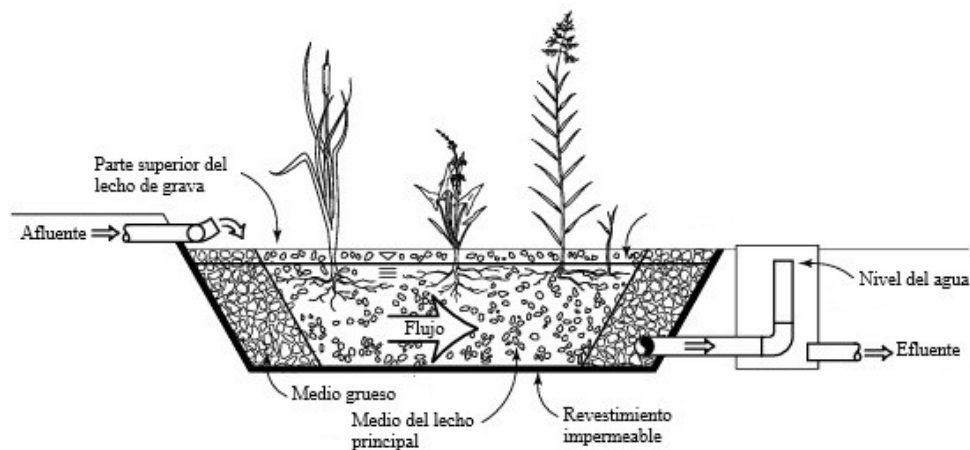


Figura 9: Esquema típico del funcionamiento de un humedal de flujo subsuperficial horizontal, Reproducido de la Figura 1.5 de *Treatment Wetlands* (Kadlec & Wallace, 2008).

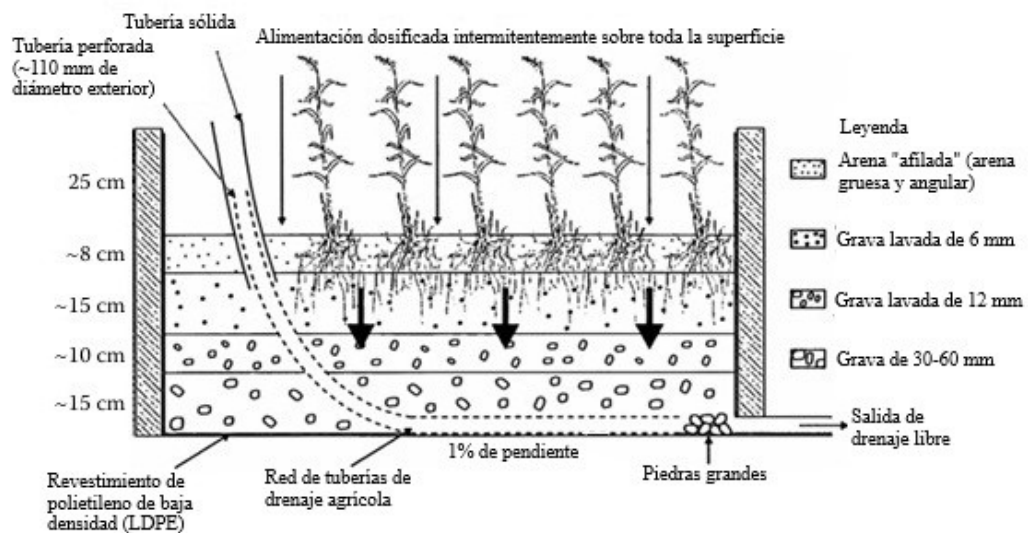


Figura 10: Esquema típico del funcionamiento de un humedal de flujo vertical. Reproducido de las Figuras 1.7 de *Treatment Wetlands* Kadlec & Wallace (2008).

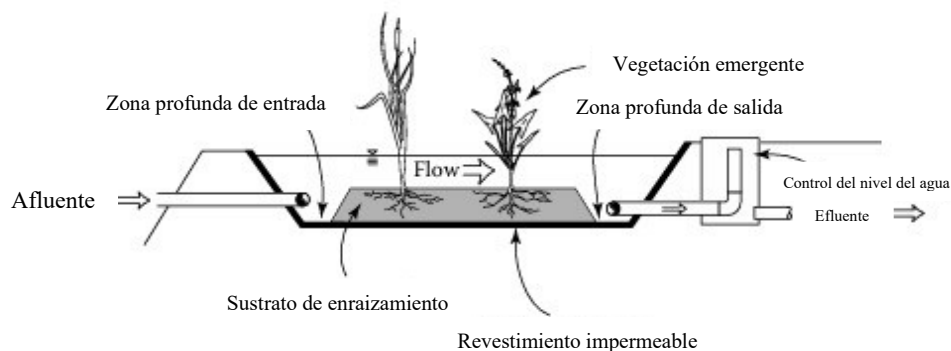


Figura 11: Esquema típico del funcionamiento de un humedal de flujo superficial libre. Reproducido de las Figuras 1.3 de *Treatment Wetlands*, Kadlec & Wallace (2008).

