

FITORREMEDIACIÓN DE EFLUENTES DOMÉSTICOS EN LA REGIÓN ICA

ANA MARÍA JIMÉNEZ PASACHE
SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO
LESLIE MARIELLY FELICES VIZARRETA
FELIPE ESTUARDO YARASCA ARCOS
MARÍA ELIZABETH FUENTES CAMPOS
CYNTHIA VICTORIA BENDEZÚ HERNÁNDEZ
JOANNA ISABEL QUISPE ALARCÓN
FELIPE RAFAEL VALLE DÍAZ

EDITORIAL

CICI

CENTRO DE INVESTIGACIONES
Y CAPACITACIONES
INTERDISCIPLINARES

ISBN 978-628-97217-3-7

Editor: Alain Fitzgerald Castro Alfaro

Título:

Fitorremediación de efluentes domésticos en la región Ica

Autores: Ana María Jimenez Pasache, Santos Humberto Olivera Machado, Leslie Marielly Felices Vizarreta, Felipe Estuardo Yarasca Arcos, María Elizabeth Fuentes Campos, Cynthia Victoria Bendeزú Hernández, Joanna Isabel Quispe Alarcón, Felipe Rafael Valle Díaz

Versión Digital: ISBN 978-628-97217-3-7

Sello Editorial:

Editorial Centro de Investigaciones y Capacitaciones Interdisciplinares SAS – CICI

Coordinadora: Nora González Pérez – Cartagena –Colombia

Portada y diagramación: Alain Castro González

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons – Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional

https://co.creativecommons.org/?page_id=13



Cartagena –Colombia, Octubre de 2025

FITORREMEDIACIÓN DE EFLUENTES DOMÉSTICO EN LA REGIÓN ICA

ANA MARÍA JIMÉNEZ PASACHE

SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO

LESLIE MARIELLY FELICES VIZARRETA

FELIPE ESTUARDO YARASCA ARCOS

MARÍA ELIZABETH FUENTES CAMPOS

CYNTHIA VICTORIA BENDEZÚ HERNÁNDEZ

JOANNA ISABEL QUISPE ALARCÓN

FELIPE RAFAEL VALLE DÍAZ

Colombia

Latinoamérica

ÍNDICE

Contenido

PRESENTACIÓN	v
CAPÍTULO I	2
SITUACIÓN ACTUAL DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE ICA	2
CAPÍTULO II	17
CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA PROVINCIA DE ICA	17
CAPÍTULO III	31
TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON EICHHORNIA CRASSIPES.....	31
(JACINTO DE AGUA).....	31
CAPÍTULO IV.....	64
ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE <i>LEMNA MINNOR</i>	64
CAPÍTULO V	79
TRATAMIENTOS DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN USANDO TOTORALES (<i>Typha angustifolia</i>).....	79
CAPÍTULO VI	110
RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN	110

PRESENTACIÓN

La problemática del tratamiento de aguas residuales en la provincia de Ica representa uno de los desafíos ambientales más críticos de nuestra región, y en este escenario, la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" emerge como un actor fundamental a través de su producción científica y tecnológica. Como principal institución de educación superior en la región, nuestra universidad tiene el compromiso ineludible de generar conocimiento aplicado que contribuya a resolver esta compleja situación que afecta tanto a la población como al sector productivo.

En los últimos años, el acelerado crecimiento urbano y la expansión de la frontera agrícola en Ica han generado una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos, situación que se ve agravada por la falta de sistemas adecuados de tratamiento de aguas residuales. Esta realidad ha motivado a nuestros investigadores y estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química a enfocar sus trabajos académicos en buscar soluciones innovadoras y viables para esta problemática. Las tesis de pregrado desarrolladas en nuestro claustro universitario han abordado el tema desde múltiples perspectivas, combinando el rigor científico con un profundo conocimiento de las condiciones locales.

Entre los estudios más relevantes se encuentran investigaciones que evalúan tecnologías convencionales y alternativas para el tratamiento de efluentes, análisis de la calidad del agua en diferentes puntos de la red hidrográfica provincial, y propuestas de sistemas de tratamiento adaptados a las particularidades de nuestra región. Estos trabajos no solo cumplen con los requisitos académicos para la obtención de grados profesionales, sino que constituyen verdaderas contribuciones al acervo científico-tecnológico necesario para enfrentar el desafío de la contaminación hídrica.

Un aspecto destacable de estas investigaciones es su enfoque práctico y aplicado, buscando siempre tecnologías que puedan ser implementadas considerando las condiciones económicas, sociales y ambientales de nuestra región. Se han estudiado desde sistemas de tratamiento avanzados hasta soluciones basadas en naturaleza, evaluando su eficiencia, costos y posibilidades de implementación a diferentes escalas. Estos estudios han permitido acumular un

valioso conocimiento sobre la efectividad de diferentes métodos de tratamiento en las condiciones particulares de Ica.

La importancia de estas investigaciones trasciende el ámbito académico, ya que sus resultados proporcionan información valiosa para la toma de decisiones tanto en el sector público como privado. Los datos generados sobre niveles de contaminación, eficiencia de tratamientos y características de los efluentes representan insumos fundamentales para el diseño de políticas públicas y proyectos de inversión en saneamiento básico.

Nuestra universidad, consciente de la gravedad del problema, está fortaleciendo sus capacidades de investigación en este campo, mejorando sus laboratorios, fomentando la formación de investigadores especializados y estableciendo alianzas estratégicas con instituciones públicas, empresas y organizaciones de la sociedad civil. El objetivo es crear un ecosistema de investigación aplicada que permita desarrollar soluciones integrales y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en nuestra provincia.

Los desafíos que enfrentamos son múltiples: desde la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos hasta los efectos en la salud pública y los cultivos agrícolas. Frente a esta compleja realidad, la investigación científica que desarrollamos en nuestras aulas y laboratorios se convierte en una herramienta poderosa para generar conocimiento aplicable y formar profesionales capaces de liderar los cambios que nuestra región necesita.

El camino por recorrer es largo, pero cada tesis, cada investigación, cada proyecto que surge de nuestra universidad representa un paso adelante en la búsqueda de soluciones a esta problemática ambiental que afecta directamente la calidad de vida de los iqueños y la sostenibilidad de nuestras principales actividades económicas. Como institución comprometida con el desarrollo regional, continuaremos fortaleciendo esta línea de investigación, convencidos de que el conocimiento científico es la base para construir un futuro con manejo sostenible del agua en nuestra provincia.

Para describir la problemática a través de un análisis y evaluación de la situación presente de las aguas residuales en la ciudad de Ica, se han utilizado las siguientes tesis como referencia:

1. S. R. Lovera Muñoz, *Estudio de la concentración y absorción de macroelementos y metales pesados en el cultivo de algodón irrigado con aguas servidas en el sector de San Pedro Cachiche – Ica*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.13028/3140>
2. C. E. Cabrera Vigil, *Estudio de la contaminación por metales pesados en el cultivo de maíz amiláceo (Zea mays L.) irrigado con aguas residuales en el sector de San Pedro - Cachiche*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.13028/4716>

Seguidamente se realiza una compilación de las Tesis desarrolladas de tipo aplicada y diseño experimental relacionadas con el tratamiento de aguas residuales domésticas, desarrolladas en la Provincia de Ica:

1. Ccapcha Cutimbo, Carlos Martin y Mendoza Quispe, Ricardo Kevin. Universidad Nacional “San Luis Gonzaga”, Tesis para optar el título de Ingeniero Químico. Diseño del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche - Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), analizado en el capítulo 3.
[https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&oq=Pre-grado Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica](https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&oq=Pre-grado+Facultad+de+Ingeniería+Química+y+Petroquímica) .
2. G. Carbajal Matta, Valoración de la Eficacia de Tratamiento con Lemna Minor para la Reducción del Nitrógeno y Fósforo del Agua Residual Urbana en la Provincia de Chinchipe, Ica: Universidad Nacional San Luis Gonzaga , 2023, analizada en el capítulo IV.
[https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&oq=Pre-grado Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica](https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&oq=Pre-grado+Facultad+de+Ingeniería+Química+y+Petroquímica) .

3. Quispe Alarcon, Joanna Isabel. Tratamiento Secundario de los efluentes domésticos empleando el sistema de humedal artificial en el cercado de Ica-Agostura Limón, Tesis para optar el título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", año 2017, Ica. [https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&og=Pre-grado Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica](https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&og=Pre-grado+Facultad+de+Ingeniería+Química+y+Petroquímica).

En última instancia, se ofrece un resumen de los resultados (parámetros de operación y eficiencia) de cada una de las alternativas de tratamiento del agua residual doméstica, que demuestra las ventajas de su aplicación. Esto permitirá al lector interesado comprender las ventajas de las alternativas de fitorremediación para sus respectivos proyectos de desarrollo.

El éxito de estas investigaciones sobre tratamiento de aguas residuales en Ica ha sido posible gracias al trabajo colaborativo de un destacado equipo de docentes investigadores de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Cada profesional ha aportado su expertise particular para lograr una comprensión integral del problema y el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptadas a la realidad regional.

La Dra. Ana María Jiménez Pasache, ha contribuido en la articulación de los diferentes capítulos del libro, así como aplicado su experiencia en el tratamiento de aguas industriales y trabajos de investigación referidos al aprovechamiento y tratamiento de efluentes en procesos productivos.

El Dr. Humberto Olivera Machado, con su experiencia ha contribuido en establecer los estándares técnicos del trabajo de investigación.

La Dra. Leslie Marielly Felices Vizarreta por su parte, ha contribuido con su conocimiento en microbiología aplicada al tratamiento de aguas, particularmente en el análisis de eficiencia en la remoción de patógenos y coliformes.

El Magíster Felipe Estuardo Yarasca Arcos ha aportado su experticia en el tratamiento de residuos líquidos, para la caracterización adecuada del agua residual doméstica y en la posterior elección del bio-tratamiento.

La Magíster María Elizabeth Fuentes Campos ha aplicado sus conocimientos en ingeniería de procesos para optimizar los diseños de las plantas piloto y establecer los parámetros operativos ideales.

La Magister Cynthia Victoria Bendezú Hernández ha sido clave en el análisis de operación de los sistemas experimentales, asegurando que los diseños teóricos se hayan traducido en aplicaciones reales.

La Ingeniera Joanna Quispe Alarcón, ha contribuido con su experiencia en análisis fisicoquímicos y control de calidad, garantizando la confiabilidad de los datos obtenidos en las investigaciones.

El Doctor Felipe Rafael Valle Díaz, finalmente, fue el gestor e impulsor del proceso de desarrollar el libro de investigación, que logró a partir del dictado de los talleres de capacitación, en calidad de invitado por la Unidad de Investigación y refrendado con la Resolución Decanal 107-2025-D/FIQyP-UNICA de fecha 25 de febrero de 2025. El rol final fue el asesoramiento, producción, sumado la revisión y gestión para la publicación del libro de investigación.

Este equipo multidisciplinario de profesionales, además de su labor investigativa, está comprometido con la formación de nuevas generaciones de ingenieros químicos a través de la docencia en la Facultad. Su trabajo conjunto representa un modelo de cómo la academia puede abordar problemas complejos del desarrollo regional mediante la combinación de diferentes especialidades y enfoques metodológicos. La sinergia creada entre estos investigadores ha permitido no solo generar conocimiento científico de calidad, sino también desarrollar soluciones prácticas que están contribuyendo a mejorar la gestión del agua residual en la región Ica.

Los autores

Capítulo I

SITUACIÓN ACTUAL DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE ICA

*María Elizabeth Fuentes Campos, Ana María Jiménez Pasache, Cynthia
Victoria Bendezú Hernández, Felipe Rafael Valle Díaz*

CAPÍTULO I

SITUACIÓN ACTUAL DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE ICA

Ante la demanda de agua de uso domiciliario y su escasez, la ciudad de Ica ha optado por reusar el agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) -Cachiche la cual está administrada por EMAPICA, allí se tratan el 90% de las aguas residuales domiciliarias, estas carecen de un tratamiento adecuado y óptimo. Después de su tratamiento sólo son reutilizadas en el riego de cultivos de tallo alto. [1]

La planta de tratamiento de Cachiche, construida en 1972 para una población de 60,000 habitantes, presenta un diseño operativo obsoleto debido al crecimiento demográfico, impulsado principalmente por la migración y el auge agroexportador de la zona. Originalmente, el sistema contaba con cuatro lagunas de oxidación de 3.2 hectáreas cada una, destinadas a depurar las aguas residuales del distrito de Ica. Sin embargo, el aumento de la población, sumado a los vertimientos de los sectores de Angostura Limón y Huacachina, ha provocado que la PTAR reciba un caudal casi tres veces superior a su capacidad inicial.

Dos de las lagunas tenían tuberías de desagüe dirigidas al cauce del río Ica, pero la Autoridad Nacional del Agua (ANA) prohibió este vertimiento directo. Como medida provisional, se sellaron las tuberías y se reforzaron los diques del río para evitar sanciones, aunque esta solución improvisada persiste hasta hoy. Esta situación ha generado alarma en la comunidad debido a los riesgos para la salud pública, la contaminación de cultivos, la falta de impermeabilización en la PTAR y el deterioro del entorno paisajístico, entre otros problemas.[2]

En la siguiente tabla se presentan las características de diseño y de operación de la PTAR- Cachiche

Tabla1: Condiciones de diseño y operación de la PTAR -Cachiche

Caudal de diseño (L/s)	DBO de diseño (mg/L)	Carga orgánica de diseño (mg/L)	Caudal de entrada(L/s)	DBO de entrada (mg/L)	Carga orgánica de operación (mg/L)
150	3240	3240	465	260	10445.76

Fuente: SUNASS 2025

La planta Cachiche no ha recibido mejoramiento significativo más allá de distribución hidráulica de las lagunas organizadas en serie (laguna 01, laguna 02, laguna 03 y laguna 04). El efluente final es vertido al canal de regadío San Jacinto, sin que se haya logrado la remoción eficiente de contaminantes como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Coliformes termo tolerantes. [3]

Ante la deficiencia del recurso hídrico, los conflictos por su uso y la inadecuada infraestructura para tratar las aguas residuales por parte de Empresas prestadoras de servicios de agua se ha implementado la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento 1280 que constituye el marco legal que regula, a nivel nacional, la organización y entrega de los servicios de saneamiento.

Mediante esta legislación, se reconoce como asunto de necesidad pública y de interés nacional la gestión y provisión de dichos servicios, con el objetivo de garantizar el acceso universal de la población a servicios sostenibles y de calidad, así como resguardar la salud pública y el medio ambiente.

De acuerdo con la ley, la provisión de los servicios de saneamiento, tanto en zonas urbanas como rurales, abarca lo siguiente:

- Servicio de agua potable
- Servicio de alcantarillado
- Servicio de disposición sanitaria de excretas en los ámbitos urbano y rural y
- Servicio de tratamiento de aguas residuales para disposición final o reúso donde se prioriza su uso en el riego de áreas verdes y se permite su comercialización, junto con subproductos como lodos y gas metano, para fines de reúso, incluso sin tratamiento previo, siempre que los terceros asuman su tratamiento y mantenimiento. [4]

El convenio entre EMAPICA y AGROKASA para el aprovechamiento de aguas residuales en Ica presenta un modelo de gestión hídrica con luces y sombras que amerita un análisis profundo. Este acuerdo pionero, vigente desde 2018, plantea un esquema de cooperación público-privada donde la empresa agroexportadora asume la construcción y operación de una planta depuradora a cambio del acceso a un caudal de hasta 9 millones de metros cúbicos anuales de aguas servidas.

Si bien el mecanismo alivia la carga financiera del Estado al transferir la inversión en infraestructura al sector privado, el precio pactado de S/0.165 por metro cúbico suscita cuestionamientos. Expertos señalan que esta tarifa no refleja el valor estratégico del recurso en una zona árida como Ica, donde la sobreexplotación de los mantos acuíferos alcanza niveles críticos. Además, el contrato carece de disposiciones para reajustar periódicamente este valor según la evolución del mercado hídrico.

La iniciativa muestra avances en el tratamiento de efluentes mediante tecnología de lodos activados con capacidad para procesar 285 litros por segundo. No obstante, presenta limitaciones técnicas preocupantes: sistemas insuficientes para eliminar metales pesados, ausencia de protocolos para contaminantes emergentes y falta de supervisión independiente sobre la calidad del agua tratada.

En términos de impacto hídrico, el proyecto contribuye modestamente a aliviar la presión sobre las fuentes subterráneas, ya que el volumen contratado representa apenas el 3% del déficit regional. Paradójicamente, la mayor parte del recurso tratado se destina a cultivos de exportación en lugar de beneficiar a los pequeños agricultores locales.

Las omisiones en el marco contractual constituyen otro punto débil: no establece mecanismos de renegociación periódica, permite modificaciones unilaterales de los estándares de calidad y carece de sanciones efectivas por incumplimiento. Tampoco contempla seguros ambientales para posibles daños acumulativos en los suelos agrícolas.

Esta experiencia deja valiosas lecciones para futuras iniciativas. Resulta imperioso implementar sistemas de monitoreo con participación académica y ciudadana, incluir cláusulas de beneficio comunitario y vincular explícitamente estos proyectos con planes de recarga de acuíferos. El desafío radica en diseñar modelos que equilibren atractivo inversionista, protección ambiental y equidad social, transformando el reúso de aguas residuales en una solución integral para la crisis hídrica de Ica.

Principales impactos ocasionados por las aguas residuales en Ica

En la región de Ica, la gestión ineficiente de las aguas residuales y la falta de inversión en infraestructura hídrica han desencadenado una crisis multidimensional que afecta tanto a la población como al motor económico de la zona. Esta situación paradójica - donde una de las

regiones más productivas del país enfrenta estrés hídrico - evidencia las graves consecuencias de una planificación deficiente y la ausencia de políticas públicas sostenibles.

El problema del desabastecimiento hídrico se agrava progresivamente ante el crecimiento demográfico y las demandas de los sectores productivos. La agricultura, principal actividad económica de Ica que contribuye significativamente al PBI nacional, se ve particularmente amenazada por esta crisis. Los cultivos de exportación - como espárragos, uvas y paltas - dependen de un recurso cada vez más escaso y contaminado, poniendo en riesgo no solo los ingresos de miles de familias sino también la posición del Perú como potencia agroexportadora.

Entre los impactos más graves de esta situación destacan:

a) Impacto en la Salud Pública.

En diversas zonas de territorios en desarrollo, los recursos hídricos se encuentran en un estado de amenaza creciente debido a la contaminación provocada por actividades industriales y humanas. Esta cuestión se agudiza en circunstancias en las que la provisión de agua potable es insatisfactoria, lo que obliga a un gran número de la población a depender de fuentes de agua no seguras, como pozos de poca profundidad y perforaciones, para satisfacer sus necesidades esenciales de consumo. Esta dependencia amenaza a las comunidades y limita la capacidad de utilizar el agua de manera segura en el hogar, agravando de esta manera las dificultades de acceso a servicios hídricos adecuados. Se estima que más de 2.300 millones de individuos sufren de enfermedades vinculadas al consumo de agua contaminada a nivel global. Además, se calcula que más de 2.2 millones de individuos en naciones en vías de desarrollo perecen como consecuencia directa de la falta de acceso a agua segura para el consumo humano y a infraestructuras sanitarias adecuadas. Este contexto subraya la urgente necesidad de optimizar los sistemas de tratamiento de aguas residuales y fortalecer las políticas de salud pública con el objetivo de proteger tanto a los individuos como al medio ambiente. [7]

Una de las consecuencias más graves del manejo inadecuado de las aguas residuales es su infiltración en fuentes de agua subterráneas sin un tratamiento previo adecuado. Este proceso puede introducir una variedad de microorganismos patógenos que representan un riesgo directo para la salud humana. Estos agentes infecciosos se clasifican principalmente en cinco grupos: bacterias, virus, protozoos, hongos y helmintos [8].

La contaminación microbiana constituye una amenaza particularmente severa cuando existen filtraciones de aguas negras hacia las redes de distribución de agua potable, lo que puede resultar en brotes de enfermedades transmitidas por el agua. Entre los microorganismos comúnmente detectados en estas situaciones se encuentran el *Rotavirus*, la *Entamoeba histolytica*, *Campylobacter* y *Escherichia coli*, todos ellos asociados a enfermedades diarreicas, disentería y otras afecciones gastrointestinales. La presencia de *E. coli* en el agua es un indicador clave de contaminación fecal, ya sea de origen humano o animal, y revela fallas en el sistema de saneamiento que requieren acciones urgentes y sostenidas. La implementación de controles de calidad rigurosos, junto con soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, es esencial para reducir estos riesgos. [9]

Otro problema de salud son los ocasionados por los virus dentro de los cuales se tienen a los arbovirus que constituyen un grupo diverso de virus pertenecientes a distintas familias, cuya transmisión se da principalmente a través de vectores artrópodos como los mosquitos y las garrapatas. Estas infecciones representan una carga significativa para la salud pública y conllevan importantes consecuencias socioeconómicas, particularmente en regiones tropicales y subtropicales. Uno que pertenece a este tipo de virus es el virus del dengue con sus cuatro serotipos distintos (DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4,) siendo uno de los más relevantes desde el punto de vista clínico, ya que se encuentra presente de manera endémica en más de cien países y que pueden constituirse en una epidemia si no hay un control sanitario[10] .Las epidemias se deben a contextos donde el acceso al agua segura es limitado, las familias suelen depender de métodos alternativos como la recolección, el transporte y el almacenamiento en sus propios hogares para satisfacer sus necesidades básicas. Este manejo del agua propicia una alta probabilidad de contaminación microbiológica entre el punto de origen y el consumo, lo que impacta negativamente en su calidad y además a la proliferación de moscas y zancudos, estos últimos transmisores de dengue [11]

Las enfermedades infecciosas que se relacionan con el manejo del agua se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las enfermedades infecciosas relacionadas con el agua

Clasificación	Mecanismo de transmisión	Ejemplos
Portadas o transportadas por el agua.	Contaminación fecal del agua.	Cólera, fiebre tifoidea, enteropatógenos, virus de la hepatitis A(VHA), virus de la hepatitis E (VHE), enterovirus, parásitos intestinales.
Soportadas por el agua	Organismos cuyo ciclo de vida ocurre parcialmente en ambientes acuáticos.	Fasciolosis, paragonimiasis, leptospirosis.
Vinculadas con el agua	Transmitidas por vectores biológicos cuyo ciclo depende del agua (como mosquitos).	Malaria, dengue, zika, fiebre amarilla, chikungunya.
Lavadas por el agua	Relacionadas con mala higiene personal o contacto con agua contaminada.	Pediculosis, rickettsiosis.
Dispersadas por el agua	Microorganismos que proliferan en agua y se inhalan en forma de aerosoles.	Legionelosis.

Fuente: Adaptado de [11]

En la ciudad de Ica uno de los problemas es el colapso del sistema de salud por el aumento de los casos de dengue reportados en mayor cantidad en el año 2024 que conllevó a su declaración de emergencia sanitaria [12].

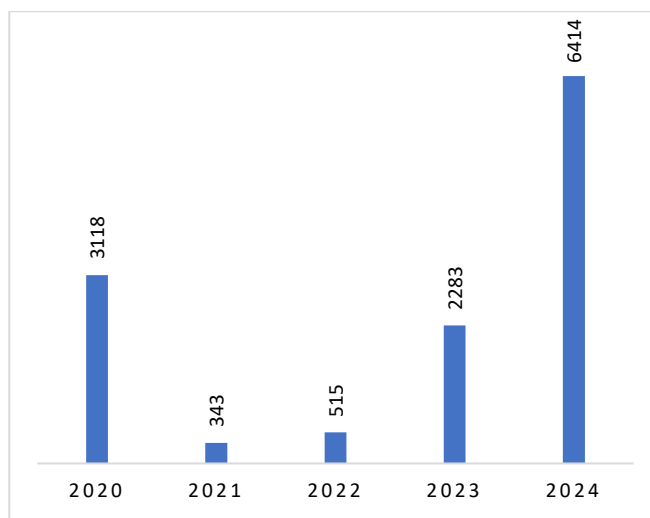


Gráfico 1: Casos de contagiados con dengue reportados en los últimos años en Ica.

Fuente: Adaptado de [12]

b) Impacto en el medio ambiente:

La contaminación de ríos, lagos y arroyos está estrechamente relacionada con las características del agua residual que se vierte en ellos. Los impactos ambientales que generan estos vertidos son variados y dependen tanto de la cantidad descargada como de los componentes químicos y microbiológicos presentes. Elementos como la materia orgánica, los sólidos en suspensión, los metales pesados y los compuestos organoclorados, junto con las particularidades del ecosistema acuático receptor, influyen directamente en la intensidad del daño. Uno de los efectos más comunes es la eutrofización, especialmente en cuerpos de agua con elevados niveles de nutrientes, lo que altera su equilibrio ecológico [13].

En distintas partes del mundo, los ríos y lagos se han convertido en receptores de múltiples tipos de contaminación, desde aguas residuales domésticas hasta descargas industriales con sustancias tóxicas y agroquímicos, que terminan infiltrándose tanto en las aguas superficiales como en los acuíferos subterráneos [14].

como problemas renales, neurológicos y gastrointestinales, generando una carga adicional para el sistema de salud pública.

Ante esta situación, resulta urgente implementar soluciones integrales que incluyan la modernización de las plantas de tratamiento de aguas residuales, la remediación de suelos contaminados y el monitoreo constante de la calidad del agua y los cultivos. Asimismo, es fundamental fortalecer las políticas de fiscalización para evitar más vertimientos ilegales y promover prácticas agrícolas que minimicen el riesgo de contaminación. La participación de las autoridades locales, el sector privado y las comunidades afectadas será clave para revertir este problema, que de no atenderse a tiempo, seguirá degradando los recursos naturales y perjudicando la salud y la economía de Ica. Solo a través de una gestión responsable y sostenible del agua se podrá garantizar un futuro seguro para la agricultura y la población de la región [16].

En un estudio desarrollado en San Pedro- Cachiche se encontró que el cultivo de algodón de la zona absorbe metales como plomo en una mayor proporción que otros metales como cromo y es debido a que esta zona es de descarga de aguas residuales de la laguna de oxidación de la PTAR siendo este un problema para los pequeños agricultores ya que solo se abastecen de esta agua mas no las empresas agroexportadoras que utilizan agua del subsuelo para cumplir con las normativas internacionales para comercializar sus productos [17].

c) Impactos económicos y sociales:

La región de Ica enfrenta una profunda crisis hídrica que evidencia las contradicciones entre el desarrollo agroexportador y la sostenibilidad ambiental. Por un lado, la sobreexplotación de los acuíferos para satisfacer la demanda de cultivos de exportación ha provocado un descenso alarmante en los niveles freáticos, poniendo en riesgo la disponibilidad de agua para las generaciones futuras. Por otro lado, las medidas implementadas para frenar este deterioro, como la veda de pozos establecida en 2005, han demostrado ser insuficientes ante la falta de capacidad de fiscalización estatal y la influencia política de los grandes actores agroexportadores.

