

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**



**“APLICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS COMO
SISTEMA DE TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO PARA
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PERÚ”**

Presentada por:

FIGUELA VIRGINIA SALAZAR TORREBLANCA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES**












Lima - Perú

2023

Document Information

Analyzed document	Tesis FIORELA SALAZAR.docx (D154714212)
Submitted	1/1/2023 11:31:00 PM
Submitted by	Rosa Maria Miglio Toledo
Submitter email	rmiglio@lamolina.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	rmiglio.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://datass.vivienda.gob.pe/ Fetched: 1/1/2023 11:31:00 PM	 3
SA	Bayona-Alvarado-Huayhua-TESIS-EVALUACION DE LOS COMPONENTES DE OPERACION DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL DISTRITO DE INDEPENDENCIA LIMA 2022.pdf Document Bayona-Alvarado-Huayhua-TESIS-EVALUACION DE LOS COMPONENTES DE OPERACION DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL DISTRITO DE INDEPENDENCIA LIMA 2022.pdf (D141800089)	 8
SA	EXAMENFINAL_DIANAMIRANDA.docx Document EXAMENFINAL_DIANAMIRANDA.docx (D121226230)	 2
SA	Gonzales_U_Molina_L_T2.docx Document Gonzales_U_Molina_L_T2.docx (D114733713)	 2
SA	Ismael_Leonardo_Vera_Puerto (cod.4204).pdf Document Ismael_Leonardo_Vera_Puerto (cod.4204).pdf (D77760127)	 7
SA	11_Jahaira Vitor.docx Document 11_Jahaira Vitor.docx (D141613352)	 3
SA	2_Cristina y Alanis R.S.docx Document 2_Cristina y Alanis R.S.docx (D141246733)	 4
SA	EF_Proyecto de Tesis_Diana Miranda.docx Document EF_Proyecto de Tesis_Diana Miranda.docx (D110532455)	 2
SA	Gonzales_U_Molina_L_T3_RS.docx Document Gonzales_U_Molina_L_T3_RS.docx (D110093863)	 4
SA	Benites_M_Quispe_C_EF_REVISION_SISTEMATICA.docx Document Benites_M_Quispe_C_EF_REVISION_SISTEMATICA.docx (D141808942)	 2
SA	Torres_E_T2.docx Document Torres_E_T2.docx (D114737453)	 5

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**“APLICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS COMO
SISTEMA DE TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO PARA
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

IORELA VIRGINIA SALAZAR TORREBLANCA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Juan Carlos Palma
PRESIDENTE

Mg.Sc. Rosa Miglio Toledo
ASESOR

Dra. Rosemary Vela Cardich
MIEMBRO

Lic. Rer.Reg. Víctor Aguilar Vidangos
MIEMBRO

*“A veces sentimos que lo que hacemos es tan solo una gota en el mar,
pero el mar sería menos si le faltara esa gota”*

- Madre Teresa de Calcuta

DEDICATORIA

A Dios por su divina misericordia y maravilloso amor...

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco de manera especial a la Mg. Sc. Rosa Miglio Toledo por la oportunidad de desarrollar esta tesis e integrarme al proyecto “The constructed wetlands knowledge platform for sustainable development (CWetlandsData)” junto a todas las enseñanzas, tiempo y detalles compartidos conmigo.

A los demás miembros del equipo del proyecto, Dra Vela, Giovanna y Diego por apoyarme en todo momento con consejos y permitirme conocerlos más allá que el medio académico.

Agradecer también al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica y ERANet LAC por el financiamiento recibido para el desarrollo de la tesis.

A mi colega y asesor estadístico, Juan Carlos, a quien también tengo la fortuna de llamarle “amigo”, por acompañarme desde el inicio aprendiendo juntos hasta lograr encaminar la investigación.

A mi hermano Víctor y mejores amigas Karen y Lisset, por estar siempre pendientes de mí pese a la distancia y alentarme a no desistir.

A mis padres Virginia y Alfonso, por su apoyo incondicional y ejemplo de perseverancia que me motivan a seguir avanzando para cumplir mis metas.

Por último, a mi esposo Rafael, por ayudarme a confiar más en mí y ser una mejor versión superando los momentos difíciles.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1.	HUMEDALES CONSTRUIDOS	5
2.1.1.	Componentes de los humedales construidos	5
2.1.2.	Clasificación de humedales	7
2.1.3.	Criterios de diseño.....	11
2.1.4.	Criterios de operación	14
2.2.	PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	15
2.2.1.	Demanda química de oxígeno	15
2.2.2.	Nitrógeno total.....	16
3.2.1.	Fósforo total	17
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.2.	MÉTODOS	18
3.2.1.	Sistematización de información sobre la aplicación de humedales construidos .	18
3.2.2.	Identificación de variables en el rendimiento de los humedales construidos.....	24
3.2.3.	Evaluación de factores en la aplicación de humedales construidos en el Perú ...	27
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1.	SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN	28
4.1.1.	Búsqueda de los estudios.....	28
4.1.2.	Selección de estudios	28
4.1.3.	Análisis de experiencias	30
4.2.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES EN EL RENDIMIENTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS.....	46
4.2.1.	Evaluación de calidad de las experiencias	46
4.2.2.	Análisis de las eficiencias de remoción.....	47
4.2.3.	Variables en el rendimiento de los humedales construidos.....	55
4.3.	EVALUACIÓN DE LOS FACTORES EN LA APLICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN PERÚ	63
4.3.1.	Factores legales	64
4.3.2.	Factores técnicos	77
4.3.3.	Factores socioambientales.....	88
V.	CONCLUSIONES	94
VI.	RECOMENDACIONES	96
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
VIII.	ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Área requerida que depende de las condiciones climáticas para HC- FSS para aguas residuales pretratadas	13
Tabla 2: Definición de los componentes de la pregunta primaria de la revisión sistemática.....	19
Tabla 3: Fuentes para la búsqueda de estudios.....	19
Tabla 4: Definición Descripción de las escalas de los humedales construidos	21
Tabla 5: Criterios de calidad y requisitos para su cumplimiento	24
Tabla 6: Categorías de calidad y criterios de asignación	25
Tabla 7: Resultados de la búsqueda de estudios.....	28
Tabla 8: Resultados de la selección de estudios por base de datos	29
Tabla 9: Clases de humedales construidos identificadas en la región de ALC	34
Tabla 10: Principales especies de macrófitas empleadas en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas	41
Tabla 11: Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales construidos en América Latina y el Caribe	43
Tabla 12: Resultados de la evaluación de calidad de las experiencias.....	47
Tabla 13: Remoción de materia orgánica y nutrientes por clase de humedal construido en la región ALC.....	54
Tabla 14: Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR.....	66
Tabla 15: Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura.....	67
Tabla 16: Especies reportadas en humedales construidos de Perú para tratamiento de agua residual doméstica.....	83
Tabla 17: Clasificación climática de las experiencias de humedales construidos en Perú para tratamiento de agua residual doméstica	89
Tabla 18: Remoción de materia orgánica por humedales construidos en Perú según grupo climático.....	91
Tabla 19: Artículos seleccionados para cada país con las referencias correspondientes	139
Tabla 20: Experiencias de humedales construidos analizadas en América Latina y el Caribe para el tratamiento de aguas residuales domésticas	142
Tabla 21: Remoción de materia orgánica y nutrientes en las experiencias de humedales construidos seleccionadas	152
Tabla 22: Características de las experiencias de humedales construidos en Perú para el tratamiento de aguas residuales domésticas	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los humedales construidos según la etapa de tratamiento del agua residual	8
Figura 2: Humedales construidos de flujo superficial (HC-FS).....	9
Figura 3: Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (HC-FSS-V).....	9
Figura 4: Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSS-H)	10
Figura 5: Humedales construidos del sistema francés (HC-Fr)	11
Figura 6: Número de artículos seleccionados por país de ALC.....	29
Figura 7: Ubicación de las experiencias con humedales construidos encontradas en Latinoamérica y el Caribe	31
Figura 8: Configuraciones de sistemas para el tratamiento del agua residual doméstica con humedales construidos en ALC.....	44
Figura 9: Número de experiencias por tipo de sistema con humedales construidos para el tratamiento del agua residual doméstica en Latinoamérica y el Caribe	45
Figura 10: Distribución acumulada de la concentración de DQO en el afluente (a) y efluente (b) de las experiencias de HC en la región de ALC.....	48
Figura 11: Eficiencia de remoción de DQO según tipo de humedal construido	50
Figura 12: Distribución acumulada de la concentración de NT en el afluente (a) y efluente (b) en las experiencias de HC encontrados en la región ALC	51
Figura 13: Eficiencia de remoción del nitrógeno total según tipo de humedal construido	52
Figura 14: Distribución acumulada de la concentración de PT en el afluente (a) y efluente (b) en las experiencias de HC identificados en la región ALC.....	53
Figura 15: Eficiencia de remoción del fósforo total según tipo de humedal construido	54
Figura 16: Diagrama de bosque que muestra el tamaño del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de DQO para humedales construidos en la región de ALC.....	56
Figura 17: Diagrama de bosque que muestra el tamaño del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de NT para humedales construidos en la región de ALC.....	57
Figura 18: Diagrama de bosque que muestra el tamaño del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de PT para humedales construidos en la región de ALC.....	58
Figura 19: Resumen del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de a) DQO, b) NT y c) PT para subgrupos según el grupo climático	60

Figura 20: Resumen del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de a) DQO, b) NT y c) PT para subgrupos según el tipo de humedal.....	61
Figura 21: Resumen del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de a) DQO, b) NT y c) PT para subgrupos según el origen de la macrófita	62
Figura 22: Actores y funciones principales para la prestación de servicio de saneamiento en el Perú	71
Figura 23: Proceso de certificación ambiental para proyectos de saneamiento en el Perú	75
Figura 24: Distribución de los sistemas de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales del CEMTRAR de la UNALM	85
Figura 25: Ubicación de los casos de humedales construidos para el tratamiento de agua residual doméstica en Perú según tipo de clima	90

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la selección de artículos para cada país.....	139
Anexo 2. Resultados del análisis y evaluación de calidad de las experiencias de humedales construidos en América Latina y el Caribe para el tratamiento de aguas residuales domésticas	142
Anexo 3. Datos extraídos para el análisis de la remoción de materia orgánica y nutrientes de las experiencias en categoría 2 y 3.....	152
Anexo 4. Resultados de la búsqueda de experiencias de humedales construidos en Perú para el tratamiento de aguas residuales domésticas.....	158

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo de evaluar el potencial de los humedales construidos para el tratamiento de agua residual doméstica en el Perú. Se realizó una revisión sistemática de literatura sobre humedales construidos implementados en América Latina y el Caribe; que permitió seleccionar 170 artículos y analizar 359 experiencias desarrolladas en 16 países de la región. Entre las principales características recopiladas de las experiencias, se obtuvo que el sistema de tratamiento más utilizado está conformado por el “Tanque séptico y humedal construido” (35 por ciento), mientras que el humedal de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSS-H) es el tipo de humedal más estudiado (62 por ciento). Como resultado del meta-análisis, la media de la eficiencia de remoción de DQO es 70 por ciento con un intervalo de confianza entre 62 a 77 por ciento; mientras que las medias de remoción de NT y PT son alrededor del 40 por ciento. Posteriormente, del análisis por subgrupos, se ha identificado que el clima es una variable que podría afectar el rendimiento de los humedales construidos en la remoción de la materia orgánica, por lo que los humedales son más eficientes en climas ecuatoriales. Respecto al potencial de los humedales construidos en Perú, tenemos que existen figuras legales que fomentan el uso de tratamientos no convencionales; sin embargo, la falta de una norma técnica especializada no permite mayor difusión entre los prestadores del servicio de saneamiento. Además, los 51 casos de humedales construidos analizados en nuestro país, han demostrado disponibilidad de macrófitas en ecosistemas naturales y recurso humano capacitado, por lo que no son factores técnicos limitantes para esta tecnología. Por falta de estudios que abarquen diferentes periodos estacionales, no se logró evidenciar la influencia del clima en la eficiencia de los humedales construidos para la remoción de la materia orgánica en los casos peruanos.

Palabras claves: Revisión sistemática, humedales construidos, agua residual doméstica

ABSTRACT

This study aims to evaluate the potential of constructed wetlands as systems for domestic wastewater treatment in Peru. A systematic review of the literature on constructed wetlands in Latin America and the Caribbean was made, where it was possible to select 170 articles and analyze 359 experiences developed in 16 countries of the region. Among, the main characteristics collected from the experiences, it was obtained that the most used treatment system is formed by "Septic tank and constructed wetlands" (35 percent), while horizontal subsurface flow wetland is the most studied type (62 percent). In regards of the meta-analysis, the median COD removal efficiency is 70 percent, with a 95 percent confidence interval from 62 to 77 percent; while the median removal efficiency for both TN and TP were similar at 40 percent. Subsequently, from the subgroup analysis, it has been identified that climate is a variable that could affect the performance of constructed wetlands in the removal of organic matter, so they are more efficient in equatorial climates. Regarding the potential of constructed wetlands in Peru, there are legal figures that encourage the use of unconventional treatments; however, the lack of a technical standard specialized in constructed wetlands does not allow for greater dissemination among sanitation service providers. Fifty cases were analyzed in our country, that showed that the availability of macrophytes in natural ecosystems and trained human resources are not a technical factor that limits the application of this technology. Due to the lack of studies covering different seasonal periods, it was not possible to show the influence of climate on the efficiency of wetlands built for the removal of organic matter in peruvian cases.

Keywords: Systematic review, wetlands constructed, domestic wastewater

I. INTRODUCCIÓN

El diagnóstico del OMS¹ y UNICEF² (2016), da a conocer la cobertura de saneamiento mejorado en América Latina y el Caribe, la cual alcanza el 88 por ciento de la población en zonas urbanas; y el 64 por ciento en zonas rurales. Además, sólo el 41 por ciento del total de agua residual doméstica generada en la región de América Latina y el Caribe recibe tratamiento (UN-WATER 2020), por lo que se contaminan los cuerpos receptores y afectando la salud de la población. Por lo tanto, existe la necesidad de mejorar la calidad del agua disminuyendo la carga contaminante de las aguas residuales vertidas.

En Perú, de acuerdo a los censos nacionales del año 2017, la cobertura de saneamiento seguro alcanzó al 73.6 por ciento de la población; mientras que 7,537, 821 habitantes no cuentan con dicho servicio, de los cuales el 40.3 por ciento corresponde al ámbito urbano, y 59.7 por ciento al ámbito rural. Por lo tanto, aún para la eliminación de excretas se utilizan letrinas, pozos ciegos o la defecación al aire libre (INEI 2017).

Además, respecto al servicio de tratamiento del agua residual, la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento reportó que el 78.2 por ciento del volumen total de aguas residuales producidas en el 2019 llegó a recibir tratamiento; sin embargo, a nivel nacional 262,696,865 m³ fueron vertidos sin tratamiento; principalmente debido a que aún empresas prestadoras de 10 departamentos no realizan ningún tratamiento al agua residual presentando una brecha de cobertura entre 84 al 100 por ciento (OPMI 2022).

Frente a este escenario, existen dos modalidades de sistemas tratamientos, aquellos sistemas centralizados que consisten en plantas conectadas a extensas redes de tuberías que conducen el agua residual hacia infraestructuras complejas cuya operación demanda grandes cantidades de energía procedentes de combustibles fósiles y consumo permanente de insumos químicos, con la ventaja de presentar cortos tiempos de

¹ Organismo Mundial por la Salud (OMS)

² Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF)

retención hidráulico y requerir áreas menores de terreno. Por otro lado, tenemos los sistemas descentralizados ubicados cerca al lugar de origen de las aguas residuales que basan sus operaciones en procesos más sencillos, por lo que los costos de operación y mantenimiento son menores; sin embargo, requieren de mayor superficie de terreno. En tal sentido, según las características geográficas, demográficas, ambientales y sociales de cada territorio es necesario diferenciar entre los sistemas de tratamiento de las aguas residuales, para gestionar el saneamiento de forma adecuada.

Analizando mejor el contexto de la demanda de tratamiento para aguas residual en nuestro país, tenemos que existen 73,498 centros poblados rurales dispersos con menos de 200 habitantes junto a 11,640 centros poblados rurales concentrados con menos de 2,000 habitantes (Cabrera 2016); además, por la reducida densidad de población y particularidades de relieve de las localidades pequeñas se genera una alta tarifa del servicio con sistemas de saneamiento centralizados, por lo que la población, no puede cubrir los costes de este tipo de sistemas (FUNASA 2018). Por lo tanto, la cobertura de agua residual tratada en nuestro país se puede mejorar impulsando la implementación de sistemas descentralizados en estos territorios de baja densidad poblacional donde la disposición de terrenos no es un limitante. Además, los sistemas descentralizados permiten integrar el tratamiento de las aguas residuales al reúso de las mismas y la producción de subproductos de manera directa, lo que favorece su sostenibilidad económica y ambiental.

Es así que, ha aumentado la necesidad de nuevos sistemas de saneamiento descentralizados que atiendan las demandas en el lugar de origen para los diferentes escenarios existentes en zonas periurbanas y rurales para acercarnos a la universalización del saneamiento básico. Entre las tecnologías de tratamientos descentralizados, los humedales construidos son una alternativa altamente recomendable, porque eliminan los contaminantes del agua residual mediante la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos presentando bajos costos de operación y mantenimiento debido al mínimo consumo de energía e insumos químicos (Von Sperling y Sezerino 2018). Además, comparado con los tratamientos convencionales, los humedales construidos tienen un menor impacto visual, lo que permite su aplicación en zonas periurbanas, residenciales o rurales sin disminuir la belleza escénica del paisaje.

Sin embargo, aunque los humedales construidos llevan varias décadas depurando las aguas residuales domésticas e industriales en distintos países; la aplicación de esta tecnología en Latinoamérica y el Caribe sigue siendo poco difundida entre el sector empresarial dedicado al servicio de tratamiento de aguas residuales (Zurita *et al.* 2011); por lo tanto, el gran desafío que enfrentan la comunidad científica que estudia a los humedales construidos es propiciar el acercamiento de esta tecnología hacia los actores claves, entre las herramientas de difusión empleadas en la actualidad, tenemos las normas técnicas, bases de datos y las revisiones sistemáticas con la finalidad de difundir casos de éxito, criterios de diseño y construcción, datos técnicos para la operación y mantenimiento, así como la formación de redes de profesionales y empresas para intercambio de experiencias y nuevas tendencias.

En tal sentido, en la última década han sido reportados el estado del arte de los humedales construidos en países de América Latina y el Caribe. Así tenemos que Vera *et al.* (2016) indican un máximo de 10 plantas con humedales en zonas rurales de Chile, mientras que, Machado *et al.* (2016) reportaron 60 humedales para Brasil y la CONAGUA (2020), en su inventario de plantas de tratamiento de tratamiento identificó 230 humedales construidos. A nivel de región, Rodríguez *et al.* (2020) han realizado un informe bibliométrico sobre la aplicación de los humedales construidos en América Latina y el Caribe, registrando 520 experiencias en 20 países y analizaron el desempeño de los mismos en el tratamiento de diferentes tipos de efluentes, resultando la remoción de DQO entre 65 a 83 por ciento, remoción de nitrógeno total entre 55 a 72 por ciento y remoción de fósforo total entre 30 a 84 por ciento, respectivamente. Siendo estos estudios un valioso aporte sobre el rendimiento de los humedales construidos; sin embargo, como abarcan diferentes tipos de efluentes los resultados presentan gran variabilidad y no permiten conocer el rendimiento específico de estos sistemas para el tratamiento de agua residual doméstica, el cual es el tipo de efluente que se genera en mayores volúmenes y su manejo queda bajo la responsabilidad de las entidades gubernamentales en sus diferentes niveles.

Por lo tanto, la gran variación en las tasas de remoción de la materia orgánica y nutrientes origina una gran desventaja para generar lineamientos o criterios de diseño, construcción, operación y mantenimiento de los humedales construidos para el

tratamiento del agua residual doméstica en nuestro país; en tal sentido, se requiere conocer que tan eficiente es esta tecnología en la remoción de los principales contaminantes y las variables que pueden intervenir en la operación y mantenimiento, para brindar información a los actores responsables de la toma de decisiones y usuarios finales. Asimismo, teniendo en cuenta que el contexto gubernamental y normativo, el nivel técnico y económico, así como los factores socioambientales son diferentes en cada país, es necesario analizar cada uno de estos factores determinando las oportunidades y desafíos para la aplicación de esta tecnología como sistema descentralizado en nuestro país.

Objetivo principal

Evaluar el potencial de la aplicación de los humedales construidos como sistemas descentralizados para el tratamiento de agua residual doméstica en el Perú.

Objetivos específicos

Por lo que, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Sistematizar información sobre la aplicación de humedales construidos en América Latina y el Caribe, para determinar los tipos de sistemas de tratamiento para agua residual doméstica.
- Determinar las principales variables que afectan el rendimiento de los humedales construidos aplicados al tratamiento de agua residual doméstica.
- Analizar los factores legales, técnicos y socioambientales para determinar el potencial de aplicar los humedales construidos como sistemas descentralizados de tratamiento de agua residual doméstica en Perú.

Cabe resaltar, que el presente estudio contribuyó con la búsqueda de información técnica para la base de datos del proyecto “The constructed wetlands knowledge platform for sustainable development” (CWetlandsData) financiado por FONDECYT, el cual, tiene como objetivo implementar una plataforma virtual de acceso internacional sobre el diseño, operación y mantenimiento de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales a nivel mundial.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. HUMEDALES CONSTRUIDOS

2.1.1. Componentes de los humedales construidos

Los humedales construidos son sistemas de ingeniería que optimizan los procesos naturales de degradación de materia orgánica y reciclado de nutrientes que ocurre en un humedal natural, para el tratamiento de agua residuales tanto domésticas, como industriales.

En los humedales construidos, los principales componentes que permiten el tratamiento del agua residual son el material filtrante, las macrófitas y los microorganismos; los cuales permiten la remoción de los contaminantes por procesos físicos, químicos y biológicos.

a. Material filtrante

El material filtrante es el medio de soporte de las macrófitas y la superficie de adherencia de los microorganismos por biopelículas. Además, es el responsable del proceso de filtrado de los sólidos en suspensión (fenómeno físico) y está involucrado en el proceso de adsorción de los contaminantes sobre su superficie (fenómeno químico) (FUNASA 2018).

Idealmente, el material filtrante debe poseer una buena permeabilidad, así como presentar un buen potencial reactivo de adsorción. Sin embargo, la asociación de ambas características en un solo material, especialmente uno que sea accesible económicamente, no es sencillo. La elección del material depende de estos factores condicionada a la carga hidráulica y orgánica del efluente, así como la finalidad del tratamiento (Von Sperling y Sezerino 2018)

Los principales problemas en el tratamiento son causados debido a que la permeabilidad del sustrato es incorrecta para la carga orgánica del efluente. Comúnmente se recomienda seleccionar arena gruesa como sustrato para la filtración. Hoffmann *et al.* (2011) recomiendan que la arena tenga una capacidad hidráulica (valor k_f) aproximado de 3,1 a 4,1 m/s.

b. Macrófitas

Las macrófitas incluyen desde las plantas acuáticas vasculares (angiospermas, como *Typha* spp.), hasta algunas algas cuyos tejidos pueden identificarse claramente. En el tratamiento de aguas residuales por humedales construidos, las plantas tienen gran importancia en el correcto funcionamiento de la tecnología, ya que sus raíces permiten la aireación de la superficie, la adhesión de microorganismos y la remoción de nutrientes debido al requerimiento nutricional de las plantas. Al respecto, los estudios científicos demuestran que el 10 por ciento del nitrógeno total eliminado en los humedales construidos se da por la acción de fitoextracción de las macrófitas, también, se informa una capacidad de remoción de nitrógeno a través de la poda de 200 a 2500 kgN/ha.año (FUNASA 2018)

Teniendo en cuenta el carácter ecológico y de bajo costo de esa tecnología, para elegir la especie de vegetal, se considera la abundancia de las especies en la localidad, el costo del transporte y la poda regula. Así como, la adaptabilidad de la especie a ambientes inundados o secos y al contacto con concentraciones elevadas de materia orgánica, nutrientes u otros contaminantes específicos del efluente a tratar (Von Sperling y Sezerino, 2018).

A nivel global, se observan tres tipos de macrófitas más empleadas en los humedales construidos: *Phragmites australis* o popularmente conocida como caña o carrizo; *Typha* spp; y, *Juncus* spp llamados juncos. Todas son clasificadas como emergentes, con una tasa de crecimiento muy rápida a moderada, y densidad alta. Además, el embellecimiento del paisaje a través de los humedales construidos se ha visto impulsado recientemente con el uso de plantas ornamentales que tienen características decorativas como *Cyperus papyrus* (Papiro egipcio), *Cyperus albostratus* (Papiro paraguaita), especies de los géneros *Heliconia*, *Canna*, *Zantedeschia* y el bambú (Almuktar *et al.* 2018).

c. Microorganismos

Los microorganismos son los agentes principales en el tratamiento biológico del agua y lodo residual en los humedales construidos. Su accionar se basa en procesos de oxidación de los compuestos orgánicos; por lo que se requieren condiciones aerobias para transformar los compuestos carbonados a bicarbonato y dióxido de carbono, mientras que los compuestos nitrogenados (amoníaco) se oxidan a nitrito y luego a nitrato mediante la nitrificación. El nitrato es absorbido por las plantas; sin embargo, esta fitoextracción es limitada, por lo que la remoción del nitrógeno total sólo ocurre a través de la desnitrificación por parte de microorganismos anaerobios que reducen el nitrato a nitrógeno molecular, gas que se libera a la atmósfera junto a la reducción de sulfatos (FUNASA 2018).

La diversidad y abundancia de microorganismos en los humedales construidos es enorme, destacándose el grupo de bacterias y arqueas. Sidrach-Cardona *et al.* (2015), reportaron la caracterización de la comunidad microbiana de humedales construidos experimentales a través del análisis de bandas DGGE, encontrando altas diferencias entre las comunidades de los humedales con *Phragmites* frente al de *Typha*, por lo que se asume que las plantas tienen un efecto en la formación de los biofilms.

2.1.2. Clasificación de humedales

La literatura clasifica a los humedales construidos de acuerdo a los siguientes criterios:

- Forma de vida de las macrófitas dominantes (flotación libre, emergente, sumergida),
- Patrón de flujo en los sistemas de humedales (flujo de superficie de agua libre; flujo subsuperficial: horizontal y vertical),
- Tipo de configuración de las células del humedal (sistemas híbridos, una etapa, sistemas de etapas múltiples),
- Tipo de aguas residuales a tratar,
- Etapa de tratamiento de aguas residuales (primarias, secundarias o terciarias),
- Tipo de tratamiento previo,
- Estructuras influentes y efluentes,
- Tipo de sustrato (grava, suelo, arena, etc.), y

- Tipo de carga (carga continua o intermitente).

Entre los diversos criterios mencionados anteriormente, Miglio *et al.* (2008) plantearon la clasificación de los humedales construidos según la etapa del tratamiento de agua residual y tratamiento de lodos (Figura 1). Este nuevo enfoque ha permitido valorar a los humedales construidos del sistema francés, como una alternativa que no requiere de pretratamientos ni tratamientos complementarios para los lodos.