Para cumplir con los objetivos en el espacio disponible, se diseñó un humedal de flujo superficial libre, con la disposición de un canal alargado, a este diseño se lo nomencloó como canal de fitorremediación (Figura 12) con un recorrido sinuoso emulando los meandros de un río natural. Esta estrategia de diseño permite:

Maximizar el recorrido del agua: Alarga la distancia que el efluente debe transitar, aumentando el tiempo de contacto con las plantas, sus raíces y bacterias asociadas.

Optimizar el área de tratamiento: Se logra una mayor eficiencia de depuración en una superficie reducida.

Generar zonas de flujo diferenciadas: Las curvas del canal crean áreas con distintas velocidades de corriente y profundidades, favoreciendo el asentamiento de diversas especies vegetales con diferentes modos de vida.



Figura 12: Imagen satelital del canal de fitorremediación, que posee en total 1000 m de longitud, las profundidades varían, en el este están las profundidades más grandes, la parte somera se ubica en el oeste

2) Marco Legal regulador

En la provincia de Tucumán, el tratamiento y la descarga de efluentes están regulados principalmente por dos normativas: la Ley N° 6529 (Tabla 2) (Marco Regulatorio de Agua y Cloacas) y la Resolución N° 030/SEMA. La primera establece las obligaciones para los prestadores del servicio de saneamiento, mientras que la segunda fija los parámetros específicos para los efluentes industriales y cloacales en general. Si bien hay más leyes que regulan la contaminación en la provincia estas dos leyes son las que rigen toda la actividad.

Condiciones Generales de Vuelco

Prohibición General: Se prohíbe la descarga de líquidos o sólidos que puedan degradar el ambiente, afectar la salud humana, la flora, la fauna o los bienes comunitarios.

Cuerpos Receptores: Los efluentes pueden ser descargados en cursos de agua, canales,

lagos o terrenos, siempre que cumplan con los niveles de calidad establecidos en los anexos de la normativa.

Permisos: Para realizar cualquier vuelco, es necesario obtener un permiso de la autoridad de aplicación, que actualmente es la Dirección de Fiscalización Ambiental.

Descarga a Red Cloacal: Para descargar a la red cloacal, se debe contar con el permiso de la Sociedad Aguas del Tucumán (SAT) o la autoridad competente.

Pozos Absorbentes: Está prohibido el vertido en pozos absorbentes o terrenos sin impermeabilizar para una larga lista de actividades industriales, como curtiembres, textiles, refinerías de petróleo, metalúrgicas, entre otras.

Parámetro	Desagües a colectoras	Sin Tratamiento	Con Tratam. Primario	Con Tratam. Secund.
pH	5.5-10	6.5-8	6.5-8	6.5-8
SSEE	100mg/l	100mg/l	100mg/l	100mg/l
Sulfuros	1mg/l	-	-	<1mg/l
Temperatura	45°	45°	45°	45°
DBO (Sobre muestra bruta)	200mg/l	220mg/l	150mg/l	30mg/l
Oxígeno Consumido del KMnO4 (Sobre muestra bruta)	80mg/l	90mg/l	60mg/l	20mg/l
Cianuros CN-	0.1mg/l	0.1mg/l	0.1mg/l	0.1mg/l
Hidrocarburos	50mg/l	100mg/l	100mg/l	50mg/l
Cromo	0.2mg/l	0.2mg/l	0.2mg/l	0.2mg/l
SRAO detergentes	<2mg/l	<2mg/l	<2mg/l	
Cadmio	0.1mg/l	0.1mg/l	0.1mg/l	0.1mg/l
Plomo	0.5mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l
Mercurio	0.005mg/l	0.005mg/l	0.005mg/l	0.005mg/l
Arsénico	0.5mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l
Sustancias Fenólicas	0.5mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l
Plaguicidas y herbicidas	-	0 mg/l	0 mg/l	0 mg/l
Demanda de cloro	-	0.1mg/l	0.1mg/l	0.1mg/l
Dureza	<400mg/l			
Sulfato	<400mg/l			
Cloruros	700mg/l			
OD				>2mg/l
Nº más probable de bacterias coliformes				<500/100m
Turbiedad				25-250 unidades

Tabla 2: Valores regulados por la normativa de la provincia de Tucumán.

3) Listado de especies con potencial fitorremediador.