Esta situación ha generado un escenario de creciente desigualdad en el acceso al recurso hídrico. Mientras las grandes empresas agrícolas cuentan con los recursos para sortear las restricciones mediante tecnologías de bombeo e incluso perforaciones ilegales, los pequeños agricultores ven

cómo sus pozos tradicionales se secan y sus cultivos se vuelven inviables. A esto se suma el problema de la contaminación por aguas residuales no tratadas, que afecta tanto a las fuentes de agua como a la salud de las poblaciones más vulnerables, generando un círculo vicioso de pobreza y deterioro ambiental.

El desafío actual requiere un cambio de paradigma en la gestión del agua en Ica. Es imprescindible fortalecer los mecanismos de control y sanción para garantizar el cumplimiento de las vedas, al mismo tiempo que se promueve un uso más eficiente del recurso mediante tecnologías de riego modernas. Asimismo, se necesita establecer criterios de distribución más justos que prioricen el consumo humano y la agricultura familiar por encima de los intereses comerciales. Todo esto debe acompañarse de un proceso de diálogo inclusivo que permita conciliar los intereses de los distintos actores involucrados, desde los pequeños agricultores hasta los grandes exportadores, bajo el principio rector de garantizar la sostenibilidad hídrica de la región.

La solución a esta crisis no puede postergarse. Cada año de inacción significa mayor presión sobre los acuíferos, mayor degradación ambiental y mayor conflicto social. Ica necesita con urgencia un modelo de gestión del agua que equilibre las necesidades económicas con la protección del medio ambiente y la equidad social, único camino posible para asegurar un futuro sostenible para esta importante región del país. [18,19,20,21]

Frente a este problema no solo social, sino también ambiental y económico originado por la contaminación por aguas residuales, se ha evidenciado la necesidad imperante de recursos alternativos y procesos que faciliten el control, la reducción o, en caso de ser factible, la eliminación de sus efectos. Numerosas comunidades están fomentando la cultura del reciclaje, garantizando la reutilización como parámetros óptimos de calidad del agua, con el fin de contribuir a la reducción de residuos y la conservación para su utilización eficaz. Estas opciones se integran en la iniciativa denominada Economía Verde (GE).^{22]}

Conclusiones

El manejo de las aguas residuales en la región de Ica representa un problema crítico que requiere atención inmediata y soluciones integrales. La incapacidad de las plantas de tratamiento existentes para procesar el volumen de aguas residuales generadas ha llevado a una situación insostenible,

donde la falta de infraestructura adecuada y tecnologías modernas impide un tratamiento eficiente. Esto no solo viola los principios de una economía sostenible, sino que también genera consecuencias graves para el medio ambiente y la sociedad. La descarga de aguas no tratadas contamina ríos, acuíferos y suelos, afectando directamente la calidad de los recursos hídricos, que son ya escasos en esta región desértica.

Esta contaminación tiene un impacto directo en la salud de la población, especialmente en las comunidades más vulnerables que dependen de fuentes de agua no seguras para su consumo y actividades diarias. Además, la degradación de los ecosistemas acuáticos y terrestres reduce la biodiversidad y perjudica a la agricultura, que es el motor económico de Ica. Los suelos contaminados pierden productividad, y el agua no tratada utilizada para el riego pone en riesgo la salubridad de los cultivos, afectando no solo a los agricultores locales sino también a los mercados nacionales e internacionales que dependen de estos productos.

Otro aspecto preocupante es el incremento de los conflictos sociales relacionados con el acceso al agua. La escasez del recurso, agravada por su contaminación, genera tensiones entre los diferentes usuarios, incluyendo comunidades, agricultores y empresas. Si no se toman medidas urgentes, estos conflictos podrían intensificarse, poniendo en riesgo la estabilidad social y económica de la región. Para evitar este escenario, es fundamental la implementación de políticas públicas integrales que involucren a todos los actores clave: el Estado, como regulador y promotor de inversiones en infraestructura; el sector privado, como impulsor de tecnologías y prácticas sostenibles; las universidades, como centros de investigación e innovación; y la comunidad, como protagonista en la vigilancia y uso responsable del agua.

Solo a través de un esfuerzo coordinado y multisectorial se podrá garantizar un manejo adecuado de las aguas residuales en Ica. Esto implica no solo modernizar las plantas de tratamiento, sino también promover la reutilización del agua tratada en la agricultura y otros usos, fomentar la educación ambiental y establecer mecanismos de monitoreo constante. El objetivo final debe ser asegurar un suministro de agua de calidad para consumo humano y actividades productivas, sentando las bases para un desarrollo verdaderamente sostenible en la región. La inacción no es una opción, pues el costo ambiental, social y económico de seguir postergando las soluciones será cada vez más alto e irreversible.

Referencias bibliográficas

- [1] C. M. Ccapcha Cutimbo y R. K. Mendoza Quispe, *Diseño del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche, Ica, por medio de la Eichhornia crassipes*, 2021.
- [2] EMAPICA, *Memoria institucional 2023 EPS EMAPICA S.A.*, 2023.
- [3] OTASS, "Sistematización de la buena práctica de comercialización de aguas crudas," 2023.
- [4] Gobierno del Perú, "Decreto Legislativo N.º 1280 - Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento", 29 de diciembre de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/sunass/normas-legales/986934-decreto-legislativo-n-1280>
- [5] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, *Comercialización de aguas residuales crudas – Caso Emapica S.A.*, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1483424/Comercializaci%C3%B3n%20de%20Aguas%20Residuales%20Crudas.pdf>
- [6] SUNASS, *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*, 2022.
- [7] M. Fida, P. Li, Y. Wang, S. M. K. Alam, y A. Nsabimana, "Water Contamination and Human Health Risks in Pakistan: A Review", *Exposure and Health*, vol. 15, pp. 619–639, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00512-1>
- [8] Kansas Department of Health and Environment, "Waterborne Diseases and Health Effects," 2020.
- [9] S. A. Al-Gheethi, M. A. Al-Maqtari, M. A. Al-Gheethi, y M. A. Al-Gheethi, "Microbiological Contaminants in Drinking Water: Current Status and Challenges," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 194, art. no. 1, pp. 1–17, 2022. doi: 10.1007/s11270-022-05698-3.
- [10] S. Monteiro, R. Pimenta, F. Nunes, M. V. Cunha, y R. Santos, "Detection of dengue virus and chikungunya virus in wastewater in Portugal: an exploratory surveillance study," *The Lancet Microbe*, vol. 5, no. 11, art. no. 100911, Nov. 2024. doi: 10.1016/S2666-5247(24)00150-2.

- [11] K. Yang, J. LeJeune, D. Alsdorf, B. Lu, C. K. Shum, y S. Liang, "Global distribution of outbreaks of water-associated infectious diseases," *PLoS Negl. Trop. Dis.*, vol. 6, no. 2, p. e1483, 2012. doi: 10.1371/journal.pntd.0001483.
- [12] Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades del Ministerio de Salud del Perú. Sala Situacional de Enfermedades Metaxénicas. Disponible en: https://app7.dge.gob.pe/maps/sala_metaxenica/#grafico01. [Accedido: 22 abril 2025].
- [13] M. A. Owili, "Impact of discharge of wastewater on water quality of Lake Victoria, Kenya," *Afr. J. Environ. Assess. Manag.*, vol. 6, no. 2, pp. 133–143, 2003.
- [14] A. G. Agudelo, *El agua en América Latina: abundante y escasa*, Bogotá, Colombia: CEPAL, 2005.
- [15] R. R. Karri, G. Ravindran, and M. H. Dehghani, *Wastewater—Sources, Toxicity, and Their Consequences to Human Health*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021.
- [16] C. E. Cabrera Vigil, *Estudio de la contaminación por metales pesados en el cultivo de maíz amiláceo (Zea mays L.) irrigado con aguas residuales en el sector de San Pedro - Cachiche*, Tesis de licenciatura, Univ. Nac. San Luis Gonzaga de Ica, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.13028/4716>
- [17] S. R. Lovera Muñoz, *Estudio de la concentración y absorción de macroelementos y metales pesados en el cultivo de algodón irrigado con aguas servidas en el sector de San Pedro Cachiche – Ica*, Tesis de licenciatura, Univ. Nac. San Luis Gonzaga de Ica, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.13028/3140>
- [18] Oré, R., Bayer, R., Chiong, C., & Rendón, J. (2012). "La sobreexplotación de los acuíferos en Ica y su impacto en la escasez hídrica." *Revista de Estudios Regionales*, 14(2), 112-130.
- [19] Marshall, F. (2014). "Impactos de la sobreexplotación del agua subterránea en el sector agroexportador." *Revista de Gestión Ambiental*, 12(1), 88-104.
- [20] Muñoz, R. (2015). "Retos en la fiscalización de la explotación de agua subterránea en la región Ica." *Estudios de Políticas Ambientales*, 5(3), 40-55.

[21]Damonte, R. (2015). "El poder agroexportador y su influencia en la gestión de los recursos hídricos." *Revista Política y Desarrollo Regional*, 9(2), 29-47.

[22] B. Otieno y A. Ochieng, "Green economy in the wastewater treatment sector: Jobs, awareness, barriers, and opportunities in selected local governments in South Africa," *J. Energy South. Africa*, vol. 29, no. 1, pp. 50–58, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i1a3379>

Capítulo II

CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA PROVINCIA DE ICA

*Felipe Estuardo Yarasca Arcos, Santos Humberto Olivera Machado, Leslie
Marielly Felices Vizarreta, Felipe Rafael Valle Díaz*

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA PROVINCIA DE ICA

Las descargas de aguas residuales de origen doméstico representan, debido a su relevancia, la segunda fuente de contaminación en los ecosistemas acuáticos. Las aguas residuales domésticas se refieren a las aguas residuales derivadas de áreas residenciales y de servicios, las cuales son principalmente generadas por el metabolismo humano y las actividades domésticas. Indudablemente, el volumen más significativo de aguas servidas corresponde a las actividades esenciales para la vida humana, tales como la limpieza, la preparación de alimentos y las necesidades fisiológicas.

La utilización de agua potable en las residencias produce agua servida que alberga los desechos derivados de las actividades humanas. Una proporción de estos desechos son materiales que requieren oxígeno para su oxidación, tales como la materia fecal, los residuos de alimentos, aceites y grasas; otra porción incluye detergentes, sales, sedimentos, material orgánico no biodegradable y microorganismos patógenos. Los microorganismos requieren nutrientes de la materia orgánica biodegradable y de algunas sales inorgánicas. Como es ampliamente reconocido, estas aguas servidas se descargan en los sistemas de alcantarillado. En la mayoría de los casos, las conducen a cuerpos de agua, tales como mar, lagos y ríos, lo que resulta en la contaminación de estos cuerpos de agua naturales.

Para la caracterización de estos residuos, se emplean una serie de parámetros analíticos que establecen su calidad en términos físicos, químicos y biológicos. La demanda bioquímica de oxígeno constituye un parámetro utilizado para cuantificar la presencia de residuos presentes en el agua en calidad de nutrientes.

Para seleccionar el tratamiento apropiado, es imprescindible tener un conocimiento profundo de las propiedades del agua residual doméstica.

I. Situación problemática

La exigencia sobre los recursos hídricos naturales se intensifica y manifiesta efectos alarmantes en el ecosistema. Además, se evidencia un incremento demográfico, lo que está propiciando un aumento en el consumo de agua y, por ende, en los niveles de disposición del agua residual doméstica.

Con el avance de la urbanización y la diversificación de los procesos industriales, una multitud de elementos químicos producidos por la sociedad, junto con un incremento en la cantidad de materias orgánicas, se distribuyen de manera inapropiada en fuentes de almacenamiento naturales. De este modo, se produce un incremento en la DBO y el oxígeno disuelto no es suficiente para facilitar la recuperación de los elementos mencionados. La naturaleza no posee la capacidad intrínseca de llevar a cabo el proceso de autopurificación de las corrientes hídricas.

Las aguas residuales de origen doméstico ejercen efectos contaminantes sobre el medio ambiente debido a su composición química. Generalmente, estas poseen una DBO elevada que demanda la implementación de tratamientos apropiados para su eliminación.

Para evaluar la eficacia del tratamiento del agua residual doméstica, es imprescindible tener conocimiento de los parámetros previos y posteriores al proceso de procesamiento. Adicionalmente, la identificación de estos parámetros facilita una caracterización precisa del agua residual doméstica.

II. Características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas se refieren a las aguas residuales originadas en áreas de vivienda y servicios, las cuales son principalmente generadas por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

Las aguas residuales de origen doméstico se distinguen por su estructura física, química y biológica, evidenciando una interacción entre numerosos parámetros que constituyen dicha composición.

Para llevar a cabo una adecuada administración de dichas aguas, es esencial disponer de información exhaustiva sobre su naturaleza y atributos.

Inicialmente, observaremos que la determinación de la calidad del agua residual requiere la realización de análisis fisicoquímicos y biológicos exhaustivos. Los parámetros fundamentales que deben ser tomados en cuenta y establecidos en estos análisis son los siguientes:

Características Físicas: Aspecto, Color, turbiedad, olor, sólidos totales, temperatura.

Características Químicas: Materia orgánica; demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total, nitrógeno orgánico, compuestos tóxicos

orgánicos, pH, acidez, alcalinidad, dureza, salinidad, sulfuros, compuestos orgánicos, metales pesados, gases.

Características Biológicas: Tipos de microorganismos presentes.

Veremos ahora, en detalle, algunos de los parámetros mencionados.

a) Características Físicas del Agua Residual

Las características físicas del agua residual son fundamentales para evaluar su composición, determinar los posibles impactos ambientales y diseñar los procesos de tratamiento adecuados. Entre los principales atributos físicos se encuentran la concentración total de sólidos, la turbiedad, el color, el olor y la temperatura. Cada uno de estos parámetros proporciona información valiosa sobre el estado del agua residual y su grado de contaminación.

1. Sólidos Totales

El agua residual contiene una mezcla heterogénea de sólidos en diferentes estados: suspendidos, disueltos y sedimentables. La identificación y cuantificación de estos sólidos son esenciales para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y predecir la generación de lodos. Los sólidos suspendidos son partículas visibles que permanecen en suspensión en el agua y pueden ser removidos mediante procesos físicos como la sedimentación o filtración. Los sólidos disueltos son compuestos que se encuentran completamente disueltos en el agua, como sales y moléculas orgánicas solubles, y su remoción requiere procesos avanzados como la ósmosis inversa o intercambio iónico. Los sólidos sedimentables corresponden a la fracción de los sólidos suspendidos que se depositan por gravedad en un tiempo determinado, generalmente en una hora. La concentración de sólidos totales influye directamente en la turbiedad del agua y en la cantidad de lodos generados durante el tratamiento. Además, altas concentraciones de sólidos disueltos pueden afectar la calidad del efluente tratado, limitando su reúso o vertido.

2. Turbiedad

La turbiedad es un parámetro óptico que mide la dispersión de la luz causada por partículas suspendidas en el agua. En el contexto de las aguas residuales, este indicador refleja la presencia de materia coloidal, microorganismos y otros contaminantes que afectan la claridad del líquido. Se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT) o Unidades Nefelométricas de Turbiedad

de Formacina (UNFT), dependiendo del método de análisis. Niveles elevados de turbiedad pueden interferir con los procesos de desinfección, como la cloración o la radiación UV, y reducir la eficiencia de los tratamientos biológicos. Además, es un parámetro clave para el monitoreo de efluentes y el cumplimiento de normativas ambientales.

3. Color

El color del agua residual es un indicador visual de su estado de degradación y composición química. Las aguas residuales frescas presentan un color grisáceo debido a la presencia de materia orgánica en suspensión y compuestos disueltos. Con el tiempo y en condiciones anaerobias, el color cambia a gris oscuro y finalmente a negro, producto de la formación de sulfuros y otros compuestos reducidos. Este cambio indica una alta actividad bacteriana y descomposición avanzada de la materia orgánica. El color también puede verse afectado por descargas industriales, como tintes textiles o efluentes de curtiembres, que alteran significativamente la tonalidad del agua.

4. Olor

El olor en las aguas residuales es causado por la liberación de gases generados durante la descomposición de la materia orgánica. Las aguas residuales frescas emiten un olor desagradable pero tolerable, asociado a compuestos volátiles como amoníaco y mercaptanos. En cambio, las aguas residuales sépticas desprenden un fuerte olor a huevo podrido, característico del sulfuro de hidrógeno (H_2S), que se forma por la reducción bacteriana de sulfatos en condiciones anaerobias. El control de olores es crucial en plantas de tratamiento y redes de alcantarillado, ya que el H_2S no solo es molesto, sino también corrosivo para las infraestructuras y peligroso para la salud en altas concentraciones.

5. Temperatura

La temperatura del agua residual suele ser más elevada que la del agua potable debido a las descargas de aguas calientes de uso doméstico e industrial. En el tratamiento biológico, temperaturas moderadas (20-35°C) favorecen la actividad microbiana en procesos como los lodos activados, mientras que temperaturas bajas (<10°C) ralentizan el metabolismo bacteriano, reduciendo la eficiencia del tratamiento. Por otro lado, temperaturas elevadas (>40°C) pueden inhibir o matar microorganismos beneficiosos, afectando la depuración. El vertido de aguas

residuales calientes en cuerpos receptores puede alterar los ecosistemas acuáticos, reduciendo el oxígeno disuelto y afectando a especies sensibles.

b) Características químicas

Las aguas residuales presentan una composición química compleja que puede clasificarse en tres grupos principales: materia orgánica, compuestos inorgánicos y gases. Estos componentes determinan el comportamiento del agua durante su tratamiento y su impacto en el medio ambiente.

1. Materia Orgánica

La materia orgánica en aguas residuales está compuesta principalmente por proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%) y aceites y grasas (10%). Estos compuestos provienen de desechos fisiológicos humanos, alimentos y actividades industriales. Las proteínas se derivan principalmente de carnes, lácteos y desechos corporales, mientras que los carbohidratos provienen de azúcares, almidones y fibras vegetales. Los aceites y grasas incluyen tanto sustancias de origen animal y vegetal (como mantequilla y aceites de cocina) como de origen mineral (lubricantes y combustibles). Estos compuestos orgánicos representan aproximadamente el 75% de los sólidos en suspensión y el 40% de los sólidos filtrables en las aguas residuales.

2. Aceites y Grasas

Los aceites y grasas presentes en las aguas residuales pueden ser de origen animal, vegetal o mineral. Los de origen animal y vegetal incluyen sustancias como mantequilla, aceites de cocina y grasas de carnes, mientras que los de origen mineral provienen principalmente de derivados del petróleo como lubricantes y combustibles. Estos compuestos tienden a flotar en el agua, aunque una parte se sedimenta, lo que puede afectar el tratamiento biológico y obstruir tuberías. Los aceites minerales, al ser no biodegradables, requieren pretratamiento mediante separación por flotación o coagulación antes de ingresar a sistemas biológicos de tratamiento.

3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) es un parámetro fundamental que mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica en condiciones aerobias durante un período de cinco días a 20°C. Este indicador es esencial para evaluar la carga contaminante del agua, diseñar sistemas de tratamiento biológico y establecer límites de vertido en cuerpos receptores. Valores elevados de DBO₅ indican una alta concentración de materia

orgánica biodegradable, lo que puede provocar el agotamiento del oxígeno en ríos o lagos, afectando severamente la vida acuática.

4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) cuantifica la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente toda la materia orgánica presente en el agua, incluyendo tanto la fracción biodegradable como la no biodegradable. A diferencia de la DBO₅, que solo mide la materia orgánica biodegradable, la DQO proporciona resultados en pocas horas y es particularmente útil para evaluar aguas residuales industriales que contienen compuestos recalcitrantes. La relación DQO/DBO₅ permite determinar la biodegradabilidad del agua residual, siendo valores superiores a 2 indicativos de presencia significativa de compuestos no biodegradables.

5. Compuestos Inorgánicos

Las aguas residuales contienen diversos compuestos inorgánicos que pueden afectar significativamente su calidad y tratamiento. Entre estos se encuentran los cloruros, que provienen principalmente de desechos humanos y sales utilizadas para descongelación; metales pesados como plomo, mercurio y cadmio, que son altamente tóxicos incluso en bajas concentraciones; y nutrientes como nitrógeno y fósforo, que pueden causar eutrofización en cuerpos de agua receptores. Estos compuestos requieren atención especial durante el tratamiento, ya que muchos de ellos no pueden ser removidos mediante procesos biológicos convencionales.

6. pH

El pH es un parámetro crítico que indica el grado de acidez o alcalinidad del agua residual. Su valor óptimo para procesos biológicos se encuentra entre 6.5 y 8.5. Valores extremos de pH (<4 o >10) pueden inhibir la actividad microbiana en sistemas de tratamiento biológico, afectar la precipitación de metales en tratamientos químicos y dañar la vida acuática en cuerpos receptores. Por esta razón, muchas plantas de tratamiento incluyen etapas de neutralización para ajustar el pH antes de los procesos biológicos o del vertido final.

7. Nitrógeno

El nitrógeno en aguas residuales se presenta principalmente en cuatro formas: orgánico, amoniacal (NH₃), nitritos (NO₂⁻) y nitratos (NO₃⁻). Este elemento es esencial para el crecimiento bacteriano en sistemas de tratamiento biológico, pero su exceso en cuerpos receptores puede causar eutrofización. Los procesos de nitrificación (conversión de amonio a nitrato) y desnitrificación

(reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso) son comúnmente empleados para remover el nitrógeno cuando se requiere prevenir problemas de eutrofización en los cuerpos de agua receptores.

8. Fósforo

El fósforo es otro nutriente esencial que, en exceso, puede causar crecimiento descontrolado de algas en cuerpos de agua (eutrofización). En aguas residuales domésticas, las concentraciones de fósforo suelen oscilar entre 6 y 20 mg/L, presentándose principalmente como ortofosfatos, polifosfatos y compuestos orgánicos fosforados. Su remoción se logra mediante precipitación química con sales de hierro o aluminio, o a través de procesos biológicos avanzados que incorporan bacterias capaces de acumular fósforo en exceso.

9. Detergentes

Los detergentes son compuestos tensoactivos ampliamente utilizados en productos de limpieza que llegan a las aguas residuales domésticas e industriales. Estos compuestos reducen la tensión superficial del agua, favorecen la formación de espumas persistentes y, en muchos casos, contienen fosfatos que contribuyen a la eutrofización. Los detergentes se miden mediante el ensayo de Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), que cuantifica su concentración basándose en cambios de coloración de una solución estándar de azul de metileno.

10. Gases

Los principales gases presentes en aguas residuales incluyen nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3) y metano (CH_4). El metano, producido durante la descomposición anaerobia de la materia orgánica, es particularmente importante por su potencial como combustible (constituye aproximadamente el 65% del biogás) y por su riesgo de explosión en ambientes confinados como alcantarillas. El oxígeno disuelto, aunque presente en bajas concentraciones en aguas residuales crudas, es fundamental para mantener procesos aerobios de tratamiento y la vida acuática en cuerpos receptores.

c) Características biológicas

Las propiedades biológicas de las aguas residuales desempeñan un papel crucial en la regulación de patologías originadas por agentes patógenos de procedencia humana. Los Coliformes Totales son los más empleados para evaluar las propiedades bacteriológicas de un agua residual. Los coliformes son organismos que señalan la presencia de contaminación derivada de residuos antropogénicos y

animales. Los coliformes fecales están constituidos por diversas cepas bacterianas, incluyendo la *Escherichia Coli*. [1].

Coliformes totales

Los microorganismos patógenos presentes en las aguas servidas son escasos y presentan una alta dificultad para su aislamiento e identificación. Por consiguiente, se emplean exclusivamente los coliformes como un indicador de contaminación o la presencia de organismos causantes de ciertas patologías. [2].

Se resalta que los componentes más significativos de las aguas residuales son: sólidos suspendidos, compuestos orgánicos biodegradables y microorganismos patógenos. Las aguas residuales típicas están compuestas por 99.9 % de agua y 0.1 % de impurezas, tales como materia orgánica, sólidos inorgánicos, nitrógeno, fósforo, metales pesados, cloruros, sulfatos, microorganismos, etc.

Entre los principales componentes orgánicos encontrados están los carbohidratos, proteínas, aminoácidos y lípidos, así como también otros compuestos orgánicos como detergentes, fenoles, urea, insecticidas, y sustancias inorgánicas como metales y sales. La materia orgánica presente está constituida normalmente con cerca del 75 % de sólidos suspendidos volátiles (SSV), 40 % de sólidos filtrados, las proteínas constituyen entre 40 – 60 % de esta materia orgánica, los carbohidratos de 25 – 50 %; y los lípidos y grasas el 10 %.

Tabla 1 Grados de caracterizacion de aguas residuales domésticas, [4] y [5].

Constituyente	Metcalf y Eddy (2004) Fuerte	Metcalf y Eddy (2004) Media	Metcalf y Eddy (2004) Débil	Romero (1999)
Sólidos totales	1230	720	390	720
Disueltos totales	860	500	270	500
-Fijos	520	300	160	300
-Volátiles	340	200	110	200
En suspensión totales	400	210	120	220
-Fijos	85	50	25	55
-Volátiles	315	160	95	165
Sólidos sedimentables, mL/L	20	10	5	10
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	350	190	110	220
Carbono Orgánico Total (COT)	260	140	80	160
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	800	430	250	500
Nitrógeno (total como N)	70	40	20	40
-Orgánico	25	15	8	15
-Amoniacal libre	40	25	12	25
-Nitritos	0	0	0	8
-Nitratos	0	0	0	0
Fósforo (total como P)	12	7	4	8
-Orgánico	4	2	1	3

-Inorgánico	8	5	3	5
Cloruros	90	50	30	50
Sulfatos	50	30	20	-
Alcalinidad (como CaCO ₃)	-	-	-	100
Grasas y aceites	100	90	50	100
Compuestos orgánicos volátiles (µg/L)	100	90	50	-
Coliformes totales (No./100 mL)	107-1010	107-109	106-108	-
Coliformes fecales (No./100 mL)	105-108	104-106	103-105	-

Una correcta interpretación de datos no podía hacerse si no se tiene cuidado en todo el proceso de caracterización, los datos obtenidos en ella suministran información que permite tomar decisiones frente a posibles tratamientos u otros requerimientos [6].

Generalmente el nivel de contaminación de las aguas residuales no se mide a partir del conocimiento de la concentración de los distintos constituyentes de un agua residual que pueden ser considerados contaminantes, sino determinando parámetros globales como son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) entre otros [7].

III. Biodegradabilidad de las aguas residuales

Dado que la mayoría de los procesos de tratamiento de aguas residuales se basan en la biodegradación biológica, la degradabilidad de los componentes es importante [8].

La relación DBO/DQO es un factor importante, que indica la *biodegradabilidad* de las aguas residuales, entendiéndose por biodegradabilidad, la característica de algunas sustancias químicas de poder ser utilizadas como sustrato por microorganismos, que las emplean para producir energía (por respiración celular), y crear otras sustancias como aminoácidos, nuevos tejidos y organismos.