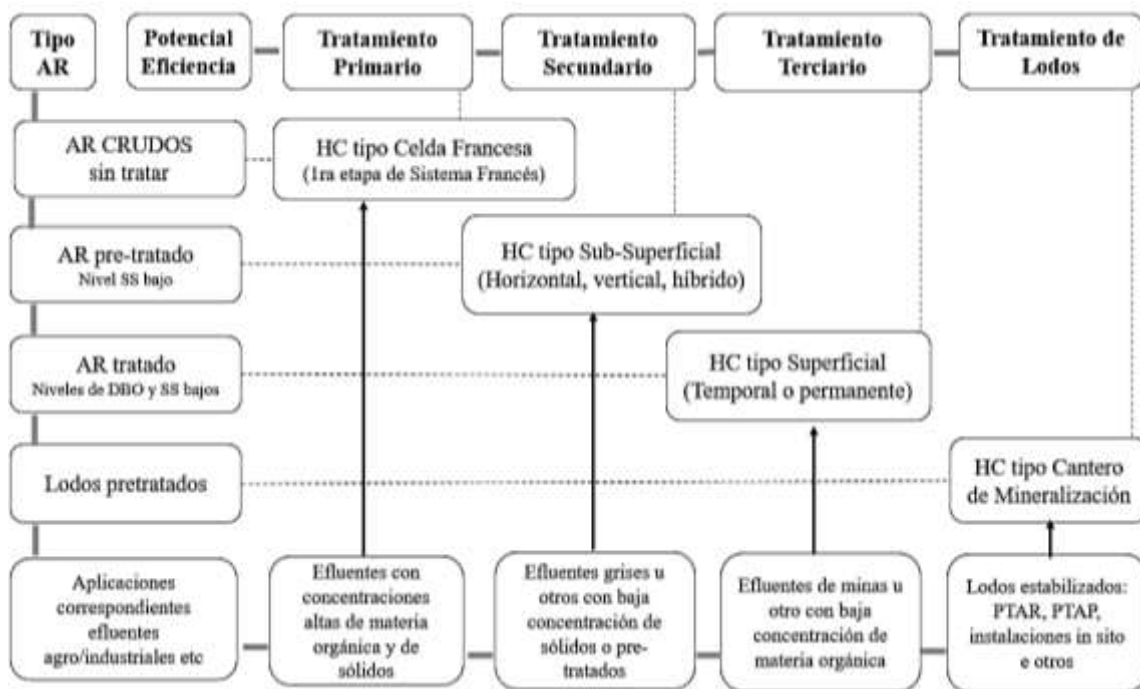


Figura 1: Clasificación de los humedales construidos según la etapa de tratamiento del agua residual

Fuente: Miglio *et al.* (2018)

Además, se mantienen las cuatro categorías de humedales según el patrón de flujo, teniendo humedales de flujo superficial (HC-FS) y los humedales de flujo subsuperficial que dependiendo de la dirección se subdividen en vertical (HC-FSS-V) u horizontal (HC-FSS-H) y los sistemas híbridos (HC-FH) que presentan combinaciones en serie de los humedales anteriores.

Los HC-FS llamados también humedales de flujo libre (Figura 2), presentan el agua a una altura superior de la capa de sustrato, por lo que presenta vegetación densa que puede ser emergente, sumergida, o flotante. En cambio, en los HC-FSS, el nivel del

agua se mantiene debajo de la superficie del sustrato poroso del medio filtrante, por lo que generalmente su profundidad es de 60 a 80 cm.

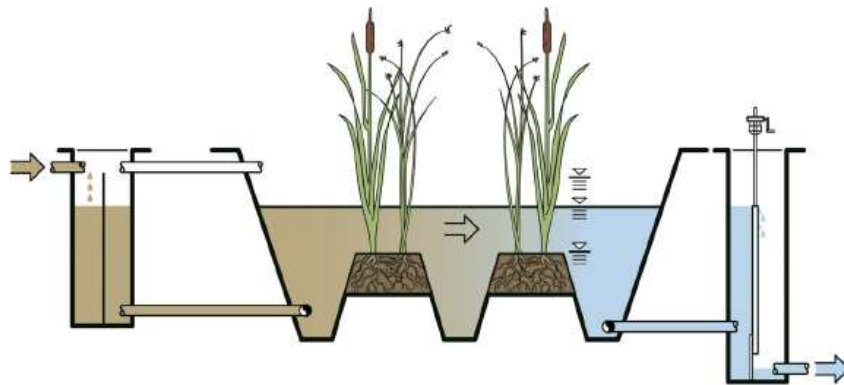


Figura 2: Humedales construidos de flujo superficial (HC-FS)

Fuente: Dotro *et al.* (2017)

Basados en esta clasificación se considera que los HC-FSS-V (Figura 3), tienen mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica debido a que el medio filtrante se mantiene insaturado, porque el ingreso del efluente es intermitente proporcionando una buena transferencia de oxígeno. Una vez tratado el efluente se recolecta en una tubería a lo largo del humedal, lo que crea condiciones aerobias adecuadas para la nitrificación. Al contrario, en los HC-FSS- H (Figura 4), el lento paso del efluente y el controlador de nivel en la zona de salida, permiten que el medio filtrante se sature favoreciendo condiciones anaerobias o anóxicas que permiten la degradación del nitrógeno.

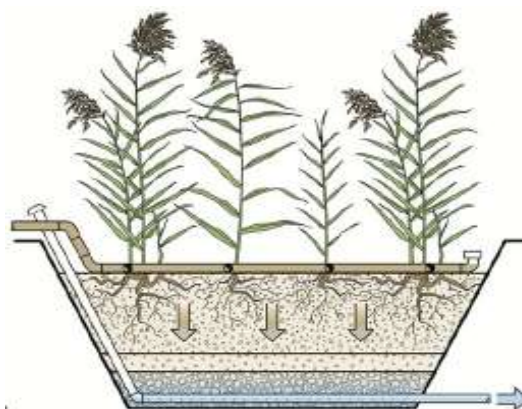


Figura 3: Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (HC-FSS-V)

Fuente: Dotro *et al.* (2017)

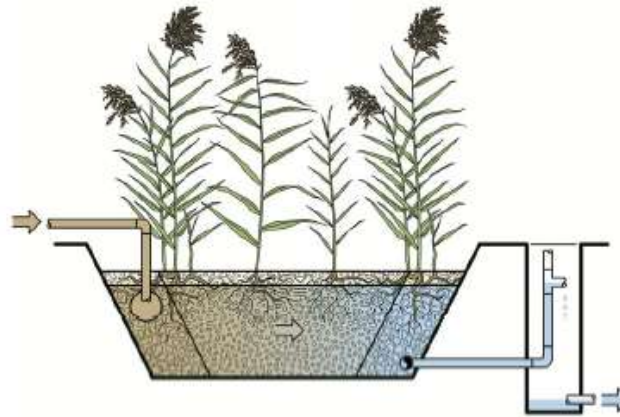


Figura 4: Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSS-H)

Fuente: Dotro *et al.* (2017)

Ambos tipos de humedales de flujo subsuperficial se utilizan frecuentemente en células interconectadas o en una misma célula a través de los denominados “Humedales Híbridos” (HC-H), alternando en el orden y número de humedales para lograr una mayor eficiencia de eliminación de contaminantes especialmente nitrógeno, reportándose incluso humedales híbridos que comprenden humedales de flujo superficial en la última fase del tratamiento (Vymazal 2007).

Además, se han presentado variaciones en el uso de los humedales construidos; como los “Humedales de Sistema francés” (HC-Fr), para el tratamiento de aguas residuales domésticas crudas y lodo en una sola infraestructura siendo un tratamiento primario y secundario que consta de dos fases. La primera se compone de un humedal subsuperficial vertical modificado que presenta de dos o más canchales operados en paralelo, que reciben el afluente directamente en la superficie del lecho, de manera que cuando unos están en operación, los otros descansan y los sólidos en la superficie se secan y mineralizan, mientras que el líquido filtra hacia el fondo del humedal para seguir su tratamiento y luego, se recoge por una tubería de drenaje para enviarlo a la segunda fase que consta de humedales subsuperficiales verticales (convencionales) en paralelo alimentados de manera alterna donde se completa el tratamiento (Gómez 2017). Igualmente, el tratamiento de lodos residuales por humedales construidos es una práctica cada vez más aplicada (Uggetti *et al.* 2010).

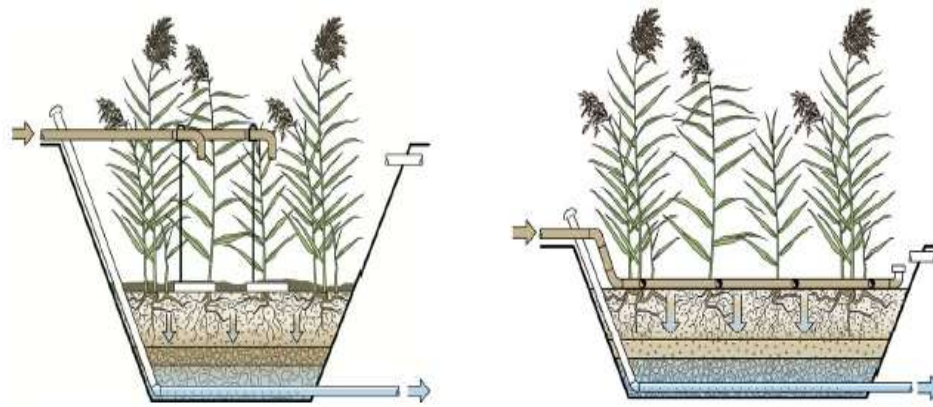


Figura 5: Humedales construidos del sistema francés (HC-Fr)

Fuente: Dotro *et al.* (2017)

Otra variación, en la clasificación de esta tecnología son los denominados “Humedales Intensificados” (HC-I), que son sistemas modificados para mejorar el rendimiento aumentando el aporte energético, utilizando medios reactivos, modificando los esquemas de operación, o incluso usando bacterias específicas.

Por último, recientemente tenemos a los “Humedales Flotantes” que son una variante de los Humedales de flujo libre en los cuales la vegetación emergente se establece sobre una infraestructura flotante, así, las partes superiores de la vegetación crecen y permanecen principalmente por encima de la columna de agua, mientras que las raíces se extienden hacia abajo, desarrollando un extenso sistema de raíces debajo del nivel del agua (Pavlineri *et al.* 2017).

2.1.3. Criterios de diseño

a. Dimensionamiento

Existen diversos criterios que pueden ser considerados en el dimensionamiento de los humedales construidos. Algunos de los modelos representados en los humedales construidos, utilizan los siguientes parámetros:

- Relación área per cápita o área por persona en m^2/PE , donde PE significa persona equivalente
- Carga orgánica superficial en $g\ DBO_5/m^2/d$ o $g\ DQO/ m^2/d$
- Tasa hidráulica en mm/d o $m^3/m^2/d$
- Tasa de transferencia de oxígeno ($kg\ O_2/d$)

El parámetro de diseño más simplificado para los HC es el área requerida por persona. Usualmente, los HC-FSS-H se dimensionan utilizando la ecuación de Monod modificada para cinética de primer orden, la cual se representa como:

$$A = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C)}{K \eta p x n}$$

Donde:

A = área superficial del HC-FSS-H (m²);

Q = caudal afluente (m³/d);

C₀ = concentración afluente (g/m³);

C = concentración efluente (g/m³);

K = coeficiente de degradación (d⁻¹);

p = profundidad media del HC (m);

η = porosidad (m³ vacíos/m³ material).

Esta ecuación ha sido simplificada, para referirse al efecto del coeficiente de degradación, la profundidad de la columna de agua y porosidad del sustrato utiliza el término constante de velocidad de reacción para la degradación de DBO (K_{DBO} = K_Tηpxn), para lo cual el coeficiente K_T se calcula por la siguiente expresión:

$$K_T = K_{20} (1.06)^{(T-20)}$$

Siendo:

K₂₀ = Constante promedio a 20 °C (d⁻¹)

T = Temperatura operacional del sistema (°C)

En tal sentido, el tamaño del área de un humedal artificial depende de la temperatura y la constante de degradación, la cual generalmente incrementa 10 por ciento por °C (UN-HABITAT, 2008).

Al respecto, Hoffmann *et al.* (2011) representan la influencia del clima y el tipo de humedal (HC-FSS-H contra HC-FSS-V); sin embargo, los criterios de diseño aún no han sido definidos considerando los diferentes climas.

Tabla 1. Área requerida que depende de las condiciones climáticas para HC- FSS para aguas residuales pretratadas

Área requerida	Clima frío,		Clima caliente,	
	Temperatura media anual		temperatura media anual	
	< 10 °C		> 20 °C	
	HFH	HFV	HFH	HFV
Por persona atendida (m ² /PE)	8	4	3	1.2

Fuente: Hoffmann *et al.* (2011)

Pero este parámetro por sí solo no es suficiente para el correcto dimensionamiento del humedal construido y debe ser utilizado para tener una aproximación inicial.

b. Profundidad

Generalmente, la profundidad en un humedal artificial está restringida a aproximadamente la profundidad de enraizamiento de las plantas para que estén en contacto con el flujo de agua y tener el efecto del tratamiento. Sin embargo, el tiempo de retención hidráulica (Hydraulic Retention Time, HRT); es decir, el tiempo en que el agua residual se retiene en el humedal, se debe considerar en la selección de la profundidad del humedal. UN-HABITAT (2008), para HC-FSH recomienda utilizar una profundidad media de 40 cm teniendo en cuenta las precipitaciones, que pueden causar flujos superficiales; mientras que para HC-FSV, recomienda una profundidad de 70 cm, para una adecuada nitrificación y eliminación de los contaminantes orgánicos.

c. Área de sección transversal (Sólo para humedales de flujo horizontal)

El dimensionamiento de los humedales construidos horizontales deriva de la ley de Darcy y debe proporcionar un flujo subsuperficial a través del medio, para lo cual diversos autores han asumido que el gradiente hidráulico se puede utilizar en lugar de pendiente, y la conductividad hidráulica se estabilizará a 10^{-3} m/s.

La ecuación es:

$$A_c = \frac{Q_s}{K_f \left(\frac{dH}{ds} \right)}$$

A_c = área de la sección transversal de la cama (m²)

Q_s = flujo promedio (m^3/s)

K_f = conductividad hidráulica del lecho completamente desarrollado (m/s)

dH/ds = pendiente del fondo del lecho (m/m)

No existe una regla sobre el ancho óptimo del humedal, sin embargo, UN-HABITAT (2008) recomienda que, si el ancho del humedal es superior a 15 m, la celda del humedal sea particionada para evitar mezclas de aguas residuales dentro del humedal, lo cual facilita la operación y mantenimiento del humedal al tener dos celdas paralelas en lugar de una sola celda.

2.1.4. Criterios de operación

A pesar de que los humedales construidos son reconocidos por presentar un bajo requerimiento, técnico, económico y energético; la operación de estos sistemas debe presentar cuidados continuos, independientemente de cuán bien el mismo ha sido diseñado. Además, existen diferencias cuando recién se inicia la operación del humedal y los controles de rutina o largo plazo, ya que la variabilidad de las condiciones de la zona tiene mayor impacto en la puesta en marcha y después el sistema se vuelve más estable. Los elementos más críticos en los que es necesaria la intervención del operador son:

a. Nivel de agua

Cambios en los niveles de agua afectan el tiempo de retención hidráulica, la difusión del oxígeno atmosférico en la fase de agua y la planta. Los cambios significativos en los niveles de agua deben investigarse de inmediato, ya que pueden deberse a fugas, salidas obstruidas, bermas perforadas, drenaje de aguas pluviales u otras causas (Trein *et al.* 2015)

b. Régimen hidráulico

El régimen hidráulico está definido por tres aspectos:

- Aplicación de efluentes por intermitencia, es decir, los efluentes entran en los humedales construidos en forma de pulsos no en forma continua.
- Alternación entre los módulos, es decir, una unidad de humedales que siempre está en operación o se alterna entre períodos de operación con períodos de reposo, para

lo que es necesario que haya unidades en paralelo para operar cuando una unidad está en reposo.

- La cantidad de volumen de efluente que se aplica en relación con el área de los humedales construidos en un tiempo determinado (normalmente se usa día como referencia).

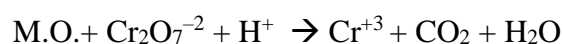
2.2. PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

2.2.1. Demanda química de oxígeno

La Demanda química de oxígeno (DQO) es una medida aproximada del contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable de una muestra de agua. En condiciones naturales, dicha materia orgánica puede ser biodegradada lentamente (oxidada) hasta CO₂ y H₂O mediante un proceso que puede tardar desde unas pocas semanas hasta unos cuantos cientos de años, dependiendo del tipo de materia orgánica presente y de las condiciones de la oxidación. En el laboratorio, los ensayos de DQO aceleran artificialmente la biodegradación que realizan los microorganismos, mediante un proceso de oxidación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos estandarizados para garantizar la reproducibilidad y comparabilidad de las mediciones (APHA 1992).

En tal sentido, se define a la demanda química de oxígeno (DQO) como la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar a los compuestos de una muestra con un oxidante fuerte. En la determinación de DQO el material orgánico es oxidado con dicromato de potasio, en medio ácido, en presencia de un catalizador. Para ello, se emplea una mezcla de ácido sulfúrico y dicromato (Cr₂O₇⁻²) de potasio con iones de plata (Ag⁺) como catalizadores. En estas condiciones, luego de 2 horas de digestión, a 150 °C, el cromo hexavalente del dicromato pasa al estado de oxidación trivalente (Cr⁺³), es decir, se reduce, oxidando la materia orgánica (AySA 2018).

La ecuación simplificada del proceso químico es:



2.2.2. Nitrógeno total

El nitrógeno es uno de los elementos presentes en el agua residual doméstica de importancia en el tratamiento debido a que origina procesos de eutrofización en los cuerpos receptores debido a que la elevada concentración de nutrientes favorece el desarrollo excesivo de algas y plantas acuáticas. A consecuencia de ello, disminuye la concentración de oxígeno que empobrecen, en ocasiones de modo irreversible, la biodiversidad del ecosistema en cuestión.

En los humedales construidos para la degradación del nitrógeno, primero ocurre la transformación del NOrg a N-NH₄⁺, por el proceso llamado amonificación, mediante microorganismos aeróbicos o anaerobios, aunque las reacciones son más lentas en condiciones anaerobias. El N-NH₄⁺ formado o presente en el afluente, puede seguir diversas rutas pudiendo ser asimilado por las raíces de las plantas o por microorganismos anaerobios y transformarse de nuevo a NOrg. (Torres *et al.* 2017). En caso que el pH sea superior a 8, el amonio se transforma en amoniaco y una parte se volatiliza, también puede ser inmovilizado mediante intercambio iónico en el medio filtrante. Sin embargo, la conversión a NO₃⁻ bajo condiciones aerobias por las *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, es el mecanismo principal que reduce la concentración de N-NH₄⁺ en los humedales de tratamiento (Vymazal y Kröpfelová 2008). El último paso es la remoción del NO₃⁻ del sistema, el cual se lleva a cabo por dos vías, la primera es la asimilación por las plantas, mediante el ingreso del NO₃⁻ a las raíces por difusión o con el flujo de agua. La segunda vía es la desnitrificación, que se favorece en condiciones anóxicas. A través de ella, el NO₃⁻ se transforma a óxido nítrico (NO), a óxido nitroso (N₂O) y finalmente se libera a la atmósfera como nitrógeno gaseoso (N₂) (Vymazal 2007).

Usualmente, en el agua residual se valoriza el Nitrógeno total Kjeldahl (NTK) que refleja la cantidad total de nitrógeno orgánico, en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en varios estados de degradación, urea, aminas, etc), y de iones amonio (NH₄⁺), por lo que este parámetro indica cuanto nitrógeno podrá ser nitrificado a nitritos y nitratos para que posteriormente, por desnitrificación pase a nitrógeno

gaseoso; pero no incluye los nitritos y nitratos presentes como tal en el medio acuoso. En tal sentido, el nitrógeno total (NT) es un parámetro más completo que incluye el NTK junto a los nitritos y nitratos (formas oxidadas del nitrógeno).

3.2.1. Fósforo total

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutriente limitante de los organismos fotosintéticos por lo que, en concentraciones elevadas, estimula el crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutroficación (APHA 1992).

Para la remoción biológica del fósforo, se realizan combinaciones operativas entre condiciones anaerobias (sin oxígeno disponible), y aeróbicas. En estas condiciones de alternancia de ciclos, los microorganismos acumulan fósforo más allá de sus necesidades metabólicas de crecimiento. Posteriormente, los microorganismos decantan y se extraen como lodos en exceso (AySA 2018).

Además, en los humedales construidos, el fósforo puede ser absorbido por las plantas en diferentes formas iónicas, el cual se integrará al metabolismo, razón por la cual disminuye su concentración en el efluente; sin embargo, esta absorción se limita a las necesidades metabólicas. Otra forma de remoción es la fijación del fósforo en el sustrato, por lo que se estudian materiales específicos con mayor afinidad y capacidad de retención de estos compuestos.

El fósforo total en las aguas residuales puede encontrarse en forma disuelta o en partículas, tanto en compuestos orgánicos o inorgánicos, por lo que se requiere liberar el fósforo combinado en la materia orgánica, sometiendo a la muestra a un proceso de digestión ácida para convertir a ortofosfato, que posteriormente se determina por métodos colorimétricos (AySA 2018).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El desarrollo del presente trabajo de investigación es parte de la línea de investigación de saneamiento ambiental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Sistematización de información sobre la aplicación de humedales construidos

La revisión sistemática es una herramienta utilizada para resumir, evaluar y comunicar los resultados e implicaciones de una gran cantidad de investigaciones individuales que examinan la misma pregunta. Para ello, se sigue un procedimiento transparente evitando la subjetividad y riesgo de sesgo en la selección de los estudios.

El primer paso es formular preguntas científicamente apropiadas que pueden ser respondidas por la literatura, para esta revisión fue la siguiente:

¿Qué tan eficaces son los humedales construidos, en la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo durante el tratamiento de agua residual doméstica en la región de América Latina y el Caribe?

Luego, se analiza la pregunta primaria para identificar los componentes que definirán la estrategia de búsqueda. Además del enfoque de la revisión sobre materia orgánica y nutrientes, por la necesidad de identificar los sistemas de tratamiento, se incluye evaluar las características de todo el tratamiento incluyendo a los humedales construidos.

Tabla 2: Definición de los componentes de la pregunta primaria de la revisión sistemática

Población	Intervención	Comparador	Resultados
Agua residual doméstica de países de América Latina que presentan materia orgánica, nitrógeno y fósforo	Humedal construido	Concentración de entrada vs salida del humedal construido	1° Concentración de materia orgánica (DQO), nitrógeno (NT) y fósforo (FT) 2° Porcentaje de remoción

i. Estrategia de búsqueda

La consulta en medios electrónicos se realizó a través de software de buscadores científicos. En la Tabla 3, se muestran las bases de datos utilizadas para la búsqueda de estudios. Se empleó la opción de búsqueda avanzada a nivel de título, palabra clave o resumen con el término “Constructed Wetlands” y a todo nivel con los términos “domestic effluent OR domestic sewage OR domestic wastewater” Además, se restringió la búsqueda al periodo entre 2009 a 2020 y cuando fue posible, se usó el filtro para seleccionar países de América Latina.

Tabla 3: Fuentes para la búsqueda de estudios

Base de datos electrónicas	Fecha
Scielo	Marzo 2021
Redalyc	Marzo 2021
ScienceDirect	Abril 2021
Scopus	Junio – Julio 2021

Asimismo, la búsqueda incluyó las memorias de los eventos científicos “Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua” desarrolladas cada dos años, desde el 2012 al 2021, donde participan universidades o instituciones de América Latina y el Caribe con experiencia en la investigación de humedales construidos. Cabe precisar que se consideró la búsqueda de artículos V Conferencia ejecutada

en abril del 2021, debido a que es un evento inicialmente programado para el año 2020, que se postergó por la pandemia del virus COVID-19.

Finalmente se corroboraron los resultados de la búsqueda con el estudio de Rodríguez *et al.* (2020) para incorporar nuevos artículos, así como aquellos mencionados en bibliografía o compartidos por investigadores de la comunidad científica que hayan sido publicados entre el 2009 al 2020.

ii. Selección de estudios

Para la selección de los estudios, se examinó el título y resumen de los artículos, en caso que estos no proporcionen la información completa se pasó a la lectura de la metodología, para verificar el cumplimiento de los siguientes criterios de selección:

- i. Estudios de Humedales Construidos implementados en países de América latina y el Caribe (ALC), considerando la clasificación de las Naciones Unidas (2019):
 - Caribe: Anguila, Antigua y Barbuda, Aruba, Bahamas, Barbados, Caribe Neerlandés Malvinas (Malvinas), Cuba, Curazao, Dominica, Granada, Guadalupe, Haití, Islas Caimán, Islas Vírgenes Británicas, Islas Turcas y Caicos, Islas Vírgenes de los Estados Unidos, Jamaica, Martinica, Montserrat, Puerto Rico, República Dominicana, Saint Kitts y Nevis, Santa Lucía, San Vicente y las Granadinas, San Martín (parte holandesa).
 - América Central: Bélice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua y Panamá.
 - América del Sur: Argentina, Bolivia (Estado plurinacional de), Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Islas Falkland, Guyana francesa, Guyana, Paraguay, Perú, Surinam, Uruguay, Venezuela (Rep. Bolivariana de).
- ii. Estudios para el tratamiento de efluentes domésticos, incluyendo efluentes mixtos donde se combina efluentes domésticos con cuerpos de agua, agua de lluvia y efluentes municipales. Excluyendo a los efluentes de origen industrial, ganadero, drenaje ácido de mina o lixiviados, así como cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos o metales pesados, y aquellos que no se

conoce su origen, debido a que las características fisicoquímicas son muy variables.

- iii. Estudios que evalúan el desempeño de experimentos con vegetación, por lo que se excluyen los no plantados (sin vegetación), o aquellos que no indican el nombre científico de la especie utilizada.
- iv. Estudios experimentales a escala mesocosmo, piloto o real; exceptuando las experiencias a escala de laboratorio, microcosmo o invernadero porque estas experiencias no reciben los efectos de los factores ambientales y no reflejan condiciones realistas. Para identificar el tipo de escala se establecieron características de ubicación, área superficial y volumen, para cada escala que se indican en la Tabla 4.

Tabla 4: Definición Descripción de las escalas de los humedales construidos

Escala	Ubicación del HC	Área superficial	Volumen del agua residual
Mesocosmo	En exteriores sin conexión directa al alcantarillado del sitio de origen del agua residual	Entre 0.2 a 1.0 m ²	Independiente
Piloto	En el sitio de origen del agua residual con conexión directa al alcantarillado	Mayor a 1.0 m ²	Recibe un porcentaje del volumen total del agua residual real
Real	En el sitio de origen del agua residual con conexión directa al alcantarillado	Mayor a 1.0 m ²	Recibe el volumen total del agua residual real

Fuente: Modificado de Rodriguez *et al.* (2020)

En excepciones, cuando el artículo no precisó ninguna de las características mencionadas, se mantuvo la escala propuesta por el autor o criterio propio en base al material de construcción o cantidad de individuos vegetales.

- v. Estudios que presentan resultados primarios remoción de materia orgánica o remoción de nutrientes como nitrógeno o fósforo.

- vi. Estudios experimentales que evalúen el efluente en comparación a un control (Control – Impacto) o el afluente y efluente posterior al tratamiento (Antes-Después).

El no cumplimiento de un único criterio es suficiente para que un estudio se excluya de la revisión. Por lo tanto, la evaluación de los criterios de selección se ha realizado considerando el orden de importancia, de manera que la primera respuesta negativa se pueda utilizar como motivo para la exclusión del estudio, y que no sea necesario evaluar los criterios restantes.

vii. Análisis de experiencias

Para la identificación de las experiencias de los artículos seleccionados se modificaron los criterios de Rodriguez *et al.* (2020), de la siguiente manera:

- Si el desempeño se evalúa durante diferentes temporadas o períodos no continuos, entonces se considera una experiencia diferente por cada temporada o período.
- Si el desempeño evalúa más de dos diferentes condiciones operativas, entonces se considera una experiencia diferente por condición operativa, eligiendo las condiciones de mayor periodo o mejores resultados, para evitar similitudes.
- Si el documento revisado considera réplicas para evaluar el desempeño de un HC, entonces se considera solo como una experiencia y se registra la media entre los valores reportados para el experimento y las réplicas como valor de la experiencia.
- Si el documento revisado evalúa el desempeño de un HC usando diferentes especies de plantas para el mismo sistema, cada experimento con diferentes especies de plantas se considera como una experiencia.
- Si el documento presentaba humedales de celdas en serie se trataron como humedales separados cuando informaban tasas de remoción y eficiencias para

cada celda individual. Caso contrario, al conjunto de celdas se trató como un humedal híbrido.

Para analizar las experiencias de la lectura completa de los estudios seleccionados, se recopiló información incluyendo:

- Ubicación: País y región o departamento o estado, según distribución geopolítica del país.
- Tamaño del sistema: Área de superficie (m²).
- Características de diseño del sistema: Clase de HC, Cantidad de unidades, tecnología de pretratamiento o postratamiento.
- Material del sustrato.
- Vegetación: Nombre científico de la especie o especies utilizadas
- Parámetro de remoción de materia orgánica: Concentración de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) en el afluente y el efluente.
- Tipo de estudio: Estudios de diseño Control-Impacto (CI), donde se evalúa al menos una experiencia control frente a un humedal construido o estudios de diseño Antes-Después (AD), donde las condiciones iniciales del afluente sirven de control.
- Tiempo: Periodo de duración del estudio en meses y fechas.