Para la preselección de especies (Tabla 3) se consideraron los datos de diferentes fuentes sobre estudios realizados en tratamiento de efluentes con humedales (Chandanshive et al., 2017; Demarco et al., 2020; Elfu et al., 2018; García, 2012; Kallimani & Virupakshi, 2015; Karungamye, 2022; Mustafa & Hayder, 2021; Rivas Jordan, 2021; Romero et al., 2009; Samal et al., 2017; Vera-Rodríguez et al., 2025), se trató de priorizar en la preselección especies nativas y de fácil acceso al material de propagación, luego con ayuda de GBIF, y otras páginas que brindan datos georreferenciados, como la página de SIB de parques nacionales, INaturalist, se realizó un curado de la lista de nombres en función de la proximidad al material de propagación. El foco eran las especies nativas, en general las que mejor se adaptaban a nuestras necesidades en este trabajo eran introducidas o exóticas como *Cyperus alternifolius* L., *Cyperus papyrus* L., *Typha* sp o *Arundo donax* L. El listado de especies registradas para Tucumán fue: *Pontederia crassipes* Mart., *Canna glauca* L., *Canna indica* L., *Heteranthera reniformis* Ruiz & Pav., *Enydra anagallis* Gardn., *Hydrocotyle bonariensis* Lam., *Lemna* sp, *Cyperus eragrostis* Lam.

Especie	Contaminantes/ variantes clave que remueve/mejora	Mecanismos Principales	Eficacia/Notas relevantes
<i>Arundo donax</i>	Arsénico (As), Metales pesados (Cd, Pb, Ni), Orgánicos (PBDEs), Nutrientes (N, P) Disminución de turbiedad	Rizodegradación, Bioacumulación	Potencial dual: fitorremediación y cultivo con materia vegetal útil para construcción. Crecimiento robusto.
<i>Canna glauca/C. indica</i>	Nutrientes (N, P), Metales pesados (As, Pb, Cr, Cu, Cd) DBO Coliformes totales y <i>E. coli</i>	Fitoextracción, Fitoestabilización	Alta tasa de remoción de arsénico.
<i>Cyperus</i> sp./ <i>C. alternifolius</i>	Orgánicos (DBO), NT, NH ₄ ⁺ , Metales pesados (Cu, Mn, Cd, Pb, Cr), Coliformes totales y <i>E. coli</i>	Fitoextracción, Rizodegradación	Alta eficiencia en remoción de DQO y NH ₄ ⁺ ; baja en fósforo. Alta productividad.
<i>Enydra anagallis</i>	Nutrientes (Ca, K, Mg, P), Metales pesados (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)	Fitoextracción, Rizofiltración.	Adaptable a las condiciones locales. Los contaminantes se acumulan principalmente en las raíces.

<i>Heteranthera reniformis</i>	Metales pesados (Cd, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Fe)	Acumulación mejorada por exudados radiculares	Los exudados radiculares aumentan la solubilidad y absorción de metales.
<i>Hydrocotyle bonariensis</i>	Orgánicos, Nutrientes, Sólidos suspendidos, Contaminantes microbiológicos	Rizofiltración, Rizodegradación	Eficaz como biofiltro para aguas residuales de origen biológico.
<i>Lemna</i> sp./ <i>L. gibba</i>	Nutrientes (N, P), Metales pesados (Pb, Cd, As, Zn, Cu, Cr, Ni), Orgánicos (fenoles), Sólidos suspendidos	Fitoextracción, Rizofiltración	Alta tasa de remoción de nitrógeno (80-90%). Potencial para uso como forrajeo.
<i>Pontederia crassipes</i>	Nutrientes (N, P), Metales pesados (Cd, Co, Ni, Hg, Pb, Cr, Cu), Arsénico (As); DBO Y DQO E.coli	Bioacumulación.	Hiperacumulador de metales pesados. Eficacia reducida en clima frío. Considerada especie invasora.
<i>Typha</i> sp.	Orgánicos (DQO), Nutrientes (N, P), Metales pesados (Ni, Cd, Cr, Zn, Cu, Pb), Sales (Na ⁺ , Cl ⁻) Coliformes totales y E. coli	Fitoextracción, Rizofiltración	Alta tasa de remoción de metales (61-75%) y nutrientes (40-46%).

Tabla 3: Preselección de especies donde se resaltan sus capacidades de remoción, modo de extracción y condiciones óptimas para su propagación.

Es importante resaltar que una buena parte de las especies consideradas valiosas llegaron al sitio de manera espontánea. Probablemente estas se encontraban presentes en humedales cercanos, esto facilitó considerablemente el trabajo de colecta, aunque fue necesario realizar remoción mecánica y química de especies no deseadas que también llegaron al sitio como *Ricinus communis* (L). Durante la temporada de frío se presentaron heladas, con nieve, circunstancia que produjo daño a la cobertura vegetal y a su capacidad fotosintética.