Según Metcalf & Eddy, el índice de biodegradabilidad se evalúa comúnmente a través de la relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO):

$$\text{Índice de Biodegradabilidad} = DBO_5 / DQO$$

Este índice proporciona una indicación de la proporción de materia orgánica en el agua residual que puede ser biodegradada por microorganismos. Los valores típicos y su interpretación según Metcalf & Eddy son generalmente los siguientes:

- **$DBO_5 / DQO > 0.5$:** Se considera que el agua residual es **fácilmente biodegradable** y, por lo tanto, susceptible a tratamientos biológicos convencionales.
- **DBO_5 / DQO entre 0.3 y 0.5:** La biodegradabilidad es **moderada**. Puede requerirse aclimatación de los microorganismos o procesos biológicos más especializados para un tratamiento eficiente.
- **$DBO_5 / DQO < 0.3$:** La biodegradabilidad se considera **baja**. Esto puede indicar la presencia de componentes tóxicos o una alta proporción de materia orgánica no biodegradable, lo que dificulta el tratamiento biológico efectivo. En estos casos, pueden ser necesarios pretratamientos u otros métodos de tratamiento [9].

Es importante tener en cuenta que estos rangos son generales y pueden variar dependiendo de las características específicas del agua residual industrial o doméstica. Sin embargo, la relación DBO_5/DQO es un parámetro fundamental y ampliamente utilizado para evaluar la potencial biodegradabilidad de las aguas residuales. De acuerdo con los informes de ensayo proporcionados por la Empresa Municipal de Agua Potable de la Provincia de Ica, EMAPICA tenemos los siguientes resultados en el agua residual generada en la Ciudad de Ica [10]:

Tabla 2 Resultados del análisis de las aguas residuales de la laguna de oxidación de Cachiche,
Ciudad de Ica, Perú [10]

PARAMETRO	15-09-2023	24-11-2023	11-07-2024	Promedio	DS N° 003-2010-MINAM
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	270	270	371	303.7	100 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	726	726	581	677.7	200 mg/L
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	162	192	296	218	150 mg/L
Aceites y grasas (mg/L)	26	26	66,5	39.5	20 mg/L
Determinación de coliformes fecales	2,4 E+7 NMP/100 mL	2,4 E+7 NMP/100 mL	2,4 E+8 NMP/100 mL	28.8 E+7 NMP/100 mL	10000 NMP/100 mL

De acuerdo con los datos mostrados en la tabla anterior, el índice de biodegradabilidad del agua residual doméstica que ingresa a las lagunas de oxidación de ciudad de Ica, (DBO/DQO) es 0,45. Por lo cual, se puede concluir que el agua residual doméstica de la laguna de oxidación se biodegrada moderadamente y, por lo tanto, es apta para un tratamiento biológico.

Referencias bibliográficas

- [1] Metcalf y Eddy. Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización. Mc. Graw Hill. Madrid, España, 1995.
- [2] J. Romero. Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 2002.
- [3] P. Quiroz. Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2009.
- [4] J. Romero. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización 3ª ed, Editorial Alfaomega. Bogotá, Colombia, 1999.

- [5] Metcalf & Eddy. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th ed. McGraw-Hill. New York, USA, 2004.
- [6] Andy y Bid. Manual de caracterización de aguas residuales industriales. 2ª ed. Ideas Graficas Ltda. Medellín, Colombia, 1997.
- [7] C. Menéndez y J. Pérez. Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales. 2ª ed. Editorial Universitaria. La Habana, Cuba, 2007.
- [8] C. López et al. Tratamiento biológico de aguas residuales. Principios, modelación y diseño. 2ª ed. IWA Publishing. London. UK, 2017.
- [9] Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed., McGraw-Hill Education, 2014.
- [10] Empresa Municipal de Agua Potable de Ica, EMAPICA. Reportes de laboratorio. Ica, Perú, 2023-2024.

Capítulo III

TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON EICHHORNIA CRASSIPES (JACINTO DE AGUA)

*Ana María Jiménez Pasache, María Elizabeth Fuentes Campos, Cynthia
Victoria Bendezú Hernández*

CAPÍTULO III

TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON EICHHORNIA CRASSIPES (JACINTO DE AGUA)

1. Relevancia de la Investigación

El crecimiento descontrolado de las aguas residuales domésticas, consecuencia directa de la expansión urbana acelerada, ha expuesto las limitaciones de los sistemas convencionales de tratamiento. Durante años, las lagunas de oxidación -diseñadas para depurar aguas servidas mediante procesos naturales que combinan acción bacteriana, actividad algal y radiación solar- han operado bajo una constante sobrecarga, superando su capacidad de tratamiento original. Esta situación crítica ha impulsado la búsqueda de alternativas innovadoras, entre las cuales destaca la investigación sobre el uso del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como solución adaptada a las condiciones específicas de Ica.

El estudio "Diseño del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche-Ica mediante *Eichhornia crassipes*" representa un avance significativo en el campo de la depuración natural. La investigación demuestra cómo esta especie vegetal, perfectamente adaptada al entorno regional, puede transformarse en un eficiente biofiltro capaz de procesar los efluentes urbanos. Los resultados experimentales revelan su notable capacidad para reducir los niveles de contaminación, ofreciendo así una respuesta concreta al grave problema de la irrigación agrícola con aguas no tratadas que afecta a la región.

El trabajo científico no solo valida la eficacia depuradora del jacinto de agua bajo las condiciones físico-químicas y climáticas propias de Ica, sino que además establece las bases técnicas para su implementación a escala real. La importancia de estos hallazgos radica en su potencial para convertir un problema ambiental histórico -la contaminación hídrica- en una oportunidad de desarrollo sostenible. Al transformar las aguas servidas en un recurso apto para riego mediante procesos completamente naturales, la investigación plantea un modelo replicable que combina innovación tecnológica con preservación ecosistémica.

La aplicación práctica de estos resultados podría marcar un punto de inflexión en la gestión de aguas residuales en la región. Más allá de su inmediata función depuradora, el sistema propuesto

representa un círculo virtuoso donde el tratamiento de efluentes se convierte simultáneamente en generador de recursos para la agricultura local. Este enfoque integral, que armoniza necesidades sanitarias con productividad agrícola y sostenibilidad ambiental, posiciona a la fitorremediación como una solución técnicamente viable y ambientalmente responsable para los desafíos hídricos de Ica.

Limitaciones

- El análisis del sistema de lagunas de oxidación de Cachiche ha revelado importantes limitaciones que comprometen su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. En primer lugar, se constata la ausencia total de un tratamiento primario para las aguas residuales que ingresan al sistema, lo que genera una sobrecarga constante de materia orgánica y sólidos suspendidos que afectan negativamente el proceso de depuración. Esta situación se agrava por la falta de tecnologías complementarias como humedales artificiales o sistemas de fitorremediación que podrían mejorar significativamente la calidad del efluente final.
- Otro problema crítico es la inexistencia de un programa sistemático de monitoreo de los parámetros de calidad del agua, lo que impide realizar ajustes operativos basados en datos reales y detectar a tiempo variaciones en las características del influente. A esto se suma el evidente deterioro de la infraestructura debido a la falta de mantenimiento adecuado, manifestado en la acumulación excesiva de lodos, crecimiento descontrolado de vegetación y el deterioro de las estructuras hidráulicas.
- Estas deficiencias generan un círculo vicioso donde el sistema opera muy por debajo de su capacidad potencial, con consecuencias que van desde la reducción en la eficiencia de tratamiento hasta posibles riesgos ambientales y sanitarios. La solución requiere una intervención integral que incluya la implementación de pretratamientos, la incorporación de tecnologías complementarias, el establecimiento de protocolos de monitoreo continuo y un programa riguroso de mantenimiento preventivo y correctivo. Solo mediante estas acciones será posible transformar el sistema actual en una solución eficiente y sostenible para el manejo de las aguas residuales en la zona.

2. Problemática

El problema principal es el colapso de la laguna de oxidación que recibe los efluentes domésticos generados en la ciudad de Ica, al haber sobrepasado su capacidad establecida inicialmente por el organismo responsable, por el incremento progresivo de la población o errores en el diseño.

Hasta la actualidad, no ha existido un tratamiento adecuado y óptimo de las aguas residuales urbanas, éstas son colectadas y vertidas en las lagunas de oxidación de Cachiche y reutilizadas como agua de regadío para cultivos de tallo alto y bajo.

Por otro lado, la ciudad de Ica en el año 2010 fue declarada como una región de emergencia hídrica, según la ordenanza regional N°0024-2010-GORE-ICA, donde el agua es uno de los recursos más escasos, sobre todo cuando es fundamental para el crecimiento del sector agroexportador. A esto se suma que la provincia de Ica ha desarrollado un notable crecimiento poblacional en los últimos años, por lo cual se debe cubrir la demanda de agua para consumo humano; además, el departamento de Ica, se ha convertido en una zona de agroexportación, lo cual indudablemente significa el uso y demanda considerable de agua para el regadío.

En la ciudad de Ica, existen pocos estudios relacionados al tratamiento de aguas residuales por medio de cultivos acuáticos, lo que si ocurre a nivel internacional.

Frente a esta problemática se formuló el siguiente problema de investigación: **¿Cuál es el diseño óptimo de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche-Ica por medio de la *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua)?** [1].

3. Antecedentes

A nivel Internacional se cuenta con diversos estudios de investigación tales como:

Mendoza, Y; Pérez, J. Galindo, A., en el trabajo de investigación titulado "Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales", llevado a cabo en el Laboratorio del Instituto de Aprovechamiento de Agua y Estudios Ambientales (INESAG) de la Universidad de la Guajira, Colombia. Se llevó a cabo una evaluación del aporte de las especies vegetales *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en el proceso de tratamiento del agua residual municipal (ARM). Se alcanzó la eficiencia óptima con

una cobertura total de *Pistia stratiotes* (M4). Las eficiencias obtenidas mediante la cobertura de *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* registraron remociones del 78,5%, 79,1%, 76,2% y 99,9% para los compuestos NO_2^- , DBO_5 y CT respectivamente. Sin embargo, esto no se observó en los casos del NH_4^+ , PO_4^{3-} y NO_3^- , donde se registraron eficiencias del 8,6%, 51,6% y 24,9%, respectivamente [2].

Vizcaíno, L. y Fuentes, N. llevaron a cabo una investigación sobre los "Efectos de *Eisenia foetida* y *Eichhornia crassipes* en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos" con el objetivo de tratar los efluentes residuales del municipio de San Juan del Cesar, Colombia, utilizando tres sistemas de tratamiento. T.1: Se implementó la aplicación de *Eisenia foetida* mediante un biofiltro dinámico aerobio de flujo vertical. T.2: Se aplica un sistema de flujo horizontal con plantas flotantes, mientras que T.3: Se aplica un sistema en serie con tiempos de retención hidráulica de 24 horas. Dentro de los hallazgos, se observó una reducción del 91% en la DBO_5 al ser tratada en el sistema en serie T.3, seguido por T.2 con un 83,7%.

Mendoza, Y.; Castro, F.; Marín, J. & Behling, E. en "Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia)", un estudio académico llevado a cabo en el Laboratorio del Instituto de Aprovechamiento de Agua y Estudios Ambientales (INESAG) de la Universidad de la Guajira, Colombia. Se instauró un sistema de fitorremediación en un entorno de laboratorio, compuesto por seis unidades operando a flujo semicontinuo y con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de siete días. Tres unidades fueron dotadas de plantas de *Eichhornia crassipes*, mientras que las otras tres unidades fueron utilizadas para control, carentes de vegetación. A lo largo de las pruebas, se implementaron tasas de renovación del efluente de 25, 50 y 75%. Los resultados más favorables se observaron en las unidades con plantas, con tasas de renovación del 75% y porcentajes de eliminación del 99,9% de amonio; 93,1% de ortofostato; 93,9% de materia orgánica (DQO); 91,6% de materia orgánica (DBO_5); y 99,9% de coliformes totales y fecales. [[4]]A nivel nacional, se han desarrollado investigaciones importantes, como:

Deybi Karin Cáceres Pom1, Gisela Milagros Calisaya Vera2 y Edgar Bedoya-Justo3 investigaron la eficacia de los compuestos *Eisenia foetida*, *Eichhornia crassipes* e hipoclorito de calcio en la depuración de aguas residuales domésticas en Moquegua. La eficacia de tres sistemas de depuración de aguas residuales domésticas empleando *Eisenia foetida*, *Eichhornia crassipes* e

hipoclorito de calcio en Moquegua fue establecida. Una muestra representativa de aguas residuales domésticas (afluente) fue recolectada y sometida a análisis para determinar su estado inicial. Este afluente, previamente al proceso de pre-sedimentación, fue sometido a tres métodos de purificación: el primero empleó *E. foetida*, el segundo con *E. foetida* y *E. crassipes*, y el tercero empleó *E. foetida* + *E. crassipes* + $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. Los efluentes fueron examinados utilizando los mismos parámetros que en el afluente, cada uno con dos repeticiones, empleando el análisis de varianza (ANOVA) en calidad de prueba estadística y la prueba de Tukey como instrumento de evaluación. Los hallazgos obtenidos revelaron discrepancias notables entre los sistemas de depuración sugeridos, siendo el más eficaz el compuesto por *E. foetida* y *E. crassipes*, con un descenso medio de 5 °C, un 94.48% de STS, un 98.41% de DBO₅, un 100.00% de coliformes termotolerantes y un pH final de 7.51. [[5]]

En la investigación realizada por Perales Vasquez Kelith Liliana: "El estudio titulado "Tratamiento de aguas residuales domésticas por fitorremediación con *Eichhornia crassipes* en la zona rural del caserío Santa Catalina Moyobamba 2017" examina la relevancia de la fitorremediación con *Eichhornia Crassipes* en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en la zona rural especificada, así como el diseño y aplicación de un sistema de fitorremediación para estas aguas residuales. La temperatura promedio registrada en tres pozos es de 28,6°C, con un pH neutro en todas las pozas muestras. Se realiza una evaluación de parámetros como el DBO₅, DQO, Aceites y grasas. Se llevaron a cabo tres muestreos previos a la siembra de las plantas, a los 40 y 86 días. Los resultados de eliminación de DBO₅ en el pozo 01 representan un 95,24%, en el pozo 02 un 94,46% y en el pozo 03 un 94,44%. La concentración de oxígeno en pozo 01 es de 93,03 %, en pozo 02 es de 92,76% y en pozo 03 es de 92,69%. El porcentaje de aceites y grasas en el pozo 01 es del 94,41%, en el pozo 02 del 94,82% y en el pozo 03 del 94,91%. La investigación llevada a cabo evidencia que esta especie exhibe una aclimatación apropiada, así como una respuesta sumamente positiva a las condiciones ambientales en las que se le instala. [[6]]

Vargas Torres Katty Lizeth, en el análisis de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* en la eliminación de parámetros de las aguas residuales domésticas de la quebrada Asungue en la ciudad de Moyobamba. Se empleó un sistema de tandas para la evaluación de los sólidos suspendidos totales, el pH, el DBO₅, la temperatura, la turbiedad y los coliformes termotolerantes, los cuales fueron contrastados con los límites máximos permisibles para efluentes de PTAR (DS N°003-

2010-MINAM) Se llegó a la conclusión de que la *Eichhornia crassipes* exhibe una mayor eficiencia en la eliminación de parámetros.

Castillo Rojas Eisner, en la investigación sobre Eficiencia de *Lemna* sp y *Eichhornia crassipes*, en la remoción de nutrientes del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales en Celendín, la evaluación se realizó por un período de 6 meses, analizando nitrógeno total (n), nitratos (NO_3^-), fósforo total (P), fosfatos (PO_4^{3-}) y oxígeno disuelto, evaluaciones realizadas una vez por mes en el afluente y efluente de cada uno de los sistemas de reactores en serie para el tratamiento con *Lemna* sp y *Eichhornia crassipes*, y los parámetros de campo (temperatura, pH, caudal y tiempo de retención hidráulica), se evaluaron en cada punto de monitoreo establecido una vez por semana y a diferentes horas del día. , concluyéndose que el tratamiento con *Eichhornia crassipes* presenta la tasa más alta en remoción de nutrientes. [8]

4. Metodología

4.1 Tipo de investigación: Aplicada, debido a que la finalidad de la investigación consiste en el diseño del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche – Ica, por medio de la *Eichhornia Crassipes* (Jacinto de agua).

4.2 Nivel de investigación: Experimental, debido a que los objetivos específicos de la investigación son determinar las dimensiones, parámetros de operación y la eficiencia de remoción del DBO_5 , para determinar el diseño del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche – Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua).

4.3 Población y muestra de investigación:

4.3.1. Población. Afluente de las lagunas de Oxidación de Cachiche Ica.

4.3.2. Muestra. La muestra de investigación se ha establecido con un volumen de 1.539 m^3 para el tratamiento secundario, proveniente de la laguna primaria del sistema de tratamiento propuesto.

4.4. Variables e indicadores

4.4.1. Variable independiente: Tratamiento Secundario por medio de la *Eichhornia Crassipes*

Indicadores:

- Densidad de plantas (kg/m^2)
- Tiempo de detención hidráulica (día)
- Profundidad del agua (m)
- Dimensión de la laguna (m)
- DBO_5 afluente (mg/L) (La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5))

4.4.2. Variable dependiente: Efluente del Tratamiento Secundario**Indicadores:**

- DBO_5 (mg/L)
- SST (mg/L) (Los sólidos suspendidos totales (SST)).
- STD (ppm) (Los sólidos totales disueltos (STD) o TDS, por sus siglas en inglés).
- pH
- Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
- Salinidad (ppm)

4.5. Métodos y procedimientos.

4.5.1. Dimensionamiento del Tratamiento Primario. La gestión primaria del agua residual se realizó en una laguna anaeróbica, la cual fue dimensionada siguiendo las directrices establecidas para estas especies de lagunas en la Norma OS.090 para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales [9]. Dentro de las consideraciones de diseño, la normativa sugiere que la profundidad de la laguna debe oscilar entre 2.5 y 5 metros, adoptar una configuración cuadrada o ligeramente rectangular y establecer una inclinación del talúd entre 1:1.5 y 1:3 (en relación vertical:horizontal). En consecuencia, se decidió dimensionar la laguna anaeróbica con las siguientes características: - Profundidad: 3m - Forma: cuadrada - Inclinación del talúd de 3:1 (vertical:horizontal) - Base interior: 1m x 1m (largo x ancho).

La laguna anaeróbica fue seleccionada para su operación, con una profundidad de agua de 2.70 metros. Este procedimiento permite dejar un margen libre aproximado de 0.30 metros.

Además, con el objetivo de garantizar la seguridad en el tránsito alrededor de la laguna y facilitar el acceso a los muestreos subsecuentes, se contempló la implementación de un piso de cemento en la superficie de 0.5m de ancho en todos sus bordes. La Figura 3.1 ilustra estas especificaciones.

4.5.2. Dimensionamiento del Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario mediante la utilización de la planta acuática flotante, *Eichhornia crassipes*, se realizó en tres lagunas secundarias (idénticas en dimensiones y forma) que operaron en paralelo. Para la dimensión de estas lagunas, se tomó como referencia los criterios de diseño propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés), en el manual: *Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment* (1988), los cuales están expuestos en la Tabla 2.9 [10].

Tabla 1. Criterios de diseño para sistemas de tratamiento con jacintos de agua

Criterio	Tipo de Sistema con jacinto de agua		
	Aerobio sin aireación	Aerobio sin aireación	Aerobio con aireación
Tipo de afluente	Filtrado o sedimentado	Secundario	Filtrado o sedimentado
DBO ₅ afluente, mg/L	130-180	30	130-180
Carga orgánica DBO ₅ , kg/ha-d	40-80	10-40	150-300
Profundidad de agua, m	0.5- 0.8	0.6-0.9	0.9-1.4
Tiempo de detención, días	10-36	6-18	4-8
Carga hidráulica, m ³ /ha-d	>200	<800	550-1,000
Período de cosecha	Anual	Dos veces al mes	Mensual
Efluente esperado, mg/L			
DBO ₅	<30	<10	<15
SS	<30	<10	<15
NT	<15	<5	<15

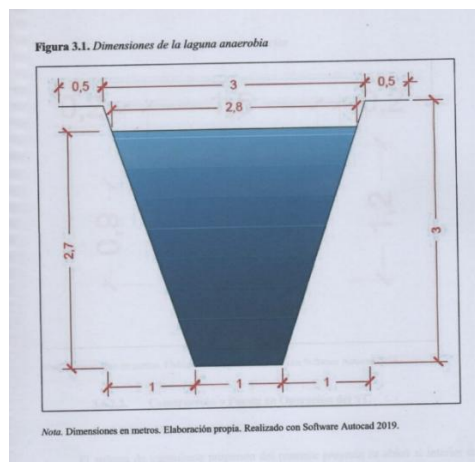
Nota. Adaptado de *Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*, EPA (1988).

Considerando la disponibilidad del terreno y la investigación bibliográfica hecha, se optó por dimensionar las lagunas secundarias con las siguientes especificaciones:

- Profundidad: 1.20m.
- Ancho: 1.5m (dato propuesto).
- Largo: 1.5m (dato propuesto).
- Inclinação de talúd de 4:1 – vertical: horizontal (dato propuesto).
- Base interior: 0.90m x 0.90m (largo x ancho)

Se optó por operar cada laguna secundaria con una profundidad de agua de 0.90m. Ello para dejar un borde libre de 0.30m aproximadamente. Además, para la seguridad en el tránsito alrededor de la laguna y el acceso al muestreo posterior, se consideró realizar un piso en la superficie de 0.2m de ancho alrededor de la laguna en todos sus bordes. En la figura 3.2 se muestran dichas especificaciones.

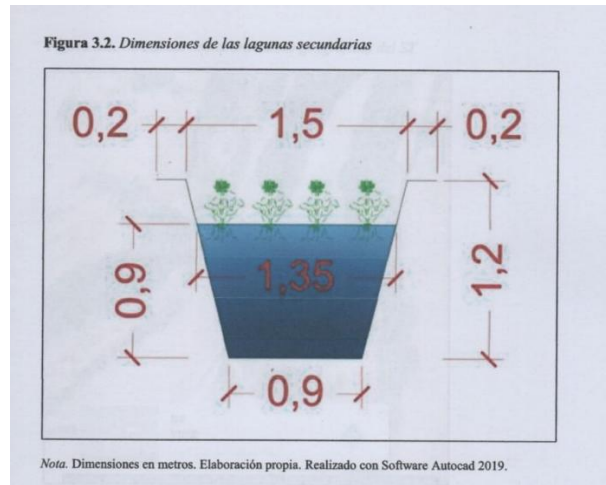
Fig.1. Dimensiones de la laguna anaerobia



Nota. Dimensiones en metros.

Elaboración propia. Realizado con Software Autocad 2019.

Fig.2. Dimensiones de las lagunas secundarias



4.5.3. Construcción y Puesta en Operación del Sistema de Tratamiento (ST).

Ubicación del ST.

El sistema de tratamiento propuesto del presente proyecto se ubicó al interior de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales- Lagunas de Oxidación Cachiche Ica, administrada por la EPS EMAPICA S.A.

La ubicación se estableció cerca de la colectora para poder captar el afluente de las lagunas y así realizar el proceso de tratamiento.

En la figura 3, se muestra la ubicación exacta satelital en grados decimales del sistema de tratamiento, la cual indica: Latitud: -14.117875 Longitud: -75.724986.

Figura 3. Ubicación con coordenadas geográficas del ST



Nota. La imagen muestra las coordenadas en latitud y longitud de la ubicación del proyecto.

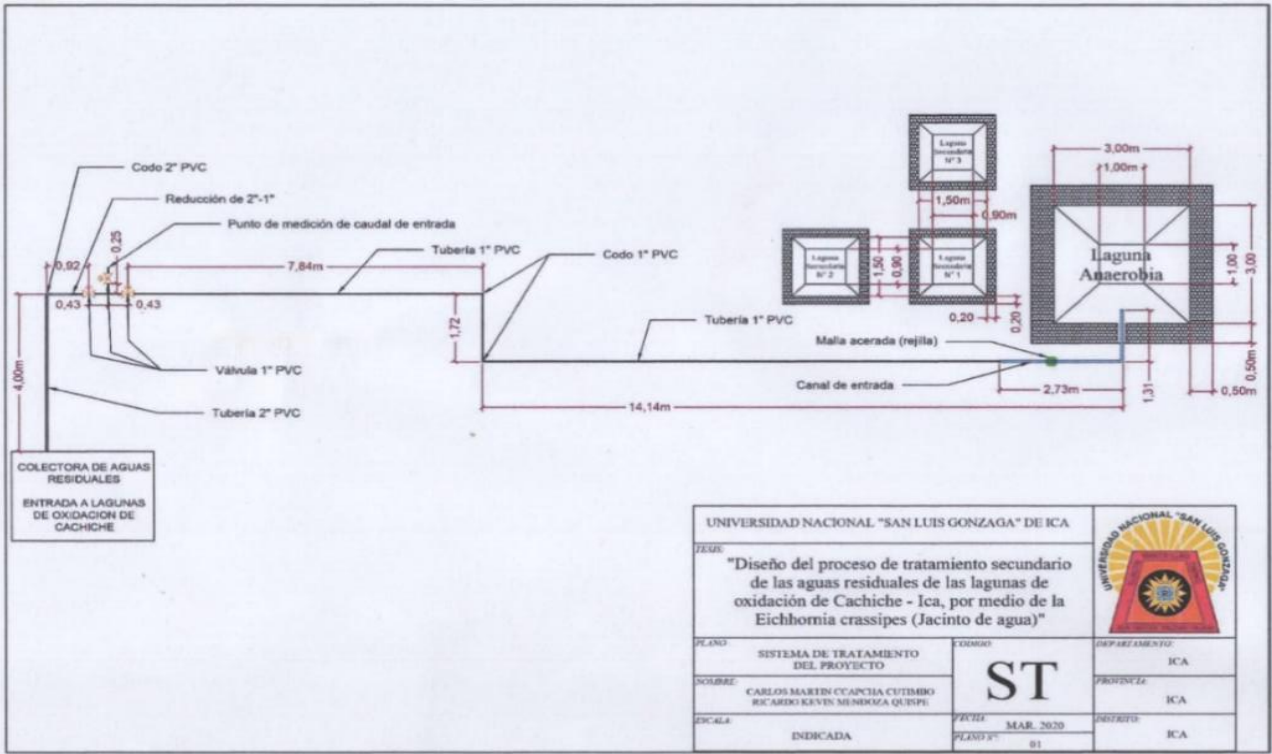
Obtenido de Google Maps. 3.6.2.2.2. Plano del ST.

Ubicación interior del ST Nota.

Elaboración propia.

La vista de planta del ST se muestra en la figura 4, donde se observa la distribución de las lagunas en el interior de la Planta de Tratamiento - Lagunas de Oxidación Cachiche, de acuerdo al espacio y terreno brindado con el permiso de la EPS EMAPICA S.A. La captación del agua residual a tratar fue, como muestra la imagen, en la colectora de las lagunas de oxidación, donde aprovechando la caída de nivel y a través de un sistema de tuberías de PVC poder llevar el agua residual hacia la laguna anaerobia, y luego del tratamiento primario, llevar a cabo el tratamiento por fitodepuración en las tres lagunas secundarias.