Para la clase de humedal se ha considerado la siguiente clasificación: Humedal construido de flujo superficial (HC-FS), Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSS-H), Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (HC-FSS-V), Humedal construido híbrido (HC-H), Humedal construido de celda francés (HC-Fr), Humedal construido flotante (HC-Fl) y Humedal construido intensivo (HC-I).

Con la información recopilada de las experiencias identificadas, se describió las tendencias en la investigación de humedales construidos en los principales países, considerando la ubicación, clases, escalas y elementos de los humedales construidos, para finalmente identificar los sistemas de tratamientos más usuales en la región para esta tecnología.

3.2.2. Identificación de variables en el rendimiento de los humedales construidos

i. Evaluación de calidad de las experiencias

Los estudios seleccionados se sometieron a una evaluación de calidad siguiendo el método sistemático de Land *et al.* (2016), se les asignó una categoría de calidad: (1) No cumple con los criterios de calidad, (2) Aceptable y (3) Estándar alto. El conjunto de criterios de calidad que se evaluaron en cada estudio se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Criterios de calidad y requisitos para su cumplimiento

Criterios de calidad	Requisitos
1 Riesgo moderado de sesgo	El estudio cubre al menos 06 meses continuos o 02 estaciones del año e incluye al menos 06 muestreos distribuidos uniformemente en el tiempo. Presente datos de remoción de materia orgánica expresados en DQO o remoción de nutrientes en NT o PT.
2 Alta frecuencia de muestreo	Muestras compuestas proporcionales al flujo o muestras individuales con una frecuencia de muestreo razonablemente alta (al menos una vez al mes).
3 Control hidráulico	Todas las principales rutas de flujo de agua se cuantifican y consideran en los cálculos de los resultados.
4 Procesos de remoción cuantificados	Presenta datos de al menos un proceso de remoción se cuantifica de forma independiente, y los resultados son razonables en relación con la diferencia de entrada / salida expresando media y desviación estándar.
5 Modificadores de efectos	Se reporta suficiente información relacionada con los potenciales modificadores de efectos.
6 Replicación	Se estudian humedales replicados o el mismo humedal durante uno o más ciclos anuales completos. Si no se informa, debería ser posible calcular la varianza de las réplicas.

Fuente: Modificado de Land *et al.* (2016).

Las condiciones para asignar cualquiera de las tres categorías de calidad se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Categorías de calidad y criterios de asignación

Categorías de calidad	Descripción
Categoría 1	Alto riesgo de sesgo (no se cumple el criterio de calidad 1)
Categoría 2	Moderado riesgo de sesgo (se cumple el criterio de calidad 1)
Categoría 3	1) Moderado riesgo de sesgo (se cumple el criterio de calidad 1), 2) Se cumplen los criterios de calidad 4 y 6 3) Cumplen al menos cuatro de los seis criterios de calidad enumerados en la Tabla 5.

Fuente: Modificado de Land *et al.* (2016).

ii. Análisis de eficiencias

Los estudios seleccionados asignados a las categorías 2 y 3 se utilizaron para la extracción de datos. Se necesitaron los datos de las concentraciones en el influente y efluente, así como la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), los cuales, generalmente se informan en unidades de mg/L o porcentaje, respectivamente. Los resultados informados en otras unidades se volvieron a calcular cuando fue posible.

Asimismo, para el cálculo del tamaño del efecto fue necesario tomar información estadística (número de muestreos y desviación estándar).

iii. Meta-análisis

Según la definición de Glass en 1976, meta-análisis es “el análisis estadístico de una gran colección de resultados de trabajos individuales con el propósito de integrar los hallazgos obtenidos”; por lo que, a través del meta-análisis se obtiene un índice cuantitativo de la magnitud del efecto que cada estudio ha investigado y se aplican técnicas de análisis estadísticos para integrar dichos efectos (Sánchez-Meca, 2010).

En tal sentido, el meta-análisis se utiliza para generar una única estimación del efecto de una intervención sobre un tema (Newman *et al.* 2015). Por lo que, los datos extraídos fueron transformados a una expresión logarítmica (Ln), la cual permite la comparación entre diferentes escalas de humedales, ya que mide directamente la eficiencia de remoción de cada humedal, independientemente del área superficial o carga de entrada.

En tal sentido, la respuesta logarítmica promedio (ln R) se calculó con la siguiente relación:

$$R = \frac{\text{Carga salida}}{\text{Carga entrada}}$$

De tal manera que Ln(R) se utilizó para cuantificar el tamaño del efecto y los modelos de efectos aleatorios para calcular la suma de efectos y límites de incertidumbre, de tales efectos. La varianza entre-estudios fue estimada mediante el cálculo de τ^2 utilizando el método de DerSimonian y Laird, y para estimar la razón entre la verdadera heterogeneidad y la varianza total en los efectos observados, se calculó el estadístico I^2 . En los análisis de subgrupos, se realizaron estimaciones separadas de τ^2 para cada subgrupo individual, presentando los resultados en diagramas de bosque en base a los grupos climáticos, tipos de humedales y origen de macrófitas.

La transformación de las respuestas logarítmicas de proporciones y recalcu de las eficiencias de remoción promedio y los intervalos de confianza, se definieron por la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia remoción} = 100 \times \frac{\text{Carga entrada} - \text{Carga salida}}{\text{Carga entrada}}$$

$$\text{Eficiencia remoción} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{Carga salida}}{\text{Carga entrada}}\right)$$

Los cálculos del meta-análisis y diagramas de bosque se realizó mediante el programa OpenMEE de código abierto adaptado a las necesidades de los ecologistas y biólogos evolutivos (Wallace *et al.* 2017).

3.2.3. Evaluación de factores en la aplicación de humedales construidos en el Perú

La evaluación de los factores relacionados a la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales construidos en el Perú, consistió en:

- La revisión exhaustiva y análisis integral de la normativa peruana del sector saneamiento relacionada al tratamiento de agua residual doméstica para la identificación de los actores clave en la toma de decisiones, así como vacíos y oportunidades legales que influyen en la implementación de los humedales construidos en el Perú.
- La recopilación de casos de humedales construidos implementados en el Perú para el tratamiento de agua residual doméstica desarrollados en los últimos 10 años, para ello se realizó la búsqueda de estudios en las bases de datos antes mencionadas, así como, revistas nacionales y el “Registro nacional de trabajos de investigación” (RENATI) de la SUNEDU. Mediante los casos de humedales se analizaron los limitantes técnicos y socioambientales sobre la aplicación de esta tecnología en nuestro país.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN

4.1.1. Búsqueda de los estudios

En la Tabla 7, se muestran los resultados de la búsqueda de estudios. Se encontraron 1440 artículos. El alto número de hallazgos se debió a que buscadores como ScienceDirect y Scopus no permitieron filtrar artículos en base al país de origen, mostrando artículos de estudios ejecutados en Europa y Asia.

Tabla 7: Resultados de la búsqueda de estudios

Base de datos	Nº hallazgos
Scielo	119
Redalyc	109
ScienceDirect	480
Scopus	301
Eventos Académicos	252
Rodriguez <i>et al.</i> (2020) y artículos compartidos	179
Total	1440

4.1.2. Selección de estudios

Se plantearon seis (06) criterios de selección o elegibilidad, teniendo como premisa que un único criterio es suficiente para que un artículo se excluya de la revisión completa. Por lo tanto, los dos primeros criterios fueron los principales filtros de exclusión de artículos, sin tener que evaluar los criterios restantes.

Como resultado de la evaluación de los criterios de selección, del total de artículos hallados, solamente el 12 por ciento del total de artículos cumplen con los criterios de inclusión para la presente investigación; restando los artículos repetidos, tenemos 170 artículos seleccionados para revisión completa.

Tabla 8: Resultados de la selección de estudios por base de datos

Base de datos	N° hallazgos	N° repetidos	N° artículos seleccionados
Scielo	119	0	26
Redalyc	109	6	8
ScienceDirect	480	1	14
Scopus	301	31	57
Rodríguez <i>et al.</i> (2020) y artículos compartidos	179	39	25
Eventos Académicos	252	3	40
Total	1440	80	170

En la Figura 6, según el país en el cual se ha desarrollado cada estudio, se tiene que el 44 por ciento de los artículos seleccionados son estudios realizados en Brasil, seguido de Colombia (20 por ciento), México (14 por ciento) y Chile (6 por ciento); siendo los países de referencia para la región respecto a la implementación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas; mientras que el resto de países contribuyen con 1 a 3 artículos a esta investigación, por lo que se agrupan como “Otros”; a excepción de Perú y Argentina que presentan un número mayor (Anexo 1. Resultados de la selección de artículos para cada país).

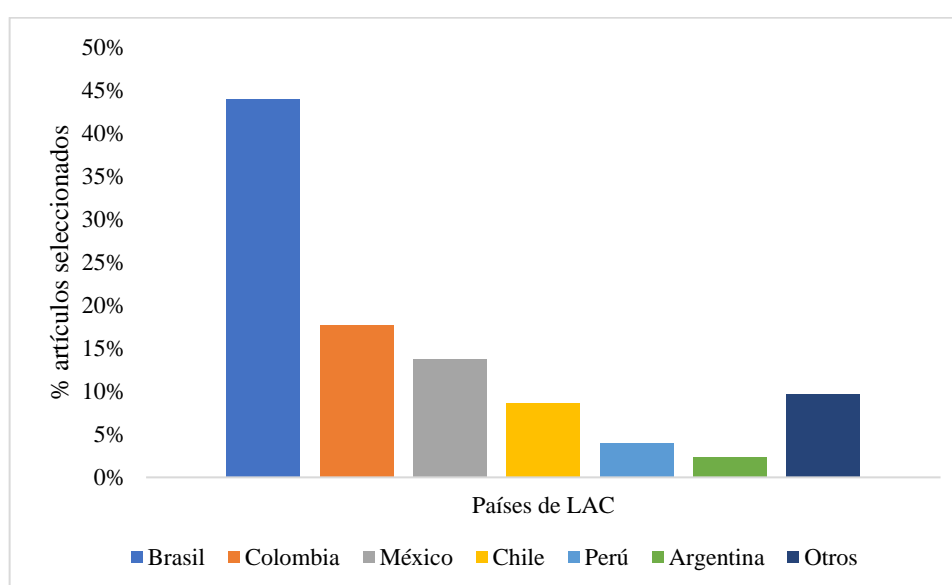


Figura 6: Número de artículos seleccionados por país de ALC

4.1.3. Análisis de experiencias

A partir de los 170 artículos seleccionados, se obtuvieron 359 experiencias de humedales construidos desarrolladas en 16 países de América Latina y el Caribe, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, que se han incluido en la revisión sistemática. En el Anexo 2, se presenta una Tabla resumen de los resultados del análisis y evaluación de calidad de las experiencias de humedales construidos en América Latina y el Caribe para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Cabe precisar que este reporte no representa un inventario de los humedales construidos en la región, quedado fuera del alcance aquellos casos desarrollados directamente por entidades gubernamentales, los cuales, usualmente no se publican en artículos científicos. Asimismo, la búsqueda de estudios no ha considerado repositorios de tesis o eventos académicos internacionales fuera de la región, porque, dichas investigaciones generalmente abarcan periodos cortos (menor a 6 meses) y baja cantidad de muestreos, lo cual no contribuye con el objetivo del trabajo. Además, es posible que más de una experiencia haya sido desarrollada en el mismo humedal construido, debido a que cada experiencia se realiza en diferentes periodos de tiempo o bajo diferentes formas de operación o parámetros. Por ejemplo, 09 estudios desarrollados en la planta piloto de Hualqui en la Región Biobío (Chile) sobre un mismo humedal construido de flujo horizontal han contribuido con 18 experiencias para el presente trabajo. Igualmente, en Villa Clara (Cuba) se estudia el mismo humedal construido de flujo subsuperficial vertical en 03 estudios (Hernández *et al.* 2012; Pérez *et al.* 2012 y Pérez *et al.* 2014) que contribuyen con 03 experiencias, respectivamente.

Pese a las limitaciones mencionadas, el resultado refleja las tendencias en la investigación y aplicación de la tecnología para la región que se analizan en las siguientes secciones, con la finalidad de difundir la tecnología, identificar objetivos no estudiados y principalmente.

4.1.3.1. Ubicación

La ubicación de las experiencias con humedales construidos se muestra en la Figura 7. La mayoría se encuentran en Sudamérica (n = 274), siendo el principal país Brasil (n = 145), seguido de México (n= 66) y Colombia (n= 71). Mientras que, en Perú, se identificaron once (11) experiencias de humedales construidos, dándonos un acercamiento a la producción científica de los países de la región sobre esta tecnología y el grado de difusión de la misma.



Figura 7: Ubicación de las experiencias con humedales construidos encontradas en Latinoamérica y el Caribe

A continuación, se presentan los detalles más sobresalientes a nivel de país, para aquellos que contribuyen con mayor número de casos a la presente investigación.

a. Brasil

Los autores brasileños han aportado con mayor número de casos a la presente investigación, debido a que cuentan con centros universitarios o empresas de saneamiento que investigan mejoras en el rendimiento de los humedales construidos, por lo que la escala piloto (46 por ciento) junto a la escala real (30 por ciento), son las más empleadas y la práctica común, son las excavaciones en el suelo impermeabilizadas con geomembranas de PVC o PEAD.

Los casos de experiencias identificadas se distribuyen en 09 estados, principalmente Minas Gerais (29 por ciento), seguido de Rio Grande del Sur y Paraná, por lo que prevalecen la región Sudeste y región Sur.

Brasil ha reportado diferentes tipos de humedales construidos, incluyendo humedales de celdas francesas (Silveira *et al.* 2015; Trein *et al.* 2019; García y Von Sperling 2018 y Mantaje *et al.* 2015) junto a humedales flotantes (Benvenuti *et al.* 2018, Mello *et al.* 2017 y Goldoni *et al.* 2014). Además, existe un gran interés por conocer la toxicidad del agua residual doméstica tratada por HC (Colares 2019, Horn *et al.* 2014, Lutterbeck 2018, Godoni 2014, Silveira *et al.* 2017 y Silveira *et al.* 2019); así como, identificar a las especies microbianas presentes en la remoción de contaminantes (Colares y Sandri 2013, Lana *et al.* 2013; Prata *et al.* 2013 y Pelissari *et al.* 2017). En Brasil, no sólo se estudia la remoción de materia orgánica y nutrientes, también, la remoción de contaminantes emergentes como productos de limpieza o cuidado personal (Oliveira *et al.* 2019; Paulo *et al.* 2019).

b. Colombia

Es el segundo país con mayor producción de artículos sobre HC para tratar aguas residuales domésticas, resaltando la aplicación de HC-FSS-H a escala mesocosmo (Menor a 01 m²), debido a las investigaciones realizadas por el Grupo de Humedales del Caribe colombiano de la Universidad del Atlántico, Grupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación de la Universidad de Antioquia y el Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira. En tal sentido, las experiencias de humedales construidos principalmente se ubican en la región Caribe (Atlántico) y región Andina (Antioquia y Risaralda).

Siendo el principal interés de los investigadores colombianos conocer el rendimiento de las macrófitas adaptadas a climas tropicales, por lo que cabe resaltar el uso de *Heliconia psittacorum* (Bohórquez *et al.* 2016, Carvajal *et al.* 2017, Montoya *et al.* 2010; Paredes 2018 y Rodríguez y Vargas 2019) junto a otras especies del género *Cyperus* (*C. ligularis*, *C. articulatus* y *C. papyrus*) (Bedoya *et al.* 2014, Casierra *et al.* 2017, Caselles-Osorio 2018, Charris y Casellos-Osorio 2016, Charris *et al.* 2016a, 2016b) como especies neotropicales nativas que crecen en zonas húmedas y presentan propiedades de adaptabilidad óptimas para el tratamiento de agua residual.

c. México

Se han identificado 66 experiencias de humedales construidos ubicadas en 07 estados mexicanos, siendo Jalisco, el estado con mayor número de casos (49 por ciento), principalmente debido a los estudios a escala mesocosmos desarrollados en la Universidad de Guadalajara. Las experiencias identificadas reportan que el 60 por ciento corresponde a humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSS-H). Además, el sistema de tratamiento más común está compuesto por humedales construidos y lagunas de maduración.

Respecto a las macrófitas, Jiménez *et al.* (2017), estudiaron el rendimiento de *Paspalum paniculatum* como especie nativa, demostrando su viabilidad en la región tropical de México. Mientras que, Méndez *et al.* (2015) investigaron plantas de importancia económica y ornamentales como *Heliconia stricta* y *Heliconia psittacorum*, con resultados optimistas.

En relación a los sustratos, resalta en México, el uso de grava o roca piroclástica denominada “tezontle” (Navarro y Durán 201, Romero *et al.* 2009, Torres *et al.* 2017, Zurita *et al.* 2009, 2011, 2015). Esta roca extrusiva volcánica por su alta porosidad y riqueza en hierro se ha convertido en un buen sustrato para la eliminación de nutrientes, además, su abundancia disminuye el costo de implementación (Zurita *et al.* 2009).

4.1.3.2. Clases de humedales construidos

De las 359 experiencias analizadas, 221 presentaron HC-FSS-H (62 por ciento); por lo que es la clase de HC más reportada y estudiada en la región de ALC. Con una gran diferencia, la segunda clase de HC en la región fue HC-FSS-V (21 por ciento). Los sistemas HC-Fr, HC-FS, HC-H estuvieron presentes entre el 6 al 4 por ciento de las experiencias; mientras que las clases de HC-FI y HC-I, sólo se emplearon en 5 experiencias, respectivamente, correspondiendo el 1 por ciento del total.

Tabla 9: Clases de humedales construidos identificadas en la región de ALC

Clase	Abreviatura	Número de experiencias (n)	Porcentaje
Humedal subsuperficial de flujo horizontal	HC-FSS-H	221	62 %
Humedal subsuperficial de flujo vertical	HC-FSS-V	77	21 %
Humedal superficial o de flujo libre	HC-FS	19	5 %
Humedal híbrido	HC-H	12	4 %
Humedal de celda francés	HC-Fr	20	6 %
Humedal intensivo	HC-I	5	1 %
Humedal flotante	HC-FI	5	1 %

a. Humedal subsuperficial de flujo horizontal

Es la tecnología más estudiada en la región de ALC, por lo que está presente en 10 de los países reportados. Según las experiencias identificadas, el HC-FSS-H de mayor extensión se ubica en Jalisco (México) con 336 m² (De Anda *et al.* 2018 y Fernández *et al.* 2020). Además, esta tecnología se ha implementado en lugares de climas tropicales propios del caribe colombiano con rangos de temperatura entre 22 y 33 °C (Llanos *et al.* 2019) hasta climas templados fríos con temperatura media anual de 8.9 °C (Manzo *et al.* 2020), demostrando la adaptabilidad del sistema a los factores externos climáticos (precipitación, temperatura, horas de sol, entre otros).

De esta tecnología resalta su facilidad de operación y mantenimiento, por lo que no requiere invertir mucho tiempo ni personal capacitado; sin embargo, la principal desventaja es la acumulación de sólidos en el lecho granular que acelera

su colmatación. Aunque, De Matos *et al.* (2018), reportaron todo lo contrario, indicando que no observan pérdidas de eficiencia en la eliminación de contaminantes durante la colmatación de los humedales, incluso en ocho años de monitoreo, resaltando la robustez de las unidades que mantienen las buenas eficiencias.

b. Humedal subsuperficial de flujo vertical

Por su menor demanda de área y funcionamiento intermitente, esta clase de humedal presenta propiedades diferentes que le permiten mantener mayor oxigenación en el efluente y lograr mayor capacidad de degradación de la materia orgánica y remoción del nitrógeno. En tal sentido, esta clase de humedal se viene difundiendo con más impulso llegando a ser reportado en 07 países de ALC, siendo la única clase identificada en Ecuador (García *et al.* 2019) y Cuba (Hernández *et al.* 2012, Pérez *et al.* 2012, 2014), debido a que el agua residual doméstica de dichas experiencias presentaba altas concentraciones de nutrientes y bajos niveles de oxígeno disuelto; características anóxicas que son más adecuadas tratar con los humedales de flujo vertical.

Asimismo, en la región se viene estudiando mejoras en su diseño y rendimiento. Es así que, Cabred *et al.* (2019) en Argentina presentan una nueva configuración de tres etapas apiladas de poca profundidad en comparación al modelo tradicional de una sola etapa, bajo la premisa que cada pulso de agua residual produce pasos de aireación secuencial, los resultados demuestran que la nueva configuración mejora la transferencia de oxígeno con mejor eficiencia en la remoción. A esta nueva configuración la han denominado “Humedal construido apilado de profundidad reducida”. Otra modificación del diseño convencional es conocida como “Tidal-Flow” (HVTF) o “Reciprocating wetlands” (Roth y de Carvalho 2021), la cual es operada diariamente en ciclos con períodos de inundación y drenaje; teniendo que, durante el drenaje, el oxígeno del aire se transfiere al sustrato, promoviendo el aumento de la tasa de transferencia de oxígeno y la nitrificación, luego cuando el sistema es nuevamente llenado en el ciclo de inundación, hay reducción de nitritos y nitratos, mejorando la eliminación de nitrógeno total en condiciones anóxicas (Pacheco *et al.* 2021).

Por último, se han desarrollado los “Humedales verticales parcialmente saturados” (HVPS) que cuentan con dos zonas, una aerobia y otra saturada de condiciones anóxicas/anaerobias, lo cual mejora su eficiencia en la remoción de nitrógeno total a comparación de los humedales verticales convencionales (Carvalho *et al.* 2018; Martínez *et al.* 2018 y Pelissari *et al.* 2017). Sin embargo, si el contenido de carbono orgánico es bajo en el afluente, la desnitrificación resulta insuficiente en la zona saturada, por lo cual, algunos investigadores han propuesto la incorporación de fuentes de carbono para promover la actividad de los microorganismos heterótrofos desnitrificantes, así que tenemos que Tejeda et al. (2021) evaluó la remoción de NT usando mazorca de maíz en la como fuente de carbono, obteniendo mayor concentración de nitrato (NO₃⁻) en las interfases después de dos años de operación, lo que sugiere una relación con la disminución en el suministro de carbono, además, las eficiencias del segundo año (51.6 y 52.9 por ciento) son menores a las reportadas en el primer año de operación (68.2 y 66 por ciento); debido probablemente a una mayor desnitrificación en la zona aerobia ante una mayor liberación de carbono orgánico con la reciente adición de la mazorca de maíz.

c. Humedal superficial o de flujo libre

Inicialmente fue la clase de humedal más estudiada, por lo que se ha implementado en países como El Salvador (Katsenovic *et al.* 2009) o Venezuela (Nuñez *et al.* 2011, posterior a lagunas facultativas; sin embargo, ha disminuido su implementación ante las comparaciones frente al humedal de subsuperficial de flujo horizontal o más recientemente, humedales flotantes que presentan ventajas por no presentar sustrato.

d. Humedal de celda francés

Es una clase de humedal difundida en Brasil (Mantaje *et al.* 2015; Silveira et al. 2015; Trein *et al.* 2019; García y Von Sperling 2018) y recientemente en Perú (Guevara *et al.* 2021, León *et al.* 2018, 2021). Además, se reporta en los departamentos y regiones de ultramar de Francia que son Guyana Francesa (Molle *et al.* 2015) y Martinica (Lombard *et al.* 2018), aunque no participan investigadores locales.

e. Humedal flotante

En los últimos años, los Humedales Flotantes (HC-FI) han ganado prominencia a nivel mundial, aunque en la región de LAC su aplicación para tratar aguas residuales domésticas como sistemas únicos o híbridos recién inicia. Es así que, Benvenuti *et al.* (2018), Cardozo *et al.* (2016), Goldoni *et al.* (2014) describen sus experiencias usando como macrófita a *Typha domingensis*, mientras que Mello *et al.* (2019) emplearon a *Eichhornia crassipes*.

Entre estas experiencias, por los altos porcentajes de eficiencia de remoción resalta el estudio de Cardozo *et al.* (2016) que implementaron un HC-FI en una vivienda unifamiliar en la ciudad de Itá (Asunción, Paraguay), evaluando su operación durante 90 días, observaron que el fósforo total se redujo en 90 por ciento y nitrógeno total en 96 por ciento, lo cual, puede deberse a que la planta los utiliza como nutrientes. En cuanto a la DBO y DQO, el humedal logró una reducción del 94 por ciento.

f. Humedal híbrido

Sobre los humedales híbridos, la configuración más común de un humedal híbrido para el tratamiento de aguas residuales domésticas es un humedal de flujo vertical (HC-FSS-V) seguido de un humedal de flujo horizontal (HC-FSS-H), debido a que se espera mejor nitrificación en la unidad vertical y mejor desnitrificación en la unidad horizontal (García *et al.* 2013; Navarro y Durán 2019; Rousso *et al.* 2016; Sezerino *et al.* 2018 y Paredes *et al.* 2018). Sin embargo, algunos autores estudian la configuración opuesta, para efluentes que contienen menor concentración de nitrógeno (Paulo *et al.* 2009; Paulo *et al.* 2013; Torres *et al.* 2017; Zurita *et al.* 2015). Recientemente, también se tiene reportes de combinaciones de humedales flotantes con humedales subsuperficiales de flujo vertical (Dell Osbel *et al.* 2020, Colares *et al.* 2019, Oliveira *et al.* 2019).

Un caso de humedal híbrido en la misma célula ha sido reportado por Trein *et al.* (2015), quienes diseñaron un humedal construido vertical con fondo saturado que presenta una modificación hidráulica permitiendo mayor remoción de nitrógeno en una única unidad, sin incremento adicional de energía ni área, por medio de la elevación del controlador de nivel (tubería de salida en el exterior del humedal)

generando condiciones de medio filtrante insaturado en el la superficie y medio filtrante saturado en el fondo.

g. Humedal intensivo

Entre las experiencias de humedales intensivos tenemos a Paredes y Galeano (2018) en Colombia estudiando el efecto de la aireación, lo cual les permitió conocer que las unidades con aireación a 2/3 de la longitud, logran mejor remoción del nitrógeno total de Kjeldahl, en comparación con los que reciben aireación hasta 1/3 de la longitud. De manera similar, Pires *et al.* (2020), demostraron que el humedal aireado intermitentemente durante 3 h/día (1 h de aireación/7 h de no aireación) aumenta la eficacia de la eliminación de la materia orgánica (DQO) y nutrientes, principalmente en el proceso de nitrificación.

Otro humedal intensificado fue estudiado por Colares *et al.* (2021) que añadieron celdas microbianas de electricidad a un HC-FSS-V, para investigar la generación de energía por aguas residuales.

4.1.3.3. Escalas de los humedales construidos

Según el tamaño, entre las 03 escalas aceptadas para la presente investigación se tiene que el 46 por ciento corresponde a la escala piloto con un área superficial mayor a 1 m². Mientras que, la escala real sólo abarca el 23 por ciento de experiencias. Así como, el trabajo de Katsenovich *et al.* (2009), que reportaron humedales de 733.35 m² en El Salvador, seguido del humedal en la planta de Zapopan en México con área superficial de 336 m² (De Anda *et al.* 2018 y Fernández *et al.* 2020).

Se debe tener en cuenta que el número de experiencias identificadas es limitado porque se ha excluido a los estudios a escala microcosmos o laboratorio, la cual se caracteriza por un alto número de variaciones en los tratamientos, a comparación de la escala piloto o real que requiere mayor disponibilidad de área y presupuesto para la implementación de los HC, por ende, se reduce el número de experiencias.