Figura 13: *Pontederia crassipes*



Figura 14: *Enydra anagalis*



Figura 15: *Heteranthera reniformis*.



Figura 16: *Hydrocotyle bonaerensis*.



Figura 17: *Lemna gibba*

En el sitio, seguimos propagando material de *C. eragrostis*, *C. alternifolius*, *C. papyrus*, *C. indica*, *C. glauca* y *A. donax*.

A manera de prueba de desempeño se introdujeron plantas flotantes como *P. crassipes*, *H. bonaerensis*, *H. reniformis* y *E. annagalis* en las lagunas facultativas. Lo que desencadenó uno de los potenciales más significativos del presente trabajo, la llegada de fauna al predio, sobre todo, avifauna. Lo cual es fenómeno documentado en la bibliografía internacional, ya que pueden servir de sitios críticos para la conservación de aves asociada a humedales en paisajes antropizados (Murray & Hamilton, 2010) lo que sucede en algunos sitios, como en el sudeste australiano. También se registraron mamíferos en el predio, todos dentro de la categoría de mesofauna y microfauna.

4) Identificación de fauna

El establecimiento de las macrófitas en el humedal y las lagunas facultativas generó un notorio incremento en la biodiversidad observable, especialmente en lo que respecta a la fauna de Vertebrados. Además de las especies observadas (Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6) y fotografiadas (Figura 18, Figura 19 y Figura 20) hay más aves a identificar por falta de nitidez en las imágenes tomadas, otras fueron vistas pero no pudieron fotografiarse como el arañerito (*Myioborus bruniceps*) y los pitiaiyumi (*Setophaga pitiayumi*), de otras tenemos registros acústicos como el taguató (*Rupornis magnirostris*), y muestras indirectas de mesofauna de mamíferos que ingresan al predio, como zorro gris (*Lycalopex gymnocercus*), además de información recopilada de los operarios que durante el turno noche vieron, liebres.

Con el muestreo, hasta la fecha se identificaron 24 sp de aves asociadas a cuerpos de agua.

ESPECIE	NOMBRE COMUN	ESTATUS DE CONSERVACIÓN	COMENTARIOS
<i>Ardea alba</i>	Garza grande	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Callonetta leucophrys</i>	Pato de collar	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Dendrocygna viduata</i>	Pato sirirí pampa	Preocupación Menor (LC)	abundante
<i>Egretta thula</i>	Garza pico fino	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Fulica armillata</i>	Gallareta	Preocupación Menor (LC)	Muy abundante
<i>Gallinula galeata</i>	Pollona negra	Casi Amenazada (NT)	Muy abundante
<i>Jacana jacana</i>	Gallito de agua	Preocupación Menor (LC)	abundante
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	Chumuco-bigua:	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Plegadis chihi</i>	Cuervillo de cañada	Preocupación Menor (LC)	Muy abundante
<i>Phimosus infuscatus</i>	Cuervillo cara pelada	Preocupación Menor (LC)	Muy abundante
<i>Podilymbus podiceps</i>	Maca pico grueso	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Rollandia rolland</i>	Maca cara blanca	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Spatula versicolor</i>	Pato de capuchino	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Syrigma sibilatrix</i>	Chiflón	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Theristicus caudatus</i>	Bandurria	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Tigrisoma lineatum</i>	Hoco colorado	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Himantopus melanurus</i>	Tero real	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Vanellus chilensis</i>	Tero común	Preocupación Menor (LC)	presente

Tabla 4. Especies de aves acuáticas observadas en las lagunas facultativas.



Figura 18: Especies observadas en las lagunas facultativas. A. *Spatula versicolor* (Pato capuchino); B. *Amazonetta brasiliensis* (Pato Cutirí); C. *Callonetta leucophrys* (Pato de collar); D. *Dendrocygna viduata* (Pato sirirí pampa); E. *Rollandia rolland* (Maca cara blanca); F. *Podilymbus podiceps* (Maca pico grueso); G. *Gallinula galeata* (pollona negra); H. *Jacana jacana* (Gallito de agua).



Figura 19: Especies observadas en las lagunas facultativas: A. *Ardea alba* (Garza Grande); B. *Syrigma sibilatrix* (Chiflón); C. *Egretta thula* (Garza Pico Fino); D. *Tigrisoma lineatum* (Hocó Colorado); E. *Phalacrocorax brasilianus* (Chumuco); F. *Himantopus melanurus* (tero real); G. *Plegadis chihi* (Cuervillo Cara Pelada); H. *Phimosus infuscatus* (Cuervillo de la cañada) a la izquierda *Vanellus chilensis* (Tero Común) a la derecha.