Figura 4. Plano del Sistema de Tratamiento



Asimismo, en las figuras 5 y 6 se muestran las ubicaciones interior y exterior del sistema de tratamiento, respectivamente.

Figura 5. Ubicación interior del ST

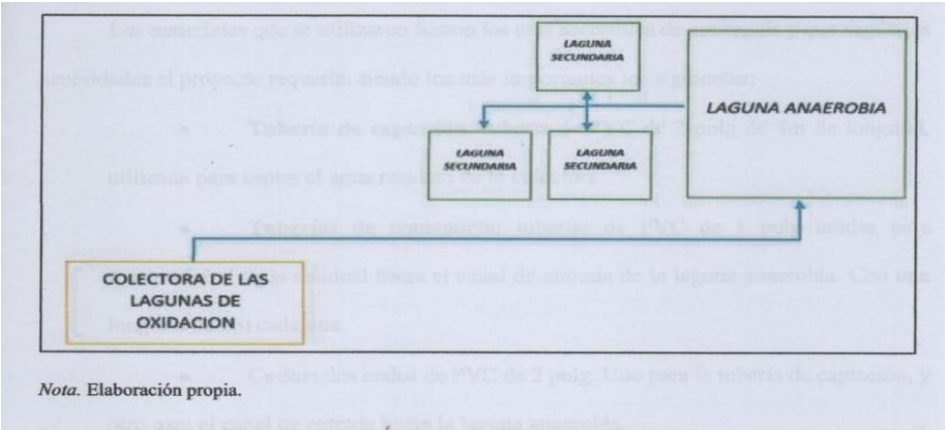


Figura 6. Ubicación interior del ST



4.5.4. Construcción de laguna anaerobia y lagunas secundarias

Laguna anaerobia Para la construcción de la laguna anaerobia, se basaron en el diseño ya mencionado.

Para llevar a cabo la construcción de esta, se contrató a un Ingeniero Civil; quien, junto a un grupo de colaboradores, hicieron posible la estructura. En primer lugar, ubicamos el área (espacio) más apropiada. Así, no afectando la estructura de la planta de tratamiento de las lagunas de oxidación de Cachaiche.

4.5.5. Operación del Sistema de Tratamiento.

Anteriormente ya se mencionó la estructura del pretratamiento, en donde, se encuentra un sistema de tuberías, las cuales hacen posible, el traslado de agua desde la colectora hacia la laguna anaerobia. Entonces, para la captación, se necesita que el nivel de agua, se encuentre por encima del nivel del sistema de tuberías (cabe acotar, que al momento de la operación, se realizaron los muestreos, de indicadores in situ).

Figura 7. Agua residual, desembocando en la laguna anaerobia



Figura 8. Laguna anaerobia, llenada hasta el nivel adecuado



Se llenaron las lagunas secundarias, hasta el nivel propuesto de 0.90 m; luego, se colocaron las plantas (casi toda la laguna cubierta, siendo la relación de 3.44 Kg de plantas mojadas/m² de superficie de agua residual). Dejando 30 cm de altura libre. En esta, el agua se empozó por un período de dieciocho días. En este período, hubo pérdida de agua debido a la evapotranspiración y evaporación natural, esta pérdida fue reemplazada por agua potable y se realizaron muestreos de forma intermitente durante este período del tratamiento secundario. Luego, las plantas que se deterioraban por completo se cambiaba; y las que no, se removían las hojas, en mal estado; cuidando siempre que la relación se mantuviera constante, es decir, se reemplazaba por otra de similar masa.

Figura 9. Laguna secundaria, cubierta con jacintos de agua



Monitoreo de parámetros evaluados en laboratorio (DBO₅ y SST). En primer lugar, los puntos a monitorear son los siguientes: Colectora, efluente del tratamiento primario; y efluente del tratamiento secundario (ya mencionados en el punto anterior). En segundo lugar, elegimos el tipo de muestreo. Así, optamos por el muestreo compuesto, ya que da una mayor representatividad de la muestra. En esta etapa, las muestras recolectadas, se enviaron a un laboratorio acreditado: Delta Lab S.A.C., además; de tener la acreditación en estas dos técnicas.

5. Resultados

Los resultados obtenidos en las etapas del procedimiento experimental, se presentan a continuación:

- a) Resultados del muestreo in situ en la colectora. El agua residual a tratar, fue tomada en la colectora de las Lagunas de Oxidación de Cachiche y transportada a través del sistema antes descrito hacia la laguna anaerobia, para su tratamiento primario. Los siguientes resultados, fueron del análisis de 3 muestras recogidas cada hora en la misma colectora durante el llenado de la laguna primaria.

Tabla 2. Resultados del muestreo in situ en la colectora de la Lagunas de Oxidación

HORA	pH	CONDUCTIVIDAD (μ S/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
09:50 a. m.	7.40	1742	1147	869	-13.90
	7.43	1715	1128	857	-13.80
	7.42	1714	1131	856	-13.50
10:50 a.m.	7.37	1846	1219	923	-10.00
	7.38	1848	1220	924	-11.60
	7.36	1843	1217	921	-10.10
11:50 a.m.	7.29	1837	1213	919	-7.10
	7.30	1839	1211	920	-7.90
	7.20	1906	1257	922	-7.50
12:50 p.m.	7.25	1595	1058	804	-3.20
	7.22	1613	1066	808	-1.20
	7.20	1610	1065	807	-0.90
1:50 p.m.	7.17	1648	1065	809	1.20
	7.17	1641	1085	823	0.90
	7.18	1653	1092	829	0.50
2:35 p.m.	7.20	1630	1091	828	-1.00
	7.10	1672	1107	840	2.00
	7.13	1669	1106	838	3.00

Asimismo, se tomaron muestras cada cierta hora (durante el llenado) para hacer un análisis de Sólidos Sedimentables (SS) y el caudal de entrada a la laguna primaria, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 3. Resultados del análisis de Sólidos Sedimentables en la colecta

HORA	SS (ml/L-h)
9:45 - 10:45	4.0
10:45 - 11:45	7.0
11:45 - 12:45	7.0
12:45 - 13:45	5.0
13:45 - 14:45	4.5

Nota. El análisis de Sólidos Sedimentables según la metodología aplicada requiere de un tiempo de una hora.

Tabla 4. Resultados de la medición del Caudal de entrada

HORA	CAUDAL (L/20seg)
10:35	14.0
11:35	14.8
12:35	15.0
13:35	15.8

Tabla 5. Resultados del muestreo de DBOs y SST en la colectora

Parámetro	Hora de Muestreo	Lugar de Muestreo	Resultado (mg/L)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	16:20	Colectora	496
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	15:40	Colectora	300

- b) Resultados del muestreo insitu en las lagunas secundarias. Luego del tratamiento primario realizado en la laguna anaerobia, se procedió al tratamiento secundario con *Eichhornia crassipes*. Se tomaron muestras de las tres lagunas secundarias operadas en paralelo de forma idéntica. Ello se llevó a cabo durante 18 días (tiempo en que se realizó el tratamiento secundario), dentro de los cuales se monitorearon 6 días para medir los parámetros tales como: pH, conductividad, salinidad, sólidos totales disueltos (STD), ORP, con la ayuda del equipo multiparámetro, y sólidos sedimentables (SS), con el cono Imhoff. Los resultados de dichos muestreos se detallan a continuación en las siguientes tablas, considerando que para cada laguna se sacaron tres muestras para posteriormente evaluar su promedio.

Tabla 6. Resultados del muestreo en las lagunas secundarias el día 15/09/2019

HORA	LAGUNA SECUNDARIA	pH	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
11:00 a.m.	N° 1	7.59	1781	1177	892	-19.2
		7.54	1787	1180	894	-17.9
		7.54	1788	1178	893	-18.4
11:15 a.m.	N° 2	7.58	1794	1183	897	-18.3
		7.54	1794	1186	898	-18.4
		7.59	1794	1184	897	-20.0
11:30 a.m.	N° 3	7.59	1767	1169	887	-18.9
		7.55	1783	1179	893	-18.7
		7.63	1779	1174	889	-21.5

Los resultados de la tabla 6 se obtuvieron a una temperatura promedio de 24.9°C

Después de haber obtenido resultados de muestreos los días 19,22,26 y 29 de Octubre, se obtuvieron los últimos resultados el día 03/10/2019

Tabla 7. Resultados del muestreo en las lagunas secundarias al día 03/10/2019

HORA	LAGUNA SECUNDARIA	pH	CONDUCTIVIDAD (μS/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
11:00 a.m.	N° 1	7.88	1553	1028	782	-19.4
		7.89	1558	1032	783	-20.3
		7.95	1548	1026	780	-24.8
11:15 a.m.	N° 2	7.88	1626	1077	817	-21.4
		8.02	1618	1073	814	-25.8
		7.91	1622	1071	812	-22.8
11:30 a.m.	N° 3	7.92	1593	1054	799	-23.2
		7.94	1597	1055	800	-23.6
		7.89	1591	1052	799	-20.4

Los resultados de la tabla 6 se obtuvieron a una temperatura promedio de 24.9°C

Por otro lado, el análisis de sólidos sedimentables se realizó también en los días que se realizó el muestreo in situ con el equipo multiparámetro, en cada uno de los 6 días. Los resultados de dichos muestreos (primero y último) se detallan a continuación en las siguientes tablas, considerando que para cada laguna se extrajo una sola muestra y que el análisis se realiza dejando en reposo la muestra durante una hora.

Tabla 8. Resultados del muestreo de SS en las lagunas secundarias el día 15/09-2019

HORA	LAGUNA SECUNDARIA	SS (ml/L-h)
10:15 - 11:15	N° 1	0.02
11:20 - 12:20	N° 2	0.03
12:25 - 13:25	N° 3	0.02

Tabla 9. Resultados del muestreo de SS en las lagunas secundarias el día 03/10/2019

HORA	LAGUNA SECUNDARIA	SS (ml/L-h)
10:30 - 11:30	N° 1	0.00
11:30 - 12:30	N° 2	0.00
12:45 - 13:45	N° 3	0.00

- c) Resultados del muestreo de DBO₅ y SST en las lagunas secundarias. Los análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), como ya se mencionó anteriormente, se realizaron en un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL), los cuales dieron los siguientes resultados detallados en las siguientes tablas, para cada uno de los días en que se realizaron. Se muestra los resultados del análisis del 15/09/2019 y del 03/10/2019.

Tabla 10. Resultados del muestreo de SS en las lagunas secundarias el día 03/10/2019

Parámetro	Hora de Muestreo	Lugar de Muestreo	Resultado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	15:46	L.S. N° 1	293
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	14:20	L.S. N° 1	14
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	14:46	L.S. N° 2	322
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	14:22	L.S. N° 2	23
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	15:30	L.S. N° 3	252
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	15:12	L.S. N° 3	4

Nota. Las siglas L.S. significan: Laguna Secundaria

Tabla 11. Resultados del muestreo de SS en las lagunas secundarias el día 03/10/2019

Parámetro	Hora de Muestreo	Lugar de Muestreo	Resultado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	13:30	L.S. N° 1	43
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	14:24	L.S. N° 1	43
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	15:15	L.S. N° 2	44
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	15:30	L.S. N° 2	12
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	15:45	L.S. N° 3	46
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	16:15	L.S. N° 3	10

Nota. Las siglas L.S. significan: Laguna Secundaria

- d) **Análisis del muestreo in situ en la colectora.** En primer lugar, se realiza el análisis de los resultados provenientes del muestreo in situ en la colectora, calculando el promedio de las 3 muestras analizadas cada hora.

Tabla 12. Resultados de los resultados del análisis del muestreo in situ en la colectora

HORA	pH	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
9:50 a. m.	7.42	1723.67	1135.33	860.67	-13.73
10:50 a.m.	7.37	1845.67	1218.67	922.67	-10.57
11:50 a.m.	7.26	1860.67	1227.00	920.33	-7.50
12:50 p.m.	7.22	1606.00	1063.00	806.33	-1.77
1:50 p.m.	7.17	1647.33	1080.67	820.33	0.87
2:35 p.m.	7.14	1657.00	1101.33	835.33	1.33

Tabla 13. Promedios totales de los parámetros evaluados en la colectora

Parámetro	Promedio Final
pH	7.27
CONDUCTIVIDAD (μS/cm)	1723.39
STD (ppm)	1137.67
SALINIDAD (ppm)	860.94
ORP (mV)	-5.23
Sólidos Sedimentables (ml/L-h)	5.50
Caudal de entrada (L/s)	14.90

e) Análisis del muestreo in situ en las lagunas secundarias.

Para el análisis de los resultados del muestreo en las lagunas secundarias, se procede a calcular el valor promedio de las tres muestras analizadas en cada laguna, en los seis días que se hizo el muestro. Las siguientes tablas muestran dichos promedios del primer y último día.

Tabla 14. Promedios de los parámetros evaluados el día 15/09/2019

LAGUNA SECUNDARIA	pH	CONDUCTIVIDAD (μS/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
N° 1	7.56	1785.33	1178.33	893.00	-18.50
N° 2	7.57	1794.00	1184.33	897.33	-18.90
N° 3	7.59	1776.33	1174.00	889.67	-19.70

Tabla 15. Promedios de los parámetros evaluados el día 03/10/2019

LAGUNA SECUNDARIA	pH	CONDUCTIVIDAD (μS/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
N° 1	7.91	1553.00	1028.67	781.67	-21.50
N° 2	7.94	1622.00	1073.67	814.33	-23.33
N° 3	7.92	1593.67	1053.67	799.33	-22.40

Tabla 15. Promedios de los parámetros durante el tratamiento secundario en la L.S N° 1

Tiempo (días)	pH	CONDUCTIVIDAD (μ S/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)
6	7.56	1785.33	1178.33	893.00	-18.50
10	7.80	1750.00	1157.67	878.00	-27.77
13	7.92	1656.67	1094.00	829.33	-40.72
17	7.73	1734.33	1145.00	869.00	-23.17
20	7.65	1586.33	1047.00	793.67	-22.93
24	7.91	1553.00	1028.67	781.67	-21.50

Tabla 16. Cuadro comparativo de la variación de CBO₅ en el tiempo para cada laguna secundaria

FECHA	Tiempo (días)	DBO ₅ (mg/L) COLECTORA		
		LAG SEC N°1	LAG SEC N°2	LAG SEC N°3
10/09/2019	1	496		
15/09/2019	6	293	322	252
19/09/2019	10	259	261	241
22/09/2019	13	171	177	160
26/09/2019	17	92	99	88
29/09/2019	20	30	27	28
03/10/2019	24	43	44	46

Tabla 17. Cuadro comparativo de la variación de SST en el tiempo para cada laguna secundaria

FECHA	Tiempo (días)	SST (mg/L) COLECTORA		
		LAG SEC N°1	LAG SEC N°2	LAG SEC N°3
10/09/2019	1	300		
15/09/2019	6	14	23	4
19/09/2019	10	60	32	28
22/09/2019	13	36	28	48
26/09/2019	17	18	12	16
29/09/2019	20	6	6	6
03/10/2019	24	43	12	10

- f) **Análisis comparativo de la variación de los parámetros medidos durante el tratamiento secundario en las tres lagunas secundarias.**

Tabla 18. Comparación de la variación de pH en las tres lagunas secundarias

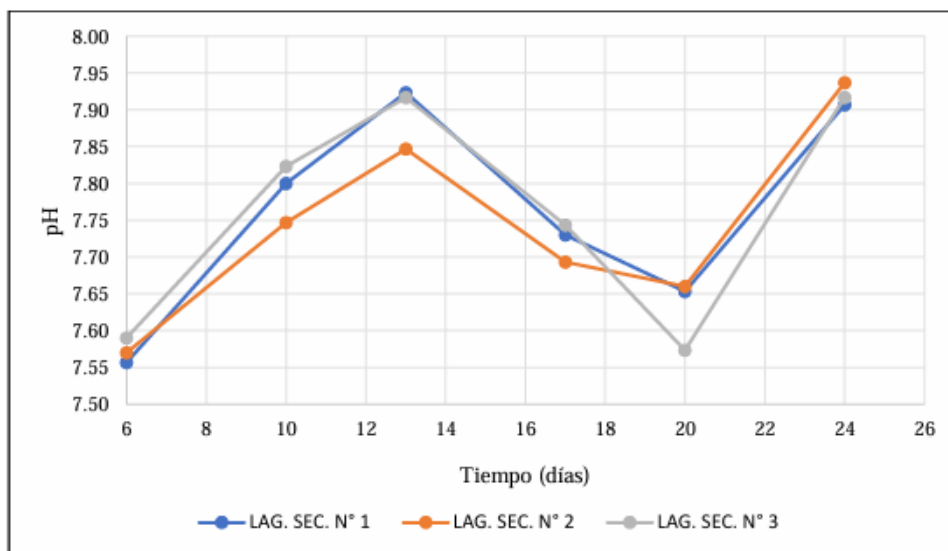


Tabla 19. Comparación de la variación de la conductividad en las tres lagunas secundarias

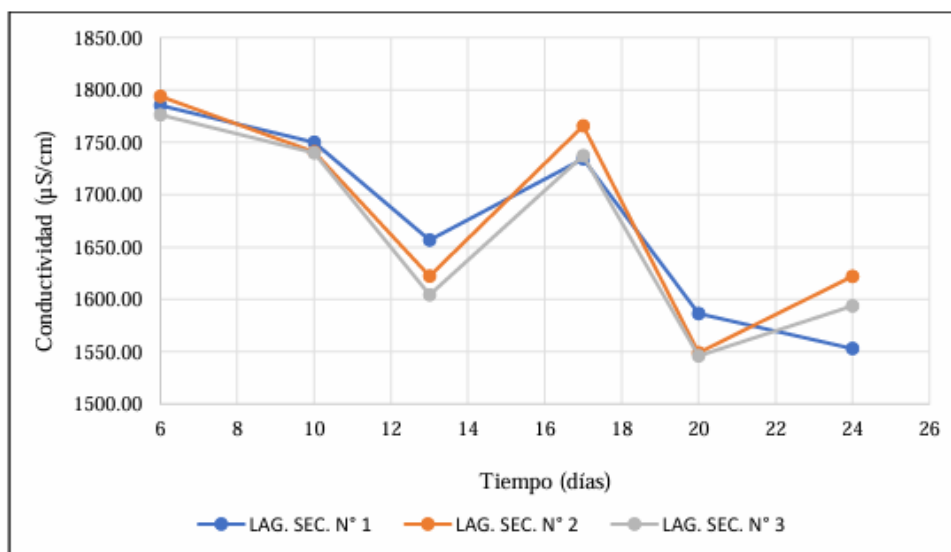


Tabla 20. Comparación de la variación de ORP en las tres lagunas secundarias

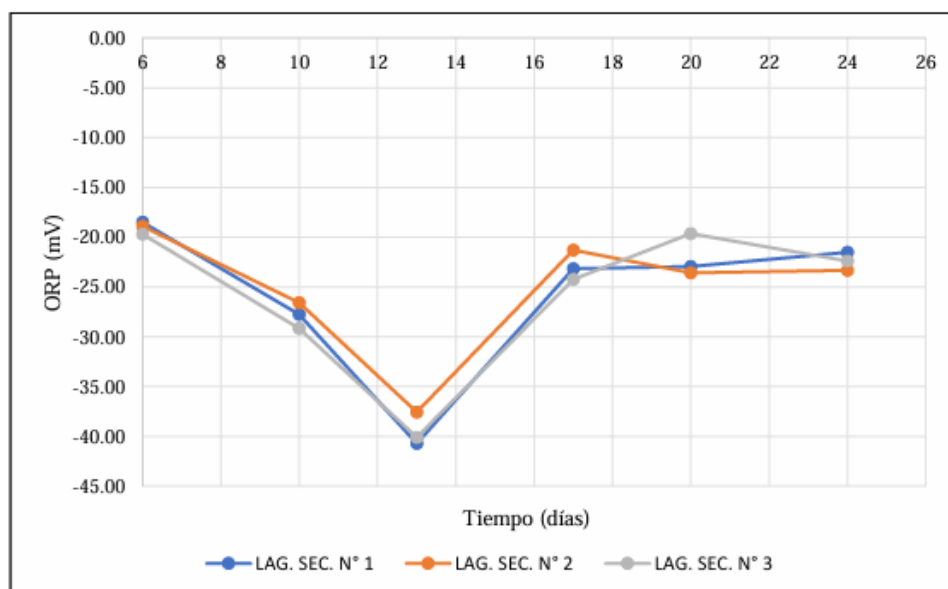


Tabla 21. Comparación de la variación de la salinidad en las tres lagunas secundarias

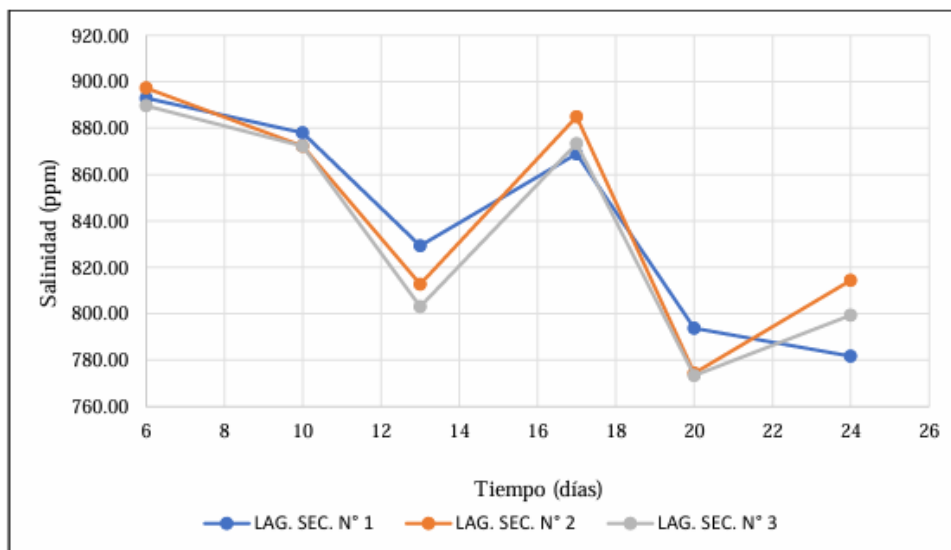


Tabla 22. Comparación de la variación de DBO₅ en las tres lagunas secundarias

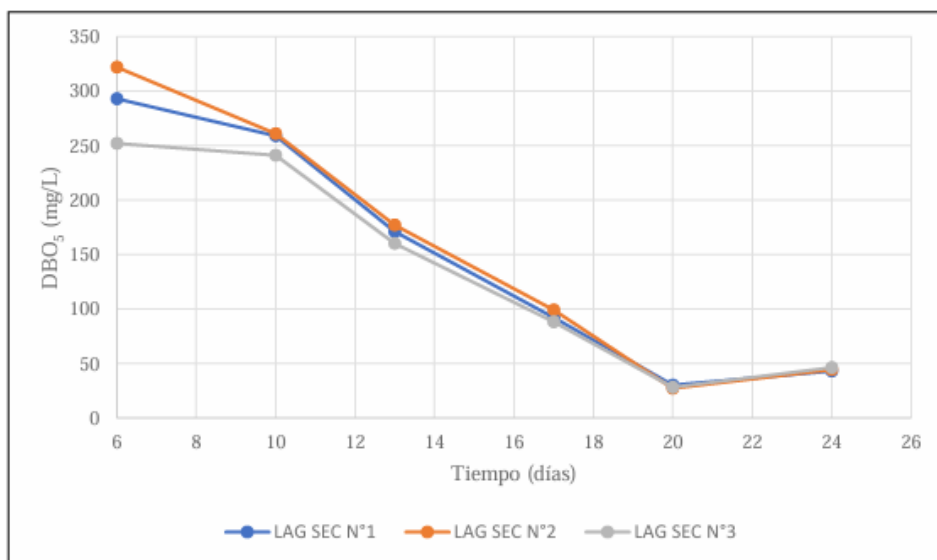
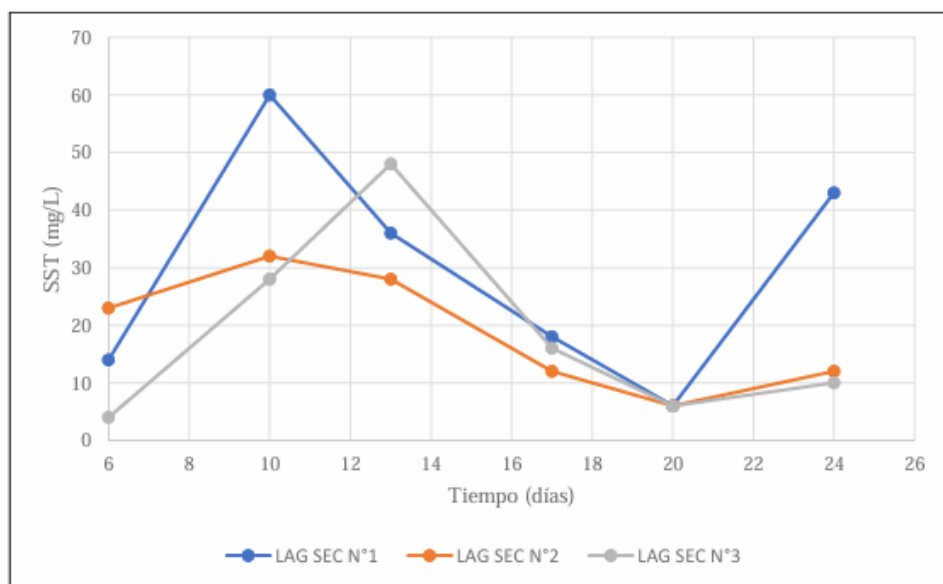


Tabla 23. Comparación de la variación SST en las tres lagunas secundarias



g) Análisis de los promedios finales totales para cada parámetro medido.

Finalmente, se calculan los promedios finales totales, promediando los resultados de las tres lagunas secundarias en cada día de muestreo. Asimismo, se toman en cuenta los resultados promedios de los parámetros medidos en el primer día que inició el sistema de tratamiento ($t = 1$ día), así como también los resultados de DBO₅ y SST para este primer día. Asimismo, más adelante se realizan los cálculos de eficiencia para: DBO₅, SST, conductividad, STD y salinidad. Ello, tanto para la determinar la eficiencia global, como también para determinar la eficiencia del tratamiento primario, y del tratamiento secundario.