Si bien se excluyeron los estudios típicos de microcosmos, se incluyeron estudios mesocósmicos ya que potencialmente brindan información valiosa sobre la variabilidad de los resultados basados en réplicas verdaderas. Se aplicó un tamaño de humedal de corte de 0.2 a 1 m²

4.1.3.4. Elementos de los humedales construidos

a. Sustratos

Generalmente, como sustratos de los humedales construidos se ha utilizado piedra triturada N° 0 al 4, arena y grava; sin embargo, resaltan los reportes en Brasil por el uso frecuente de escoria de acero (Von Sperling y Cordeiro 2013; Da Costa *et al.* 2015; Dornelas *et al.* 2009; Da Costa *et al.* 2013), así como las experiencias con tezontle en México (Navarro y Durán 2019, Romero *et al.* 2009, Torres *et al.* 2017, Zurita *et al.* 2009, 2011 y 2015). Cabe precisar que, en la presente búsqueda sólo una experiencia presenta a la zeolita como material de sustrato (Vera *et al.* 2014), debido a las limitaciones de la búsqueda y exclusión de experiencias a nivel de laboratorio; sin embargo, es un material altamente estudiado en Chile, comprobando que su capacidad de absorción de fosfatos y amonio (Vera *et al.* 2020).

Asimismo, en la región tenemos nuevos materiales en estudio como los residuos plásticos, que según Zamora *et al.* (2019), no cambia el crecimiento de las plantas y eliminación de contaminantes, siendo una alternativa para el reusó plásticos como material de filtro. Igualmente, Rodríguez *et al.* (2021) estudiaron el uso de biocarbón (biochar), residuo proviene de la combustión de biomasa forestal sometida a altas temperatura (aproximadamente 900 °C), teniendo que, en tres días de monitoreo, el HC-FSS-V mostró buen desempeño para los procesos biológicos alcanzando 70 por ciento de remoción de DQO. Además, el biocarbón por ser residuo industrial, implica menores costos. Por último, otros residuos orgánicos que se han usado son la cascarilla de café en un HC-FSS-H en Colombia (Palta y Morales 2013) y mazorcas de maíz u olote que han sido usadas en HC-FSS-V en México (Del Toro *et al.* 2018 y Tejeda *et al.* 2021) para aumentar la eficiencia en la remoción del nitrógeno total.

b. Macrófitas

En climas tropicales y subtropicales de ALC, según los resultados del presente estudio, el género de macrófitas más popular utilizado en los humedales construidos es el género *Typha* (n=63), siendo sus mejores representantes *Typha domingensis* (n= 23) y *Typha. latifolia* (n =19). Estos resultados están acordes a lo indicado por Sezerino *et al.* (2015) que menciona que “aproximadamente el 60 por ciento de todos los estudios brasileños utilizan *Typha* sp”. Otra especie de uso común es *Phragmites australis* (n= 29) (caña común o carrizo).

Otras especies estudiadas por ser nativas de países LAC son *Schoenoplectus californicus* presente en los humedales costeros de Sudamérica (Rojas *et al.* 2013), *Heliconia psittacorum*, *Heliconia stricta*, *Cyperus articulatus* y *C. ligularis* por ser especies neotropicales de Colombia y México (Casierra *et al.* 2017, Caselles-Osorio 2018, Méndez *et al.* 2015, Charris y Casellos-Osorio 2016).

Al respecto de plantas ornamentales (productoras de flores) con valor estético y comercial, adicional a las especies mencionadas por Vymazal (2011), como *Zantedeschia aethiopica* (lirio blanco gigante o alcatraces), *Strelitzia reginae* (flor de grulla o ave de paraíso), *Anthurium andraenum* (flor de flamenco) y *Agapanthus africanus* (agapanto); se reporta en ALC a *Canna indica*, *Hedychium coronarium* y *Hemerocallis flava* L. Otra especie de especial interés es *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) porque es una especie flotante, que puede aumentar la aceptación del sistema de tratamiento de aguas en residencias (Lorenzi y Souza 2001).

Asimismo, varios autores presentan policultivos; por ejemplo, Hernández y Lagunes (2018), estudiaron en conjunto a las sombrillas (*Cyperus alternifolius*) y papiros (*Cyperus papyrus*) junto a plantas ornamentales *Zantedeschia aethiopica*, *Lilium* sp, *Strelitzia reginae* y *Hedychium coronarium*; mostrando buen crecimiento en grava.

Otra tendencia, para los HC es emplear plantas de importancia económica, por lo que Cubillos *et al.* (2014), estudió el uso de *Guadua angustifolia* Kunth, una de las especies de bambú de mayor demanda comercial en Colombia con utilidad en la construcción, elaboración de muebles, artesanías, papel, pisos y generación de

combustible. Dicha investigación reveló reducciones en masa para DQO y DBO superiores al 85 por ciento usando arena como medio filtrante en vez de grava. Igualmente, se tiene reportes de las herbáceas *Hymenachne grumosa* en Brasil y *Paspalum paniculatum* en México (Jiménez *et al.* 2017), por ser común su uso como forraje para animales.

A continuación, se presenta la lista de las principales especies reportadas en las experiencias identificadas para ALC, en la cual la familia Poaceae incluye la mayor cantidad de especies. Respecto a la diversidad de especies, Rodríguez *et al.* (2020) hallaron 112 especies empleadas en la región, la presente revisión aporta 16 especies adicionales a dicha lista

Tabla 10: Principales especies de macrófitas empleadas en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Familia	Especie
Amaranthaceae.	<i>Alternanthera philoxeroides</i> Griseb (*)
Amaryllidaceae	<i>Agapanthus africanus</i> (*)
Araceae	<i>Zantedeschia aethiopica</i>
Asparagaceae	<i>Chlorophytum comosum</i> (Thunb.) Jacques (*)
Asphodelaceae	<i>Hemerocallis flava</i> L. <i>Hemerocallis dumortieri</i>
Cannaceae	<i>Canna indica</i> <i>Canna hybrids</i> <i>Canna limbata</i> (*)
Cyperaceae	<i>Cyperus alternifolius</i> <i>Cyperus articulatus</i> <i>Cyperus papyrus</i> L. <i>Cyperus isocladius</i> (*) <i>Cyperus giganteus</i> <i>Scirpus cernuus</i> (*) <i>Scirpus alternifolius</i> (*) <i>Schoenoplectus californicus</i>
Heliconiaceae	<i>Heliconia psittacorum</i>

Familia	Especie
	<i>Heliconia rostrata</i>
	<i>Heliconia stricta</i>
	<i>Heliconia caribaea</i> Lam (*)
Iridaceae	<i>Iris sibirica</i>
Lamiaceae	<i>Mentha aquatica</i> (*)
Marantaceae	<i>Thalia geniculata</i>
Myrtaceae	<i>Eucalyptus Bentamii</i> (*)
Pedaliaceae	<i>Sesamum indicus</i> (*)
Pontederiaceae	<i>Eichhornia crassipes</i>
	<i>Pontederia parviflora</i> (*)
Poaceae	<i>Avena strigosa</i> Schreb
	<i>Brachiaria spp</i>
	<i>Cynodon spp</i>
	<i>Eragrostis plana</i> Nees (*)
	<i>Hymenachne grumosa</i>
	<i>Oryza sativa</i> L.
	<i>Paspalum paniculatum</i>
	<i>Panicum cf. racemosum</i> (*)
	<i>Phragmites australis</i>
	<i>Vetiveria zizanioides</i> L. Nash
Typhaceae	<i>Typha domingensis</i>
	<i>Typha latifolia</i>
	<i>Typha angustifolia</i>
Strelitziaceae	<i>Strelitzia reginae</i>
Xanthorrhoeaceae	<i>Hemerocallis flava</i> L. (*)
Zingiberaceae	<i>Hedychium coronarium</i>
	<i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Maas (*)

Leyenda: (*): Especie empleada en humedal construido no reportada por Rodríguez *et al.* (2020)

4.1.3.5. Tipos de sistemas para el tratamiento del agua residual doméstica

En la mayoría de las experiencias reportadas, los humedales construidos son utilizados en el tratamiento de aguas residuales pretratadas, cumpliendo un rol de tratamiento secundario o terciario; por lo que un sistema de tratamiento completo necesita un tratamiento preliminar para la retención de sólidos flotantes de gran tamaño y la separación de arena, luego un tratamiento primario para separar los sólidos suspendidos sedimentables e incluso, un tratamiento secundario anaerobio, cuando los niveles de materia orgánica y microorganismos sean muy altos para que el agua residual ingrese al medio filtrante del humedal construido en condiciones adecuadas.

De la revisión sistemática se reconocen 07 tecnologías que se combinan con los humedales construidos para conformar sistemas descentralizados de tratamiento de agua residual doméstica. Como tratamiento preliminar, resalta el uso conjunto de rejas y desarenador, mientras que, para el tratamiento primario se ha empleado tanques de sedimentación o tanques sépticos. Además, cuando los humedales construidos son el tratamiento terciario, previamente se reportan reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA o UASB, por siglas en inglés), reactores anaerobios compartimentados (RAC o BAC, por siglas en inglés), filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA o UAS, por siglas en inglés) o lagunas de estabilización, tal como se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11: Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales construidos en América Latina y el Caribe

Etapa de tratamiento	Tecnologías
Tratamiento preliminar	Rejas y desarenador
Tratamiento primario	Tanque de sedimentación
	Tanque séptico
	RAFA
Tratamiento secundario	RAC
	FAFA
	Laguna de estabilización

En base al análisis de la información, se presentan diversas configuraciones de sistemas de tratamiento para agua residual doméstica empleando humedales construidos en la región de América Latina y el Caribe, las cuales se representan en la Figura 8.

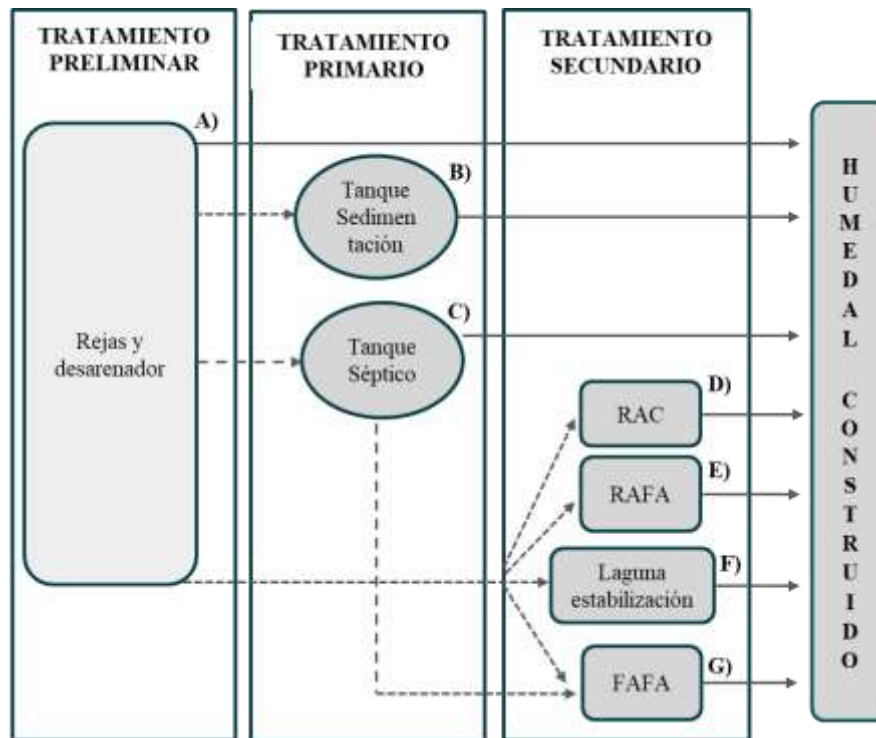


Figura 8: Configuraciones de sistemas para el tratamiento del agua residual doméstica con humedales construidos en ALC

Cuando se desea tratar agua residual doméstica cruda y lodo simultáneamente, el sistema de tratamiento está conformado por rejas y desarenador que se acoplan a un HC-Fr, el cual, actúa como tratamiento primario y secundario (A). Mientras que, si el agua residual doméstica tiene un alto nivel de sólidos suspendidos se requiere de un tratamiento primario empleando tanques de sedimentación (B) o tanques sépticos (C) seguidos por un HC-FSS-H o menos común, un HC-FSS-V.

Además, se reconoce la tendencia de usar a los humedales construidos como tratamiento terciario posterior al tratamiento de reactores anaeróbicos tipo RAFA (D) (Colijuri *et al.* 2009, Costa *et al.* 2018, Oliveria *et al.* 2019;) o tipo RAC (E) (Trein *et al.* 2015, Méndez *et al.* 2015, Rousso *et al.* 2016, Pelissari *et al.* 2017, Campos y Teixeira 2018, 2019). Este sistema de tratamiento tiene la finalidad de

reducir altos niveles de carga de materia orgánica y microorganismos del afluente o cumplir con legislación que exige límites muy bajos en el efluente antes de su descarga al alcantarillado o cuerpo receptor.

Otro tipo de tecnología que se emplea junto al humedal construido, son las lagunas de estabilización (F) (Katsenovich *et al.* 2009, Mari y Correa 2010, Nuñez *et al.* 2011, Silva y Valverde 2011, Ucker *et al.* 2012, Dos Santos *et al.* 2013). Sin embargo, es un sistema cada vez menos empleado por el gran requerimiento de área. La configuración menos reportada implica usar filtros anaeróbicos de flujo ascendente, que pueden o no acoplarse a tanques sépticos para mejorar el rendimiento del sistema. Como a nivel domiciliario o comunal, la carga de sólidos gruesos y arena es baja, se puede prescindir del tratamiento preliminar (Véase líneas puntiagudas en la Figura 8) o si es necesario, el desarenador puede ser reemplazado por una trampa de grasa.

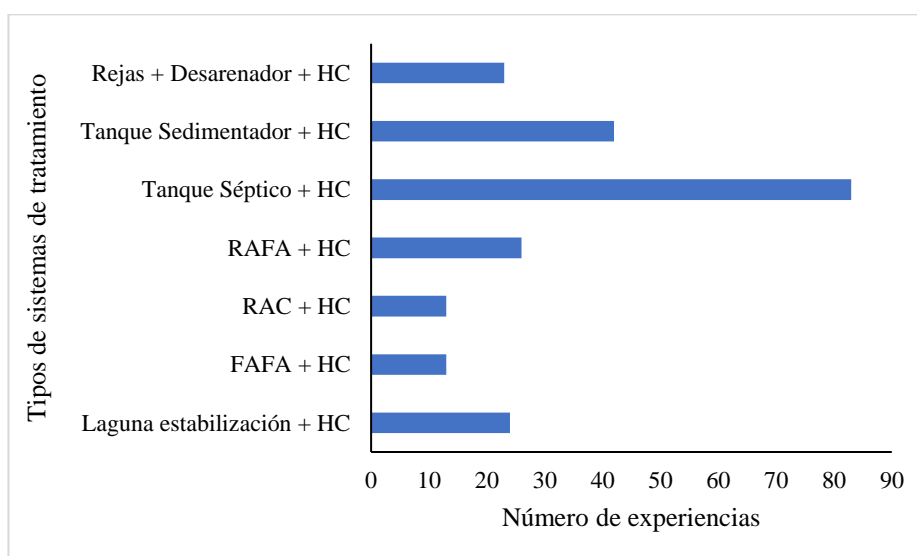


Figura 9: Número de experiencias por tipo de sistema con humedales construidos para el tratamiento del agua residual doméstica en Latinoamérica y el Caribe

En concordancia con los resultados de la revisión sistemática a nivel mundial de Moreira y Oliveira (2020) sobre saneamiento rural con humedales construidos, en la Figura 9 se observa que el sistema conformado por “Tanque séptico y HC”, es la configuración más empleada en la región de ALC, como sistema de tratamiento descentralizado (23 por ciento del total de experiencias). Un ejemplo del buen

rendimiento de este tipo de sistema de tratamiento es presentado por Cordesius y Hedström (2009) con un tanque séptico y HC-FSS-H en San Antonio de buena vista (Cochabamba, Bolivia), logrando la reducción de DBO5 entre 80 a 97 por ciento, mientras que la DQO fue 80 a 90 por ciento, llegando a concentraciones menores de 80 mg/l establecidos como límites en la norma boliviana. En tal sentido, es el sistema que más evidencias presenta de eficiencia de remoción de contaminantes, para poder determinar las variables que afectan su comportamiento y posteriormente determinar el potencial de la aplicación de los humedales en nuestro país.

4.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES EN EL RENDIMIENTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

4.2.1. Evaluación de calidad de las experiencias

De 170 artículos seleccionados se identificaron 359 experiencias sobre humedales construidos en el tratamiento de agua residual doméstica, de las cuales 40 experiencias no presentan fecha del estudio o periodo de duración, por lo que no se podía corroborar si cubren como mínimo 06 meses de estudio o dos estaciones del año, por lo que se excluyeron de la evaluación de calidad.

Para la evaluación de la calidad, se revisó el cumplimiento del primer criterio de calidad “Riesgo moderado de sesgo”, en base a la duración del estudio y cantidad de muestreos mínimos, teniendo que aquellas experiencias que no cumplen con dicho criterio se asignan a la Categoría 1.

Con el resto de experiencias, se revisó el cumplimiento del resto de criterios, siendo clave el cumplimiento del criterio “Procesos de remoción cuantificados”, para que las experiencias pasen a la categoría 2; caso contrario, se mantienen en la categoría inferior. Posteriormente, se evaluó el criterio “Replicación”, obteniendo 46 experiencias que cumplen con al menos cuatro criterios; por lo que se clasificaron en la categoría 3.

Tabla 12: Resultados de la evaluación de calidad de las experiencias

Categorías de calidad	Descripción	N° experiencias
Categoría 1	No cumple con los criterios de calidad	219
Categoría 2	Aceptable nivel de calidad	55
Categoría 3	Alto nivel de calidad	45

La baja cantidad de experiencias en categoría 3, se debe a que la replicación real es inusual en los estudios de eliminación de materia orgánica y nutrientes porque se dedican a estudiar sólo un humedal o humedales diferentes. Sin embargo, las mediciones de un mismo humedal durante un año completo se puede considerar una cuasi réplica de dos semestres, por lo que se consideraron aquellas experiencias con periodos de un año a más aceptables para la categoría 3. Así tenemos 15 experiencias que investigan humedales suficientemente similares como para ser considerados réplicas, mientras que 30 experiencias fueron cuasi replicados a través de mediciones durante dos semestres de un año o más.

Las experiencias de la categoría 2 y 3, se consideraron aceptables para la extracción de datos cuantitativos sobre remoción de materia orgánica y nutrientes, y aquellas que presentaban datos estadísticos completos (desviación estándar y número de muestras) se usaron para el meta-análisis.

4.2.2. Análisis de las eficiencias de remoción

Se eligieron los parámetros más comunes para describir la eficiencia de un tratamiento de aguas residuales: Demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). En el Anexo 3, se da a conocer los datos extraídos para el análisis de la remoción de materia orgánica y nutrientes de cada una de las experiencias en categoría 2 y 3.

a. Remoción de materia orgánica

Para evaluar la remoción de la materia orgánica se eligió como parámetro la DQO, porque en comparación a la DBO₅ sólo detecta el material orgánico que degradan los microorganismos, mientras que la DQO incluye a los compuestos

orgánicos no biodegradables y algunos compuestos inorgánicos. Además, la concentración de DQO en el afluente y efluente se informó para casi todas las experiencias revisadas (n = 90).

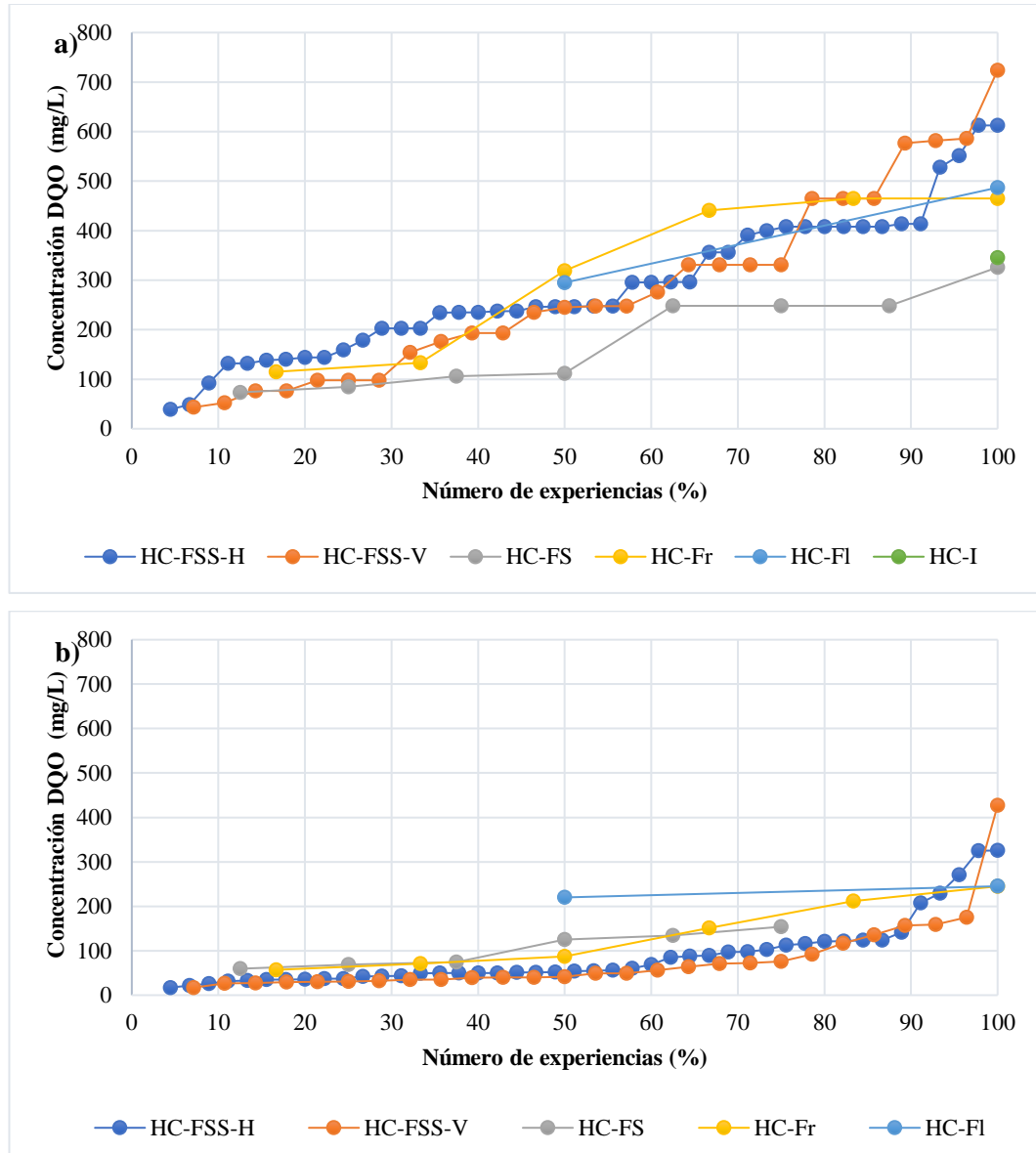


Figura 10: Distribución acumulada de la concentración de DQO en el afluente (a) y efluente (b) de las experiencias de HC en la región de ALC

La Figura 10 presenta la distribución acumulada de la concentración de DQO en el afluente y efluente de las experiencias de HC encontrados, siendo posible observar que alrededor del 70 por ciento de los casos de HC-FSS-H y HC-FSS-V recibieron concentraciones de DQO entre 100 a 400 mg/L, considerado como un rango de carga media según Metcalf y Eddy (2003). Sin embargo, las

concentraciones de DQO del efluente para el 70 por ciento de los casos fueron menores que 100 mg/L, cumpliendo con la normativa de descarga de aguas residuales en cuerpos receptores de países de ALC como Brasil³ (≤ 360 mg/L para caudal entre 20 a 100 m³/d), Perú⁴ (< 200 mg/L), Colombia⁵ (< 180 mg/L) y El Salvador⁶ (150 mg/L).

En la Figura 11 se muestra la eficiencia de remoción de materia orgánica en base a la DQO según el tipo de humedal construido. En general se obtuvieron valores positivos que indican la reducción de este parámetro en el efluente en todos los tipos de humedal. Resalta que en el 75 por ciento de los casos de HC-FSS-H (n= 45) presentan eficiencia de remoción mayor al 50 por ciento, mientras que el 75 por ciento de los casos de HC-FSS-V (n= 28) presentan eficiencia de remoción de DQO mayor al 40 por ciento. Sin embargo, el valor promedio de la eficiencia de remoción para los HC-FSS-H (64 ± 23 por ciento) es más bajo que el valor promedio de los HC-FSS-V (68 ± 28 por ciento). Por lo tanto, se debe tener en cuenta que los porcentajes de eficiencia de remoción dependen de las concentraciones del contaminante al ingreso y salida del tratamiento, por lo que, los cambios mínimos en la concentración de salida pueden derivar de una baja concentración de entrada, lo cual indica que la comparación del desempeño en términos del porcentaje de remoción puede ser engañoso.

³ Resolución 128/06. Consejo de Estado de Río Grande do Sul sobre el Medio Ambiente

⁴ Decreto Supremo N ° 003 del 2010. Ministerio del Ambiente

⁵ Resolución 631 de 2015. Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

⁶ RTS 13.05.01:18, Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para descarga y Manejo de Lodos Residuales

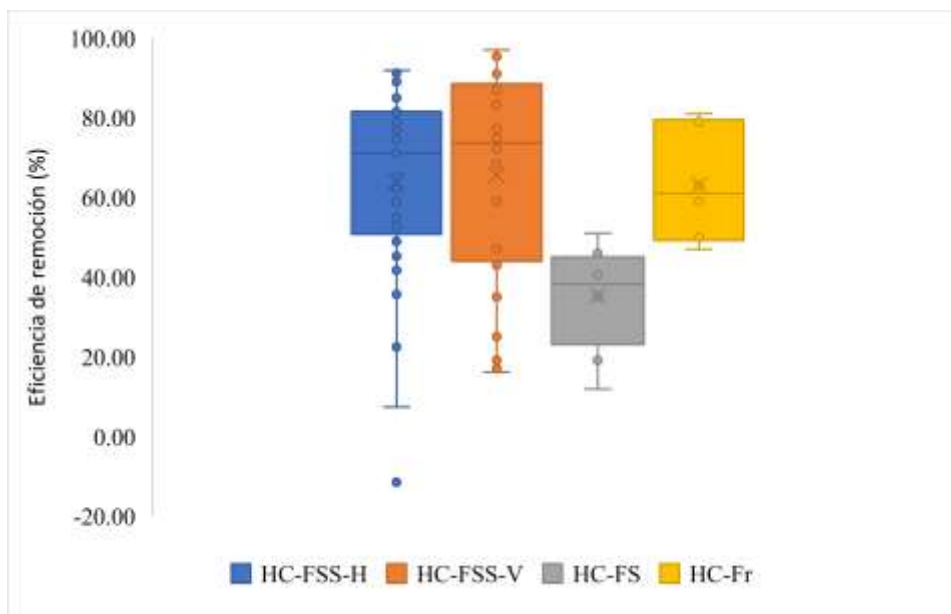


Figura 11: Eficiencia de remoción de DQO según tipo de humedal construido

b. Remoción de nitrógeno total

El nitrógeno total (NT) es el parámetro que combina todas las especies de nitrógeno en las aguas residuales; sin embargo, en algunos estudios se reporta el Nitrógeno total de Kendhal y otras especies como NO_3^- , NO_2^- y NH_4 , por lo que sólo 35 casos reportaron la remoción de NT.

En la Figura 12 se presenta la distribución acumulada de la concentración de NT en el afluente y efluente de las experiencias de HC encontrados, lográndose observar que el 60 por ciento de los casos de HC tanto de flujo horizontal como vertical, trataron afluentes con concentraciones de NT menores a 80 mg/L, considerada como una carga media de NT según Metcalf y Eddy (2003).

Posterior al tratamiento, la concentración de NT en los efluentes para el 60 por ciento de los casos de HC-FSS-H y HC-FSS-V, se reduce a valores menores que 50 mg/L y 45 mg/L, respectivamente, demostrando que se cumple con la normativa de países como Chile⁷, donde el LMP para descarga en cuerpos de agua

⁷ Decreto 90: Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio secretaría general de la presidencia. 07-03- 2001

fluviales es 50 mg de NKT/L, contrario a límites más estrictos de Brasil (LMP \leq 20 mg/L para caudal menor a 100 m³/d).