ESPECIE	NOMBRE COMUN	ESTATUS DE CONSERVACIÓN	COMENTARIOS
<i>Pitnagus sulfuratus</i>	Benteveo común	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Lessonia rufa</i>	Sobrepuesto	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Xolmis irupero</i>	monjita	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Chrysomus ruficapillus</i>	Varillero congo	Preocupación Menor (LC)	Muy abundante
<i>Tachineta sp</i>	avión común/ golondrina	Preocupación Menor (LC)	presente
<i>Turdus amaurochalinus</i>	zorzal chalchalero	Preocupación Menor (LC)	presente

Tabla 5. Especies observadas alrededor de las lagunas facultativas y en los alrededores del canal.



Figura 20: Especies observadas alrededor de las lagunas facultativas y en el canal mencionadas en la tabla 5: A. *Xolmis irupero* (Monjita); B. *Chrysomus ruficapillus* (Varillero congo); C. *Pitangus sulphuratus* (Quetupi); D. *Turdus amaurochalinus* (zorzal chalchalero); E. *Tachineta sp* (avión común/ golondrina); F. *Lessonia rufa* (Sobrepuesto, monturita).

Presencia de mamíferos en el predio:

Se observó el establecimiento de una familia de 4 individuos de *Myocastor coypus* (Figura 21)



Figura 21: Presencia de nutria o coypo (*Myocastor coypus*) en las lagunas facultativas.

Conclusiones y recomendaciones

Este tipo de sistemas de lagunas que congregan biodiversidad, ya están siendo utilizados en países como Australia, para proteger la biodiversidad, un caso con una magnitud de escala mucho mayor como en el estado de Werribee (Melbourne Water, 2025), donde las lagunas de tratamiento de efluentes de su costa Sudoeste ocupan 1544 Ha, son el sitio predilecto para los avistadores de aves (Low, 2017) hasta la fecha tienen registrado 256 especies de aves en sus lagunas. Este tipo de sistemas, en los cuales se contempla y fomenta el cuidado de la naturaleza al mismo tiempo, si bien nunca van a alcanzar la complejidad de un humedal natural (Hsu et al., 2011) se encargan de mitigar el impacto que generan los efluentes, y la presencia de avifauna por el momento no se asocia a desequilibrios en el balance de nutrientes removido en el proceso (Hahn et al., 2003) por lo que es un modelo ya funcional, que se vuelve necesario seguir adaptándolo y adoptarlo en nuestra región. El sistema de humedales construidos podría solventar una necesidad que tiene la provincia de Tucumán de cuidar y restaurar sus bosques de ribera. Según, Pero et al. (2020), la rehabilitación de zonas ribereñas, previamente degradadas o alteradas por diversas actividades antrópicas puede lograrse eficazmente mediante el establecimiento de zonas de amortiguamiento forestal. Específicamente, el estudio indica que la implementación de franjas de amortiguamiento con una anchura que oscila entre 60 y 250 metros es una estrategia efectiva para restaurar entre el 40% y el 60% de la integridad ecológica y funcional de dichos ecosistemas ribereños. Estas medidas son fácilmente ocupadas y superadas por las plantas de tratamiento de lagunas, las cuales están distribuidas en diferentes zonas de la provincia, en departamentos del interior más las que faltan construirse, estamos hablando de que podemos solventar dos problemas al mismo tiempo, contribuir con el ODS 6 de manera significativa y con el ODS 15, cuidado de la biodiversidad, y al mismo tiempo, cuidando nuestra fauna nativa. Incluso, podríamos pensar en estos sistemas como corredores biológicos para la fauna, de manera tal que, si estos sistemas son adoptados, sería factible establecer una red interconectada de protección para la biodiversidad, en particular para la avifauna, ya que en Tucumán contamos con el 50% de la diversidad de aves del país.

En otros países de la región como Chile (en zonas como Valparaíso, Peñalolén, Valdivia, De los Ríos) las empresas privadas llevan adelante construcciones en barrios privados de

diferentes modelos de humedales donde el agua no queda en la superficie y dota a la zona de jardines con un curso de agua subterráneo, lo que permite tener especies vegetales que en condiciones de aridez no las podrían mantener, abriendo la puerta para una posible exacerbación en los cambios de cobertura vegetal producidos por fenómenos de contraurbanización, que se manifiestan como un incremento de la población en las áreas periurbanas y rurales (Jimenez & Grau, 2022).

Es una opción viable para barrios privados nuevos (y no tan nuevos) que se están estableciendo en la provincia, también claro está, que es una opción para los barrios públicos, ya que en líneas generales el mantenimiento es bajo y no requiere de una gran inversión. No necesariamente el sistema de lagunas en sí mismo, pero sí sería factible el sistema de flujos subsuperficial, lo que mitigaría conflictos con olores no deseados en la zona.