Tabla 24. Promedios totales de cada parámetro evaluado durante el sistema de tratamiento

Tiempo (días)	pH	CONDUCT. (μS/cm)	STD (ppm)	SALINIDAD (ppm)	ORP (mV)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)	TEMP. (°C)
1	7.27	1723.39	1137.67	860.94	-5.23	496.00	300.00	-
6	7.57	1785.22	1178.89	893.33	-19.03	289.00	13.67	24.9
10	7.79	1743.56	1152.89	874.22	-27.83	253.67	40.00	20.9
13	7.90	1627.78	1075.11	815.00	-39.46	169.33	37.33	26.4
17	7.72	1745.78	1153.22	875.78	-22.90	93.00	15.33	22.3
20	7.63	1560.44	1029.89	780.44	-22.04	28.33	6.00	25.0
24	7.92	1589.56	1052.00	798.44	-22.41	44.33	21.67	22.9

Como se evidencia en la tabla 4.36, parámetros tales como: conductividad, STD, salinidad, DBO₅ y SST exhibieron sus valores más reducidos durante el día veinte. Esto sugiere que fue en este día cuando el sistema alcanzó su eficiencia máxima, seguido por un incremento en los valores en el día veinticuatro.

Con respecto a los valores de pH y ORP, ambos exhiben una correlación teórica que se evidencia a continuación. Cuando se observa un incremento en el valor del pH (por ejemplo, de 7.57 a 7.79), se observa una reducción en el valor del ORP (por ejemplo, de -19.03 a -27.83). A lo largo del tratamiento, todos los valores de ORP evidenciaron una característica ligeramente reductora del agua, así como una característica ligeramente básica, evidenciada por las variaciones en los valores

de pH, que oscilaron entre 7.27 y 7.92. Adicionalmente, la oscilación térmica se mantuvo dentro del intervalo de 20.9-26.4 °C, lo que sugiere que fue idónea para el desempeño óptimo y el desarrollo óptimo de las macrófitas.

6. Discusión de resultados

De la evaluación de los parámetros medidos durante el tratamiento secundario se demuestra que **la medida del pH**, como indicador del nivel de acidez o alcalinidad de una solución, se mantuvo. La valoración de los parámetros obtenidos durante el tratamiento secundario evidencia que la cuantificación del pH, que señala el grado de acidez o alcalinidad de una solución, se mantuvo constantemente cercana a la neutralidad, oscilando entre valores que oscilan entre 7.57 y 7.92. En la investigación llevada a cabo por Rizzo et al. (2012), se evaluó la cuantificación del pH a lo largo del tratamiento, el cual se mantuvo en un intervalo de 7.5 a 7.7 [11].

El tiempo de retención hidráulica es uno de los elementos cruciales, dado que su incremento incrementa la eficiencia. Sin embargo, lo relevante es establecer el punto de quiebre, es decir, el intervalo entre la máxima capacidad de descontaminación y el retardo de esta; tomando en cuenta 3.44 Kg de plantas mojadas por metro cuadrado de superficie de agua residual. De este modo, se implementaron 18 días de tratamiento secundario, alcanzando el rendimiento máximo en el día 14. Perales et al. (2018) sugirieron un periodo de 46 días, teniendo en cuenta que la carga orgánica en el afluente era considerable (aparentemente sin tratamiento primario y, además, no especifican la cantidad de vegetación). Adicionalmente, Rizzo et al. (2012) implementaron un sistema terapéutico para *Eichhornia crassipes* durante un periodo de 30 días, en el que se alcanzó la máxima eficacia en la eliminación de DBO₅ al día 17, un resultado que se asemeja al reportado en la presente investigación.

Se registró una eliminación del 56.11% de los sólidos suspendidos totales (SST), un indicador de la turbiedad del agua, una cifra que es inferior a la registrada por Vizcaíno y Fuentes (2016) [12], quienes reportaron un porcentaje de eliminación de SST del 100%. En el caso de Rizzo et al. (2012), se logró una eficiencia del 87%, con un tiempo de retención de 10 días. Es importante destacar que en nuestro estudio, desde el día 10 hasta el 20, se observó una reducción de 40 mg/L a 6 mg/L de los SST, lo que representaría un porcentaje del 85% de eliminación durante este periodo de 10 días.

En el presente estudio, se utilizó la temperatura del agua residual de cada laguna secundaria para evaluar los parámetros durante el tratamiento secundario, resultando en un promedio de 23.73 °C. Este parámetro es crucial para el desarrollo biológico. Castillo et al. (2017) registran hallazgos notables, empleando *Eichhornia crassipes* para la eliminación de nutrientes a una temperatura promedio de 18.63 °C. En contraste, Perales et al. (2018) alcanzaron un promedio de 28.6 °C, demostrando una eficiencia significativa [13]. Además, Shah et al. (2014) corroboran que el intervalo de temperatura óptimo para el tratamiento de aguas con macrófitas es de 15-38°C [14]. En su sistema de tratamiento semicontinuo, Mendoza et al. (2018) operaron a una temperatura de 26.5°C $\pm$ 2.65, para una celda experimental completamente cubierta de *Eichhornia crassipes* [15].

La efectividad en la erradicación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), un indicador crítico de la calidad del agua tratada y de la eficacia del sistema, se tradujo en una eliminación de DBO₅ del 90% en el tratamiento secundario con *Eichhornia crassipes*. Este descubrimiento supera las cifras registradas por Mendoza et al. (2018), que registraron un 79.1%, y Shah et al. (2014), que registraron un 50.61%. Las evaluaciones se orientan hacia la eficacia de *Eichhornia crassipes* como agente fitorremediador. Adicionalmente, según Perales et al. (2018). Se documentó una eliminación promedio del 94.71% de DBO₅, con un periodo de retención de 46 días. Sin embargo, es crucial destacar que, a pesar de las circunstancias contemporáneas, la situación no ha experimentado una evolución significativa.

Una condición esencial es "la altura efectiva", vinculada a la profundidad del agua, que puede influir de manera negativa o positiva en el rendimiento del proceso. En la investigación actual, se estableció una altura de 0.9 metros para el agua residual, con una eficiencia de eliminación del 90.20% en el caso de DBO₅. Perales y su equipo (2018). La configuración del tratamiento secundario se establece con una profundidad de 0.50 (94.71% de eliminación de DBO₅); sin embargo, no especifica una altura efectiva (que debería ser ligeramente inferior). Adicionalmente, Shah et al. (2014) llevaron a cabo experimentos con estanques de 0.91 metros de profundidad; no obstante, no especificaron la altura de agua efectiva, resultando en una remoción del 50.61% de DBO₅.

6. Conclusiones

Conclusión general:

El diseño óptimo del tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche – Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes* se cumple siguiendo las conclusiones específicas, en el primer ítem se dan las dimensiones, en el segundo, se considera los parámetros de operación y en el tercer, se menciona la eficiencia que se obtiene, siguiendo los anteriores.

Conclusiones específicas:

- Las dimensiones del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche – Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes* son las siguientes: En la parte superior, tiene forma cuadrada de 1.5 m x 1.5 m, con una altura total de 1.2 m, el fondo posee forma cuadrada de 0.9 m x 0.9 m, el talud posee una relación de 4:1 (vertical: horizontal) y el uso efectivo de altura de la laguna fue de 0.9 m, con una altura libre de 30 cm (seguridad).
- El tamaño y densidad de las plantas (grandes, y casi toda la superficie de agua cubierta de estas (preferible); usando así; 3.44 Kg de plantas mojadas/m² de superficie de agua residual), altura efectiva de la laguna (0.90 m), la DBO₅ (menor a 180 mg/L, para el afluente, de preferencia), pH (7.57 a 7.92, trabaja de manera óptima en el rango mencionado), temperatura (23.73°C, en promedio) y el tiempo de retención hidráulica (18 días de tratamiento, pero en el día 14; se obtuvieron los mejores resultados, con respecto al tratamiento secundario) son los parámetros de operación del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche – Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes*.
- La eficiencia de remoción de la DBO₅ en las lagunas secundarias 1, 2 y 3 fueron de 89.76%, 91.61% y 88.89%; respectivamente, teniendo un 90.20% de rendimiento promedio; en el tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche – Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua).

Referencias bibliográficas

- [1] Ccapcha Cutimbo, Carlos Martin y Mendoza Quispe, Ricardo Kevin. Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", Tesis para optar el título de Ingeniero Químico. Diseño del proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales de las lagunas de oxidación de Cachiche - Ica, por medio de la *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). [https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&og=Pre-grado Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica](https://www.google.com/search?q=REPOSITORIO+UNIVERSIDAD+SAN+LUIS+GONZAGA+DE+ICA&og=Pre-grado+Facultad+de+Ingeniería+Química+y+Petroquímica).
- [2] Mendoza,Y.; Pérez,J. 6 Galindo,A.(2018), Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, trabajo de investigación realizado en el Laboratorio del Instituto de Aprovechamiento de Agua y Estudios Ambientales (INESAG) de la Universidad de la Guajira, Colombia.
- [3] Vizcaino,L. y Fuentes,N.(2016). Efectos de Eisenia foetida y Eichhornia crassipes en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos, se realizó para tratar efluentes residuales del municipio de San Juan del Cesar, Colombia-
- [4] Mendoza,Y.; Castro, F.; Marín,J. & Behling,E.(2016). Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia), trabajo de investigación realizado en el Laboratorio del Instituto de Aprovechamiento de Agua y Estudios Ambientales (INESAG) de la Universidad de la Guajira, Colombia.
- [5] Deybi Karin Cáceres Pom¹ Gisela Milagros Calisaya Vera² Edgar Bedoya-Justo³ (2021).Eficiencia de *Eisenia foetida*, *Eichornia crassipes* e hipoclorito de calcio en la depuración de aguas residuales domésticas en Moquegua, Perú. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162021000100083
- [6] Perales Vasquez Kelith Liliana (2018). Tratamiento de aguas residuales domésticas por fitorremediación con Eichhornia crassipes en la zona rural del caserío Santa Catalina Moyobamba 2017.
- [7] Vargas Torres Katty Lizeth (2017). Evaluación de Eichhornia crassipes y Lemna minor en la remoción de parámetros de las aguas residuales domésticas de la quebrada Asungue de la ciudad de Moyobamba.

[8] Castillo Rojas Eisner(2017) Eficiencia de Lemna sp y Eichhornia crassipes, en la remoción de nutrientes del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales en Celendín.

[9] Norma OS.090
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686395/OS.090%20Plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20DS%20n%C2%Bo%20022-2009.pdf?v=1641411306>

[10] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en el Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA (1988).
[https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Constructed+Wetlands+and+Aquatic+Plant+Systems+for+Municipal+Wastewater+Treatment,+EPA+\(1988\).&hl=es&as_sdt=o&as_vis=1&oi=scholar](https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Constructed+Wetlands+and+Aquatic+Plant+Systems+for+Municipal+Wastewater+Treatment,+EPA+(1988).&hl=es&as_sdt=o&as_vis=1&oi=scholar)

[11] Rizzo, P., Arreghini, S., Serafini, R., Bres, P., Crespo, D., y Fabrizio, A. (2012). Remediation of feedlot effluents using aquatic plants. Rev. FCA UNCUIYO, 42(2), 47-64.

[12] Vizcaíno, L., y Fuentes, N. (2016). Efectos de Eisenia foetida y Eichhornia crassipes en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos. Rev. U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica, 19(1), 189-198.

[13] Perales, K. (2018). Tratamiento de aguas residuales domésticas por fitorremediación con Eichhornia Crassipes en la zona rural del caserío Santa Catalina Moyobamba 2017 (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Perú.

[14] Shah, M., Nisar, H., Ali, A., y Razzaq, A. (2014). Evaluación del desempeño de macrófitas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales municipales. Journal of Environmental Health Science & Engineering, 12(106), 1-12.

[15] Mendoza, Y., Pérez, J., y Galindo, A. (2018). Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Información Tecnológica, 29(2), 205-214.

Capítulo IV

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICO MEDIANTE LEMNA MINNOR

*Cynthia Victoria Bendezú Hernández, Leslie Marielly Felices Vizarreta, Felipe
Estuardo Yarasca Arcos*

CAPÍTULO IV

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE *LEMNA MINNOR*

1. Relevancia de la investigación:

La gestión de aguas residuales a través de técnicas ecológicas ha emergido como una demanda creciente debido a las repercusiones ambientales derivadas de la descarga indiscriminada de efluentes con elevadas concentraciones de nutrientes, tales como el nitrógeno y el fósforo. En el presente escenario, la aplicación de *Lemna minor* constituye una opción factible y de bajo costo para la eliminación de estos contaminantes. La relevancia de este estudio radica en su propuesta de un enfoque sostenible y ecoamigable para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Este enfoque facilita la reducción eficaz de nitrógeno amoniacal y fósforo total en cuerpos hídricos contaminados y puede ser implementado en regiones con insuficiencia en la infraestructura de tratamiento convencional.

2. Limitaciones

La opción terapéutica alternativa con *Lemna minor* ha demostrado resultados prometedores como agente de fitorremediación; sin embargo, su implementación presenta ciertas restricciones técnicas y operativas que deben ser tomadas en cuenta. La eficacia del sistema se halla considerablemente vinculada a factores ambientales tales como la temperatura, el pH y la intensidad lumínica, los cuales deben mantenerse dentro de los parámetros óptimos para asegurar la viabilidad de la especie y su capacidad de absorción. Además, la puesta en marcha de sistemas acuáticos con *Lemna minor* en situaciones prácticas puede verse limitada por factores económicos, especialmente en áreas rurales con inversión limitada en infraestructura ambiental. Un elemento crucial es la exigencia de un seguimiento constante para prevenir la sobreproducción de biomasa, lo cual podría resultar en complicaciones secundarias como la disminución del oxígeno disuelto. Estas restricciones subrayan la relevancia de realizar una evaluación previa de las condiciones del entorno de estudio antes de implementar esta opción como un sistema complementario o terciario de tratamiento.

3. Problemática

El aumento en la descarga de aguas residuales con altos niveles de nutrientes ha exacerbado las problemáticas de eutrofización en varios ecosistemas acuáticos, impactando negativamente en la biodiversidad y la calidad del agua. En el escenario particular de la laguna facultativa "San Francisco" ubicada en la provincia de Chincha, el sistema de tratamiento exhibe deficiencias en su diseño y funcionamiento, lo que resulta en una eliminación de nutrientes deficiente.

La repercusión adversa de esta problemática se manifiesta en: la reducción del oxígeno disuelto en el agua, lo que impacta la vida acuática, el crecimiento desmedido de algas, lo que provoca desequilibrios en el ecosistema, la contaminación de cuerpos de agua receptores, y la limitación del uso del agua tratada para riego y otras aplicaciones.

4. Antecedentes

En su estudio titulado Remoción de metales pesados, Mayra Lizcano-Toledo examinó la habilidad de *Lemna minor* para eliminar aluminio y plata de soluciones acuosas. Los hallazgos evidenciaron una remoción de aluminio eficaz, mientras que la eliminación de plata se limitó al 10%, lo que indica que la planta es más idónea para la extracción de aluminio. [1]

Los científicos Loconi Sampa y Purizaca Vasquez realizaron una evaluación de la eficiencia de las especies *Lemna minor* y *Salvinia* spp. En la fitorremediación de aguas residuales derivadas de actividades agroindustriales en Pomalca, Perú. Se estableció que la *Lemna minor* es más eficaz en el tratamiento de dichas aguas, exhibiendo resultados superiores en las pruebas de laboratorio. [2]

La presente investigación, llevada a cabo en 2022, evaluó la habilidad de la *Lemna minor* para eliminar nutrientes de aguas residuales derivadas de actividades acuícolas en el Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón. Los hallazgos indicaron una eliminación del 67.08% del nitrógeno total y del 40.49% del fósforo total, junto con una reducción del 88.9% en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Estos descubrimientos indican que la *Lemna minor* es eficiente en la depuración de aguas con elevados niveles de nutrientes y materia orgánica. [3]

En 2023, se llevó a cabo una investigación sobre la eficacia de la *Lemna minor* y la *Eichhornia crassipes* en la eliminación de contaminantes en las aguas residuales municipales de Paucarcolla,

con la finalidad de su reutilización en el riego agrícola. Tras un periodo de 30 días de tratamiento, se registró una eficiencia de eliminación que excedió el 50% en variables fisicoquímicas, tales como nitrógeno total y fósforo total. No obstante, la eficiencia en la disminución de parámetros microbiológicos resultó ser inferior al 50%. Estos hallazgos sugieren que la *Lemna minor* podría representar una alternativa factible para el tratamiento de aguas residuales destinadas al riego agrícola; sin embargo, podría ser necesario intensificar el proceso para tratar los contaminantes microbiológicos. [[4]]

Esta investigación realizada en 2022 evaluó la aptitud de las especies de *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* para la extracción de nitratos y fosfatos de aguas residuales domésticas en Jaén. Los hallazgos indicaron que la *Lemna minor* consiguió una eliminación del 82.59% de los nitratos y del 69.27% de los fosfatos. A pesar de que no se consiguió una eliminación significativa de sulfatos, la elevada eficiencia en la eliminación de nitratos y fosfatos subraya el potencial de la *Lemna minor* en procesos de fitorremediación de aguas residuales de origen doméstico. [[5]]

5. Metodología

Tipo y nivel de investigación

Conforme al objetivo de la investigación, los hallazgos analíticos derivados del tratamiento con *lemna minor* para la reducción del nitrógeno y fósforo en el agua residual urbana de Chíncha, posibilitan la propuesta de la utilización de esta tecnología como una opción viable de tratamiento terciario en la región. Por lo tanto, se tratará de una investigación aplicada y de naturaleza cuantitativa.

En donde el carácter de medida se fundamenta en las magnitudes cuantificables del estudio, tales como los resultados numéricos de la muestra recolectada en el laboratorio, previos y posteriores al tratamiento, que posteriormente se transforman en un instrumento para el procesamiento de los datos.

Diseño del método

El enfoque metodológico adoptado fue experimental, y se evaluó el impacto de la eficiencia en la implementación del tratamiento con *lemna minor* para la disminución del nitrógeno y fósforo en el agua residual urbana de la provincia de Chíncha. Se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos de las concentraciones de Nitrógeno y Fósforo pre y post tratamiento con el objetivo de evaluar la eficacia

de la disminución de estos nutrientes. Adicionalmente, se empleó una muestra representativa del sistema para una evaluación comparativa, empleando en todas las instancias la misma metodología analítica.

Los siguientes parámetros fueron objeto de evaluación: pH, temperatura, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), oxígeno disuelto (OD), nitrógeno amoniacal y fósforo total. El período de retención se extendió durante 10 días. La periodicidad de muestreo implicó la recolección de muestras cada diez días, las cuales fueron enviadas para su análisis en un laboratorio acreditado, siguiendo los protocolos establecidos para asegurar la fiabilidad de los resultados.

Tabla 1 Número de sistemas aplicados en el tratamiento

N ° de Sistemas	Tipo de Tratamiento
S1	Estanque con Lemna minor
S2	Estanque sin planta acuática (control)

Fuente: [6]

Empleando el siguiente esquema

GE	O1	X	O2
GC	O3		O4

Donde:

GE: Efluente de la laguna facultativa que será sometido al tratamiento

GC: Efluente de la laguna facultativa que servirá de control

O1: Análisis previo al tratamiento

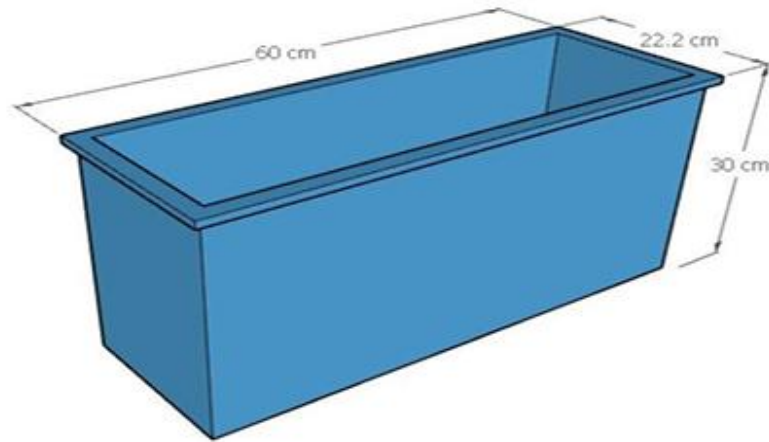
O3: Análisis previo sin tratamiento

X: Tratamiento con Lemna Minor

O2: Análisis posterior al tratamiento

O4: Análisis posterior sin tratamiento

Figura 1. Esquema y dimensiones del estanque



Fuente: [6]

Con el horario establecido para la recolección de muestras, se determinaron los puntos de muestreo que se llevarán a cabo en el estudio, reconociendo que este método de muestreo es puntual. Punto 1: La ubicación inicial de muestreo se localiza a la entrada de la laguna facultativa "San Francisco", precisamente tras el tratamiento preliminar, con las coordenadas N:8513786 UTM y E:18Lo373387 UTM (Figura 2). Punto 2: La segunda ubicación de muestreo se localiza a la salida de la laguna Facultativa "San Francisco", con las coordenadas N: 8513625 UTM y E: 18Lo373365 UTM (Figura 3). Punto 3: El tercer punto de muestreo se realizará en el área designada para la implementación del tratamiento experimental, con las coordenadas N: 8516442 UTM y E: 18Lo375952 UTM (Figura 4).

Figura 2: Punto 1 de muestreo al inicio de la laguna facultativa



Fuente: [6]

Figura 3: Punto 2 de muestreo en la salida de la laguna facultativa



Fuente: [6]

Figura 4: Punto 3 de muestreo en sistema de tratamiento

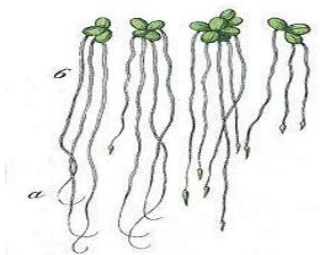


Fuente: [6]

Recolección de ejemplares de lemna minor

Lemna minor se caracteriza por su reducido tamaño, comúnmente con una longitud inferior a 10 mm. Se propaga con rapidez en el agua, generando una capa superficial que puede obstaculizar la transmisión de la luz solar. Esta especie vegetal puede crecer en una gama de temperaturas que oscila entre 5°C y 30°C, con un óptimo desarrollo entre 15°C y 18°C. Adicionalmente, tolera un amplio espectro de pH, con el pH óptimo oscilando entre 4.5 y 7.5. 7 [7]

Figura 5: Representación de la estructura vegetal y las raíces de la lenteja de agua (Lemna minor).



Fuente: [7]

Lemna minor se ajusta a variadas circunstancias de iluminación, sin requerir necesariamente la luz solar directa. Se aconseja una iluminación de intensidad media a alta, con un mínimo de 8 horas de exposición diaria.

Los ejemplares empleados en procedimientos de fitorremediación deben ser previamente seleccionados y acondicionados para optimizar la eficacia en la eliminación de contaminantes. La elección de especies vegetales jóvenes es esencial, dado que exhiben una mayor capacidad de absorción. Estas se distinguen por su tonalidad verde más profunda y su apariencia fresca.

Previo a su implementación en tratamientos, las plantas fueron sometidas a un lavado con agua corriente y a un periodo de aclimatación apropiado para asegurar la eficacia del procedimiento. En investigaciones contemporáneas, se ha sugerido un periodo de preparación de cinco días.

6. Resultados

Los hallazgos derivados del tratamiento con Lemna minor evidenciaron una disminución notable de los contaminantes presentes en las aguas residuales. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) inicial se estimaba en un promedio de 420 mg/L, mientras que al término del tratamiento se consiguió disminuir hasta valores cercanos a 26.93 mg/L, lo que indica una eficiencia del 94.4% en la eliminación de materia orgánica.

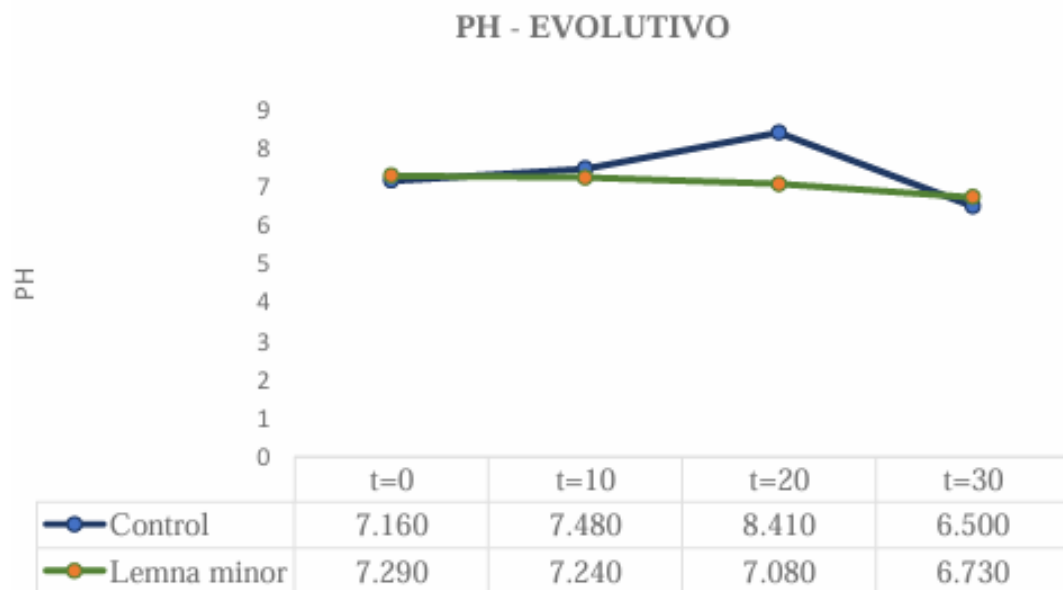
Con respecto al nitrógeno amoniacal, los niveles iniciales excedían los 20 mg/L; sin embargo, con la aplicación de Lemna minor, se registró una reducción hasta alcanzar niveles inferiores a 2 mg/L.

El fósforo total experimentó una reducción significativa, pasando de niveles iniciales de aproximadamente 7 mg/L a valores inferiores a 1.5 mg/L.

Adicionalmente, se observó un incremento en los niveles de oxígeno disuelto, lo cual sugiere una mejora en la calidad del agua procesada. En las etapas iniciales, los niveles de oxígeno disuelto eran

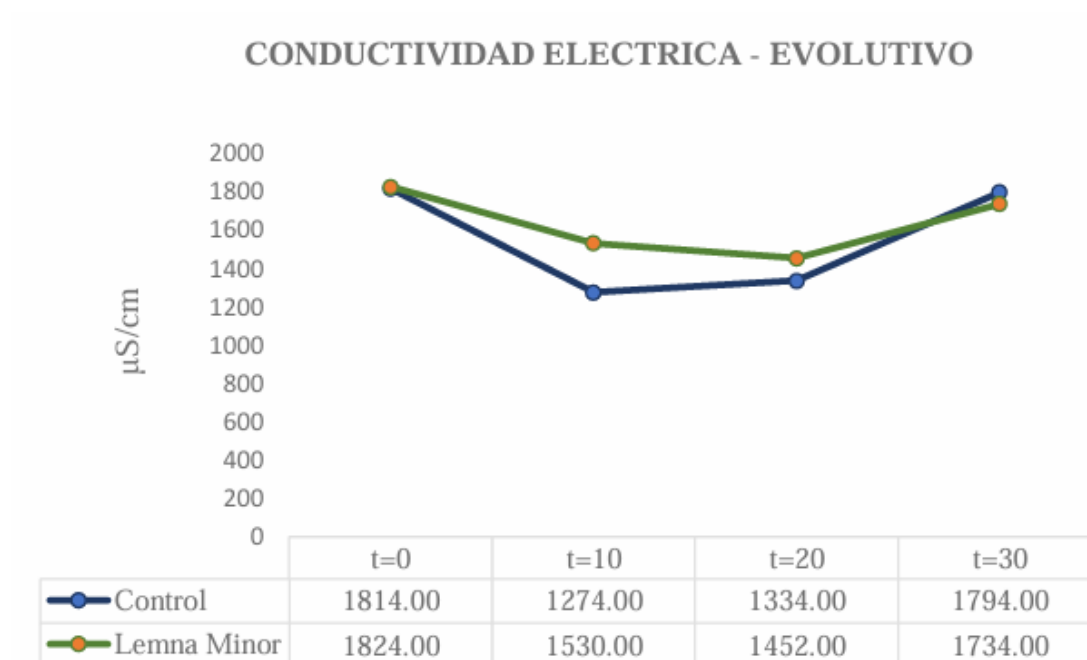
inferiores a 1 mg/L; sin embargo, al concluir el tratamiento, estos incrementaron hasta alcanzar 5 mg/L.