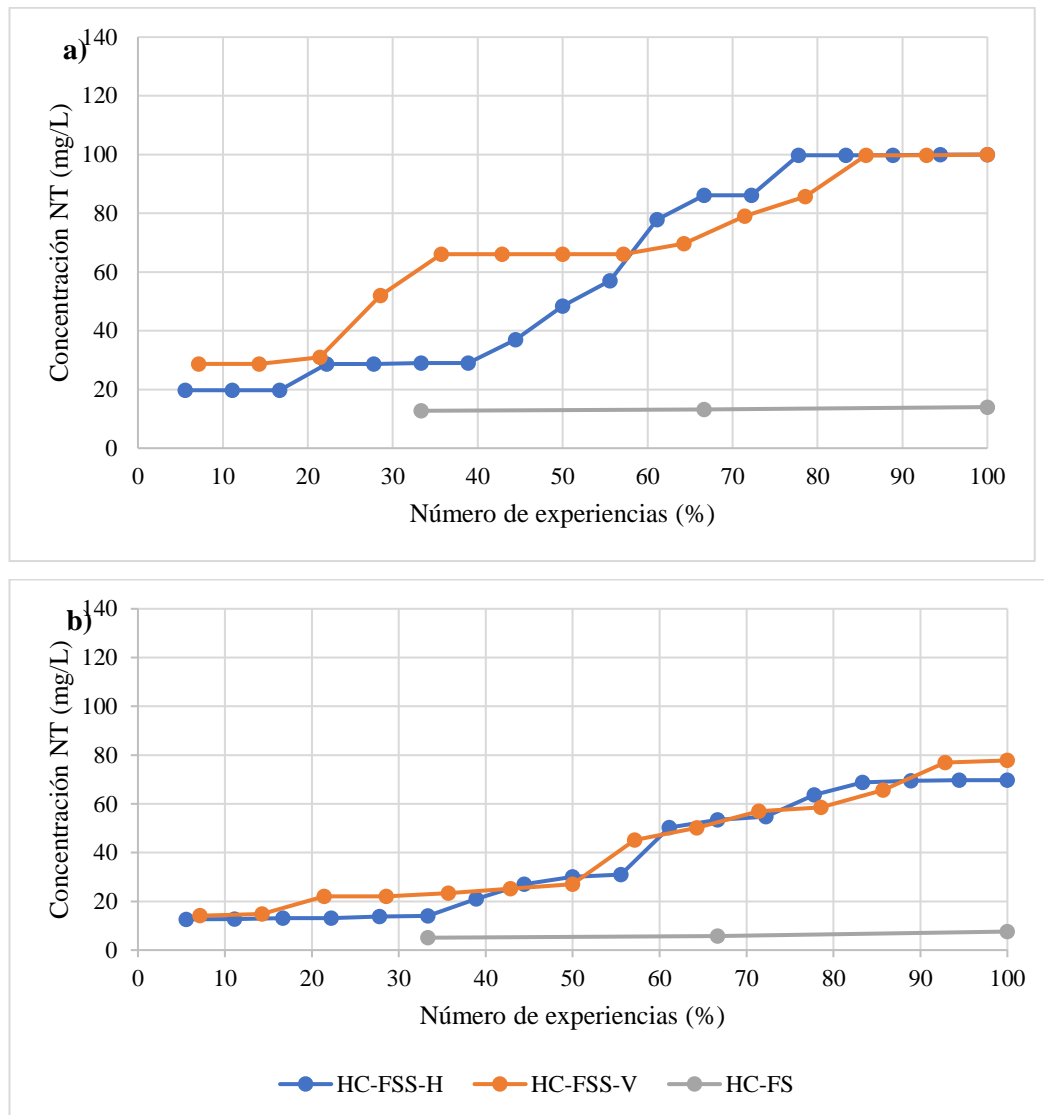


Figura 12: Distribución acumulada de la concentración de NT en el afluente (a) y efluente (b) en las experiencias de HC encontrados en la región ALC

Las transformaciones para la remoción del nitrógeno, dependen del flujo de humedal, por lo tanto, en los humedales de flujo horizontal al predominar las condiciones anóxicas debido a la saturación permanente del medio, se proporcionan condiciones propicias para la desnitrificación en presencia de materia orgánica; en cambio, en los humedales de flujo vertical donde predominan las condiciones aerobias, debido a la alimentación intermitente que facilita la difusión del oxígeno en el lecho, se favorece a la nitrificación (Vymazal 2007).

Así tenemos que, la Figura 13 muestra el porcentaje de eficiencia de remoción del NT para cada tipo de humedal, donde la mediana de los casos de HC-FSS-H alcanza una eficiencia de remoción de 40 por ciento; mientras que un mejor resultado se alcanza con los HC-FSS-V, ya que la mediana presenta una eficiencia de remoción del 50 por ciento. Aunque, resalta aún más los altos porcentajes de remoción de NT en los HC-FSS con promedio de 66 ± 5 por ciento.

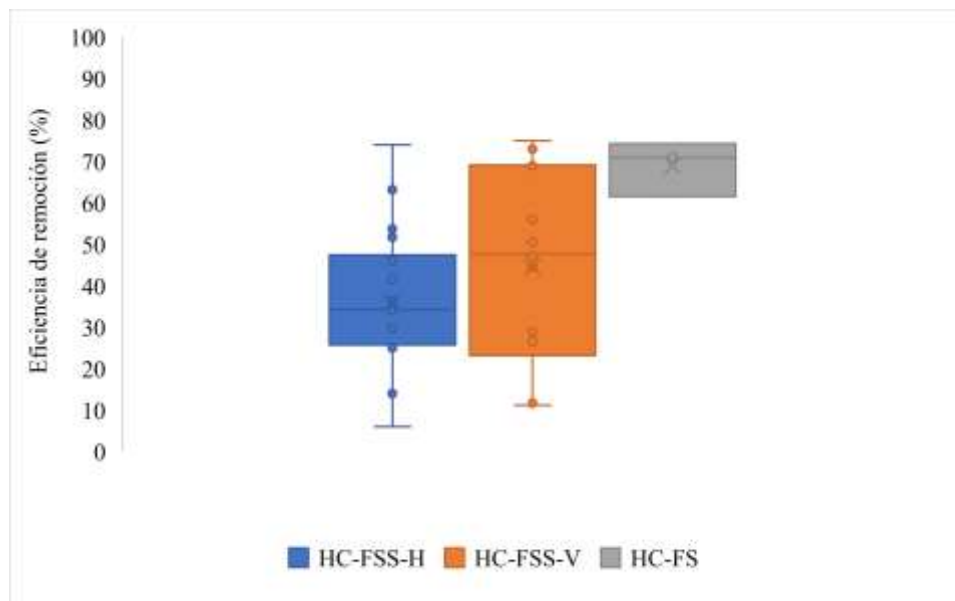


Figura 13: Eficiencia de remoción del nitrógeno total según tipo de humedal construido

c. Remoción de fósforo total

La remoción del fósforo total es un parámetro que se presentó en más estudios que la remoción del nitrógeno (47 casos). A partir de los datos extraídos que se muestran en la Figura 14, es posible observar que el rango de la concentración de PT en el afluente es muy diverso, teniendo concentraciones débiles (menores a 6 mg/L) a fuertes (mayores a 20 mg/L) según Metcalf y Eddy (2003). Posterior al tratamiento, la concentración de PT en el efluente disminuye a valores menores de 15 mg/L, a excepción de la experiencia con HC-FS de Sa Salomao *et al.* (2012), la cual corresponde a la primera unidad de un sistema de tratamiento conformado por tanque de algas, HC-FSS-V y HC-FSS-H, lo cual aumenta su eficiencia final.

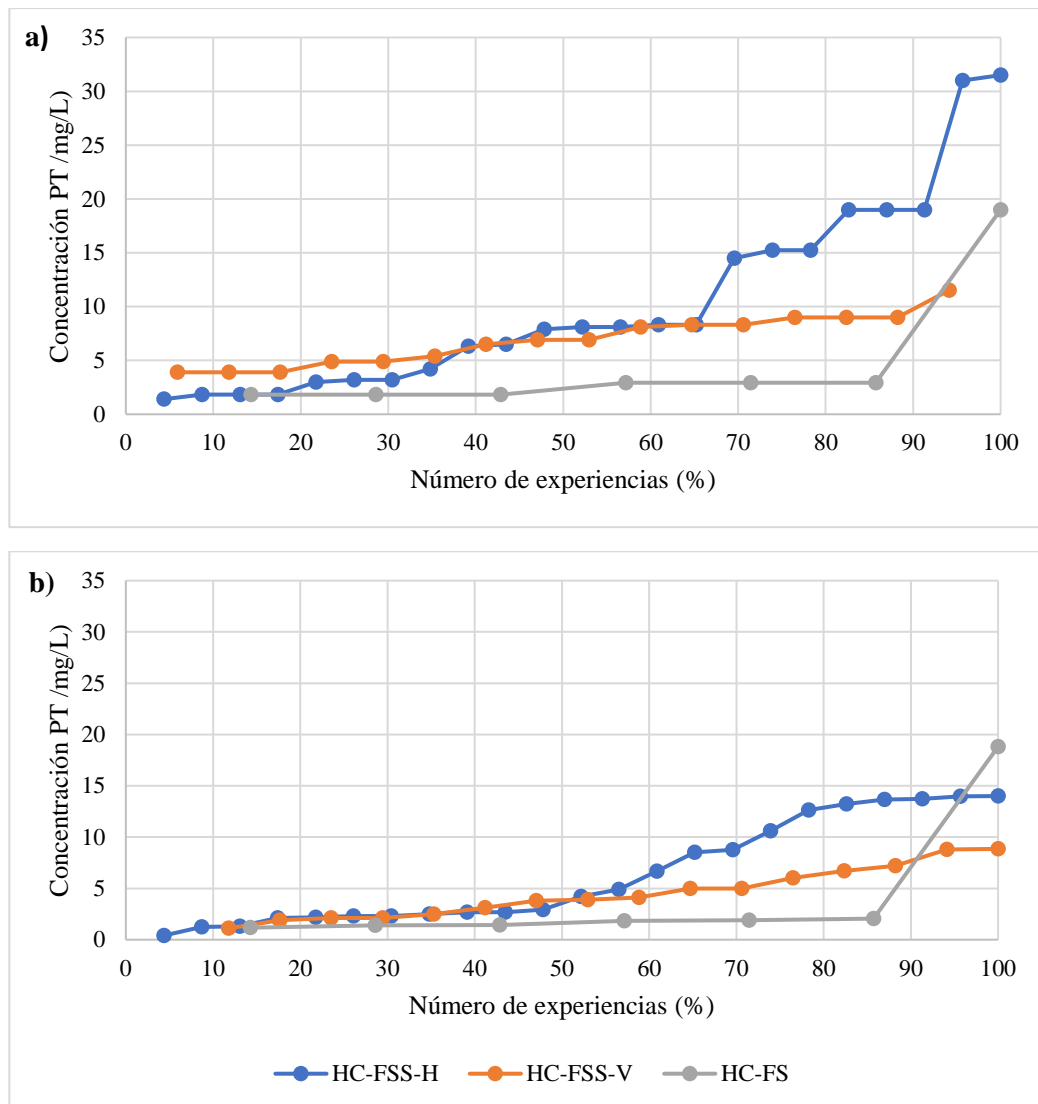


Figura 14: Distribución acumulada de la concentración de PT en el afluente (a) y efluente (b) en las experiencias de HC identificados en la región ALC

Respecto al cumplimiento de normativa son pocos los países que regulan la concentración de este nutriente dentro de los límites máximos permisibles para descarga de agua residual, en Chile, el LMP es 10 mg/L de fósforo; mientras que en Brasil es 4 mg/L de fósforo total para caudal menor de 100 m³/d. Por lo tanto, alrededor del 50 por ciento de las experiencias de HC-FSSH y HC-FSS-V cumplen con los límites mencionados.

En la Figura 15, se muestra la eficiencia de remoción de PT para tres tipos de HC, con promedios cercanos al 40 por ciento para el HC-FS y HC-FSS-V.

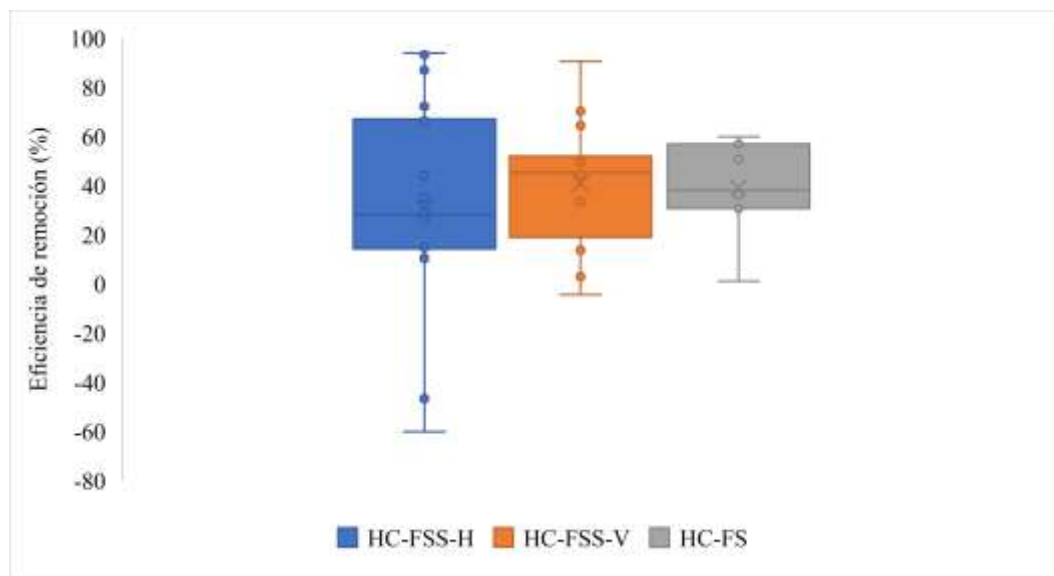


Figura 15: Eficiencia de remoción del fósforo total según tipo de humedal construido

Tabla 13: Remoción de materia orgánica y nutrientes por clase de humedal construido en la región ALC

Parámetros	Tipo de humedal construido					
	HC-FSS-H	HC-FSS-V	HC-FS	HC-Fr	HC-FI	
DQO	\bar{X} Afluente \pm ds (mg/L)	294 \pm 147	302 \pm 205	181 \pm 97	323 \pm 163	391 \pm 136
	\bar{X} Efluente \pm ds (mg/L)	89 \pm 75	97 \pm 128	115 \pm 49	137 \pm 78	233 \pm 18
	\bar{X} Remoción \pm ds (%)	66 \pm 23	66 \pm 27	35 \pm 13	63 \pm 14	36 \pm 28
	n	45	28	8	6	2
NT	\bar{X} Afluente \pm ds (mg/L)	59 \pm 33	67 \pm 25	13 \pm 0	-	-
	\bar{X} Efluente \pm ds (mg/L)	38 \pm 24	41 \pm 23	5 \pm 1	-	-
	\bar{X} Remoción \pm ds (%)	36 \pm 17	44 \pm 24	66 \pm 5	-	-
	n	18	14	3	-	-
PT	\bar{X} Afluente \pm ds (mg/L)	10 \pm 9	7 \pm 2	5 \pm 6	-	-
	\bar{X} Efluente \pm ds (mg/L)	6 \pm 5	5 \pm 2	5 \pm 0	-	-
	\bar{X} Remoción \pm ds (%)	31 \pm 42	41 \pm 25	36 \pm 20	-	-
	n	23	17	7	-	-

En comparación a Land *et al.* (2016), quienes de 112 experiencias de HC desarrolladas en Europa y América del Norte, obtuvieron que la eficiencia de remoción promedio de NT es 39 ± 21 por ciento; en la Tabla 13 se muestra que los reportes promedio para las experiencias en países de ALC (36 ± 17 por ciento para HC-FSS-H, 44 ± 24 por ciento para HC-FSS-V y 66 ± 5 por ciento para HC-FS) son muy similares.

Igualmente, Land *et al.* (2016), obtuvieron que la eficiencia de remoción promedio de PT es 41 ± 52 por ciento para 146 experiencias desarrolladas en Europa y América del Norte; en tal sentido, pese a las diferencias climáticas, en la Tabla 13 se están reportando promedios cercanos (31 ± 42 por ciento para HC-FSS-H, 41 ± 25 por ciento para HC-FSS-V y 36 ± 20 para HC-FS).

Con base en el desempeño reportado por las experiencias revisadas, es posible afirmar que, la mayoría de los sistemas con humedales construidos alcanzan una eficiencia de remoción de contaminantes satisfactoria. Todos los resultados hallados en esta investigación, demuestran que los sistemas de tratamiento del agua residual doméstica con humedales construidos son apropiados para las condiciones geográficas y climáticas de la región de ALC.

4.2.3. Variables en el rendimiento de los humedales construidos

Para identificar las variables que afectan el rendimiento de los humedales construidos, se realizó un meta-análisis con los estudios de calidad moderada y alta. Los resultados obtenidos para cada parámetro se presentan en las Figuras 16, 17 y 18, que muestran diagramas de bosque de las respuestas logarítmicas de la relación entre las cargas de salida y cargas de entrada ($\ln(\text{carga de salida/carga de entrada})$) para DQO, NT y PT, respectivamente.

El diagrama de bosque para la remoción de DQO muestra una remoción global general con límites de confianza razonablemente estrechos (Figura 16). Se observa que todas las experiencias informan baja variabilidad, siendo el estudio de Bohórquez *et al.* (2012), aquel que obtuvo las tasas de eliminación más altas. De los 32 casos, tenemos que los límites de confianza de 05 casos indican una remoción de DQO estadísticamente no significativa debido a que abarcan la línea

de efecto cero. El tamaño del efecto resumen promedio es -1.214 ± 0.123 . La varianza entre estudios (T^2) se estimó en 0.462 y el estadístico I^2 fue del 98.26 por ciento. Por tanto, la heterogeneidad de las experiencias puede considerarse alta. El resumen del efecto promedio general representa una mediana del índice de remoción de DQO (R) de aproximadamente 0.30. Esto significa que la mediana de remoción de DQO o eficiencia de remoción es del 70 por ciento, con un intervalo de confianza al 95 por ciento del 62 al 77 por ciento.

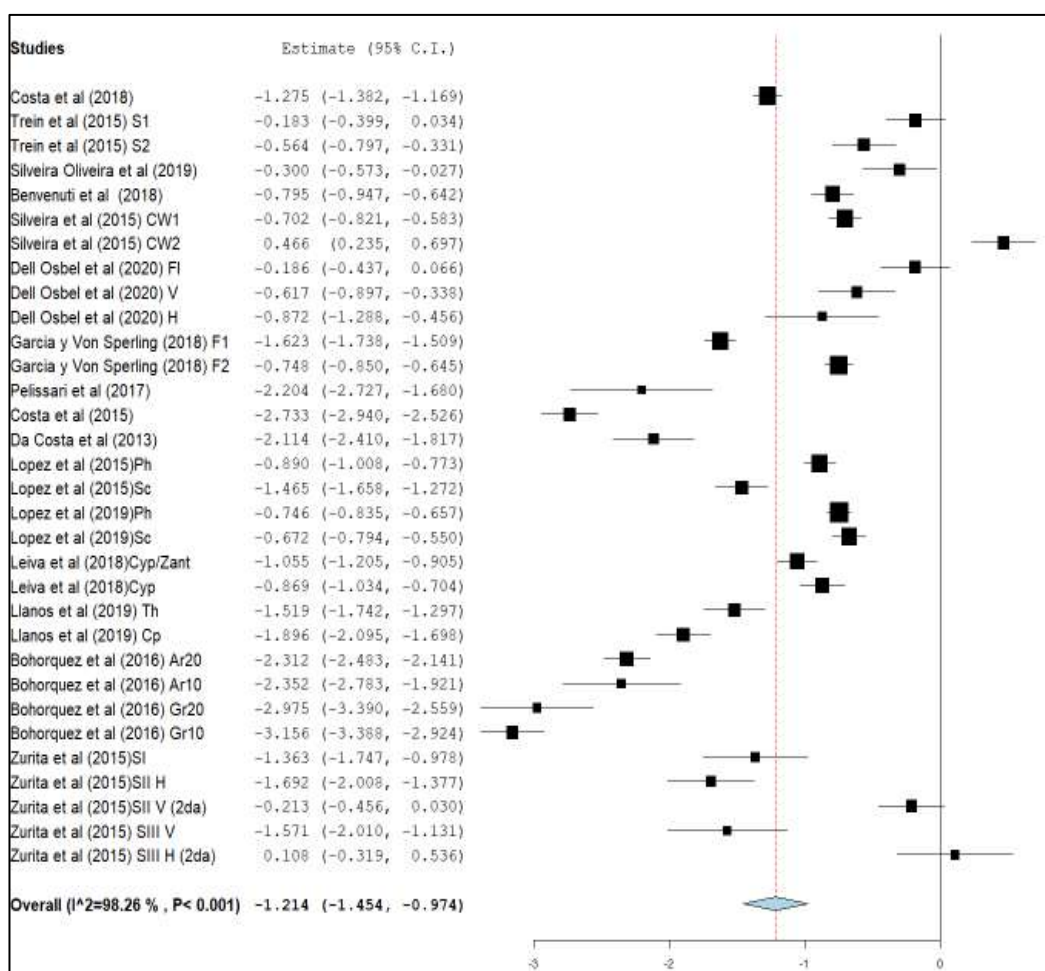


Figura 16: Diagrama de bosque que muestra el tamaño del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de DQO para humedales construidos en la región de ALC

El diagrama de bosque para la remoción de TN muestra una remoción promedio general con límites de confianza amplios (Figura 17). Solo cinco de las 26 experiencias reportan una moderada variabilidad, y se puede observar que dos de ellas también tuvieron las tasas de eliminación más altas (Katsenovich *et al.* 2009

y Miranda 2012). Para 22 experiencias, los límites de confianza indican una eliminación de NT estadísticamente significativa, el resto de experiencias, los límites de confianza abarcan la línea de efecto cero. El tamaño del efecto resumen promedio general es -0.556 ± 0.04 . La varianza entre estudios (T^2) se estimó en 0.023, y el estadístico I^2 fue del 88 por ciento. Por tanto, la heterogeneidad de la base de pruebas puede considerarse alta. El efecto resumen de promedio general representa una mediana del índice de remoción de NT (R) aproximadamente de 0.57. Esto significa que la mediana de la reducción de carga NT, o eficiencia de remoción, es del 43 por ciento, con un intervalo de confianza del 95 por ciento del 38 al 47 por ciento.

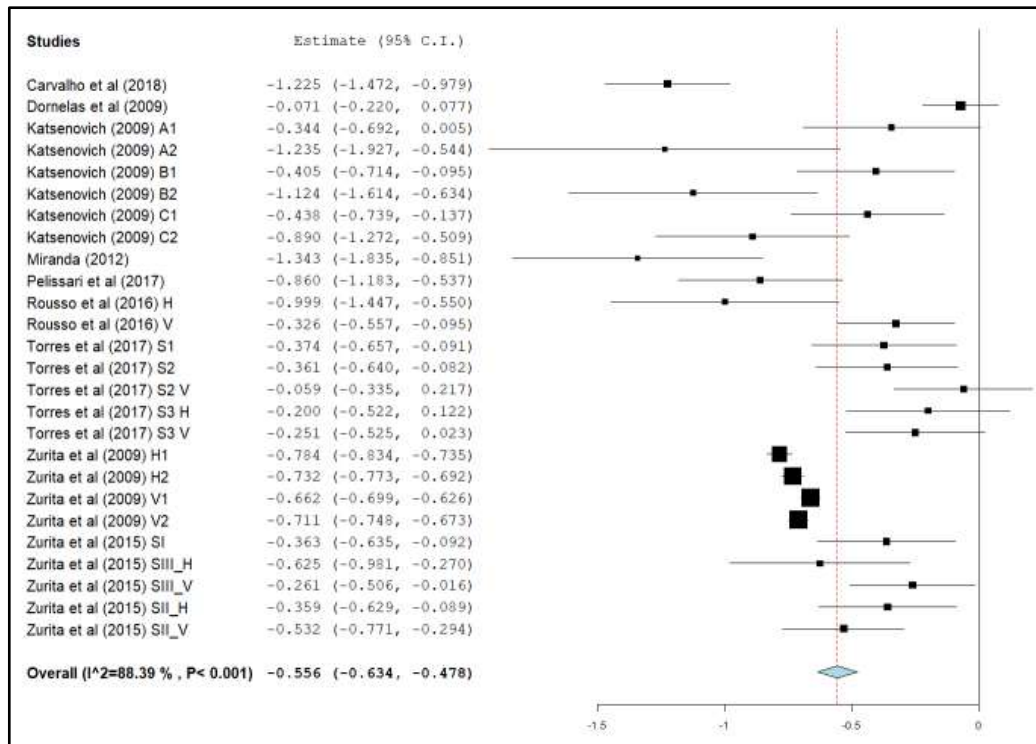


Figura 17: Diagrama de bosque que muestra el tamaño del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de NT para humedales construidos en la región de ALC

Para la mayoría de experiencias en el diagrama de bosque para la eliminación de PT muestra intervalos de confianza más estrechos (Figura 18). En 29 de los 51 humedales se informó una remoción neta significativa. De los casos restantes, 09 exhibieron una eliminación neta de PT no significativa y 03 experiencias mostraron resultados desfavorables. El tamaño del resumen del efecto promedio

es muy significativo con límites de confianza bastante estrechos. La media es $-0,513 \pm 0.06$, que es muy similar que la media de NT. Al igual que en la remoción de NT, la heterogeneidad entre los estudios es alta para la remoción de PT. La varianza estimada entre estudios (T^2) fue de 0.14, mientras que I^2 la estadística fue del 97 por ciento. El efecto resumido promedio general representa una mediana de la tasa de eliminación de PT (R) de aproximadamente 0.60, que puede recalcularse a una mediana de eficiencia de eliminación de PT del 40 por ciento con un intervalo de confianza al 95 por ciento de 32 a 47 por ciento.

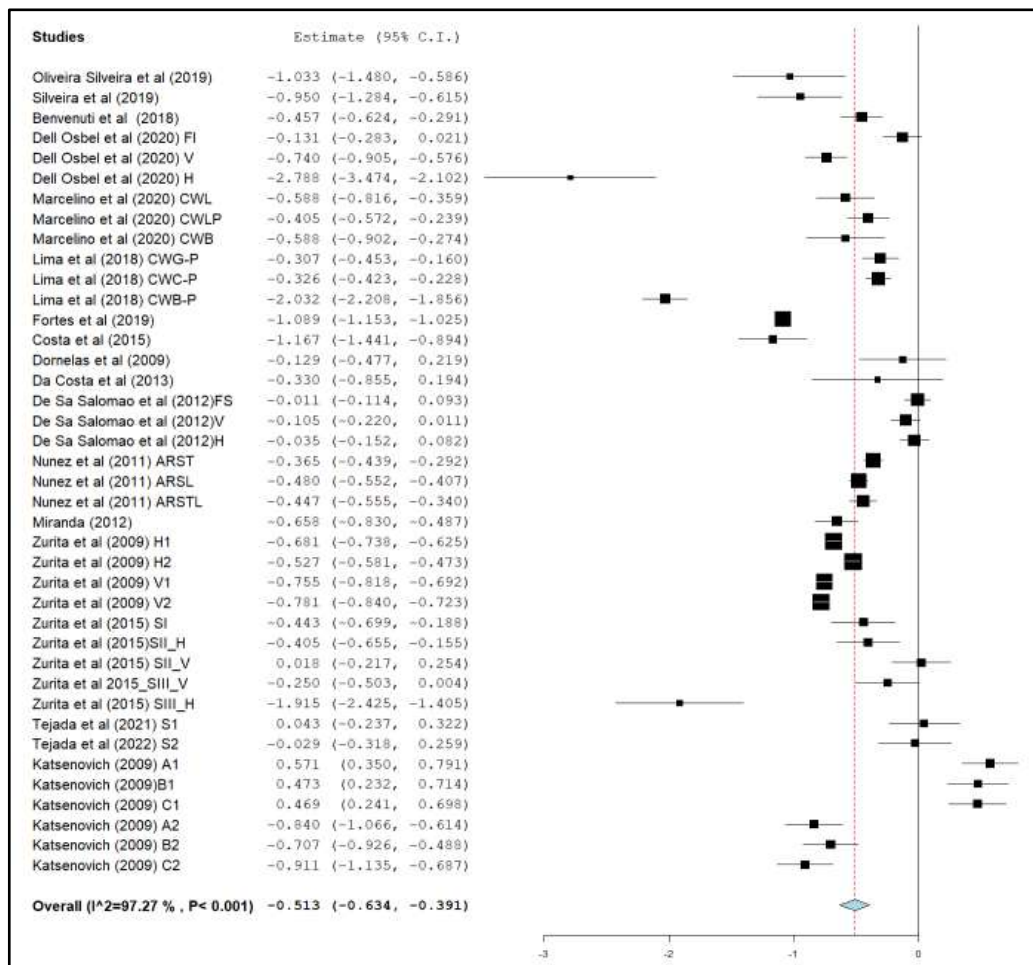


Figura 18: Diagrama de bosque que muestra el tamaño del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de PT para humedales construidos en la región de ALC

En comparación a Land *et al.* (2016), quienes obtuvieron la mediana de NT al 37 por ciento, con un intervalo de confianza del 95 por ciento del 29 al 44 por ciento y la mediana de PT de 46 por ciento con un intervalo de confianza del 95 por

ciento de 37 al 55 por ciento, en base a 112 experiencias desarrolladas en Europa y América del Norte; entonces, los resultados del presente meta-análisis en la remoción de nutrientes está dentro de los rangos publicados por otros autores.