Como parte de las actividades de la Práctica Profesional Supervisada, se realizaron los monitoreos pertinentes para la evaluación de la eficiencia del canal fitorremediador. Sin embargo, en virtud de las políticas de confidencialidad de la Sociedad Aguas del Tucumán (SAT) y el carácter sensible de los datos operativos de la planta, los resultados analíticos cuantitativos no se incluyen en el presente informe.

Concluyendo, es destacable que, al finalizar este estudio, se recuperó el sistema de lagunas en el canal de fitorremediación; la comunidad vegetal fue establecida y las mejoras estructurales y edilicias que se llevaron adelante en la planta La Bolsa está mejorando la calidad del agua tratada (Aguas del Tucumán S.A., 2024a, 2024b; Comunicación Tucumán, 2024).

El desarrollo de este modelo podría permitir establecer una herramienta innovadora a este nivel de escala, que responda a las necesidades locales. y podría ampliarse a otras plantas de la provincia y el país.

Hay que contemplar para su replicación en otras PTAR y dimensionamiento, que es un sistema altamente sensible a la temperatura ambiental, por lo que, lo óptimo es acompañar a los procesos biológicos con acciones electromecánicas que mantengan los parámetros sugeridos durante el 90% del tiempo anual, que es lo que pide la normativa provincial.

Las especies vegetales deben ser removidas al llegar a su etapa de madurez, por lo que es necesaria una propuesta de plan de Acción para la Gestión y Monitoreo a Futuro del Humedal, que contemple donde disponer la materia vegetal removida y un sitio donde propagar el material juvenil.

Se podría explorar las posibilidades de llevar adelante colaboraciones con empresas locales que estén dispuestas a invertir en la planta como un núcleo de protección a la biodiversidad.

Agradecimientos

La realización de esta Práctica Profesional Supervisada ha sido un recorrido colectivo. Primero que nada, agradezco a la Sociedad Aguas del Tucumán (SAT) permitirme hacer mi práctica profesional con ellos.

Mi gratitud hacia mis directores, el Dr. Alfredo Grau y el Ing. Civil Héctor Rezzonico, quienes siempre estuvieron para darme una mano e incentivarme a crecer más allá de lo académico. Este trabajo no sería el mismo sin las contribuciones técnicas del Dr. Blendinger en la identificación de la avifauna, ni sin la invaluable ayuda de Alejandra Kortsarz, quien elevó exponencialmente la calidad de la redacción.

En el plano formativo y humano, quiero agradecer especialmente a Marcela Hernandez y Daniela Miotti, mis guías facultativas, por siempre darme un espacio para ser escuchado y sabiamente aconsejado.

A mi familia, pilar fundamental, gracias por el apoyo y la ayuda durante todo el proceso, realmente soy consciente de la suerte que tengo de tenerlos conmigo. A mis amigos, gracias por mantenerme siempre de ánimo para continuar.

A todas las personas que, de forma directa o indirecta, hicieron posible este trabajo: gracias. Me demostraron que jamás estuve solo y que la colectividad es, sin duda, mucho más que la simple suma de las partes..

Bibliografía citada

- Altafin, C., & Wilk, J. (2020). Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Saneamiento Descentralizado en Latinoamérica y El Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo (BID)
- Andersen, D. C., Sartoris, J. J., Thullen, J. S., & Reusch, P. G. (2003). The effects of bird use on nutrient removal in a constructed wastewater-treatment wetland. *Wetlands*, 23(2), 423-435. DOI:[10.1672/17-20](https://doi.org/10.1672/17-20)
- Arias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., & Hernández Ángel, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74. <https://doi.org/10.23850/22565035.5>
- Ayala Tocto, R. Y., Calderón Ordoñez, E., Rascón, J., & Collazos Silva, R. (2018). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista De Investigación De Agroproducción Sustentable*, 2(3), 48–53. <https://doi.org/10.25127/aps.20183.403>
- Castillo-Valenzuela, J., Martinez-Guerra, E., & Gude, V. G. (2017). Wetlands for Wastewater Treatment. *Water Environment Research*, 89(10), 1163–1205. <https://doi.org/10.2175/106143017X15023776270269>
- Chandanshive, V. V., Rane, N. R., Tamboli, A. S., Gholave, A. R., Khandare, R. V., & Govindwar, S. P. (2017). Co-plantation of aquatic macrophytes *Typha angustifolia* and

Paspalum scrobiculatum for effective treatment of textile industry effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 338, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.021>