Figura 6: Variación evolutiva de pH en el tratamiento



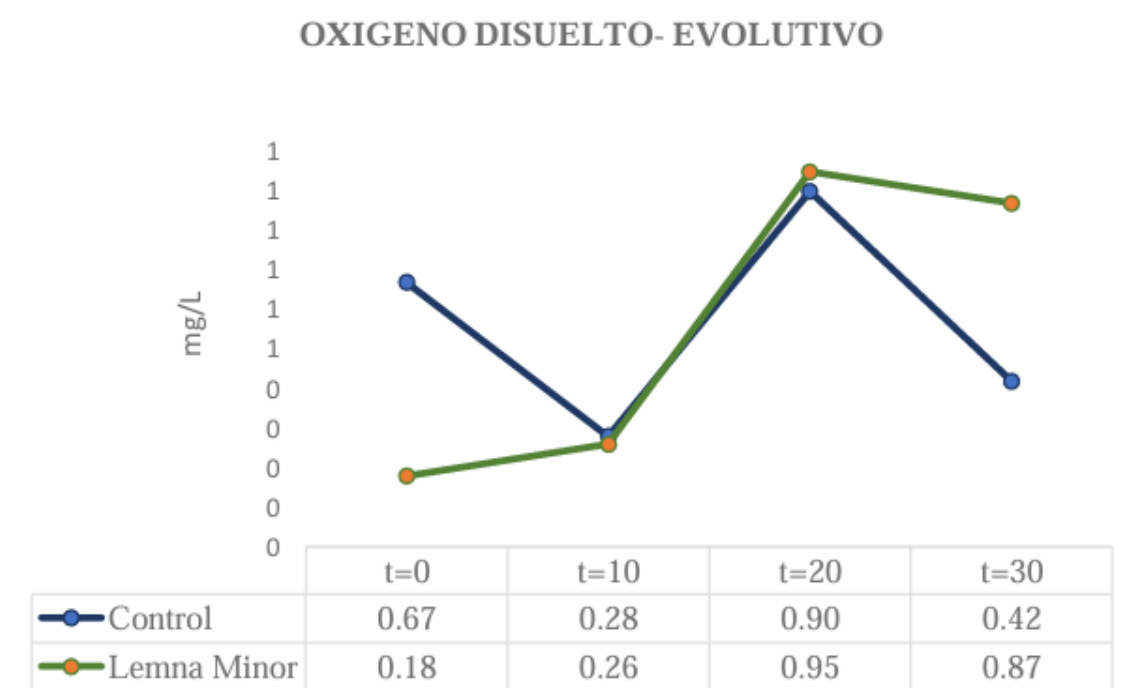
Fuente: [6]

Figura 7: Variación evolutiva de la Conductividad Eléctrica



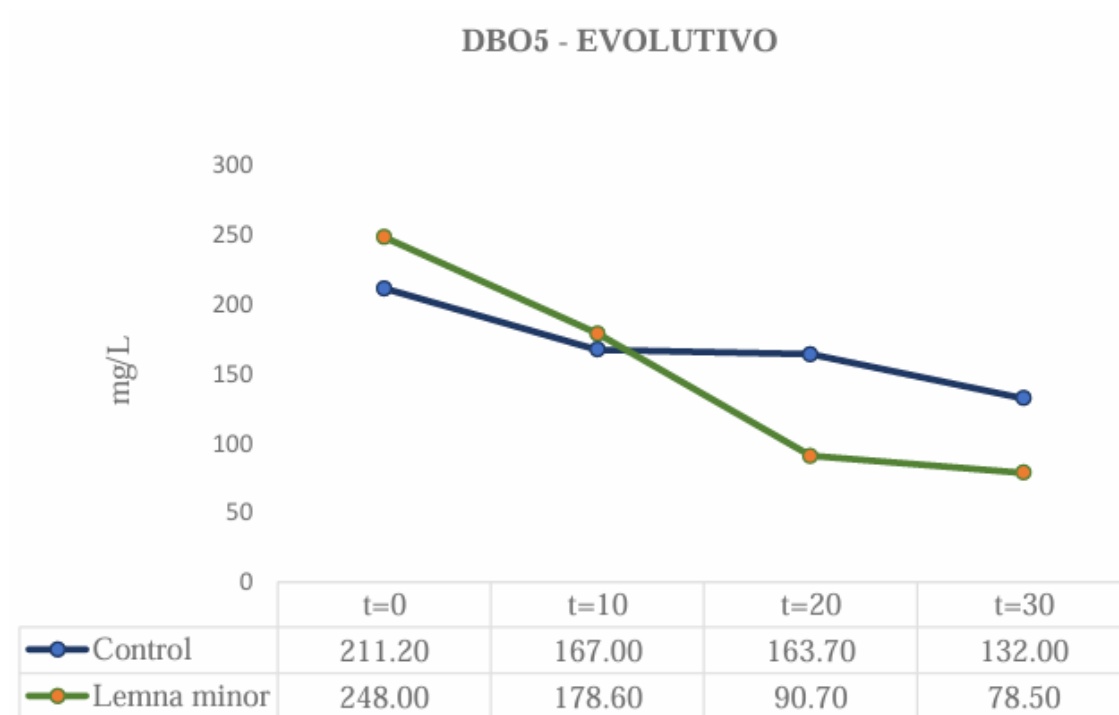
Fuente: [6]

Figura 8: Variación evolutiva de Oxígeno disuelto



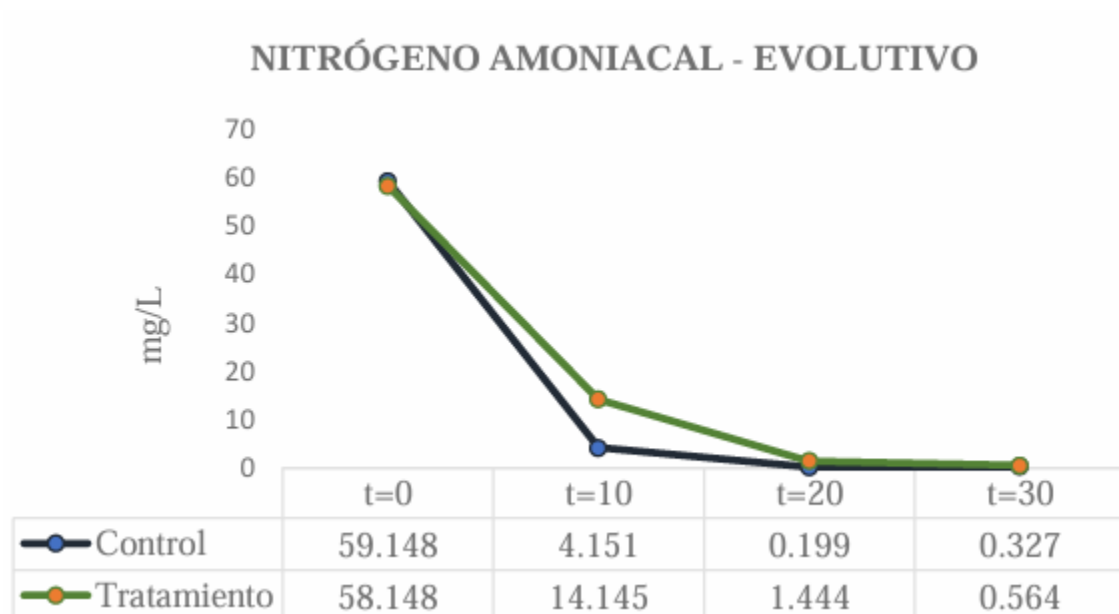
Fuente: [6]

Figura 9: Variación evolutiva de la DBO₅



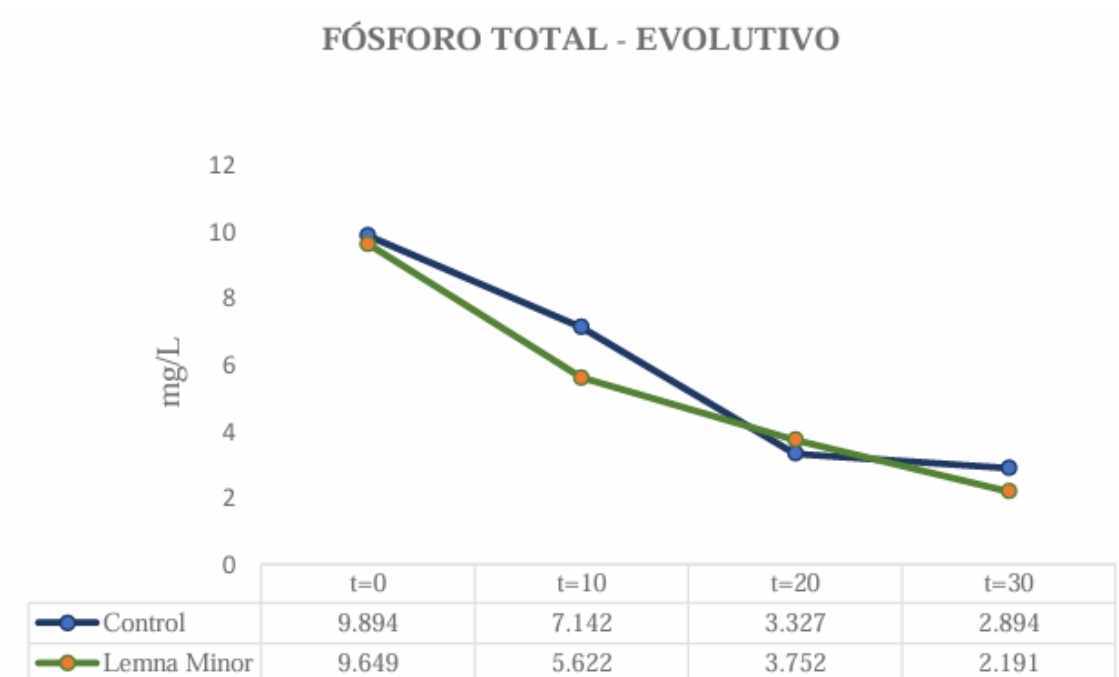
Fuente: [6]

Figura 10: Variación evolutiva del Nitrógeno amoniacal



Fuente: [6]

Figura 11: Variación evolutiva del Fósforo total



Fuente: [6]

Tabla 2 Resumen de Resultados

Tratamiento	Tiempo(t) (días)	pH	Conductividad Eléctrica (μ S/cm)	Oxígeno Disuelto (mg OD/L)	DBO ₅ (mg/L)	Nitrógeno amoniacoal (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
Lemna Minnor	0	7.29	1824	0.18	248	58.148	9.649
Lemna Minnor	10	7.24	1530	0.26	178.6	14.145	5.622
Lemna Minnor	20	7.08	1452	0.95	90.7	1.444	3.752
Lemna Minnor	30	6.73	1734	0.87	78.5	0.564	2.191
Control	0	7.16	1814	0.67	211.2	59.148	9.894
Control	10	7.48	1274	0.28	167	4.151	7.142
Control	20	8.41	1334	0.9	163.7	0.199	3.327
Control	30	6.5	1794	0.42	132	0.327	2.894

Fuente: Adaptado de Carbajal [6]

7. Discusión de Resultados

La aplicación del tratamiento con Lemna minor en aguas residuales de origen doméstico permitió evidenciar una eficacia significativa en la eliminación de contaminantes, especialmente en la reducción de la carga orgánica y los nutrientes. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) experimentó una disminución del 94.4%, lo que fortalece el potencial de esta planta acuática como instrumento de fitorremediación.

La disminución del nitrógeno amoniacoal a concentraciones inferiores a 2 mg/L corrobora la aptitud de Lemna minor para la captación de formas nitrogenadas. Este hallazgo se alinea con los hallazgos de Campos et al. [5], quienes registraron una eficiencia del 82.6% en la eliminación de nitratos al emplear tiempos de retención apropiados y biomasa previamente aclimatada. Además, la eliminación total de fósforo, que supera el 75%, coincide con el 69.3% de los fosfatos removidos en su estudio, atribuible a

la incorporación acelerada de este nutriente en los tejidos vegetales durante el proceso de crecimiento activo.

Finalmente, el oxígeno disuelto experimentó un incremento de menos de 1 mg/L a aproximadamente 5 mg/L, lo que evidencia una mejora significativa en la calidad del agua residual. La elevación del oxígeno puede ser atribuida tanto a la disminución de la carga orgánica como a la actividad fotosintética de *Lemna minor* durante el procedimiento.

Estos descubrimientos consolidan la aplicación de *Lemna minor* como una opción factible y accesible para el tratamiento de aguas residuales domésticas, particularmente en regiones donde la infraestructura convencional no está disponible. Adicionalmente, su eficacia en diversas condiciones ambientales, tal como lo subrayan Jaimes Prada, Lora Díaz y Tache Rocha [7], avala su aplicabilidad en escenarios rurales o periurbanos que requieren soluciones ecológicas y de coste reducido.

8. Conclusiones

El uso de *Lemna minor* como método de fitorremediación se presenta como una alternativa altamente eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, particularmente en regiones con problemas de contaminación hídrica y escasez de recursos. Los resultados obtenidos demuestran una notable capacidad de este sistema para reducir la carga contaminante, alcanzando una remoción promedio del 94.4% en la DBO₅, lo que evidencia su eficiencia en la degradación de materia orgánica. Además, se observó una significativa disminución en las concentraciones de nitrógeno y fósforo, nutrientes responsables de procesos de eutrofización en cuerpos de agua, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas acuáticos receptores.

Un aspecto relevante es el incremento en los niveles de oxígeno disuelto registrado en el agua tratada, resultado de la actividad fotosintética de la planta. Esta mejora en la calidad del agua no solo favorece su posible reutilización en actividades agrícolas, sino que también reduce el impacto ambiental al devolver al medio natural un efluente con mejores características. La capacidad de *Lemna minor* para proliferar rápidamente y adaptarse a diferentes condiciones la convierte en una opción viable para implementar sistemas de tratamiento descentralizados, especialmente en zonas rurales o periurbanas con limitado acceso a tecnologías convencionales de saneamiento.

Entre las ventajas destacables de este método se encuentran su bajo costo de operación y mantenimiento, la minimización de lodos residuales y la generación de biomasa que puede ser

aprovechada como forraje, abono o incluso como materia prima para la producción de biocombustibles. Sin embargo, es importante considerar ciertos factores para su aplicación a gran escala, como la influencia de las condiciones climáticas en el crecimiento de la planta y la necesidad de gestionar adecuadamente la biomasa producida para evitar su acumulación y posibles efectos negativos.

9. Referencias Bibliográficas

- [1] M. Lizcano Toledo, "Remoción de metales pesados utilizando Lemna minor," *Revista Pensamiento Actual*, 2023.
- [2] V. Loconi Sampi e F. Purizaca Vásquez, "Estudio sobre la remoción de aluminio y plata utilizando Lemna minor," *Revista pensamiento actual*, 2023.
- [3] M. Aquino Carmen, Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por Lemna minor L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón, Lima: Repositorio de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, 2022.
- [4] S. Contreras Vargas, Eficiencia de fitorremediación con Eichhornia crassipes y Lemna minor en las aguas residuales municipales para el riego agrícola en el distrito de Paucarcolla, Puno: Repositorio de la Universidad Nacional del Altiplano, 2023.
- [5] O. Campos Torres, Efecto de Lemna minor y Eichhornia crassipes en la extracción de nitratos y fosfatos en aguas residuales domésticas en Jaén, Cajamarca: Repositorio de la Universidad Nacional de Cajamarca, 2022.
- [6] G. Carbajal Matta, Valoración de la Eficacia de Tratamiento con Lemna Minor para la Reducción del Nitrógeno y Fósforo del Agua Residual Urbana en la Provincia de Chíncha, Ica: Universidad Nacional San Luis Gonzaga , 2023.
- [7] O. Jaimes Prada, O. Lora Díaz e K. Tache Rocha, "Lenteja de agua (Lemna minor): potencial alimentario y ambiental," *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, pp. 2024: 15(2), 404-424. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6107>, 2024.

- [8] E. Landolt, Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae). In G. Veröff, The family of Lemnaceae – A monographic study, Zürich: Inst. Stiftung Rübel, 1986.
- [9] M. Arroyave, "La lenteja de agua (*Lemna minor* L.): Una planta acuática promisorio," *Revista EIA*, pp. 1: 33-38, 2004.
- [10] R. Z. Gaur e A. Khursheed, "Evaluation of *Lemna minor* phytoremediation performance for the treatment of dairy wastewater," *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. 20(5), 1234-1245. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04567-8>, 2023.
- [11] V. Loconi Sampi e F. Purizaca Vásquez, Evaluación de la eficiencia de *Lemna minor* y *Salvinia* spp. en la fitorremediación de aguas residuales agroindustriales en Pomalca, Perú, Puno: Repositorio Institucional Universidad Nacional del Altiplano, 2023.

Capítulo V

TRATAMIENTOS DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN USANDO TOTORALES (*Typha angustifolia*)

*Joanna Isabel Quispe Alarcón, Santos Humberto Olivera Machado, Leslie
Marielly Felices Vizarreta*

CAPÍTULO V

TRATAMIENTOS DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN USANDO TOTORALES (*Typha angustifolia*)

1. Relevancia

La producción de aguas residuales en el hogar constituye una consecuencia ineludible de las actividades humanas en su residencia. Es reconocido que más del 80% de las aguas residuales generadas diariamente a escala global se descargan al medio ambiente sin tratamiento alguno [1], lo que representa un desafío que cada nación debe abordar, dado que el nivel de contaminación que este proceso genera ha alcanzado niveles insostenibles en los últimos años. Esta circunstancia es particularmente severa en Ica, así como en otras urbes peruanas, dado que las aguas residuales domésticas son canalizadas directamente y completamente hacia un vasto depósito de almacenamiento, conocido como "laguna de oxidación", sin ninguna forma de tratamiento y están en peligro de colapso al haber alcanzado su volumen máximo de captación.

En este contexto, la investigación realizada es relevante por las siguientes razones:

- Establece una alternativa de solución a la problemática de contaminación ambiental relacionada con las descargas de aguas residuales domésticas de la ciudad de Ica.
- Desarrolla una tecnología viable y de bajo costo para la depuración de aguas residuales domésticas.
- Utiliza recursos vegetales característicos de la flora del departamento de Ica.
- Se orienta a la generación de un valor agregado a las aguas residuales domésticas de la ciudad de Ica, en razón que, al reducir la carga contaminante a niveles por debajo de los exigidos en la normatividad oficial, el agua depurada puede ser utilizada para riego en la agricultura como también en el riego de parques y jardines municipales.

2. Limitaciones

La restricción más significativa fue la construcción del sistema de humedad artificial en proximidad a la fuente de las aguas residuales, dado que el emplazamiento de la laguna de oxidación se encontraba en condiciones de desaprovechamiento en su mantenimiento.

Una restricción se manifestó en la recolección de muestras de los efluentes domésticos, atribuible a la dificultad de acceso al punto de muestreo representativo, así como a la captación y traslado del efluente para su tratamiento a través del sistema de humedal artificial piloto.

Además, se añade a las restricciones la ausencia de componentes adicionales de construcción en consonancia con las dimensiones del diseño para una vivienda de cinco integrantes. Por consiguiente, se diseñó un humedal artificial piloto con una producción diaria de 12.8 litros, que corresponde al promedio generado por individuo.

La complejidad en seleccionar las plantas óptimas para la fitorremediación de los efluentes domésticos de arrabales también representó una restricción. Por lo tanto, inicialmente se empleó la planta oreja de elefante, sin embargo, esta no logró tolerar la alta carga orgánica y otros componentes. Por lo tanto, se optó por la especie denominada totora (*Typha angustifolia*), una especie característica y altamente adaptada a la laguna de aguas residuales domésticas.

3. Problemática

La problemática involucrada en el desarrollo de la investigación está definida en los siguientes aspectos:

- El acelerado crecimiento demográfico en la provincia de Ica, reflejo de una tendencia nacional, ha generado una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos. Este incremento poblacional conlleva una mayor demanda de agua para consumo humano, actividades productivas y servicios básicos, lo que a su vez se traduce en un aumento significativo en la generación de aguas residuales domésticas. Sin embargo, la capacidad de tratamiento de estas aguas no ha evolucionado al mismo ritmo, generando un desequilibrio crítico entre la oferta y la demanda de saneamiento.
- Uno de los aspectos más preocupantes es el agotamiento progresivo de los acuíferos subterráneos, principal fuente de abastecimiento tanto para el consumo humano como para la agricultura, actividad económica fundamental en la región. Estudios recientes alertan sobre la sobreexplotación de estas reservas, poniendo en riesgo la sostenibilidad hídrica a mediano y largo plazo. Esta situación se agrava por el auge de la agroexportación, motor económico de Ica, que requiere grandes volúmenes de agua para el cultivo de productos como espárragos, arándanos, uvas y cítricos, destinados a mercados internacionales.

- A esto se suma el grave problema de contaminación ambiental derivado de la disposición inadecuada de aguas residuales. En muchas zonas urbanas y rurales de la provincia, los efluentes domésticos son vertidos directamente a lagunas de evaporación sin ningún tipo de tratamiento previo. Muchas de estas lagunas se encuentran ya colapsadas o al borde de su capacidad máxima, generando focos de insalubridad, malos olores y la proliferación de enfermedades relacionadas con la calidad del agua. Esta práctica no solo afecta la salud pública, sino que también contamina los suelos y, potencialmente, los escasos recursos hídricos subterráneos restantes.
- Esta problemática multidimensional exige soluciones integrales que combinen tecnología, gestión sostenible del agua y políticas públicas eficaces. La implementación de sistemas de tratamiento descentralizados, como humedales artificiales, podría ser una alternativa viable para zonas periurbanas y rurales, contribuyendo a la depuración de aguas residuales y a la recarga controlada de acuíferos. Asimismo, se requiere una regulación más estricta sobre el uso del agua en la agricultura industrial y la modernización de la infraestructura de saneamiento para evitar mayores impactos ambientales.

4. Antecedentes

El primer sistema de humedales artificiales comenzó a desarrollarse en Europa a comienzos del siglo XX, para el tratamiento de aguas residuales; convirtiéndose en una importante tecnología para el tratamiento de efluentes de tanques sépticos, de lagunas de estabilización y, en general, de efluentes de tratamiento biológico secundario [1].

A continuación, se destacan algunos estudios sobre sistemas de humedales artificiales:

- En 2006, se llevó a cabo la tesis denominada "Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del Parque Nacional Natural AMACAYACU-AMAZONAS" (Diego Alejandro García Rubio y Diana Carolina Leal Correa, tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario en la Universidad de la Salle Bogotá D.C.). Esta tesis se centró en el diseño y construcción de un sistema de humedal artificial con siete especies de plantas flotantes no convencionales. El enfoque se centró en

la elección de las especies acuáticas más adecuadas para el mencionado sistema, seguido por la implementación del mencionado sistema, donde se examinó la adaptación de las plantas y la mitigación de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

- El proyecto de investigación denominado "Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas en la UNMSM, Perú" (Wilmer Alberto Llagas Chafloque, Diplomatura en Gestión Ambiental - Instituto de Investigaciones FIGMMG UNMSM, Perú) fue llevado a cabo en 2006. El estudio propone una opción alternativa para el tratamiento de aguas residuales en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Mexicana (UNMSM) mediante la implementación de humedales artificiales. El propósito es diseñar un sistema de agua de flujo libre para el tratamiento de aguas residuales y describir la formulación matemática de los procesos biológicos en el humedal artificial.
- El documento titulado "Depuración con humedales construidos – Guía Práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo Subsuperficial" (autoría de Joan García Serrano y Angélica Corzo Hernández, Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña) presenta una serie de conocimientos técnicos para la construcción y redacción de proyectos, los cuales han sido acumulados a través de investigaciones experimentales en humedales. El propósito del documento fue proporcionar soporte para la elaboración y redacción de proyectos relacionados con el sistema de humedales de tipo FSS.
- En el año 2010, se formuló la tesis denominada "Tratamiento de los efluentes domésticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de San Juan de Marcona, Ica, Perú" (Máximo Fidel Baca Neglia, Maestría en Investigación y Docencia Universitaria, Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú). El objetivo de su elaboración es aportar a la resolución de la disposición final de los efluentes domésticos que generan contaminación ambiental en la Bahía de San Juan de Marcona. Este proceso se llevó a cabo mediante el diseño y construcción de un modelo piloto de humedal sub superficial, destinado a las pruebas experimentales de eliminación de contaminantes, con el objetivo de evidenciar la eficiencia del tratamiento de los efluentes domésticos a través de este sistema.
- En 2011, se llevó a cabo el estudio titulado "Metodología para el diseño de humedales de flujo Subsuperficial" (Orestes Gonzáles Díaz, Ingeniero Hidráulico, CIH, CUJAE y Guido Deas Valdés, Ingeniero Hidráulico, Empresa Aguas de La Habana – CIX, Ingeniería Hidráulica y

Ambiental). El propósito de este estudio fue la formulación de una metodología que integre tanto los componentes cinéticos del proceso de tratamiento como los geométricos e hidráulicos, así como la verificación del tipo de flujo a esperar dentro del reactor.

- La tesis denominada "Factibilidad de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30 000 habitantes" (Camilo Eduardo Espinoza Ortiz, Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.) abordó el diseño de un sistema de humedal de FSS para una población de 30 000 habitantes, utilizando diversas ecuaciones de diseño, y el análisis de los costos de construcción en comparación con los costos de los sistemas de tratamiento convencionales.
- En el año 2014 se llevó a cabo la investigación dirigida a la "Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas" (Pedro Andreo Martínez, tesis doctoral – Universidad de Murcia). El presente evaluó los resultados del proceso de depuración y determinó un diseño con la finalidad de probar la eficacia del sistema para tratar las aguas residuales.