En resumen, existe una fuerte evidencia de que los humedales construidos eliminan DQO, NT y PT; siendo la eficiencia promedio de eliminación aproximadamente del 51 por ciento. En un número muy reducido de estudios, se presentan tasas negativas de eliminación de TP. Además, las tasas de remoción de NT, generalmente, muestran una variación mayor.

La gran heterogeneidad de la evidencia exige un análisis de subgrupos para identificar el efecto de las principales variables o modificadores que pueden tener un efecto positivo o negativo sobre la eficiencia de remoción de los humedales construidos. Los resultados del análisis de subgrupos, se muestra en las Figuras 19, 20 y 21.

a. Grupo climático

Para la clasificación climática se tomó en cuenta el sistema de Köppen-Geiger que presenta cinco grupos: A (Clima Ecuatorial), B (Clima Árido), C (Clima Templado), D (Clima Continental) y E (Polar), los cuales se subdividen por las precipitación estacional y calor. Para el presente análisis a nivel de grupos, la mayoría de las experiencias no proporcionan esta información, por lo tanto, se extrajo de la base de datos cartográficos de Kottek *et al.* (2006).

El análisis de subgrupos con estudios de humedales construidos por grupo climático, muestra que la remoción de DQO (Figura 22 a) tiende a ser más eficiente para el grupo de humedales en clima ecuatorial, es decir, el tamaño del efecto tiende a ser más negativo, aunque el intervalo de confianza al 95 por ciento se superpone con el grupo de clima árido, posiblemente debido a que en ambos climas alcanzan temperaturas más altas, en comparación con el grupo de humedales en clima templado, que ha tenido menor rendimiento. Mientras que para la remoción de NT y PT (Figura 22 b y c), el patrón es notablemente similar para el grupo de clima ecuatorial, ya que los promedios de los efectos resumen

son relativamente cercanos entre sí con niveles de confianza que muestran una fuerte superposición.

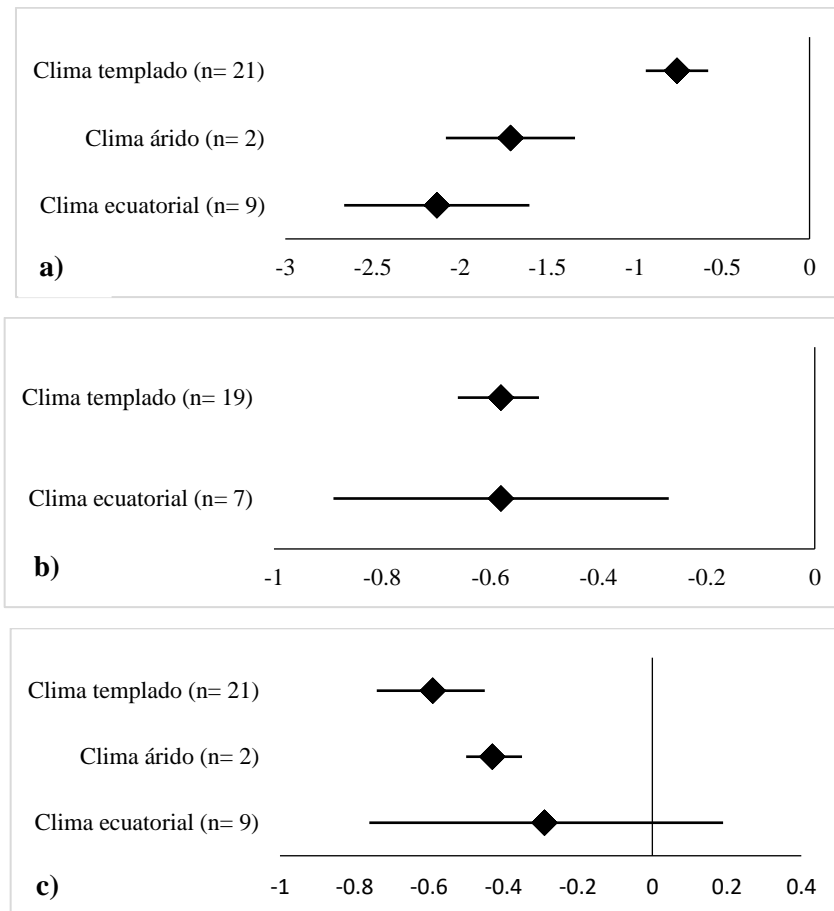


Figura 19: Resumen del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de a) DQO, b) NT y c) PT para subgrupos según el grupo climático

b. Tipo de humedal

Siguiendo la clasificación de los humedales construidos de Miglio *et al.* (2018), en el análisis por tipo de humedal se tiene que los efectos resumen en la remoción de DQO, NT y PT (Figura 20), son significativamente diferentes de cero, a excepción del grupo de humedales flotantes. Además, los promedios de efectos resumen tienden a ser bastante similares entre los grupos de humedales subsuperficiales verticales y horizontales, por lo cual, no se diferencia una influencia del tipo de humedal sobre el rendimiento de los humedales en la remoción de materia orgánica (DQO) o nutrientes (NT y PT).

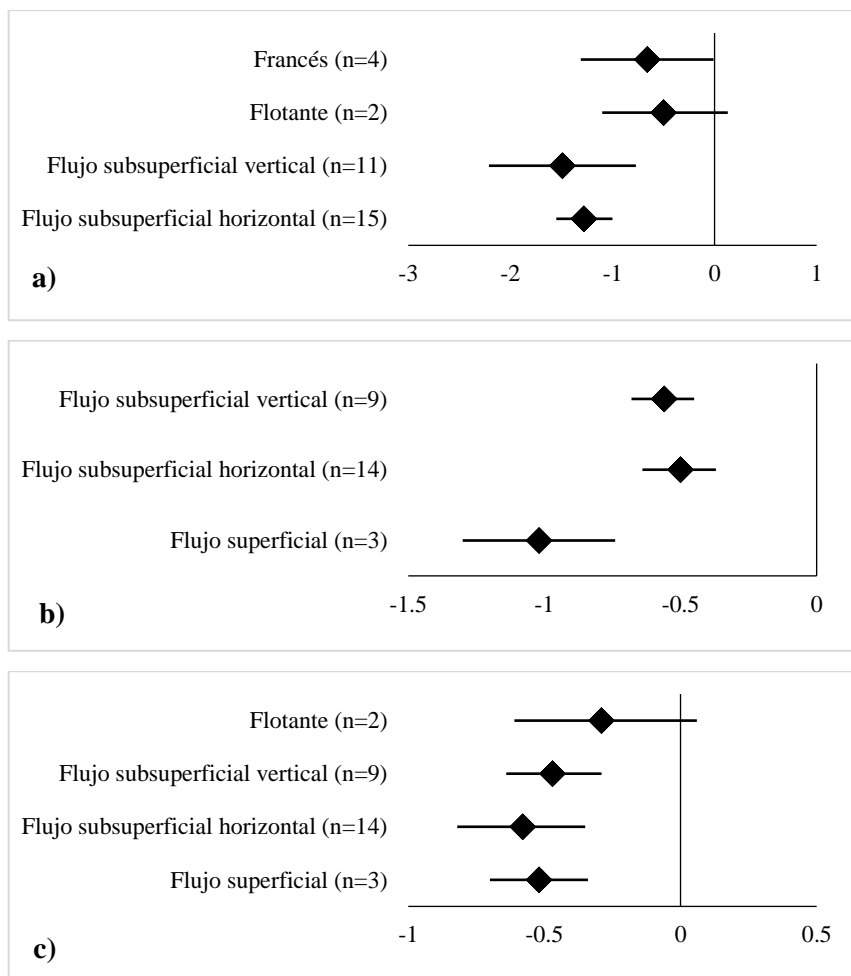


Figura 20: Resumen del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de a) DQO, b) NT y c) PT para subgrupos según el tipo de humedal

c. Origen de macrófitas

Con el nombre científico de las especies empleadas en cada experiencia de HC seleccionada, y utilizando la base de datos “Global Biodiversity Information Facility⁸”, la cual compila información georreferenciada de la distribución mundial de varias especies, se determinó el origen de las especies. De esta manera, se agruparon como especies nativas a aquellas originarias de América, tales como *Canna indica*, *Canna generalis*, *Cyperus articulatus*, *Heliconia rostrata*, *Heliconia psittacorum*, *Hymenachne grumosa*, *Schoenoplectus californicus*, *Thalia geniculata* y *Typha latifolia*. Mientras que el subgrupo de especies exóticas abarcó a aquellas oriundas de los demás continentes (Europa,

⁸ Disponible en: <https://www.gbif.org/>

África o Asia), como *Cyperus papyrus*, *Zantedeschia aethiopica*, *Strelitzia reginae* e *Iris sibirica*. Finalmente, cuando no se pudo dilucidar el rango nativo de una especie que presentaba distribución global, se consideró como especie cosmopolita; quedando el subgrupo de especies cosmopolitas conformado por las experiencias que emplearon a *Typha domingensis*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis* y *Cynodon dactylon Pers.*

En la Figura 21, se evidencia que la remoción de DQO, NT y PT es significativamente diferente de cero en todos los subgrupos de macrófitas, menos para el subgrupo de especies cosmopolitas en la remoción de PT, igualmente, este subgrupo es el que presenta la menor eficiencia promedio de remoción tanto de DQO como NT, aunque con superposición del intervalo de confianza.

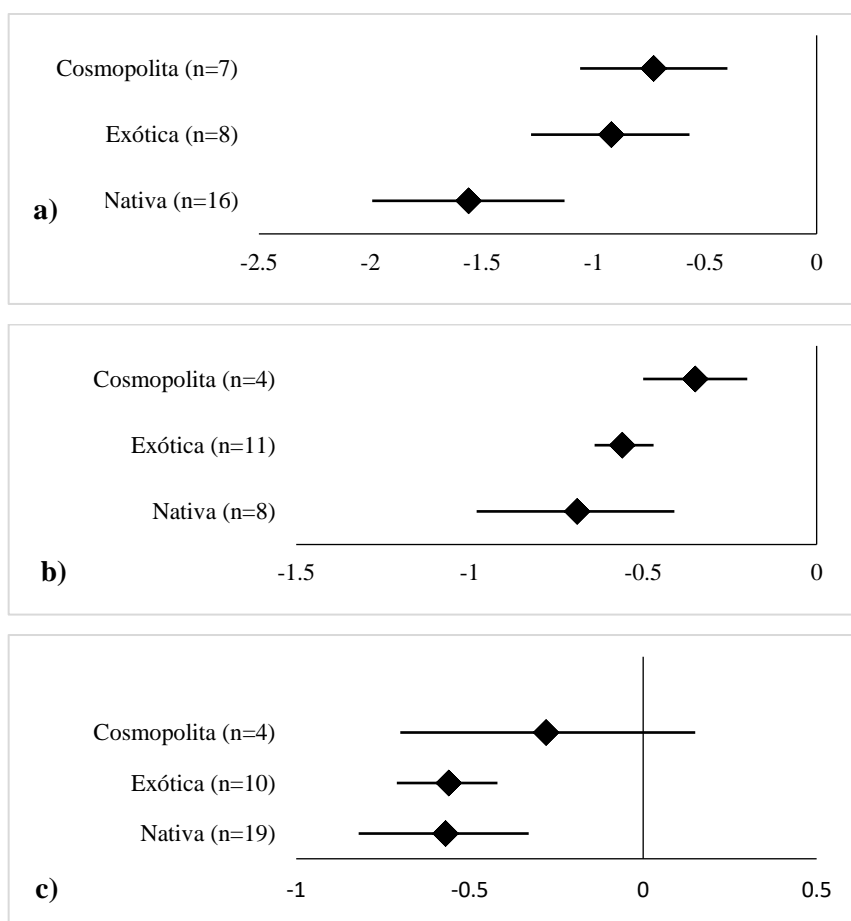


Figura 21: Resumen del efecto promedio e intervalos de confianza al 95 por ciento en la remoción de a) DQO, b) NT y c) PT para subgrupos según el origen de la macrófita

Lo más importante a recalcar en este análisis es la tendencia del subgrupo de especies nativas que parece ser más eficiente que las especies exóticas y cosmopolitas, lo cual podría estar indicando un modificador de efecto, principalmente para la remoción de materia orgánica, teniendo que validarse esta afirmación con la comparación de otros parámetros como la demanda biológica de oxígeno, sólidos totales y oxígeno disuelto. Sin embargo, se demuestra que las especies nativas, las cuales están adaptadas a las condiciones climáticas de la región, son una excelente alternativa para ser empleadas en el tratamiento del agua residual doméstica mediante humedales construidos.

Los análisis de subgrupos muestran que los humedales tienen una capacidad sólida para eliminar materia orgánica y nutrientes, aunque los intervalos de confianza del 95 por ciento de los promedios son amplios y hay más casos no significativamente diferentes de cero para la remoción de fósforo.

En base a los resultados, el clima parece ser un modificador de efecto significativo para la remoción de materia orgánica, pero sin influencia en la remoción de nutrientes, por lo que humedales en climas ecuatoriales tienden a tener una eliminación de materia orgánica más confiable que en climas más fríos.

Además, no se evidenció diferencias significativas entre el efecto de los tipos de humedal para la remoción de DQO, NT o PT. Mientras que, el origen de las macrófitas puede ser un modificador de efecto que requiere de mayores parámetros de comparación.

4.3. EVALUACIÓN DE LOS FACTORES EN LA APLICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN PERÚ

Se procedió a evaluar los factores relacionados a la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales construidos en el Perú, mediante el análisis integral de la normativa, limitantes y beneficios socioambientales de la implementación de humedales construidos en el Perú para el tratamiento de agua residual doméstica.

4.3.1. Factores legales

Se recopiló la normativa sobre el tratamiento de agua residual doméstica y relacionó con la implementación de humedales construidos, para determinar su posición frente a esta tecnología, la identificación de actores, vacíos y oportunidades. Se revisaron en total 19 documentos legales, que se enlistan a continuación:

- Ley N ° 29338, Ley de Recursos Hídricos (30 marzo de 2009)
- Ley N ° 28611, Ley General del Ambiente (21 abril de 2017)
- D. L. N ° 1280, Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento (29 diciembre 2016)
- D. L. N ° 1285, Modificación de la Ley de Recursos Hídricos (29 de diciembre de 2016)
- D. S. N ° 001-2010-AG, Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (23 marzo de 2010)
- D. S. N ° 019-2017-VIVIENDA, Reglamento de la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento (26 junio 2017)
- D. S. N ° 010-2017-VIVIENDA, Reglamento de los artículos 4 y 5 del Decreto Legislativo N° 1285, que modifica el artículo 79 de la Ley de Recursos Hídricos y establece disposiciones para la adecuación progresiva a la autorización de vertimientos y los instrumentos de gestión ambiental (12 de mayo de 2017)
- D.S. N ° 003 -2010-MINAM, Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda (17 de marzo de 2010)
- R. M. N ° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (24 octubre 2013)
- D. S. N ° 004-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental para Agua (7 junio de 2017)
- Ley N ° 27779, Ley de creación del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (11 de Julio 2002)
- Ley N ° 30156, Ley de Organización y funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, (19 de enero de 2014)

- D.S. N ° 010-2014-VIVIENDA, Reglamento de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (19 de junio 2014)
- D. S. N ° 006-2015-VIVIENDA, Modificación del ROF (11 marzo 2015)
- D. S. N ° 002-2012-VIVIENDA, Programa Nacional de Saneamiento Rural y cambio de nombre al Programa Nacional de Saneamiento Urbano (06 enero 2012)
- R. M. N ° 015-2012-VIVIENDA, Reglamento de protección ambiental para proyectos vinculados a las actividades de Vivienda, Urbanismo, Construcción y Saneamiento (13 setiembre 2012)
- R. M. N ° 383-2016-MINAM, Primera Actualización del Listado de Inclusión de los Proyectos de Inversión sujetos al SEIA (13 diciembre 2016)
- R. M. N ° 036-2017-VIVIENDA, Ficha Técnica Ambiental para los proyectos de inversión del Subsector Saneamiento, no comprendidos en el Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (30 enero 2017)

a. Servicio de tratamiento de agua residual doméstica

La Ley General del Ambiente, Ley N° 28611, estipula en el artículo 120° que el Estado tiene el deber de promover el tratamiento de las aguas residuales con fines de su reutilización, sin afectar la salud humana, el ambiente o las actividades en las que se reutilizarán. Siguiendo esta pauta, la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, establece la prohibición del vertimiento directo o indirecto de agua residual sin previa autorización, la cual está condicionada a la aprobación de un instrumento ambiental que compruebe que las condiciones del cuerpo receptor permiten desarrollar los procesos naturales de purificación.

Ante la necesidad de regular el servicio de saneamiento se promulgó La Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento, D. L. N° 1280, estableciendo como principio el acceso universal a los servicios de saneamiento en condiciones de eficiencia, sostenibilidad y calidad; incluyendo al servicio de tratamiento de aguas residuales para disposición final o reúso, el cual comprende todos los procesos de mejora de la calidad del agua residual proveniente del servicio de alcantarillado mediante procesos físicos, químicos, biológicos u otros, y los componentes necesarios para la disposición final o reúso.

Teniendo este sustento, en el artículo 26° del D. L. N° 1280, se indica que los prestadores de servicios de saneamiento deben implementar tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas residuales, a fin de cumplir con los Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad Ambiental (ECA) correspondientes; por lo que, ambos conjuntos de parámetros representan los estándares para evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de agua residual, según el fin del agua tratada y cuerpo de agua receptor del vertimiento. Sin embargo, no se ha establecido normativa cuando el vertimiento es directo al suelo, el cual puede afectar la napa freática o calidad del suelo, práctica común en nuestro país en zonas que no cuentan con alcantarillado.

En tal sentido, en el D.S. N° 003-2010-MINAM se aprobaron los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, para conocer si dichas plantas están cumpliendo con la depuración de las aguas residuales sin causar daños a la salud y al ambiente. Por lo tanto, un sistema de tratamiento con humedales construidos será eficiente cuando el agua residual tratada presente valores menores a los LMP para PTAR.

Tabla 14: Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5 – 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	< 35

Fuente: Anexo del D.S. N° 003 – 2010 – MINAM

Asimismo, en el D.S. N°003 -2010-MINAM, se da la obligación a los titulares de las PTAR a realizar el monitoreo de sus efluentes, de conformidad con un Programa de Monitoreo aprobado en su instrumento ambiental, el cual debe especificar la ubicación de los puntos de control, métodos y técnicas adecuadas; así como los parámetros y frecuencia de muestreo para cada uno de ellos. En

consecuencia, por la R. M. N°273-2013-VIVIENDA se aprobó el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales que se debe cumplir para la evaluación del rendimiento de los sistemas de tratamiento, incluyendo a los humedales construidos.

Tabla 15: Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura.

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nemátodos intestinales (media aritmética N° de huevos por litro)	Coliformes fecales (media geométrica n° por 100 ml)	Tratamiento de aguas residuales necesario para lograr la calidad microbiológica exigida
A	Riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos, campos de deporte, parques públicos	Trabajadores consumidores públicos	≤ 1	≤ 1000	Serie de estanques de estabilización que permiten lograr la calidad microbiológica indicada o tratamiento equivalente
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles	Trabajadores	≤ 1	No se recomienda ninguna forma	Retención en estanques de estabilización por 8 a 10 días o eliminación equivalente de helmintos y coliformes
C	Riego localizado de cultivos en la categoría B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos	Ninguno	No es aplicable	No es aplicable	Tratamiento previo según lo exija la tecnología de riego por no menos que sedimentación primaria

^a En caso específicos, se deberían tener en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar

^b Especies *Ascaris* y *Trichuris* y anquilostomas

^c Durante el periodo de riego

^d Conviene establecer una directriz más estricta (≤ 200 coliformes fecales por 100 ml)

^e En el caso de los árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de cosechar la fruta y ésta no se debe recoger del suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Fuente: OMS (1989)

Mientras que, si el agua residual tratada se desea reusar, según el artículo 150° del D. S. N ° 001-2010-AG, Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos; se deberá tener en cuenta los valores que establezca el sector correspondiente a la actividad a la cual se destinará el reúso del agua o, en su defecto, las guías correspondientes de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Hasta la fecha, únicamente se cuenta con las directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura de la OMS, publicadas en 1989, donde se reconoce a los parásitos como el principal riesgo para la salud; para lo que propone que se reduzcan a menos de un litro, los huevos de nemátodos, mediante el tratamiento de aguas residuales (Tabla 15).

b. Actores clave en el tratamiento de agua residual doméstica

El Gobierno promulgó la Ley N° 27779 para crear el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, con el objetivo de formular, aprobar, ejecutar y supervisar las políticas de alcance nacional aplicables en materia de Vivienda, Urbanismo, Construcción y Saneamiento. Posteriormente, la Ley N° 30156 define la naturaleza jurídica y regula el ámbito de competencia, rectoría, funciones y estructura orgánica básica de este ministerio. En ese sentido, el D.S. N° 010-2014-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, detalla sus funciones, resaltando entre ellas la función normativa que permite formular, aprobar, dirigir, evaluar, regular, norma, supervisar y ejecutar las políticas nacionales en estas materias.

Correspondiéndole al MVCS promover la implementación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas como humedales construidos, por lo que es necesario conocer las funciones específicas de los órganos ministeriales. La Dirección General de Políticas y Regulación en Construcción y Saneamiento, encargada de proponer normas, lineamientos, planes, reglamentos, directivas, procedimientos concernientes a servicios de saneamiento básico, a través de la Dirección Nacional de Saneamiento. Por otro lado, la Dirección General de Programas y Proyectos en Construcción y Saneamiento, responsable de proponer lineamientos para la gestión y seguimiento a la ejecución de programas en materia de saneamiento, además de aprobar o proponer metodologías e instrumentos

técnicos para la gestión y ejecución de los mismos. Por último, la Dirección General de Asuntos Ambientales, órgano encargado de proponer los objetivos, lineamientos y estrategias ambientales para el desarrollo de las actividades de competencia; por lo cual, coordina, monitorea y evalúa el proceso de certificación ambiental clasificando y aprueba los estudios ambientales de los proyectos en el marco del SEIA y complementarios mediante la Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental; mientras que, la Dirección de Gestión Ambiental, evalúa, sistematiza y difunde la información ambiental de los monitoreos de efluentes de PTAR.

Asimismo, el D. L. N° 1280 establece a la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) como organismo regulador con la finalidad de garantizar a los usuarios la prestación de los servicios de saneamiento en el ámbito urbano y rural, en condiciones de calidad, para lo cual ejerce las funciones establecidas en la Ley N° 27332, Ley Marco de los Organismos Reguladores de la Inversión Privada en los Servicios Públicos, la presente Ley, su Reglamento y las normas sectoriales. Al igual que el Organismo Técnico de la Administración de los Servicios de Saneamiento (OTASS) con la función de promover y asistir en el proceso de adecuación de normativa, así como, promover e incentivar adopción de estándares para sistematizar información mediante incorporación de tecnologías adecuadas. Por último, se le asigna a las municipalidades provinciales y distritales, la responsabilidad de brindar la prestación de los servicios de saneamiento en el ámbito urbano y rural, respectivamente.

Mientras que, el D. S. N° 019-2017-VIVIENDA, Reglamento del Decreto Legislativo N° 1280, especifica las responsabilidades, derechos y obligaciones de las entidades con competencias reconocidas en materia de saneamiento; por lo cual se han identificado los órganos competentes del ente rector que participan en promover sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas para disminuir la brecha en saneamiento en el país, así como los actores locales que gestionan el servicio de saneamiento, los mismos que se representan en la Figura 22. Así tenemos que, los gobiernos regionales, a través de las Direcciones Regionales de VCS apoyan técnica y financieramente a los gobiernos locales para la implementación de los proyectos de saneamiento. Asimismo, los gobiernos

locales deben constituir Áreas Técnicas Municipales para monitorear, supervisar, fiscalizar y brindar asistencia y capacitación técnica a los prestadores del servicio de saneamiento. Según el diagnóstico sobre el abastecimiento de agua y saneamiento en el ámbito rural se reportan 61 operadores especializados, 79 empresas prestadoras de servicios de saneamiento, 924 unidades de gestión municipal y 24,568 organizadores comunales (DATASS 2021). Por lo tanto, se han identificado los actores clave para la toma de acciones y desarrollo de proyectos de inversión sobre saneamiento, así como la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento a diferente nivel.

c. Vacíos y oportunidades para la implementación de humedales construidos en Perú

Directamente, sobre los tipos de tratamiento para agua residual en el artículo 4 del D. S. N ° 019-2017-VIVIENDA, se define a las “Opciones tecnológicas no convencionales”, término bajo el cual se incluyen a los humedales construidos debido a que son una tecnología basada en procesos naturales que puede aplicarse a nivel familiar o multifamiliar, tanto en zonas periurbanas como en el ámbito rural. Además, en el artículo 5, entre las funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento se establece “*Formular normas de carácter técnico de alcance nacional que incluyan, entre otros, opciones tecnológicas convencionales y no convencionales, lineamientos, criterios y metodologías de diseño, procedimientos para su operación y mantenimiento, lineamientos de intervención social, acorde a las condiciones del lugar donde se ejecuten los proyectos*”. Por lo tanto, en la normativa se da la oportunidad de aplicar diferentes tecnologías para el tratamiento del agua residual.