- Demarco, C. F., Afonso, T. F., Pieniz, S., Quadro, M. S., De Oliveira Camargo, F. A., & Andreazza, R. (2020). Evaluation of *Enhydra anagallis* remediation at a contaminated watercourse in south Brazil. *International Journal Of Phytoremediation*, 22(12), 1216-1223. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1754759>
- Elfanssi, S., Ouazzani, N., Latrach, L., Hejjaj, A., & Mandi, L. (2018). Phytoremediation of domestic wastewater using a hybrid constructed wetland in mountainous rural area. *International Journal of Phytoremediation*, 20(1), 75–87. <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1337067>
- Elfu, A., Fassil, K., & Worku, M. (2018). *Wastewater treatment by Lemna minor and Azolla filiculoides in tropical semi-arid regions of Ethiopia*. Ecol Gen.
- García, K., Píriz-Carillo, V., & Gasparri, N. I. (2012). Cambio en la cobertura del suelo en la cuenca media y alta de Lules durante los últimos 20 años. En H. R. Fernández & H. Barber (Eds.), *La cuenca del Río Lules: una aproximación multidisciplinaria a su complejidad* (pp. 97–110). Editorial UNT.
- García, Z. (2012). *Comparación y Evaluación de Tres Plantas Acuáticas Para Determinar la Eficiencia de Remoción de Nutrientes en el Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas*. (pp. 57-65).
- Glick, B. R. (2003). Phytoremediation: Synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnology Advances*, 21(5), 383–393. [https://doi.org/10.1016/s0734-9750\(03\)00055-7](https://doi.org/10.1016/s0734-9750(03)00055-7)
- Hsu, C.-B., Hsieh, H.-L., Yang, L., Wu, S.-H., Chang, J.-S., Hsiao, S.-C., Su, H.-C., Yeh, C.-H., Ho, Y.-S., & Lin, H.-J. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. En *Ecological Engineering* (Vol. 37, pp. 1533-1545).
- Jimenez, Y. G., & Grau, H. R. (2022). Contraurbanizaciones (o cómo vivir en la naturaleza). *Ciencia Hoy*, 30 (180), 53-58.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC press. Kadlec, R.H. & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Kadlec, R. H., Knight, R. L., et al. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. International Water Association.
- Kadlec, R. H., Wallace, S. D., Taylor & Francis Group, LLC, & CRC Press. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- Kallimani, K. S., & Virupakshi, A. S. (2015). Comparison Study on Treatment of Campus Wastewater by Constructed Wetlands Using *Canna Indica* & *Phragmites Austrails* Plants.

- Karungamye, P. N. (2022). Potential of *Canna indica* in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Conservation*, 2(3), 499–513. <https://doi.org/10.3390/conservation2030034>
- Mara, D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Earthscan. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf
- Ministerio de Obras Públicas, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, y Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento. (2023). *Diagnóstico y prospectiva del tratamiento de aguas residuales en Argentina*. Argentina.gob.ar. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/diagnostico_y_prospectiva_del_tratamiento_de_aguas_residuales_en_argentina.pdf
- Murray, C. G., & Hamilton, A. J. (2010). REVIEW: Perspectives on wastewater treatment wetlands and waterbird conservation. *Journal Of Applied Ecology*, 47(5), 976-985. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01853>.
- Mustafa, H. M., & Hayder, G. (2021). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009>
- Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olguín, E. J. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. En *Ciencia* (Vol. 69, p. 70).
- Organización de las naciones unidas (ONU). (2003). *The United Nations World Water Development Report: Water for People Water for Life*. UN-Water. Recuperado de <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2003>
- Pero, E. J. I., Casagrande, E., Cristobal, L., Wottitz, A., & Gasparri, N. I. (2020). Evaluación del déficit de bosques de ribera en Tucumán. *Ecología Austral*, 30(3), 484–496. <https://doi.org/10.25260/EA.20.30.3.0.1117>
- Pochodyła, E., Glińska-Lewczuk, K., & Jaszczak, A. (2021). *Blue-green infrastructure as a new trend and an effective tool for water management in urban areas*. Landscape Online, 92, 1–20. <https://doi.org/10.3097/LO.202192>
- Rivas, J. D. (2021). *Potencial fitorremediador de macrófitas en cuerpos de agua contaminados con mercurio remanentes de la minería (pozas) en el departamento del Chocó-Colombia*. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83774>
- Rodríguez-Miranda, Juan Pablo, Gómez, Esteban, Garavito, Laura, & López, Francy. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(1), 59-68. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-

[24222010000100005&lng=es&tlng=es](https://doi.org/10.24222010000100005&lng=es&tlng=es).