5. Metodología

- Tipo y nivel de investigación

La investigación se caracteriza por su naturaleza aplicada y su enfoque experimental. Se aplica debido a que implica el diseño, construcción y funcionamiento del humedal artificial, y es experimental dado que, una vez construido el humedal artificial, se regulan las condiciones operativas para alcanzar los resultados propuestos.

- Población y muestra de investigación

La población objeto de estudio es el humedal natural y la laguna de recolección de aguas residuales domésticas ubicadas en el Sector La Angostura Limón, Distrito Subtanjalla, Provincia de Ica. La muestra de investigación se constituye por un humedal artificial, diseñado y construido para funcionar con un flujo diario de $0.0128 \text{ m}^3/\text{día}$.

- **Diseño de la investigación**

La investigación se desarrolló en base a un diseño experimental preexamen – postexamen [2], de acuerdo con el esquema, M: $X_1 - O - X_2$, en donde:

M: Muestra experimental (afluente secundario)

X_1 : Análisis de DBO₅ inicial

O: Tratamiento de la muestra por el sistema humedal artificial

X_2 : Análisis de DBO₅ final

- **Procedimiento**

La investigación se ejecutó en cuatro etapas:

1. Muestreo y determinación de DBO₅ del afluente de aguas residuales domésticas
2. Diseño del humedal artificial
3. Construcción y operación del humedal artificial
4. Monitoreo del efluente de aguas residuales domésticas

6. Resultados de la investigación

Los resultados obtenidos en la ejecución cada etapa fueron los siguientes:

1) Muestreo y determinación de DBO₅ del afluente de aguas residuales domésticas

El afluente doméstico secundario del sistema de humedal artificial se origina a partir de los efluentes de la laguna de oxidación del Sector Angostura Limón, Provincia de Ica. Esta laguna, que comprende una laguna facultativa y una anaeróbica, estaba en estado de colapso y presentaba desbordamientos significativos hacia la vegetación y cultivos adyacentes, incluyendo frutales y otros [2].

La recolección de muestras se llevó a cabo en el punto de salida de la laguna de oxidación del Sector Angostura Limón, siguiendo las directrices del protocolo de toma de muestras para el parámetro de DBO₅ en aguas residuales. Previamente, se registraron variables como la temperatura y el pH, tal como se ilustra en la Figura 1. Figura 1. Procedimiento de Toma de Muestra



En la siguiente tabla 1, se muestran los resultados de la determinación del parámetro de DBO_5 de las muestras tomadas en el punto de salida de la laguna de oxidación del Sector Angostura Limón durante un periodo de 8 semanas.

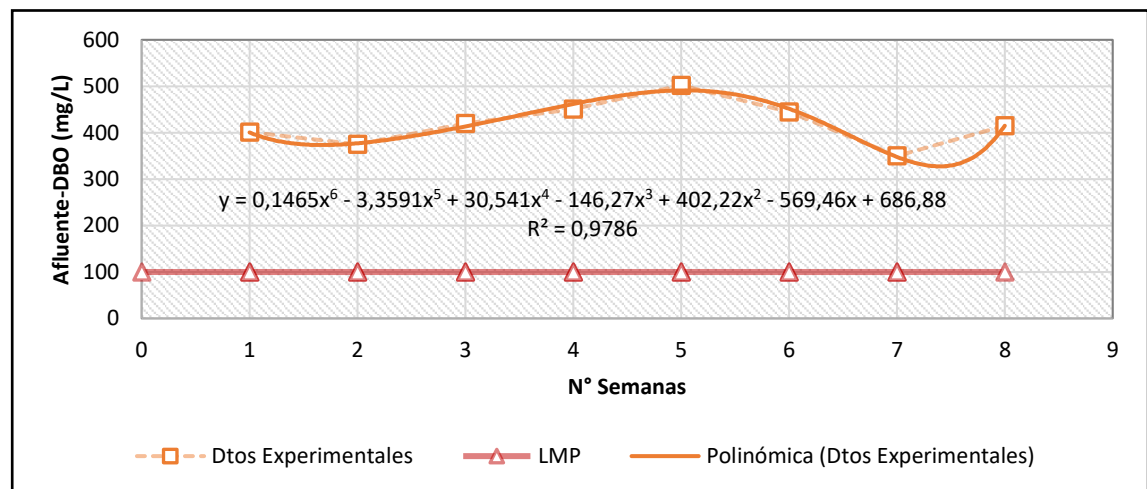
Tabla 1. Resultados del muestreo y determinación del DBO_5 del afluente (AH) doméstico secundario

Mes	Nº Semana	Fecha	AH – DBO_5 (mg/L)
Junio	1	07/06/2016	401
	2	14/06/2016	375
	3	21/06/2016	420
	4	28/06/2016	451
Julio	5	05/07/2016	502
	6	12/07/2016	445
	7	19/07/2016	350
	8	26/07/2016	415
Promedio AH Inicial:			420

La demanda bioquímica de oxígeno promedio (DBO_5) resultante fue de 420 mg/L [2], por lo tanto, este fue el valor inicial de DBO_5 como afluente del sistema de humedal artificial.

En la siguiente figura se comparan los resultados de la DBO del punto de salida de la laguna de oxidación de Angostura Limón en relación a los límites máximos permisibles de los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas ó municipales (PTAR), establecidos en el D.S. N°003-2010-MINAM [7], en donde para el parámetro de DBO el valor permisible máximo es 100 mg/L.

Figura 2. Comparación de los resultados del DBO del punto de salida de la laguna de oxidación de Angostura Limón Vs los LMP de los efluentes de las PTAR



Se observa que los datos obtenidos en el muestreo de los efluentes de la laguna de oxidación del Sector Angostura Limón superan lo establecido por la normativa vigente. Estos resultados se deben a que la laguna de oxidación está colmatada de lodos, alta carga orgánica y la falta de mantenimiento.

2) Diseño del humedal artificial

Existen dos métodos más conocidos que describen el diseño de humedales artificiales, tales son:

- El método de Kadlec y Knight (desarrollado en 1995), emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción (por unidad de volumen), dependientes de la temperatura [8].

- El método de Sherwood C. Reed (desarrollado en 1996), emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción por unidad de superficie y no todas son dependientes de la temperatura (la temperatura solo tiene importancia en la eliminación de sólidos en suspensión y de nitrógeno). Se trata, por tanto, de un método menos sensible a las condiciones climáticas que el método de Reed y col [8].

La tabla 2 muestra las ecuaciones del método de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, DBO, de acuerdo al criterio y perspectiva en base a los antecedentes expuestos:

Tabla 2 Ecuaciones para el diseño de humedales de flujo sub superficial, con base en remoción de DBO.

Autor/Referencia	Método de Remoción de DBO
Kadlec y Knigh	$A_s = \frac{Q \cdot \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T \cdot h \cdot \eta}$
Sherwood C. Reed	$A_s = \frac{Q}{K_A} \cdot \ln \left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$

Modelo de Diseño General

Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado para la remoción de DBO y nitrógeno; aunque en su mayoría se encuentra dirigido para la remoción de DBO [8].

A. Ecuación General

Está representada por la ecuación de diseño de los “reactores de flujo a pistón para una cinética de primer orden” [8].

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T \cdot t} \dots (1)$$

Donde:

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

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

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

t: tiempo de retención hidráulica, d

La constante de reacción de primer orden K_T (para la remoción de DBO), en la ecuación general anterior, se determina con la siguiente expresión (proveniente de la ecuación de Arrhenius) [8]:

$$K_T = K_R(\theta_R)^{(T - T_R)} \dots (2)$$

Donde:

T: Temperatura del agua considerada en el diseño (°C); se suele emplear la temperatura media del mes más frío.

T_R: Temperatura de referencia, suele ser 20°C, (°C).

Θ_R: Coeficiente a la temperatura a 20 °C (adimensional).

K_R: Constante a la temperatura de 20°C, d⁻¹

El coeficiente de temperatura θ_R a 20°C, toma el valor de 1.06, para flujos de tipo superficial y sub superficial [8].

El valor de la constante K_R de remoción a 20° C es de 1.104 d⁻¹ para flujo sub superficial, según la tabla 3 (basada en el valor de una carga orgánica aparente de 112 kg/ha.d).

Tabla 3 Valores de la constante de Primer Orden a la T=20°C de los tipos de Humedales.

Procesos de Tratamiento	Valor de la Constante K _R (d ⁻¹)
Humedal de flujo sub superficial	1.104
Humedal de flujo superficial	0.678

El valor de la constante K_T es muy importante porque de ella depende la ecuación general; ésta a su vez depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura. Los estudios en el diseño de humedales artificiales se han basado en la remoción de DBO, por obtener mejor rendimiento y grandes ventajas al reducir su concentración. La temperatura en el caso de la remoción de nitrógeno y SST, es muy necesario tenerla en cuenta para su diseño; aquí, la remoción de DBO no es muy influyente en el diseño del sistema, en especial para el flujo sub superficial, FSS.

Por lo tanto, así como en los humedales de flujo libre, los humedales de FSS sufren cierta regeneración de DBO debido a la degradación; así, dependiendo de la época del año habrá cierto aporte de la vegetación de la superficie, encontrándose que la degradación de las raíces genera 2 a 3 mg/L de DBO_5 .

B. Tiempo de Retención Hidráulica (t)

Está basado en la porosidad (n) del medio o huecos intersticiales del humedal, puede ser calculado con la siguiente expresión [8]:

$$t = \frac{L \cdot W \cdot h \cdot \eta}{Q} \dots (3)$$

Donde:

L: Largo de la celda del humedal, m

W: Ancho de la celda del humedal, m

h: Profundidad del Medio filtrante del humedal, m

n: porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal.

Q: Caudal medio a través del humedal, m^3/d

El caudal medio Q, es importante en su evaluación para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual en el humedal [8]. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2} \dots (4)$$

Donde:

Qe: Caudal de salida, m^3 /d

Q_o : Caudal de entrada, m^3/d

En este diseño es razonable suponer que los caudales de entrada y salida son iguales.

C. Área Superficial (AS)

El área superficial del humedal se determina en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover. Por lo general los diseños se realizan para reducir la concentración de DBO.

Combinando las ecuaciones (1) y (3) tenemos la expresión para el cálculo del área superficial [9]:

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T \cdot h \cdot \eta} = L \cdot W \dots (5)$$

Donde

A_s : Área superficial del humedal, m^2

Es necesario tener en cuenta la relación largo-ancho (L/A) para asegurar el diseño del sistema, puesto que mientras mayor sea dicha relación habrá mejor depuración de las aguas, pero se presenta el problema del corto circuito, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros. Por ello se recomiendan valores para la relación largo-ancho 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1 [9].

El ancho de la celda del humedal se determina con la ecuación siguiente:

$$W = \left(\frac{A_s}{R_A} \right)^{\frac{1}{2}} \dots (6)$$

Donde:

R_A : relación longitud/ancho, m/m

Consideraciones Hidráulicas

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Como es el caso de los humedales de FSS por sus condiciones dadas bajo el lecho para asegurar condiciones normales durante todo el periodo de funcionamiento del sistema. Esto solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico y unos métodos constructivos apropiados; donde el flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia está dada

por la vegetación y la capa de sedimentos en los FWS, el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los SFS. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada (h_e) y la salida (h_s) del sistema. La mejor solución en lo referente a la construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo y una salida de altura variable con el nivel de agua [8].

Ley de Darcy

El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy [10], que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante de la siguiente ecuación:

$$V = K_s \cdot S \dots (7)$$

Donde:

V: Velocidad de Darcy, la velocidad aparente del flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d.

K_s : Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, $m^3/m^2/d$.

S: Gradiente hidráulico o "pendiente" de la superficie del agua en el sistema, m/m.

En el sistema de humedal de FSS se asumen condiciones de flujo laminar (constante y uniforme) porque el medio donde ocurre la degradación es en un lecho de grava fina (arena), es decir porosidad reducida; el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño tiene un gradiente hidráulico alto (para ese caso se usa la ecuación de Ergum).

D. Área de sección transversal (A_C)

También llamada área vertical del humedal, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_C = w \cdot h \dots (8)$$

Donde:

A_C : Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m^2

Q: Caudal promedio a través del humedal, m^3/d $[(Q_o+Q_e)/2]$. Aunque otros estudios recomiendan tomar el máximo caudal diario para asegurarse que el sistema opere eficientemente.

La profundidad o altura del humedal, h , generalmente varía de 0.3 a 1 m (valor recomendado 0.6 m); con una pendiente 1% (valor recomendado 0.5%). Se recomienda multiplicar el valor de la conductividad K_s , por $1/3$ o bien por 0.1 (10%) como factor de seguridad, para evitar problemas de estancamiento por acumulación de lodos, raíces y otros. Es preferible que la conductividad hidráulica y porosidad del sustrato (grava) se mida en el terreno o en laboratorio antes del diseño final [9].

Consideraciones Térmicas

La temperatura desempeña un papel crucial en el funcionamiento de los humedales, ya que influye directamente en los procesos físicos y biológicos que ocurren en el sistema. En condiciones de frío extremo y prolongado, especialmente en humedales de flujo superficial libre (FWS), la formación de capas de hielo puede llegar a comprometer la integridad estructural del sistema, incluso provocando fallas en casos graves. Sin embargo, predecir el comportamiento térmico dentro del humedal resulta complejo debido a las múltiples interacciones energéticas, como las pérdidas y ganancias de calor entre el suelo, el agua residual que circula y la atmósfera circundante.

En el caso de los humedales de flujo subsuperficial (FSS), el impacto de las bajas temperaturas puede ser menos crítico en comparación con los sistemas superficiales, pero sigue siendo un factor que no debe pasarse por alto, especialmente en regiones con climas muy fríos. Esto se debe a que el descenso térmico puede inhibir la actividad bacteriana, reduciendo así la eficiencia del tratamiento biológico. Por esta razón, es fundamental incorporar consideraciones térmicas en la fase de diseño cuando se implementan humedales en zonas con inviernos severos, garantizando así un rendimiento óptimo incluso bajo condiciones climáticas adversas.

Criterios de Diseño

Los criterios a considerar en el diseño y la construcción de un humedal artificial son los siguientes:

- El diseño y construcción de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales requiere una planificación meticulosa y la consideración exhaustiva de múltiples factores interrelacionados que garantizan su funcionamiento óptimo a largo plazo. Entre los aspectos más relevantes se encuentra el dimensionamiento hidráulico, el cual debe

realizarse mediante la aplicación rigurosa de la ley de Darcy, considerando las características específicas del medio filtrante y asegurando un gradiente hidráulico adecuado que permita el flujo continuo del agua a través del sistema sin provocar encharcamientos ni cortocircuitos hidráulicos.

- La selección del emplazamiento constituye otro elemento fundamental en el proceso de diseño, debiendo priorizarse zonas con conexión directa a la fuente de efluentes y que permitan el flujo por gravedad, evitando así la necesidad de sistemas de bombeo que incrementarían los costos operativos y de mantenimiento. Es imprescindible garantizar la disponibilidad permanente de agua en el sistema, ya que las plantas y los microorganismos encargados de los procesos de depuración requieren condiciones constantes de humedad para su supervivencia y correcto funcionamiento.
- El tiempo de retención hidráulica, que típicamente oscila entre 2 y 10 días, debe calcularse considerando las características del agua a tratar y los objetivos de calidad requeridos, permitiendo que se desarrollen adecuadamente los complejos procesos físicos, químicos y biológicos involucrados en la depuración. En cuanto a la vegetación, se recomienda emplear especies autóctonas adaptadas a las condiciones locales, como carrizos (*Phragmites australis*), juncos (*Scirpus* spp.) o espadañas (*Typha* spp.), las cuales pueden obtenerse mediante trasplante de humedales naturales cercanos o adquirirse en viveros especializados.
- El establecimiento de la vegetación requiere especial atención, debiendo colocarse las raíces a una profundidad aproximada de 5 cm bajo la superficie del sustrato y manteniendo una distancia entre plantas de unos 15 cm para permitir su desarrollo adecuado. La creación de una zona radicular homogénea es fundamental, proceso que puede favorecerse mediante la regulación controlada de los niveles de agua para estimular el crecimiento vertical de las raíces.
- La impermeabilización perimetral del humedal, generalmente realizada con materiales como geomembranas o concreto, es esencial para evitar filtraciones no controladas que podrían comprometer la eficiencia del tratamiento y generar posibles impactos ambientales. Asimismo, el sistema debe incorporar mecanismos para el manejo de excedentes hídricos, particularmente importantes en zonas con precipitaciones intensas,

donde se recomienda la instalación de válvulas de control en el extremo inferior del humedal que permitan regular los niveles de agua y prevenir posibles daños estructurales.

- La prevención de zonas de estancamiento es otro aspecto crítico en el diseño, ya que estas áreas favorecen la proliferación de insectos vectores y pueden generar problemas de olores. Esto se logra mediante un pretratamiento adecuado que reduzca la carga de sólidos y un diseño hidráulico que garantice el flujo uniforme a través de todo el sistema. En la zona de entrada, se pueden emplear estructuras de distribución como lechos de grava gruesa o sistemas de tuberías perforadas, mientras que en la salida es recomendable instalar dispositivos de filtración que eviten el arrastre de material del lecho filtrante.
- Las dimensiones finales del humedal varían significativamente en función de las condiciones climáticas locales, requiriéndose superficies mayores en climas fríos (no menos de 5 m² por persona equivalente) donde los procesos biológicos son menos intensos, mientras que en zonas cálidas pueden emplearse áreas menores (entre 3-5 m² por persona equivalente) gracias a la mayor actividad metabólica de los microorganismos. Estos parámetros deben complementarse con un programa de monitoreo y mantenimiento periódico que incluya la revisión de los sistemas de distribución, el control de la vegetación y la evaluación periódica de la calidad del efluente, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema a lo largo de su vida útil.

Operación y Mantenimiento

La operación y mantenimiento rutinarios de los humedales FSS son similares a los de las lagunas facultativas. Por lo tanto, se debe considerar lo siguiente:

- El ajuste de la profundidad de agua para promover el crecimiento de raíz de planta. La profundidad del agua en el humedal puede requerir ajuste periódico según sea la estación como también para evitar la acumulación de detritos en los poros del medio.
- Si las plantas están muy marchitas aún con agua suficiente, pueden sufrir de una sobrecarga de contaminantes y debe ser reemplazadas. Si muchas plantas marchitan, deben ser reemplazados con otras plantas.
- Limpieza periódica: la malla en la entrada y la salida debe ser limpiada para prevenir la obstrucción por sólidos suspendidos y grava.

- Monitoreo de la calidad del agua: se recomienda que se monitoree periódicamente los niveles de nutrientes y BOD para estimar la reducción e identificar los problemas potenciales.

Dimensionamiento del Humedal Artificial de FSS piloto

El estudio realizó los cálculos necesarios para diseñar un humedal artificial con flujo subsuperficial horizontal (FSSH), utilizando diversos modelos y ecuaciones fundamentales. Para ello, se aplicó la ecuación general de los reactores químicos de flujo pistón, considerando una cinética de primer orden, lo que permitió analizar el comportamiento del sistema. Además, se empleó la ecuación propuesta por Kadlec y Knight con el fin de determinar el área superficial requerida para la celda del humedal. En cuanto al dimensionamiento hidráulico, se utilizó la conocida ley de Darcy, que garantiza un flujo adecuado a través del medio poroso. Por otro lado, el caudal diario se calculó mediante la regla de retroceso, obteniendo un valor estimado de 0.0128 metros cúbicos, lo que corresponde a una eficiencia del sistema del 76.19%. Estos cálculos y metodologías aseguraron un diseño óptimo y eficiente del humedal artificial para el tratamiento de aguas.

DATOS DE PARTIDA:

- C_o : DBO ingreso, es determinado por el análisis de laboratorio; ($C_o = 420 \text{ mg/l}$).
- C_e : DBO salida, se determina de acuerdo al parámetro establecido por los LMP de efluentes de PTAR Domésticas o Municipales dado por el D.S. N° 003-2010-MINAM; ($C_e = 100 \text{ mg/l}$).
- Q : caudal de ingreso a celda, se asume de acuerdo a la escala del piloto; ($Q = 12.8 \text{ L/día}$, una aprox. al vertimiento de agua residual por persona).

DATOS DETERMINADOS:

- h : profundidad del medio filtrante; está determinada por las condiciones del material usado como celda; ($h = 0.27 \text{ m}$).
- m : pendiente de la celda; se determinó por razones de adecuación al ingreso y en la distribución del agua residual en la celda ($m = 1\%$).

- η : porosidad del medio filtrante, de acuerdo a unas pruebas sencillas por diferencia de masa, se determinó la porosidad de la grava usada en el medio; ($\eta_{pr} = 32\%$ para grava tipo confitillo).
- K_T : constante de reacción de primer orden, a la temperatura requerida, la cual se halla de la siguiente manera mediante la ecuación (2):

$$K_T = K_R (\theta_R) (T - T_R)$$

$$K_T = 1.104 (1.06) (15 - 20)$$

$$K_T = 0.83$$

Donde:

- $T = 15.1^\circ\text{C}$ temperatura requerida del mes más frío (julio); de acuerdo a los datos del SENAMHI.
- $T_R = 20^\circ\text{C}$ Temperatura de referencia ó CN.
- $\theta_R = 1.06$ Coeficiente de T° a 20°C , para flujo Subsuperficial.
- $K_R = 1.104 \text{ d}^{-1}$ Constante de primer orden a la temperatura de referencia para flujo sub superficial.

DATOS CALCULADOS:

- A_S : Área Superficial, se calcula mediante la ecuación (5) dada por Kadlec y Knigh.

$$A_S = \frac{Q \cdot \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T \cdot h \cdot \eta} = L \cdot W$$

$$A_S = \frac{0.0153 \times \ln \left(\frac{420}{100} \right)}{0.83 \times 0.27 \times 0.32}$$

$$A_S = 0.26 \text{ m}^2$$

- W : Ancho de la celda

De acuerdo a las recomendaciones de otros estudios y proyectos, se establece una relación largo/ancho de 1.86 por la naturaleza determinada del instrumento usado como celda.

De esta manera, mediante la ecuación (6) el ancho de la celda:

$$W = \left(\frac{A_S}{R_A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$W = \left(\frac{0.26 \text{ m}^2}{1.86} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$W = 0.37 \text{ m}$$

Donde:

$R_A = 1.86$; Proporción L/W.

- L: largo de la celda; se calcula a partir de la expresión: $A_s = L W$

$$L = \frac{A_s}{W}$$

$$L = \frac{0.26 \text{ m}^2}{0.37 \text{ m}}$$

$$L = 0.69 \text{ m}$$

- t: tiempo de retención hidráulica; de acuerdo con la ecuación (3).

$$t = \frac{L \cdot W \cdot h \cdot \eta}{Q}$$

$$t = \frac{0.69 \text{ m} \times 0.37 \text{ m} \times 0.27 \text{ m} \times 0.32}{0.0128 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}$$

$$t = 1.72 \text{ d}$$

En las tablas 4 y 5, se muestran los resultados del diseño general de la celda piloto del humedal artificial y las características detalladas de los componentes del sistema.

Tabla 4. Resultados de los parámetros de diseño

Parámetros de diseño	Unidad	Valor
DBO ₅ en el afluente doméstico (ingreso)	mg/L	420 °
DBO ₅ en el efluente Esperado (LMP)	mg/L	100 °
Caudal	m ³ /d	0.0128 °
Área Superficial	m ²	0.26 *
Largo	m	0.69 *
Ancho	m	0.37 *

Altura del Medio Filtrante	m	0.27 ⁺
Profundidad de la vegetación	m	0.15 ⁺
Profundidad del agua	m	0.22 ⁺
Tiempo de Retención Hidráulico	d	1.72 [*]

Tabla 5. Resultados de las características de diseño

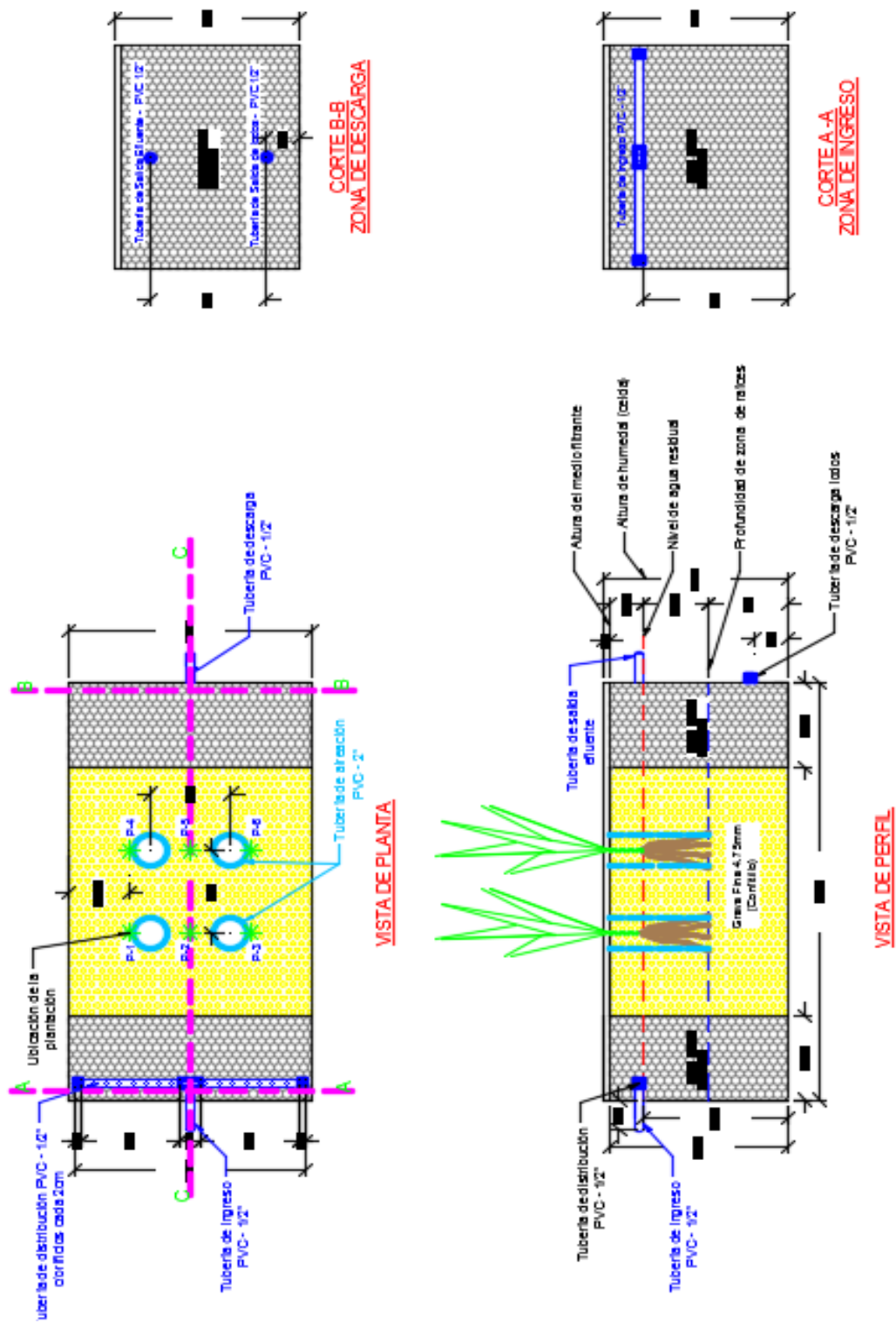
Características de Diseño	Unidad	Valor
Vegetación: <i>Typha angustifolia</i>	Totoras	6 ⁺
Grava de Ingreso y Salida	mm	15.90 ⁺
Grava del Medio (Confitillo)	mm	3.55 - 5.55 ⁺
Pendiente de la celda	%	1.0 ⁺
Tubería de Ingreso y Salida	pulgadas	1/2 (con reducción a 1/4) ⁺
Tubería de Drenaje	pulgadas	1/2 ⁺

Leyenda

- ° : Datos de Partida
- * : Datos Calculados
- + : Datos Determinados

En la figura 3, se presentan los resultados de la simulación de las dimensiones de la celda piloto del humedal artificial en AUTOCAD, también se incluyen las medidas de los accesorios para su construcción.