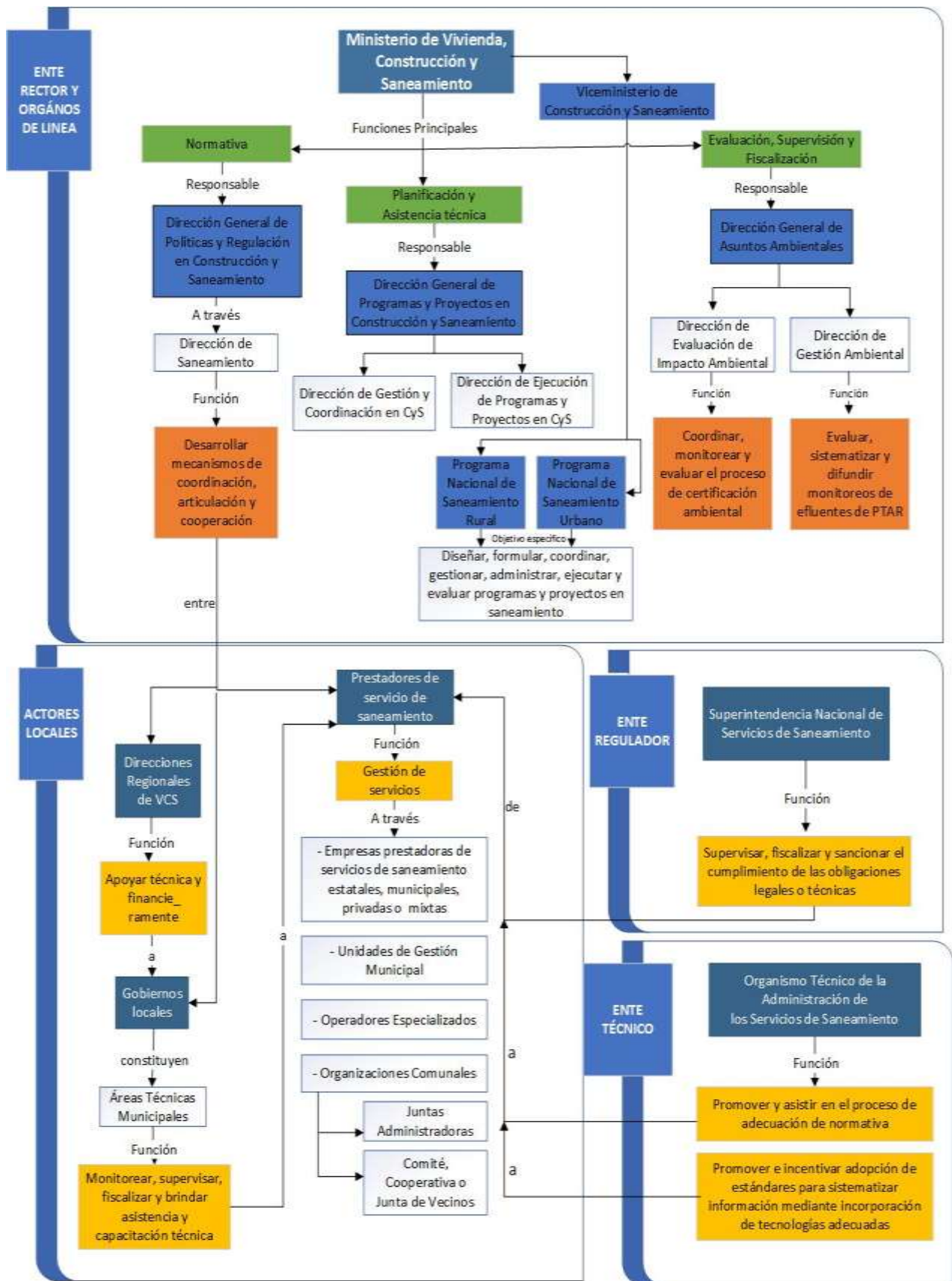


Figura 22: Actores y funciones principales para la prestación de servicio de saneamiento en el Perú

Respecto a la selección de la tecnología idónea, la Cuarta Disposición Complementaria Transitoria, se menciona que el Ente Rector (MVCS) debe aprobar opciones de tecnologías no convencionales para que los prestadores de servicios de saneamiento puedan emplearlas. Sin embargo, ante ausencia de una normativa técnica; se pueden aplicar las tecnologías contempladas en normas internacionales, siendo necesario que el formulador del proyecto sustente los beneficios de su uso, la sostenibilidad técnica, financiera y ambiental incluyendo los costos de profesionales especializados y la operación y mantenimiento de la opción tecnológica. Quedando la decisión de elección del sistema de tratamiento a los funcionarios encargados de la elaboración de los expedientes técnicos de los proyectos de inversión pública o privada, quienes pueden acudir a norma técnica internacional para poder sustentar el uso de los humedales construidos en nuestro país.

Asimismo, en el D. S. N° 019-2017-VIVIENDA, resalta la promoción de la inversión pública y privada orientada al incremento de la cobertura, el aseguramiento de la calidad y la prestación eficiente y sostenible de los servicios. De tal forma, apoya la ejecución de Programas de asistencia técnica para la sostenibilidad del servicio de saneamiento en el ámbito rural, principalmente en materia de gestión operativa y financiera, a favor de las organizaciones comunales. Por lo que, ante una nueva tecnología para el tratamiento de aguas residuales, se puede organizar actividades de soporte para los prestadores del servicio de manera que realicen una adecuada operación y mantenimiento de los sistemas.

Otra herramienta importante es el Sistema de Fortalecimiento de Capacidades (SFC) dirigido a los prestadores de servicios de saneamiento, correspondiéndole al Estado, sector privado y la cooperación internacional, brindar capacitación, asistencia técnica e innovación tecnológica, en beneficio del crecimiento profesional, el desarrollo institucional, la mejora operacional y la optimización de los recursos. Es así que, la Dirección de Saneamiento de la Dirección General de Políticas y Regulación en Construcción y Saneamiento del MVCS, gestiona el SFC con las demás instituciones público y privadas vinculadas al Sector.

Por otro lado, con la finalidad de contribuir al cumplimiento progresivo de los LMP para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales que se encuentren en operación, en consecuencia, los cuerpos receptores de las aguas residuales cumplan gradualmente con los ECA Agua, se ha publicado el D. S. N° 010-2017-VIVIENDA, aprobando el reglamento de los artículos 4 y 5 del Decreto Legislativo N° 1285, que modifica el artículo 79 de la Ley de Recursos Hídricos; el cual incentiva a los prestadores de servicios de saneamiento con actividades en curso que atiendan oportunamente las contingencias relacionadas con las descargas o reboses del agua residual y establezcan medidas para manejar los riesgos y prevenir los daños derivados. Queda así la obligación por parte de los prestadores de servicios de saneamiento, tener que identificar y registrar los vertimientos de los servicios de saneamiento, según corresponda, además, de proponer o formular iniciativas o proyectos que puedan resolver problemas, de manera individual o colectiva, para la adecuación progresiva, sobre las cuales se elabora el instrumento de gestión ambiental de adecuación, y tramitar la autorización de vertimiento y/o reúso. Por lo tanto, aquellos prestadores de servicio con infraestructura sanitaria que bajo condiciones actuales no cuenta con la capacidad suficiente para el tratamiento de aguas residuales que ingresan al sistema y no cumple con las condiciones de LMP o ECA, según corresponda; pueden reforzar el sistema de tratamiento empleando humedales construidos para mejorar la calidad del agua tratada.

Respecto a la obtención de la certificación ambiental para los proyectos de saneamiento, en la R. M. N° 015-2012-VIVIENDA que aprueba el Reglamento de protección ambiental para proyectos vinculados a las actividades de Vivienda, Urbanismo, Construcción y Saneamiento se detalla el proceso de la evaluación de impacto ambiental bajo la Ley del SEIA, Ley N° 27446 y su reglamento quedando detallados los proyectos sujetos al SEIA dentro del Listado de Inclusión del Anexo II del mencionado reglamento. Posteriormente, la R. M. N° 383-2016-MINAM modificó dicho Listado de proyectos, en lo relativo al Subsector Saneamiento del Sector Construcción y Saneamiento indicando que el Gobierno Sectorial es la autoridad competente en los siguientes proyectos:

- Represamiento de agua para potabilización
- Proyectos integrales de agua y saneamiento con alcance mayor a 15 000 hab.

- Proyectos integrales de agua y saneamiento o la ejecución parcial de cualquier componente que se ubique en ANP o zona de amortiguamiento, así como zonas con presencia comprobada de restos arqueológicos.
- Sistemas de tratamiento y disposición final de aguas residuales domésticas o municipales.

Generalmente, los proyectos con sistemas de tratamiento con humedales construidos se prevé que generen impactos negativos leves por lo que se clasifican en la Categoría I, la cual no requiere de Términos de referencia, por lo que el titular del proyecto presenta la Ficha Informativa de Clasificación Ambiental (FICA) que contiene la evaluación preliminar y el plan de participación ciudadana, incluyendo documentos sustentatorios y anexos, la cual, de ser el caso, será aprobada por la autoridad ambiental, correspondiendo a la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto, tal como ocurrió con el proyecto “Planta de tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales de la habilitación urbana DOMUS HOGARES en Nuevo Chimbote, Santa, Ancash”, de la empresa Domus Hogares del Norte S.A., teniendo que su FICA se aprobó como DIA por la R. D. N° 036 -2015-VIVIENDA-VMCS-DGGA con fecha 17 de febrero 2015. En tal sentido, el proceso de certificación ambiental para los proyectos de saneamiento con humedales construidos no es complejo, permitiendo obtener la certificación ambiental de manera oportuna.

Además, si los sistemas de tratamiento se diseñan para beneficiar a menos de 15,000 habitantes y se encuentra fuera del contexto mencionado, entonces, los proyectos de inversión están fuera del SEIA y no requieren obtener la certificación ambiental. Este cambio de normativa, favorece la implementación de sistemas de tratamiento más simples como los humedales para centros poblados pequeños, lo cual simplifica el proceso de la evaluación ambiental

De acuerdo a lo precisado en el Anexo 2 de la R. M. N° 036-2017-VIVIENDA, los siguientes proyectos de inversión no se encuentran comprendidos en la R. M. N° 383-2016-MINAM:

- Proyecto que tiene una población beneficiaria menor a 15,000 habitantes.

- Proyecto que no se encuentra dentro de una Área Natural Protegida (ANP) o Zona de Amortiguamiento.
- El proyecto contempla PTAR menor a 15,000 habitantes.

En tal sentido, en la Figura 23, se muestran las rutas para la obtención de la certificación ambiental, siendo favorable la presentación y aprobación automática del instrumento ambiental, a través de una Ficha Técnica Ambiental (FTA) para los proyectos de saneamiento con sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, tanto en el ámbito rural o periurbano, así como a nivel familiar o multifamiliar que cumplen con los requisitos mencionados en la R. M. N° 036-2017. Además, el MVCS cuenta con portal virtual para la presentación de la FTA junto a un instructivo que brinda pautas y orientaciones técnicas para el correcto uso de la FTA aplicada a los proyectos de saneamiento.

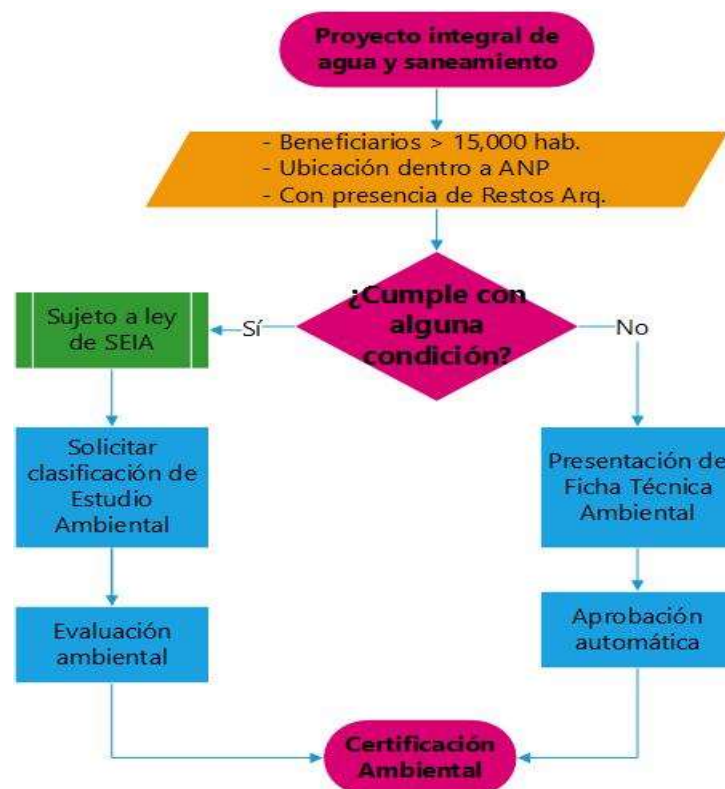


Figura 23: Proceso de certificación ambiental para proyectos de saneamiento en el Perú

Otra manera de promover los proyectos de inversión en saneamiento es a través de la creación del Programa Nacional de Saneamiento Rural (PNSR) y Programa

Nacional de Saneamiento Urbano (PNSU) (D. S. N° 002-2012-VIVIENDA). Mientras que el PNSR está orientado a posibilitar el acceso de la población del ámbito rural, al agua y saneamiento de calidad y sostenibles por lo que su ámbito de acción lo constituyen los centros poblados rurales del país. El PSU se orienta posibilitar el acceso de la población del ámbito urbano a los servicios de saneamiento de calidad y sostenibles. Ambos programas tienen como objeto mejorar la calidad, ampliar la cobertura y promover el uso sostenible de los servicios de agua y saneamiento.

El PNSR cuenta con un Manual de Operaciones aprobado por la R. M. N° 013-2017-VIVIENDA (13 de enero 2017), que fue modificado por la R. M. N° 235-2017-VIVIENDA (19 de junio de 2017), indicando que la Unidad Técnica de proyectos tiene como función promover, implementar y supervisar el desarrollo de soluciones tecnológicas no convencionales para zonas dispersas e inundables; así como formular y proponer normas, especificaciones técnicas y estándares, conforme a los lineamientos de la Dirección de Saneamiento del MVCS. En tal sentido, se reconoce la posibilidad de emplear sistemas no convencionales para el ámbito rural como los humedales construidos.

Actualmente, dentro de los programas a cargo del PNSR, está en marcha el “Programa Integral de Saneamiento Rural” (PIASAR) que implementará 100 proyectos de agua y saneamiento beneficiando 37,647 habitantes, adoptando opciones tecnológicas convencionales que corresponden a Unidades Básicas de Saneamiento con arrastre hidráulico (UBSAH) y Unidad Básica de Saneamiento de Compostaje (UBSC). En tal sentido, para mejorar la eficiencia de las UBSAH se pueden considerar emplear humedales construidos.

El PNSU, cuenta con un Manual de Operaciones aprobado por la R. M. N° 231-2012-VIVIENDA (16 de enero 2012). Entre sus órganos de línea, está la Unidad de estudios, responsable de la elaboración y/o revisión de estudios de preinversión, diseños definitivos y expedientes técnicos de los programas y proyectos priorizados, por lo que se dicha unidad puede incluir en los proyectos de saneamiento el uso de humedales construidos. En esa línea, el proyecto “Mejoramiento y Ampliación de los servicios de agua potable y alcantarillado

sanitario de la zona urbana de la localidad de San Marcos, distrito de San Marcos, Huari, Ancash” con CUI 2311662, presenta un sistema de tratamiento de agua residual compuesto por 02 tanques Imhoff, cámara de bombeo, 02 filtros percolares y 04 humedales construidos flotantes en funcionamiento en paralelo, finalizando con una cámara de desinfección.

En conclusión, el marco normativo de Perú, presenta oportunidades para la implementación de humedales construidos como una opción de tecnología no convencional que se puede sustentar con norma técnica internacional, los mismos que ya son incluidos en los proyectos de inversión pública por el PNSU. Además, el proceso de certificación ambiental ha sido simplificado por las FTA, cuando los beneficiarios son menores a 15,000 habitantes. Por último, se han establecido herramientas para que los prestadores del servicio de saneamiento pueden recibir asistencia técnica y capacitaciones por parte del gobierno central, regional o local.

4.3.2. Factores técnicos

Para analizar los factores técnicos se recopilaron 51 casos de humedales construidos implementados para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Perú. Se realizó la búsqueda de casos de estudio o trabajos de investigación en las bases de datos antes mencionadas, revistas nacionales y el Registro nacional de trabajos de investigación (RENATI). En el Anexo 4, se detallan los resultados de la búsqueda de experiencias de humedales construidos en Perú para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

a. Normas técnicas

Rodríguez *et al.* (2020) afirma que la falta de uso de esta tecnología radica en una posible falta de comunicación entre las comunidades científicas locales y los gobiernos que retrasa la adopción de la tecnología. Como ejemplo de apoyo gubernamental hacia la implementación de los humedales construidos se presenta el caso del gobierno Mexicano, que desde el 2018 ha adoptado a los humedales construidos en sus lineamientos locales para el tratamiento de aguas residuales (CONAGUA 2018), por lo que en el en el Inventario Nacional de Potabilización Municipal y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (CONAGUA 2020), se reportan 230 humedales construidos conformando plantas de tratamiento de agua

residual municipal a escala real en 16 estados, principalmente en Sinaloa con 116 humedales. Aunque, se debe mejorar en la difusión de estas experiencias a escala real en revistas científicas o técnicas para brindar información del diseño, estado de operación y rendimiento de las plantas. Ante la falta de información disponible, los humedales construidos mencionados en el inventario no son considerados en esta investigación, por lo que no están aportando al posicionamiento de la tecnología a nivel de la región de ALC.

La implementación de los componentes de los humedales construidos siempre necesita personal de ingeniería calificado para el diseño del mismo, además, para afianzar el conocimiento al respecto de esta tecnología y compartirlo con mayor difusión hacia los prestadores de servicio es necesario la publicación de normas técnicas. En Perú, se tiene como norma técnica la Norma OS. 090 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, que es parte del Reglamento Nacional de Edificaciones aprobado por la D.S. N° 011-2006-VIVIENDA, la cual plantea orientaciones para el diseño de las plantas de tratamiento para las etapas de estudio de factibilidad y diseño definitivo. Para la selección de los procesos de tratamiento del agua residual da como opciones de tratamiento secundario a los siguientes sistemas: lagunas de estabilización, lodos activados (incluidas las zanjas de oxidación y otras variantes), filtros biológicos y módulos rotatorios de contacto. En tal sentido, estas recomendaciones de sistemas convencionales hacen que la guía se útil para proyectos de saneamientos urbanos de alto presupuesto, sin considerar a los sectores periurbanos o rurales.

Posteriormente, se difundió el Manual técnico de difusión sistema de tratamiento de aguas residuales para albergues en zonas rurales (MINCETUR, 2008), el cual considera a los humedales construidos como tratamiento secundario que se puede instalar de forma complementaria al tanque séptico y tanque imhoff en albergues y pequeñas comunidades rurales que cuenten con un lugar de disposición para el agua tratada. Resalta que en este manual se describen las actividades construcción, operación y mantenimiento de un humedal. Sin embargo, únicamente describe al humedal subsuperficial de flujo horizontal y en el diseño de los sistemas se considera la disponibilidad de área de 2 m²/hab. Además, como dicho manual no ha sido emitido por el ente rector del sector de saneamiento, no ha tenido tanta

acogida, siendo más una herramienta de acercamiento de la tecnología a la población por su fácil lectura e ilustraciones.

Por último, se aprobó la R.M. N° 192-2018-VIVIENDA, difundiendo la Norma técnica de diseño: “Opciones tecnológicas para sistemas de saneamiento en el ámbito rural”, con el objetivo de definir los diseños definitivos de las opciones tecnológicas de saneamiento, los criterios de selección, diseño y forma de implementación para los proyectos de saneamiento en el ámbito rural. En tal sentido, para la disposición sanitaria de excretas la norma presenta como única opción con arrastre hidráulico a la “Unidad básica de Saneamiento de Tanque Séptico Mejorado”, el cual se describe bajo la norma IS 020 Tanque Séptico. Además, se incluyen sistemas complementarios de tratamiento y disposición final de líquidos presentando dos tipos de sistemas de infiltración, que son “Pozo de Absorción” (PA) y “Zanja de Percolación” (ZP). Sin embargo, como tratamiento complementario de aguas pretratadas, la norma considera al “Humedal” como un sistema de tratamiento para aguas residuales tratadas por un tanque séptico mejorado o aguas grises provenientes de las instalaciones sanitarias de sistemas secos de hoyo seco ventilado o compostera. Por lo tanto, seis (06) combinaciones de sistemas complementarios de tratamiento y disposición incluyen a los “Humedales” como tratamiento terciario (SS-03, SS-04, SS-07, SS-08, SS-17 y SS-18). Además, del algoritmo de selección de sistemas se pueden identificar las consideraciones técnicas para elegir a los humedales como tratamiento complementario, las cuales son:

- Suelo Impermeable.
- Suelo fisurado profundo.
- Nivel freático menor a 4 mts
- Zona Inundable.

Comparando la Norma técnica de diseño peruana con el Manual técnico mexicano de humedales construidos (CONAGUA, 2018), tenemos que la norma peruana sólo brinda requisitos previos, beneficios y ejemplo para el cálculo de las dimensiones del humedal, por lo que se considera que está incompleta brindando sólo generalidades respecto al diseño de los humedales, por lo que se debe mejorar su contenido publicando una norma específica que describa con mayor

detalle las características técnicas para su construcción, operación y mantenimiento, tal como lo hace para las otras tecnologías propuestas en dicha norma, por lo tanto, se presenta un vacío técnico, ya que un manual emitido por la autoridad nacional debe brindar información consistente para que los responsables del servicio de saneamiento puedan optar por esta tecnología y dar buen uso de la misma.

b. Disponibilidad de área y materiales

La disponibilidad de área es el factor técnico que usualmente limita el uso de tratamiento extensivos. De acuerdo a UN-HABITAT (2008), un humedal de flujo subsuperficial horizontal requiere entre 1 – 2 m²/PE, mientras que humedal de flujo subsuperficial vertical, usualmente, entre 0.8 – 1.5 m²/PE. Aunque se han reportado mayores requerimientos considerando la influencia de la temperatura (Hoffmann *et al.* 2011).

Según los casos recopilados en Perú, a escala real tenemos que el tamaño varió entre 1 m² para sistemas unifamiliares para aproximadamente 5 habitantes (Arellano 2017, Paima y Gratelly 2021, Cruz y Niñez, 2018) hasta unidades con áreas mayores a 25 m² para instituciones educativas (Miglio 2011; León 2020) o sistemas multifamiliares que atienden a la población de centros poblados rurales (Flores 2013 y Suero *et al.* 2018), sin reportar problemas para la selección y disponibilidad del terreno.

En nuestro país son 63,254 centros poblados que no cuentan con el servicio de eliminación de excretas (DATASS 2022). Analizando mejor el contexto del ámbito rural, tenemos que los centros poblados se distribuyen principalmente forma dispersa, presentando menos de 1,000 habitantes; lo que significa que para ampliar la cobertura de agua residual tratada se debe impulsar la implementación de sistemas descentralizados en zonas de baja densidad poblacional y amplia disponibilidad de áreas, siendo de mayor preocupación aquellos departamentos que presentan la mayor cantidad de centros poblados desabastecidos, como Puno (13 por ciento), Huánuco (8 por ciento), Cusco (8 por ciento), Ancash (7 por ciento) junto a Arequipa, Cajamarca y Ayacucho (6 por ciento). Por lo cual, de la presente revisión de casos resaltan los estudios realizados Damián y Mancha

(2021) en el distrito de Santa Ana de Huancavelica y Flores (2013) en el CP Pinchollo de Arequipa junto a los estudios en Cajamarca desarrollados por Cruz y Nuñez (2018) en la comunidad Cruz Verde y Rojas (2018) en la comunidad de Santa Rosa Bajo-Chota; los cuales demuestran que el potencial de los humedales construidos como sistemas descentralizados ubicados en las regiones prioritarias de atención, siendo eficientes en la remoción de contaminantes.

Comparado con los tratamientos centralizados convencionales, los humedales artificiales tienen un menor impacto visual, lo que permite su aplicación en zonas periurbanas, residenciales o rurales. Además, sus subproductos pueden ser utilizados para producir, entre otros, materia prima para artesanías, flores de ornato y forraje para ganado. El agua tratada puede reutilizarse en actividades acuícolas, riego de cultivos o áreas verdes.

Otro factor técnico a tener en cuenta es la disponibilidad de materiales en nuestro país para la construcción de humedales construidos. Analizando los casos de humedales construidos identificados, tenemos que, a escala real, se construyen mediante excavaciones cuyo fondo se impermeabiliza con geomembrana o concreto, especialmente cuando no se cuenta en la zona con mano de obra especializada en la instalación de geomembranas, sin embargo, el uso de concreto eleva los costos del sistema.

Para las macrófitas se han reportado 20 especies, siendo la más conocida y difundida la totora (*Scirpus californicus* o *Schoenoplectus californicus*) debido a que esta especie se encuentra en diferentes lagos o humedales como el Lago Titicaca en Puno y los Pantanos de Villa El Salvador en Lima, también por su potencial para la artesanía, construcción de viviendas y balsas. Otras especies frecuentes han sido el vetiver, *Chrysopogon zizanioides*, antes denominada *Vetiveria zizanioides* L. Nash, junto al jacinto de agua, *Eichhornia crassipes*, por lo que en el país se cuenta con diversas plantas fitodepuradoras apropiadas a medios inundados con poco oxígeno disuelto que se pueden emplear en los sistemas no convencionales de tratamiento de aguas residuales, las cuales están presentes en ecosistemas naturales o establecimientos especializados (viveros). Cabe precisar que, una manera de disminuir la influencia del clima sobre el

rendimiento de los humedales construidos, es la selección de especies nativas de macrófitas presentes en medios naturales, ya que los periodos vegetativos están adaptados a los cambios climáticos de cada zona, dando estabilidad y resiliencia al sistema de tratamiento de agua residual.

Además, de comparar el rendimiento de cada especie en la remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos para cumplir con los LMP o ECA, la otra variable que ha sido estudiada es la densidad de las macrófitas en los humedales (Flores, 2013; De la Cruz, 2020 y Herrera, 2018). En la Tabla 16, se enlistan las especies empleadas en los casos de humedales construidos encontrados en Perú.

Del análisis de los casos con humedales construidos, se resalta la importancia de conocer el tiempo de crecimiento de las especies, por ejemplo, Medina y López (2015) a partir del tercer mes de sembrado de *Arundo donax*, tuvieron resultados favorables debido a la formación de rizomas en cantidad que ayudó a absorber los contaminantes con mayor eficiencia. Igualmente, Torres (2017) logró mejores resultados que De La Cruz (2020, por el adecuado periodo de adaptación que tuvieron las macrófitas, logrando que las raíces se distribuyan de mejor manera, los tallo y hojas sean más grandes, e incluso observó rebrote con aumento de las plantas.

Respecto a las macrófitas, una limitante es la cantidad de individuos ante una alta demanda, porque los establecimientos especializados no cuentan con grandes cantidades de plántulas; por lo tanto, los proyectos de inversión deberán considerar en la etapa de construcción, establecer viveros temporales para la propagación de las especies y el abastecimiento de las mismas.

Tabla 16: Especies reportadas en humedales construidos de Perú para tratamiento de agua residual doméstica

Familia	Nombre científico	N° exp.	Referencia
Araceae	<i>Lemna minor</i>	2	Cóndor (2019), Quispe y Ayala (2019)
	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	1	Portilla (2019)
Cannaceae	<i>Canna indica</i>	4	Segami (2018), De la Cruz (2020)
	<i>Cyperus alternifolius</i>	5	Gamarra (2016), Larico (2021), León (2020) y Miglio <i>et al.</i> (2011)
	<i>Cyperus papyrus</i>	2	Montalván y López (2017), Cruz y Núñez (2018)
Cyperaceae			Cubas y Mirelas (2019), Cárdenas (2019), Flores (2013), Padilla y Cahuaya (2019), Suero <i>et al.</i> (2018) y Miglio <i>et al.</i> (2011)
	<i>Schoenoplectus californicus</i>	7	
	<i>Eleocharis palustris</i>	1	Paima y Gratelly (2021)
Hydrocharitaceae	<i>Elodea canadensis</i>	1	Cóndor (2019)
Juncaceae	<i>Juncus efusus</i>	1	Saldaña (2021)
Nymphaeaceae	<i>Nuphar luteum</i>	2	Cruz (2018)
			Mejía (2017), Montenegro y Rubio (2018), Flores (2014), Valle (2017), Neira y Ruiz (2021), Quispe y Ayala (2019)
Pontederiaceae	<i>Eichhornia crassipes</i>	6	
	<i>Arundo donax</i>	1	Medina y López (2015)
	<i>Phragmites australis</i>	4	Cejas (2021), Arellano (2027), Saldaña (2021)
Poaceae			Gómez (2017), Miglio <i>et al.</i> (2016), Córdova y Huamán (2018), Córdova y Díaz (2020), Vargas (2021), Rojas (2018)
	<i>Chrysopogon zizanioides</i>	7	
	<i>Guadua angustifolia</i>	2	Herrera (2018)
	<i>Calamagrostis rigida</i>	1	Damián y Mancha (2021)
	<i>Typha angustifolia</i>	1	Montalván y López (2017)
Typhaceae	<i>Typha dominguensis</i>	1	Torres (2017)
	<i>Typha sp</i>	2	Huamán (2017)

Respecto al sustrato, la característica principal del medio es que debe tener suficiente permeabilidad para permitir el paso del agua. Según los casos encontrados para Perú, frecuentemente se emplea arena gruesa, grava fina (6 - 16 mm) o arena lavada, grava media (32 - 38 mm) o confitillo; las cuales se distribuyen en la zona de ingreso y salida, así como la zona central. Además, diversos autores recomiendan que la selección de materiales y el proceso de construcción deben ser controlados para evitar errores irreparables, como para ejemplo la perforación del revestimiento de plástico, igualdad en el tamaño de la arena o grava, plantas equivocadas, etc.

c. Recurso humano capacitado

Entre los casos en Perú, resalta haber identificado 02 plantas pilotos en universidades públicas.