- Romero-Aguilar, Mariana, Colín-Cruz, Arturo, Sánchez-Salinas, Enrique, & Ortiz Hernández, Ma. Laura. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992009000300004&script=sci_abstract
- Samal, K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2017). Performance assessment of a *Canna indica* assisted vermifilter for synthetic dairy wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.027>
- Shah, A., & Shah, M. (2020). Characterisation and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100383>
- Smith, B. R. (2009). Re-thinking wastewater landscapes: Combining innovative strategies to address tomorrow's urban wastewater treatment challenges. *Water Science and Technology*, 60(6), 1465–1473. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.473>
- Vera-Rodríguez, J. H., Mendieta-Chica, H. D., Intriago-Villavicencio, M. A., Romero-Blanco, R. L., & Andrade-Yucailla, V. C. (2025). Efecto biorremediador de la macrófita (*Hydrocotyle bonariensis*) sobre agua contaminada por purín porcino. *Horizon Nexus Journal*, 3(3), 70-83. <https://doi.org/10.70881/hni/v3/n3/85>
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands.
- Worku, A., Tefera, N., Kloos, H., & Benor, S. (2018). Constructed wetlands for phytoremediation of industrial wastewater in Addis Ababa, Ethiopia. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s41204-018-0038-y>
- Yadav, S., Kumar, J., Malyan, S. K., Singh, R., Singh, O., Goyal, V. C., Singh, J., & Negi, R. (2023). Evaluating Pilot-Scale Floating Wetland for Municipal Wastewater Treatment Using *Canna indica* and *Phragmites australis* as Plant Species. *Sustainability*, 15(18), 13601. <https://doi.org/10.3390/su151813601>
- Zhang, X.-B., Liu, P., Yang, Y.-S., & Chen, W.-R. (2007). Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 19(8), 902–909. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(07\)60150-8](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(07)60150-8)

Literatura gris/Notas periodísticas

- Aguas del Tucumán S.A. (2024b, 6 de febrero). *La SAT y el Municipio de Lules comenzaron con la rehabilitación de la Planta de Tratamiento de La Bolsa*. Recuperado de <https://www.aguasdeltucuman.com.ar/noticias/1120-la-sat-y-el-municipio-de-lules-comenzaron-con-la-rehabilitacion-de-la-planta-de-tratamiento-de-la-bolsa>
- Aguas del Tucumán S.A. (2020, 12 de mayo). *¿Consumo asignado o medidor?* Recuperado de <https://www.aguasdeltucuman.com.ar/noticias/57-%C2%BFConsumo->

asignado-o-medidor?

- Aguas del Tucumán S.A. (2024a, 24 de junio). *Avanzamos con el reacondicionamiento de la Planta de Tratamiento de Líquidos Cloacales La Bolsa, en Lules*. Recuperado de <https://www.aguasdeltucuman.com.ar/noticias/1144-avanzamos-con-el-reacondicionamiento-de-la-planta-de-tratamiento-de-liquidos-cloacales-la-bolsa-en-lules>
- Alemania logró recuperar uno de sus ríos más contaminados. (2014, 2 de octubre). ABC Color. Recuperado de <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/economia/alemania-logro-recuperar-uno-de-sus-rios-mas-contaminados-769090.html>
- Comisión Europea. (2013). *Infraestructura verde: mejora del capital natural de Europa* (Comunicación de la Comisión COM (2013) 249 final. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0008.03/DOC_1&format=PDF
- Comunicación Tucumán. (2024, 18 de septiembre). *Importante avance en la Planta de Tratamiento de Líquidos Cloacales de La Bolsa*. Recuperado de <https://www.comunicaciontucuman.gob.ar/noticia/obras-servicios-publicos/229986/importante-avance-planta-tratamiento-liquidos-cloacales-bolsa>
- Convención Ramsar. (2007). *Valoración de Humedales* (Serie de Informes Técnicos de Ramsar N° 3). Recuperado de https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_rtr03_s.pdf
- Convención Ramsar. (2016). *The Fourth Ramsar Strategic Plan 2016–2024* (Ramsar handbooks for the wise use of wetlands, 5th ed., Vol. 2). Ramsar Convention Secretariat. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/hb2_5ed_strategic_plan_2016_24_e.pdf
- Fundación Miguel Lillo. (2018, 23 de marzo). *Tucumán derrocha agua*. Recuperado de <https://www.lillo.org.ar/prensa/noticias/20180323-tucuman-derrocha-agua>
- La Gaceta. (2024, 16 de octubre). *Sin mejoras a futuro, habrá menos agua y de peor calidad en Tucumán*. Recuperado de <https://www.lagaceta.com.ar/nota/1055792/sociedad/sin-mejoras-futuro-habra-menos-agua-peor-calidad-tucuman.html>
- Low, T. (2017, 1 de mayo). *Why sewage plants are great for birds*. Australian Geographic. <https://www.australiangeographic.com.au/nature-wildlife/2017/05/bird-watching-at-sewage-plants/>
- Melbourne Water. (s.f.). *Bird species of the Western Treatment Plant*. Recuperado el 30 de junio de 2024, de <https://www.melbournewater.com.au/things-do/birdwatching/bird-species-western-treatment-plant>