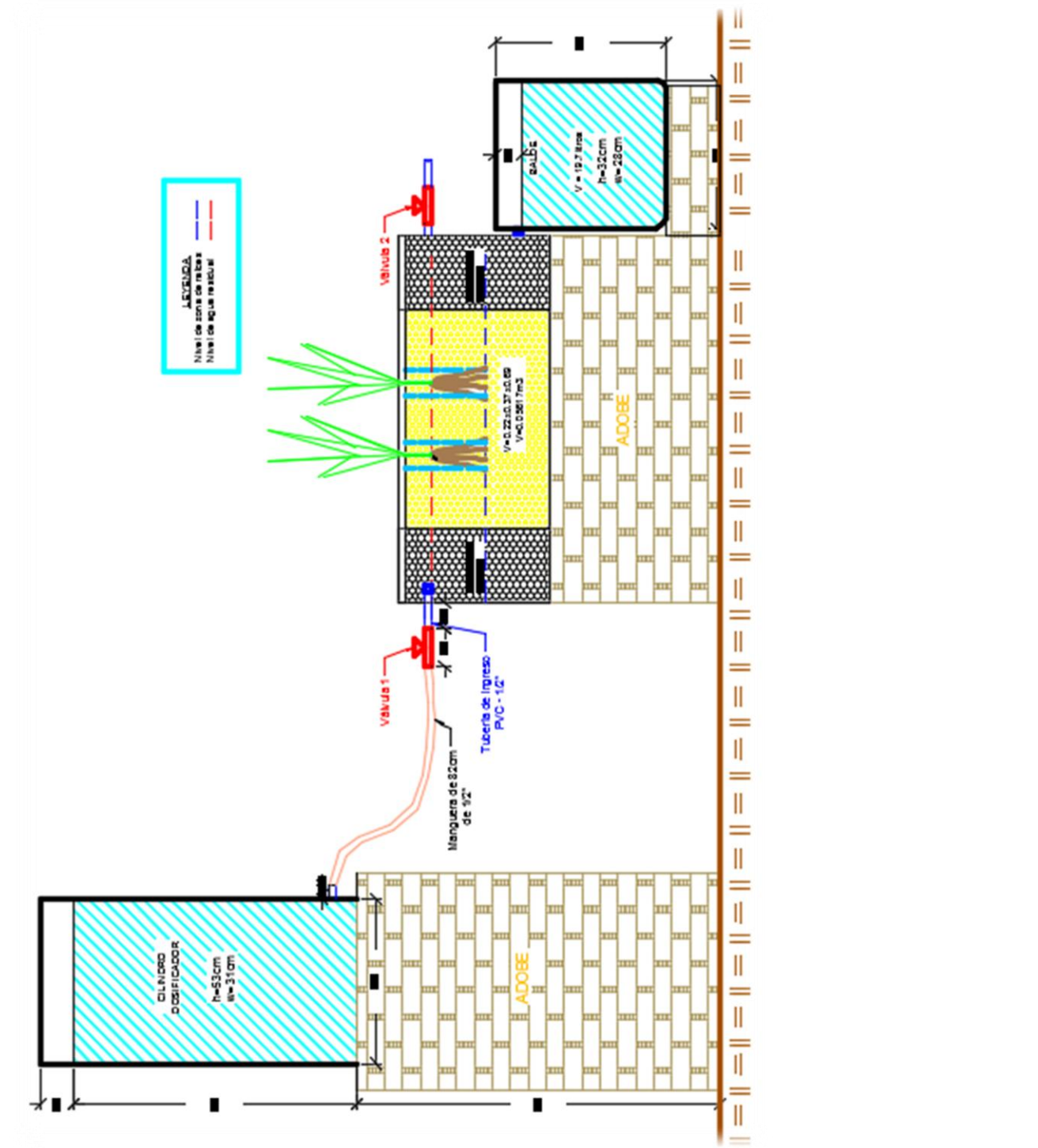
Figura 3. Plano de Celda del Humedal Artificial



3) Construcción y operación del humedal artificial

En un comienzo, el sistema de humedal artificial fue simulado en base a los datos expuestos en las tablas 4 y 5. Los resultados se muestran en la figura 4.

Figura 4. Plano de Celda del Humedal Artificial de FSS Piloto – Vista Lateral



Con los resultados de la simulación se procedió a la construcción del humedal artificial. De esta manera se detalla en las figuras 5, 6 y 7 la construcción de la celda, iniciando con la colocación de las tuberías, luego la distribución de la grava fina y gruesa (previa separación por tamizado entre 15.9 mm para el ingreso/salida, y de 3.55 a 5.55 mm para la zona de fitorremediación) y, finalmente, la trasplantación de totoral y el acondicionamiento del sistema de aireación.

Figura 5. Armado y colocación de tuberías.



Figura 6. Agregado del material grueso



Figura 7. Puesta en operación del sistema humedal artificial piloto



Antes de la puesta en marcha definitiva del humedal artificial, se verificó el proceso de adaptación de las plántulas al nuevo lecho de plantación con las aguas residuales, tal como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Puesta en operación del sistema de humedal artificial piloto



4) Monitoreo del efluente de aguas residuales domésticas

Una vez asegurada la adaptación y desarrollo de las plantas de totora, se procedió a tomar las muestras de agua residual en la salida del humedal piloto, según se indica en la figura 9.

Figura 9. Recepción de la muestra de salida del humedal artificial



Como evidencia concreta del resultado obtenido en el tratamiento del agua residual, en la figura 10, se visualiza claramente la diferencia de color del agua residual de ingreso al humedal artificial (agua residual de color turbio verdoso) con el efluente de salida del humedal artificial (agua residual de color amarillo ligero transparente).

Figura 10. Comparación del afluente y efluente del humedal artificial.



Los resultados del monitoreo semanal/mensual se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del monitoreo semanal/mensual del efluente del humedal artificial con respecto al DBO_5

Mes	Nº Semana	Fecha	EH – DBO_5 (mg/L)
Septiembre	1	07/ 09/2016	27.60
	2	14/ 09/2016	29.04
	3	21/ 09/2016	24.75
	4	28/ 09/2016	25.02
Octubre	5	05/ 10/2016	29.85
	6	12/ 10/2016	27.30
	7	19/ 10/2016	30.48
	8	26/ 10/2016	22.20
Noviembre	9	02/ 11/2016	23.15
	10	09/ 11/2016	24.18
	11	16/ 11/2016	32.40
	12	23/ 11/2016	25.67
Diciembre	13	01/ 12/2016	26.41
	14	07/ 12/2016	27.24
	15	15/ 12/2016	27.69
	16	22/ 12/2016	27.97
Promedio EH:			26.93

Según los hallazgos del seguimiento del efluente del humedal artificial, se observa que la concentración promedio de DBO_5 durante los cuatro meses es de 26.93 mg/L. La disminución más significativa se observó en noviembre con 26.35 mg/L, mientras que la concentración más elevada se registró en octubre con 27.6 mg/L [2].

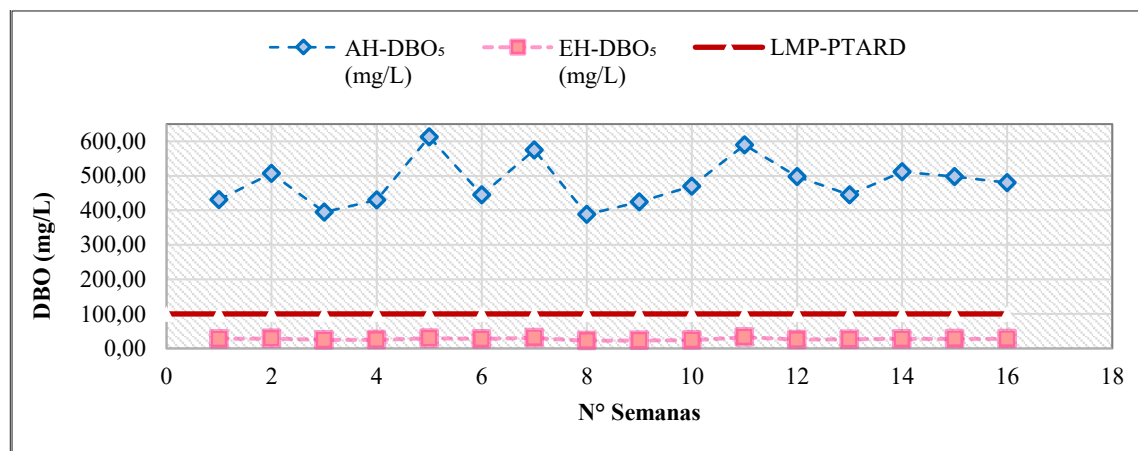
En la tabla 5, los resultados comparativos de la concentración de DBO₅ en la entrada (afluente: AH) y salida (efluente: EH) del humedal artificial piloto se presentan en la tabla 5. Estos hallazgos indican que en el punto de entrada, la concentración de DBO₅ supera los 400 mg/L, mientras que en el humedal piloto, los valores de DBO₅ son considerablemente inferiores al nivel máximo permitido de 100 mg/L. Adicionalmente, se establece que el promedio de eficiencia alcanzado es del 94.4%, con un máximo de 94.7% en el mes de septiembre y un mínimo de 93.3% en octubre.

Tabla 7. Resultados de la concentración de DBO₅ del afluente y efluente del humedal artificial

Nº Semana	AH-DBO ₅ (mg/L)	EH-DBO ₅ (mg/L)	%E
1	431.00	27.60	93.6%
2	507.00	29.04	94.3%
3	395.00	24.75	93.7%
4	430.00	25.02	94.2%
5	613.00	29.85	95.1%
6	445.00	27.30	93.9%
7	575.00	30.48	94.7%
8	388.00	22.20	94.3%
9	425.00	23.15	94.6%
10	470.00	24.18	94.9%
11	590.00	32.40	94.5%
12	498.25	25.67	94.8%
13	445.00	26.41	94.1%
14	512.00	27.24	94.7%
15	498.00	27.69	94.4%
16	480.00	27.97	94.2%
Promedio:	481.39	26.93	94.4%

En la figura 11 se grafican los valores de la concentración de DBO_5 del ingreso y salida del humedal artificial e comparación con el límite máximo permisible de 100 mg/L.

Figura 11. Concentración de DBO_5 en el afluente y efluente del humedal artificial



6. Discusión de resultados

El seguimiento de la concentración de DBO_5 a lo largo de cuatro meses consecutivos reveló valores de alta variabilidad e inestabilidad, aproximadamente de 430 mg/L. Esta situación se atribuye a las fluctuaciones de la carga orgánica en el agua residual doméstica que se descarga en la laguna de oxidación.

El seguimiento de la concentración de DBO_5 durante cuatro meses consecutivos de funcionamiento del humedal artificial registró valores en la descarga con una variabilidad mínima aproximada de 26 mg/L. Esto evidencia que la técnica de fitorremediación del humedal artificial exhibe una estabilidad en términos de su eficacia en la depuración del agua residual doméstica.

Durante el periodo de cuatro meses, las concentraciones medias de DBO_5 en la alimentación y descarga del humedal artificial se mantuvieron constantes en 481.39 mg/L y 26.93 mg/L, respectivamente.

Según los promedio de la concentración de DBO_5 en los puntos de alimentación y descarga, el humedal artificial resulta en una disminución de la carga orgánica del agua residual doméstica de 454.46 mg/L, lo que indica una eficiencia del 94.40 %.

El análisis estadístico realizado para la concentración de DBO_5 durante un período de cuatro meses de operación continua del humedal artificial evidencia la estabilidad y eficacia de su funcionamiento, proporcionando un valor del estadístico de contraste $F = 0.129$, que es

considerablemente inferior al valor crítico al 95% de confianza $F_{0.05, 3, 12} = 3.49$. Además, la probabilidad asociada $p = 0.941$ corrobora la conclusión de que los resultados obtenidos exhiben una baja variabilidad, lo que se traduce en una alta estabilidad.

7. Conclusiones

1. Para una concentración inicial de DBO_5 en 420 mg/L los parámetros de construcción del humedal artificial son: $Q = 12.8$ L/día, $t = 1.72$ día y Eficiencia Esperada = 76.19 %.
2. Las dimensiones del humedal artificial establecidas de acuerdo con los parámetros de construcción son: longitud = 0.69 m, ancho = 0.37m y altura = 0.28 m (menor a 0.40 m que es la altura máxima recomendada para humedales).
3. El humedal artificial permitió reducir el nivel elevado de DBO_5 de los efluentes de la laguna de oxidación, de un promedio de 431.39 mg/L hasta 26.93 mg/ L de DBO_5 en la salida.
4. La eficiencia promedio obtenida en el humedal artificial fue de 94.4 %, resultado superior a la eficiencia esperada de 76.19 % en el diseño.

Referencias bibliográficas

- [1] J. Nesburgo, *Día Agua*, Agencia EFEverde, 2017.
- [2] J. Quispe Alarcón, *Tratamiento secundario de los efluentes domésticos empleando el sistema de humedal artificial en el cercado de Ica- Angostura Limón, Ica, 2017*. Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Tesis de grado, Ica, Perú, 2017.
- [3] C. E. Espinoza Ortiz, *Factibilidad de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes*, Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., 2014.
- [4] P. Andreo Martínez, *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas*, Tesis doctoral, Universidad de Murcia, Murcia, España, 2014.
- [5] O. Gonzáles Díaz y G. Deas Valdés, *Metodología para el diseño de humedales de flujo subsuperficial*, Estudio técnico, CIH-CUJAE y CIX Ingeniería Hidráulica y Ambiental, La Habana, 2011.

- [6] M. F. Baca Neglia, *Tratamiento de los efluentes domésticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de San Juan de Marcona*, Tesis de maestría, Univ. Nacional del Callao, Callao, Perú, 2010.
- [7] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM: Límites máximos permisibles de los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR)*, Lima, Perú, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/1258084-ds-n-003-2010-minam>
- [8] A. Lara, *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*, Tesis de maestría, Instituto Catalán de Tecnología y Univ. Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1997–1998.
- [9] R. Kadlec y S. Knight, *Treatment Wetlands*, CRC Press, 1996. [En línea]. Disponible en: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_o.pdf
- [10] U.S. Environmental Protection Agency, *"Humedales de flujo subsuperficial"*, EPA 832-F-00-023, 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf?utm_source=chatgpt.com.

Capítulo VI

RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN

*Santos Humberto Olivera Machado, Ana María Jiménez Pasache, Joanna
Isabel Quispe Alarcón*

CAPÍTULO VI

RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN

En esta sección conclusiva del documento, se integran y analizan de manera detallada los hallazgos más relevantes obtenidos a partir del estudio comparativo de las tres técnicas de fitorremediación aplicadas al tratamiento de aguas residuales domésticas. Cada una de estas alternativas demuestra que la selección de la especie vegetal es un factor determinante en la eficacia del proceso, ya que las particularidades biológicas de cada planta —como su capacidad de absorción de nutrientes, tolerancia a contaminantes y metabolismo— influyen directamente en los parámetros de operación y diseño del sistema de humedal construido. Estas diferencias se reflejan en aspectos como el tiempo de retención hidráulica, la necesidad de sustratos específicos y la eficiencia en la remoción de contaminantes.

Uno de los aspectos más significativos de este estudio radica en el análisis de la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), un indicador clave para evaluar la reducción de materia orgánica en el agua tratada. Los resultados demuestran que, a pesar de las variaciones entre los métodos, todos logran una eficiencia considerable en la disminución de este parámetro, lo que refuerza la viabilidad de la fitorremediación como una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. Asimismo, se destaca que el agua obtenida cumple con los límites permisibles de carga contaminante, lo que permite su reutilización segura en actividades como el riego agrícola de distintos tipos de cultivos —incluyendo aquellos de consumo humano— así como en el mantenimiento de áreas verdes urbanas, como parques y jardines.

Además, este proceso no solo contribuye a la descontaminación del agua, sino que también genera beneficios ambientales adicionales, como la creación de hábitats para la biodiversidad y la integración de sistemas naturales en entornos urbanos. En conclusión, la fitorremediación se consolida como una tecnología prometedora, combinando eficiencia técnica, sostenibilidad ecológica y aplicabilidad práctica en el manejo de aguas residuales domésticas. Los hallazgos fundamentales de cada una de las alternativas de fitorremediación del agua residual doméstica se presentan a continuación:

Alternativa 1:

TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON *Eichhornia Crassipes* (JACINTO DE AGUA)

Tabla 1 Resultados de los parámetros del sistema de fitorremediación con *Eichhornia Crassipes*

Parámetro	Valores
pH	7.57 hasta 7.92
Sólidos suspendidos totales (SST)	56.11%
Tiempo de retención hidráulica	18 días
Temperatura	Máximo rendimiento: día 14
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	23.73 °C (Promedio)
Altura Efectiva	90.20% de remoción
	0.9 m de agua residual

Alternativa 2:

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE *Lemna minnor*

Tabla 2 Resultados iniciales y finales del tratamiento mediante *Lemna Minnor*

Tratamiento	t (días)	pH (unidad de pH)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	OD (mg DO/L)	DBO ₅ (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
Lemna Minnor	0	7.29	1824	0.18	248	58.148	9.649
Lemna Minnor	30	6.73	1734	0.87	78.5	0.564	2.191

Alternativa 3:

TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN USANDO TOTORALES (*Typha angustifolia*)

Tabla 3 Parámetros de diseño y construcción del humedal artificial con *Typha angustifolia*

Parámetro	valor	Unidad de medida
Caudal	12.8	L/día
Tiempo de retención	1.72	Día
Eficiencia esperada	76.19	%
Longitud	0.69	M
Ancho	0.37	M
Altura	0.28	M
DBO ₅	400	mg/L

Finalmente, los resultados de DBO₅ y eficiencia del proceso, que se presentan a continuación, son los elementos de prueba de la efectividad de cada uno de los métodos expuestos en el tratamiento del agua residual doméstica por fitorremediación.

Tabla 4 Resultados generales del TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON *Eichhornia Crassipes* (jacinto de agua)

Característica	Valores
Sólidos suspendidos totales (SST)	56.11%
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	90.20% de remoción

Tabla 5 Resultados generales del ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE *Lemna minnor*

Tratamiento	t (días)	pH (unidad de pH)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	OD (mg DO/L)	DBO ₅ (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
Lemna Minnor	15.00	7.09	1635.00	0.57	148.95	18.58	5.30

Tabla 6 Resultados generales del TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS POR FITORREMEDIACIÓN USANDO TOTORALES (*Typha angustifolia*)

Características del agua residual	valor	Unidad de medida
DBO ₅ en la entrada	431.39	mg/L
DBO ₅ en la salida	26.93	mg/L
Eficiencia	94.4	%

AUTORES

DRA. ANA MARÍA JIMÉNEZ PASACHE



La Dra. Ana María Jiménez Pasache, es Ingeniero Químico, egresada de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", Magister en Educación con mención en Administración y Planificación de la Educación Superior y Doctora en Gestión Ambiental. Se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la UNICA, habiendo ocupando cargos de Directora de Escuela de Ingeniería Química, Directora de la Escuela de Posgrado de la UNICA, Vice Rectora Académica y de Investigación de la Universidad Privada de Ica, entre otros. Realiza asesoría de Tesis de Pregrado y ha desarrollado trabajos de investigación: "El reciclaje una alternativa para el desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente" "Recuperación de proteínas del agua de cola por evaporación de múltiple efecto, para mejorar la calidad de la harina de pescado", "Impacto de la Contaminación Acústica en la Población Urbana y su Control", entre otros.

DR. SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO



Santos Humberto Olivera Machado es ingeniero químico, egresado de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Perú, con Maestría en Administración y Planificación en Educación Superior y Doctorado en Educación. Tiene amplia experiencia en evaluación y análisis estadístico de procesos, diseño de experimentos y en metodología de la investigación científica. Es investigador de procesos y operaciones de ingeniería química; asesor de tesis de pregrado y de posgrado. Actualmente es profesor universitario y con 35 años de labor docente.

DRA. LESLIE MARIELY FELICES VIZARRETA



La Dra. Leslie Marielly Felices Vizarreta es Ingeniero Químico de profesión egresada de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Realizó estudios de maestría y doctorado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Docente principal de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Magister en Educación con mención en Administración y Planificación de la Educación Superior otorgada por la UNICA y Doctora en Ciencias Químicas.

Docente de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la UNICA ocupando cargos como Directora de Escuela de Pos Grado, entre otros. Integrante del Consejo de Facultad de la FIQYP.

MAG. ING. FELIPE ESTUARDO YARASCA ARCOS



El Magister Felipe Estuardo Yarasca Arcos, es Ingeniero Químico, egresado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", Magister en Ingeniería Química con mención en Procesos Químicos y Ambientales.

Título de Segunda especialidad en Ingeniería de Seguridad e Higiene Industrial.

Estudios concluidos del Doctorado en Gestión Ambiental.

Además, ha cursado la Maestría en Ingeniería de Procesos en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Maestría en Investigación y Docencia Universitaria en la Universidad Inca Garcilaso De la Vega (UIGV)

Se ha desempeñado como docente en la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la UNICA, ocupando diversos cargos en la Escuela de Ingeniería Química, Director de la Oficina General de Tecnologías de la Información (TIC), Director del Centro de Computo, Director del Centro de Idiomas, Director de la Oficina General de Proyección Social y Extensión Cultural, entre otros cargos en la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga".

Se ha desempeñado como Asesor de Tesis y desarrollados trabajos de investigación en las siguientes áreas: "Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales", "Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas", "Industria pisquera", entre otros.

MAG. MARÍA ELIZABETH FUENTES CAMPOS



La Magister María Elizabeth Fuentes Campos, Bachiller en Ingeniería Química por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Magister Scientae en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional Agraria La Molina y estudios de doctorado en Ingeniería Química por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Su área de Investigación es bioenergía y biorrefinerías, así como en procesos de extracción verde de compuestos con actividad biológica y su aplicación.

MAG. CYNTHIA VICTORIA BENDEZÚ HERNÁNDEZ



Máster en Procesos Químicos y Ambientales| Doctorando en la UNALM en Ingeniería

Docente en la Facultad de Ingeniería de Química y petroquímica de la UNICA. Docente en la Facultad de ambiental y sanitaria de la UNICA, con sólida experiencia en investigación y generación de conocimiento científico. Entrenadora en Transversalización de AbE para la planificación de desarrollo del MEF. Especialista en saneamiento ambiental, tratamiento y calidad del agua, gestión de recursos hídricos, ecohidrología, ecosistemas y medios de vida. Con participación en proyectos de energías renovables en colaboración con colegas de la UNALM, valorización de residuos peligrosos y modelamiento con drones. Ponente en congresos internacionales relacionados con recursos hídricos y autora de artículos científicos sobre contaminación atmosférica en México, fitorremediación con plantas nativas. Especialista en el uso de software de modelamiento hidrológico y atmosférico. Amplia experiencia en software estadístico y de análisis de datos utilizando las herramientas R.Studio, Minitab, SPSS, entre otros. Actualmente, egresada del Doctorado en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

ING. JOANNA ISABEL QUISPE ALARCÓN



Ing. Joanna Isabel Quispe Alarcón, es Ingeniero Químico, egresada de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", con estudios de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Universidad Nacional del Callao; con más de 7 años de experiencia en Laboratorios de alimentos, análisis de aguas, y experiencia en plantas industriales, con destacado conocimiento en el tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales. Actualmente, se desempeña como laboratorista, asistente de docentes y función en la gestión de calidad educativa en los laboratorios de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, entre otras funciones. Ha realizado una de las primeras investigaciones en el tratamiento de las aguas residuales domésticas usando humedales artificiales en la región de Ica.

DR. FELIPE RAFAEL VALLE DÍAZ



Econ. Felipe Rafael Valle Díaz, es Economista, egresado de la Facultad de Economía y Contabilidad de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" año 1996, con estudios de Maestría en la Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote año 2010 y Doctorado en Administración en la Universidad Alas Peruanas año 2016; con más de 16 años de experiencia en la docencia universitaria. Coordinador del Grupo de Investigación "QAPPRE" de la Universidad Nacional José María Arguedas. Investigador RENACYT "V" nivel con registro P0004520, con ORCID 0000-0003-0855-9688. Actualmente, se desempeña como docente en el Departamento Académico de Ciencias Empresariales de la Facultad de Ciencias de la Empresa. La experiencia académica, se ciñe a los cargos siguientes, escritos en orden descendente (actualidad hacia atrás): Miembro del Comité Electoral Universitario; Adjunto de presidencia de Comisión Organizadora en vicepresidente académico; Director de la Dirección de Calidad Educativa; Director del Centro de Idiomas en dos periodos; Miembro del Tribunal de Honor en cuatro periodos; Coordinador de Facultad Ciencias de la Empresa, Director del Instituto de Investigación, etc. A junio 2025, responsable y en proceso de proyecto de investigación, cuyo propósito es recuperar todo el sistema y cultura del camino de arriero colonial-republicano como oportunidad sostenible del Desarrollo Económico Local en los distritos de Pampachiri y Pomacocha de la provincia de Andahuaylas, región Apurímac, sumado a la edición de dos libros de investigación sobre este proyecto de investigación. Asesor de tesis y jurado evaluador de tesis ubicadas en el Repositorio UNAJMA reconocidos por CONCYTEC.

FITORREMEDIACIÓN DE EFLUENTES DOMÉSTICOS EN LA REGIÓN ICA

ANA MARÍA JIMÉNEZ PASACHE

SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO

LESLIE MARIELLY FELICES VIZARRETA

FELIPE ESTUARDO YARASCA ARCOS

MARÍA ELIZABETH FUENTES CAMPOS

CYNTHIA VICTORIA BENDEZÚ HERNÁNDEZ

JOANNA ISABEL QUISPE ALARCÓN

FELIPE RAFAEL VALLE DÍAZ

EDITORIAL

CICI

CENTRO DE INVESTIGACIONES
Y CAPACITACIONES
INTERDISCIPLINARES

ISBN 978-628-97217-3-7