La planta piloto del Centro Modelo de Tratamiento de Residuos (CEMTRAR) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, la cual abarca un área aproximada de 1000 m² y presenta tres líneas de tratamiento:

- La primera línea presenta un tanque séptico de dos cámaras y un humedal de flujo subsuperficial horizontal.
- La segunda línea está compuesta por un tanque baffled con cuatro cámaras de contacto y dos humedales de flujo subsuperficial horizontal.
- La tercera línea de tratamiento está compuesta por una celda francesa seguida por dos humedales de flujo subsuperficial vertical.

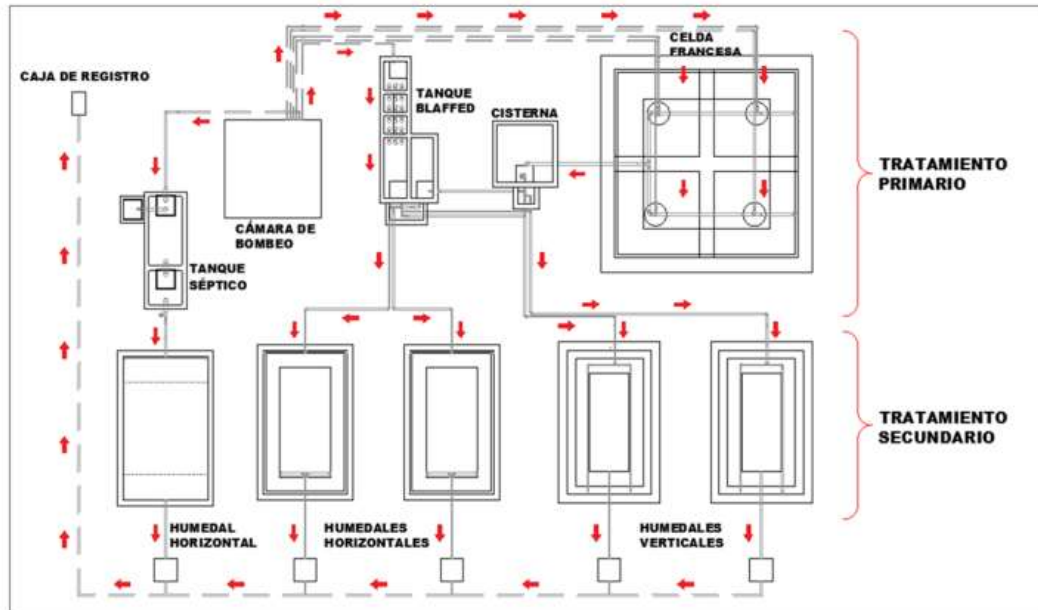


Figura 24: Distribución de los sistemas de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales del CEMTRAR de la UNALM

Fuente: Oyarce (2021)

El sistema integral de tanque séptico y humedal de flujo subsuperficial horizontal, últimamente, ha sido estudiado por Portilla (2019) empleando *Zantedeschia aethiopica* para el tratamiento de agua residual doméstica logrando eficiencias de remoción de 60.0 por ciento y 52.2 por ciento de DBO₅ y DQO en el humedal, mientras que 85 por ciento en DBO₅ y 81.4 por ciento en DQO, para el sistema completa. Sin embargo, la vegetación tuvo dificultades para desarrollarse con una tasa de crecimiento de 4,6 plantas por m² de humedal, y con una baja producción de flores (2 flores/m²). Mientras que, el tanque blaffed ha sido diseñada para 30 PE a 6 m³/día, conteniendo 03 cámaras de sedimentación y 01 cámara final para la distribución del agua pre tratada por gravedad hacia los dos humedales horizontales que han sido diseñado para atender el efluente de 15 PE.

Por último, el sistema de humedal francés ha sido diseñado para 30 personas equivalentes con cuatro canchales seguido de dos humedales superficiales de flujo vertical. Según Gómez (2017), durante dos meses se comparó la eficiencia de los humedales de flujo vertical instalados en paralelo entre las especies paraguaitas (*Chryzopogon zizanioides*) y grass vetiver (*Cyperus alternifolius*). También Guevara *et al.* (2018) estudiaron el efecto de añadir una capa de material orgánico

(viruta y material vegetal) sobre la retención de huevos de helmintos. Posteriormente, León *et al.* (2021), buscaron optimizar el sistema con diferentes cargas de ingreso. Mientras que Guevara *et al.* (2021), actualmente compara la eficiencia entre el humedal de flujo vertical u horizontal, para determinar cuál es más eficiente como tratamiento secundario complementario en el sistema francés.

Mientras que, la segunda planta piloto con humedales construidos se encuentra en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR) de la Universidad Nacional de Ingeniería, conformada por las siguientes unidades: Cámara de rejas (gruesas y finas), desarenador, reactor UASB, lecho de secado y 02 lagunas de estabilización. Con fines de investigación, dos humedales construidos de flujo horizontal de 1.05 m² fueron implementados por Huamán (2017), usando diferentes materiales de soporte, lecho volcánico y canto rodado, respectivamente; con plantación de juncos (*Typha spp*) en ambos y utilizado el efluente del reactor UASB, concluyendo que el humedal de lecho volcánico fue más eficiente que el humedal de canto rodado en la reducción de la turbiedad durante la evaluación de las tres cargas orgánicas, la cual, aumentó conforme incrementó la carga orgánica en el afluente. Posteriormente, Larico (2021) implementó dos humedales construidos de flujo vertical de 1 m² usando *Cyperus alternifolius* con la finalidad de estudiar el efecto de la carga hidráulica y la combinación de sustratos con distintos espesores en la reducción de materia orgánica y nutrientes; obteniendo diferencias en la remoción dependiendo del parámetro.

En tal sentido, se cuenta con dos plantas pilotos en centros de investigación que son referentes de la operación y mantenimiento de la tecnología para el tratamiento de agua residual, los cuales pueden brindar asesoramiento técnico a los profesionales a cargo de la elaboración de proyectos de inversión pública o privada. Sin embargo, ambas plantas se encuentran en Lima, por lo que personal de otras provincias pueden tener acceso limitado a las capacitaciones y eventos académicos que se organicen.

A favor de la difusión de esta tecnología para el tratamiento del agua residual, se observa que las tesis han sido desarrolladas por egresados de las carreras

profesionales de Ing. Agrícola, Ing. Ambiental, Ing. Civil, Ing. Sanitaria, Ing. Química y Biología; por lo tanto, tenemos diversas escuelas y carreras profesionales interesadas en la investigación sobre los humedales construidos, asimismo, el involucramiento de diversos profesionales permite acercar más la tecnología a los responsables de proyectos de inversión en saneamiento y contar con profesionales que brinden capacitaciones a los prestadores de servicio.

Asimismo, se hace hincapié que existen en el país empresas privadas del rubro de saneamiento, especializadas en la asesoría para el diseño y construcción de humedales construidos, tales como, Rotaria de Perú SAC, Arrebol SAC, ONG Vetiver y Yakufil Ingeniería S.A. Por lo tanto, se cuenta con recurso humano capacitado para implementar y operar adecuadamente esta tecnología, aunque los principales centros de investigación y empresas de saneamiento se ubican en Lima, por lo que puede mejorar su difusión en provincias.

Respecto al perfil del personal que opere un humedal construido, se tiene que no requiere de formación técnica o profesional, sino únicamente ser capacitado para realizar actividades de inspección visual para verificar los niveles de operación del efluente para que esté en contacto con las raíces de las macrófitas, la limpieza de las cajas de ingreso y salida, retirando sólidos y maleza puede perjudicar el control de flujo en la unidad, mediciones de parámetros en campo, como conductividad eléctrica y temperatura, retiro de maleza no deseada en la superficie del humedal, verificar el crecimiento de las plantas macrófitas en el humedal, y retirar la vegetación seca o sin actividad. En tal sentido, se considera que cualquier poblador comprometido con el servicio de saneamiento puede ser responsable de la operación y mantenimiento de un humedal construido.

Un limitante a nivel gubernamental es que el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), actualmente, cuenta con Centros de Formación con el servicio de capacitación formativa orientado al sector de saneamiento, cuya cobertura a nivel nacional es reducida (64 por ciento) y no operan en condiciones adecuadas (96 por ciento), por lo que a través de la R.M. N° 035-2019-VIVIENDA, se aprobaron indicadores de brechas del sector que buscan ampliar la cobertura y mejorar la calidad de dichos centros para que

certifiquen profesionalmente a los trabajadores de la actividad de construcción y saneamiento en todos sus niveles. Igualmente, SENCICO no dispone de centros de investigación y desarrollo (I+D) para la generación de conocimiento y tecnología orientados para atender las necesidades de investigación de la construcción y saneamiento a nivel nacional. Sin embargo, según los indicadores de brechas del sector, la implementación de estos espacios ha sido considerado siguiendo la línea de investigación “Tratamiento, disposición y reutilización de aguas residuales”.

4.3.3. Factores socioambientales

a. Clima

El principal factor ambiental que afecta a los humedales construidos es el clima, tanto la temperatura, horas de sol y precipitaciones pueden impactar de manera positiva o negativa el rendimiento de esta tecnología en el tratamiento del agua residual. Por lo tanto, siguiendo la clasificación climática de Köppen-Geiger y la base de datos cartográficos de Kottek *et al.* (2006), los casos de HC encontrados en Perú, se ubicaron según cada subgrupo climático en base a la precipitación estacional y temperatura.

De los 51 casos de HC, la mayoría de experiencias presentaron “Clima de desierto con temperatura alta - BWh” (n=30), lo cual se puede observar en la Figura 25 y Tabla 17, abarcando principalmente los humedales ubicados en Lima y el resto de departamentos costeros como Lambayeque, La Libertad, Moquegua y Piura. Mientras que, el segundo subgrupo lo conformaron aquellos humedales en clima “Ecuatorial monzón – Am” (n=12), ubicados en los departamentos de San Martín, Ucayali y Huancavelica. Y en menor proporción, el tercer subgrupo se conformó por humedales en clima “Templado y cálido – Cwb” (n=5), ubicados en Junín, Cajamarca y Cusco.

Tabla 17: Clasificación climática de las experiencias de humedales construidos en Perú para tratamiento de agua residual doméstica

Grupo climático	Símbolo	Subgrupo climático	Símbolo	N° de experiencias
Ecuatorial	A	Ecuatorial monzón	Am	12
		Sabana ecuatorial con invierno seco	Aw	2
Árido	B	Clima de desierto con temperatura alta	BWh	30
		Clima de estepa con temperatura baja	BSk	2
Templado y cálido	C	Clima templado cálido con invierno seco y verano cálido	Cwb	5

Cabe precisar que Perú presenta en total 11 subgrupos climáticos entre los grupos con clima ecuatorial (A), árido (B) y templado (C); sin embargo, los casos de humedales construidos encontrados sólo se ubican en 05 subgrupos, quedando pendiente conocer el rendimiento de los humedales en el resto de subgrupos climáticos.

Teniendo en cuenta que el clima es una variable que afecta el rendimiento de los humedales construidos, en base a la información disponible de las experiencias encontradas en Perú, se obtuvieron las concentraciones promedio de DBO y DQO de los afluentes y efluentes, así como las eficiencias de remoción promedio por subgrupo climático.

En base a las concentraciones promedio de los efluentes, reportados en la Tabla 18, se puede observar que en todos los grupos climáticos se cumple con los límites máximos permisibles de la normativa peruana, tanto en DBO (< 100 mg/L) y DQO (< 200 mg/L).

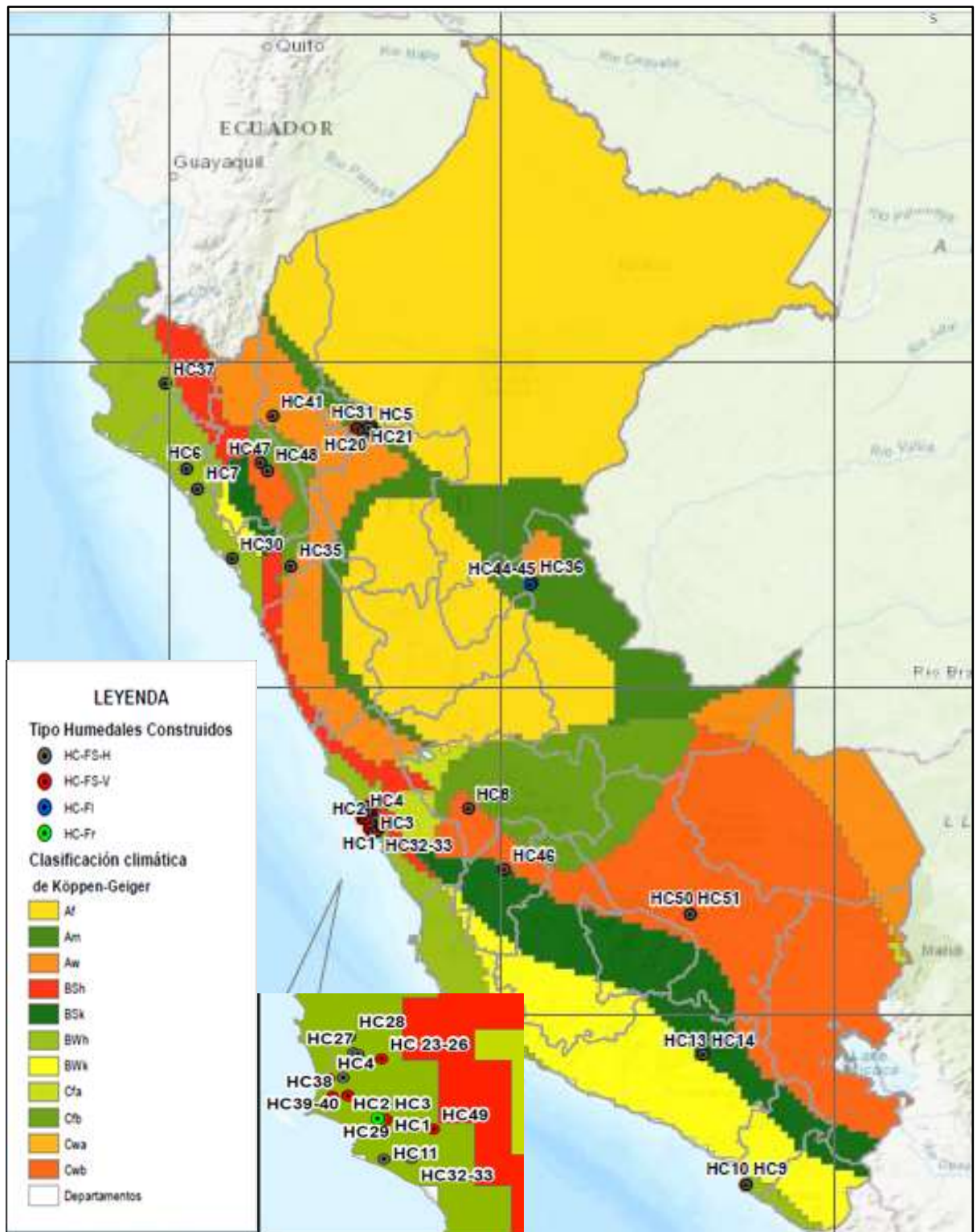


Figura 25: Ubicación de los casos de humedales construidos para el tratamiento de agua residual doméstica en Perú según tipo de clima

Tabla 18: Remoción de materia orgánica por humedales construidos en Perú según grupo climático

Parámetro	Grupo climático	n	\bar{X} Afluente \pm ds (mg/L)	\bar{X} Efluente \pm ds (mg/L)	\bar{X} Eficiencia (%)
DBO	Am	12	279.4 \pm 255.1	51.0 \pm 34.7	75.6 \pm 14.0
	Bwh	27	286.0 \pm 308.9	31.2 \pm 39.3	77.1 \pm 21.3
	Cwb	4	192.1 \pm 144.4	51.8 \pm 67.5	62.3 \pm 30.2
DQO	Am	9	381.5 \pm 226.0	110.0 \pm 66.3	69.5 \pm 16.0
	Bwh	27	603.6 \pm 619.1	81.5 \pm 85.2	76.3 \pm 22.8
	Cwb	2	513.5 \pm 239.7	74.6 \pm 62.5	80.5 \pm 21.3

Leyenda: Am= Ecuatorial monzón, BWh= Clima de desierto con temperatura alta y Clima templado cálido con invierno seco y verano cálido= Cwb

Aunque la tendencia a nivel de región indica que, los humedales construidos en climas templados, son menos eficientes a comparación de los humedales en climas ecuatoriales o áridos; en el presente estudio se han encontrado pocas experiencias en clima templado para evidenciar el efecto de esta variable sobre la remoción de la materia orgánica. Otro aspecto que posiblemente no permite evidenciar el efecto del clima en el rendimiento de los humedales, es el corto tiempo de evaluación de las experiencias desarrolladas en Perú, generalmente menor o igual a 4 meses; por lo cual, la variación de temperatura y precipitaciones entre estaciones del año no alcanza a influenciar sobre el crecimiento de las macrófitas y la actividad microbiana. Asimismo, por la falta de datos estadísticos (desviación estándar y número de muestreos), no se pudo desarrollar un meta-análisis con los casos de Perú.

Cabe resaltar que, ante a la diversidad climática del Perú, los humedales construidos vienen mostrando buenos resultados de remoción de materia orgánica y nutrientes, siendo necesario desarrollar más experiencias en los departamentos de la sierra, e incluso dando mayor importancia a aquellos con gran brecha de cobertura de saneamiento como Apurímac, Huancavelica, Huánuco, Pasco y Junín; donde los sistemas descentralizados son la mejor alternativa.

b. Plagas

Otro aspecto ambiental a considerar es la interacción de insectos, gusanos, hongos y otros organismos que pueden dañar a las macrófitas de los humedales construidos comportándose como plagas. Es así que Padilla y Cahuaya (2019) reportaron presencia de pulgones en el humedal construido con *Schoenoplectus californicus*, mientras que Portilla (2019), reportó la aparición de moscas de humedad o Psychodidae durante la operación del humedal construido con *Zantedeschia aethiopica*, por lo que para controlar esta plaga usó trampas amarillas untadas con melaza por ambas caras para atraer las moscas, además usó de un insecticida casero de ají, ajo y detergente, dos veces por semana, logrando controlar la plaga después de las tres semanas de la aplicación del insecticida.

En tal sentido, es importante evitar la proliferación de plagas manteniendo una buena limpieza del humedal construido para que la acumulación de materia orgánica del lodo o vegetación seca sea atrayente de zancudos, moscas, pulgones u otros, ya que limitan el crecimiento de las macrófitas, lo cual reduce su rendimiento en la depuración.

c. Percepción de población

Respecto a los aspectos sociales, la aceptación a la población es lo más importante para que no tengan una percepción negativa respecto al funcionamiento de los humedales construidos por la generación de malos olores del agua residual, la proliferación de zancudos u otros insectos, caídas de niños o mascotas dentro del humedal, entre otros. Hoffman *et al.* (2009) manifiestan la percepción negativa que puede tener la población al inicio frente a la operación de los humedales, pero con evidencias se puede revertir dicha posición. En tal sentido, el MVCS fomenta la participación de la comunidad en proyectos de agua y saneamiento mediante la R.D. N ° 107-2014-PNSR-DE.

García (2021) realizó una evaluación social sobre la implementación y operación de un sistema de tratamiento con humedales construidos en el Parque de los niños en el AAHH Florida II de San Martín de Porres en Lima, a través de una encuesta aplicada a 20 beneficiarios; obteniendo los siguientes resultados:

- El 90 por ciento de los encuestados manifiesta no haber percibido molestias en el proceso de construcción del parque, el 10 por ciento restante manifiesta que la principal molestia percibida fue el ruido y el polvo producto de los procesos constructivos, siendo estos impactos negativos temporales.
- El 65 por ciento de los encuestados manifiesta que después de la construcción del parque, ha notado la presencia de animales no deseados, producto de la espesa vegetación. De las especies identificadas, el 43 por ciento son roedores, el 36 por ciento son insectos y el restante se trataría de algunos artrópodos como gusanos.
- Sobre la estética del parque, el total de los encuestados considera que el parque ha mejorado el paisaje en la zona, que antes se encontraba desierta y con desechos sólidos.
- El 95 por ciento de los encuestados sabe que existe un humedal artificial en el parque, sin embargo, solo el 55 por ciento de los entrevistados manifiesta tener conocimiento de lo que es un humedal y como funciona este sistema de tratamiento.
- El 100 por ciento manifiesta que no percibe ninguna molestia por la presencia y/o funcionamiento del humedal instalado, mientras que el 70 por ciento y 15 por ciento considera que el humedal es importante y muy importante para la comunidad respectivamente, debido al conocimiento que se tiene sobre el proceso de purificación del agua y reúso en el riego.

Por lo tanto, García (2021) concluye que la percepción es positiva para la adopción de la tecnología por parte de la comunidad, lo que se refleja en la predisposición a involucrarse en los planes de mejoramiento, en la adopción de compromisos y responsabilidades para la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento. Sin embargo, resalta la necesidad de difundir información periódicamente para mantener una continua educación ambiental y capacitación sobre el sistema de tratamiento instalado.

V. CONCLUSIONES

1. Se determinó que el sistema conformado por “Tanque séptico y HC” es el tipo de sistema más empleado en la región (35 por ciento). Además, el humedal construido subsuperficial de flujo horizontal, es el tipo de humedal más estudiado (62 por ciento) y existe un gran interés por el uso de plantas nativas para el tratamiento de agua residual doméstica, por su adaptación a las condiciones climáticas y otros factores ambientales.
2. Respecto al rendimiento por tipo de humedal, los humedales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical reportan promedios similares alrededor del 66 por ciento en la remoción de DQO; sin embargo, el meta-análisis permitió sintetizar diferentes tipos de humedales y obtener una mediana de remoción de DQO en 70 por ciento, con un intervalo de confianza al 95 por ciento de 62 al 77 por ciento, demostrando que el alto potencial que tienen los humedales construidos para remover materia orgánica en la región. Asimismo, el análisis de subgrupos muestra que el clima puede ser una variable que afecte la remoción de materia orgánica, siendo más eficientes los humedales construidos en climas ecuatoriales.
3. En el caso del rendimiento en la remoción de nutrientes, los promedios de remoción para NT y PT estuvieron alrededor del 40 por ciento, al igual que los resultados del meta-análisis con medianas de remoción entre 40 a 43 por ciento, respectivamente. Estos resultados están dentro de los rangos reportados por Land *et al.* (2016), para experiencias desarrolladas en Europa y América del Norte. Por lo tanto, existe una fuerte evidencia de que los humedales construidos son eficientes en la remoción de nutrientes en cualquier región del mundo. Además, el análisis de subgrupos por tipo de clima, no evidenció influencia de esta variable sobre la remoción de estos nutrientes.

4. En Perú se cuenta con el marco legal que establece el acceso universal al servicio de saneamiento y permite aplicar opciones de tecnologías no convencionales para el tratamiento del agua residual (D. L. N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento y D. S. N° 019-2017-VIVIENDA que aprueba su Reglamento). Además, se tiene diferentes figuras de apoyo a los prestadores de servicio de saneamiento para aplicar nuevas tecnologías, como los humedales construidos. Los límites máximos permisibles para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (D. S. N° 003-2010-MINAM), es la principal normativa para determinar la eficiencia de los mismos. Por lo tanto, los factores legales favorecen la implementación de esta tecnología.

5. Respecto a factores técnicos, la Norma técnica de diseño: “Opciones tecnológicas para sistemas de saneamiento en el ámbito rural” (R.M. N° 192-2018-VIVIENDA) no presenta información completa para el diseño y operación de los humedales construidos, por lo que la falta de una norma técnica no permite compartir el conocimiento de las comunidades científicas locales con más formuladores de proyectos y prestadores de servicio. Respecto a la disponibilidad de materiales, se afirma que se cuenta con diversas especies de macrófitas en ecosistemas naturales que se pueden emplear en los humedales construidos, resaltando el potencial de *Schoenoplectus californicus*.

6. Teniendo en consideración que entre los factores socioambientales, el clima puede afectar el rendimiento de los humedales construidos, en base a los resultados de las experiencias reportadas en Perú por subgrupo climático, se obtuvieron los promedio de las eficiencias de remoción de DBO y DQO, sin observar notable diferencia entre los subgrupos; porque se han reportado pocas experiencias en clima templado y principalmente, por el corto tiempo de evaluación, lo cual no permite evidenciar la influencia de la variación de temperatura y precipitaciones sobre el crecimiento de las macrófitas y la actividad microbiana.

VI. RECOMENDACIONES

1. Es importante que los investigadores al momento de publicar los resultados de remoción de materia orgánica o nutrientes durante el tratamiento de agua residual con humedales construidos, consideren usar tablas con la información primaria completa (fechas de muestreo, número de muestras y desviación estándar) y no sólo gráficos con valores promedio, para que se tenga mayor disponibilidad de data para los meta-análisis.
2. Se recomienda aumentar el tiempo de evaluación de la remoción de materia orgánica y nutrientes desarrolladas en la región de América Latina y el Caribe, en especial Perú, para poder tener resultados con menor heterogeneidad y poder calcular las variaciones de las tasas anuales de remoción.
3. Para confirmar el efecto del clima sobre la remoción de la materia orgánica, es necesario realizar meta-análisis con otros parámetros de remoción tales como Demanda biológica de oxígeno, sólidos disueltos totales, sólidos totales en suspensión, entre otros.
4. El origen de las macrófitas puede que sea una variable que permita mejores rendimientos de los humedales construidos en la remoción de materia orgánica, por lo que se recomienda considerar especies nativas antes que especies exóticas o cosmopolitas en el tratamiento de agua residual doméstica.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo, R; Jaramillo, M; Peñuela, G; Aguirre, N. 2010a. Remoción del carbono orgánico disuelto en humedales piloto de flujos subsuperficial y superficial. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública* 2010; 28(1): 21-28.

Agudelo, R; Peñuela, G; Aguirre, N; Morató J; Jaramillo, M. 2010b. Simultaneous removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon using horizontal sub-surface flow pilot wetlands. *Ecological Engineering* 36:1401–1408.

Agudelo, R; Machado, C; Aguirre, N; Morato, J; Peñuela, G. 2011. Optimal conditions for chlorpyrifos and dissolved organic carbon removal in subsurface flow constructed wetlands. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 918 (7–8): 668–679.

Agudelo, R; Jaramillo, M; Peñuela, G. 2012. Comparison of the removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon in horizontal sub-surface and surface flow wetlands. *Science of the Total Environment* 431: 271–277.

Alasino, N; Nadal, F; Primo, L; Bollo, P; Larrosa, N. 2015. Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6(3), 93-104.

Almuktar, S; Abed, S; Scholz, M. 2018. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 25:23595–23623.

APHA. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), Washington DC.

Arellano, S. 2017. Humedal artificial para mejorar la calidad del agua residual doméstica en El Caserío Ternique - Piura. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

Ascuntar, D; Toro, A; Peña, M; Madera, C. 2009. Changes of flow patterns in a horizontal subsurface Flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions. *Ecological Engineering* 35: 274 – 280.

AySA. 2018. *Manual de plantas depuradoras*. Vol. 1: caracterización de efluentes: ensayos físicos y químicos. - 1a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Lazos de Agua.

Avelar, FF; Matos, AT; Matos, MP. 2019. Remoção de contaminantes do esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com *Mentha aquatica*. *Engenharia Sanitária Ambiental*. 24 (6):1259 – 1266.

Barceló, I; Rivas, A; Solís, H; García, J; Salazar, M; Giacomán, G; Zetina, C. 2014. Comportamiento de un sistema humedal-laguna de maduración-humedal de pulimento a nivel piloto para el tratamiento de aguas municipales en la

Universidad Autónoma Metropolitana de la unidad azcapotzalco en la Cd. de México, México. Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Morelia, Michoacán, México. 55 – 58.

Bassani, L; Pelissari, C; Brinkert, B; Sezerino, P. 2021. Influência das condições operacionais sobre o consumo e transferência de oxigênio em um wetlands construído vertical de fundo saturado. Libro de Memoria V Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Abril, Evento Online. 59 – 62.

Bastos,K; Calijuri, M; Bevilacqua, P; Rios, E; Dias, E; Capelete, B; Magalhaes, T. 2010. Post-treatment of UASB reactor effluent in waste stabilization ponds and in horizontal flow constructed wetlands; a comparative study in pilot scale in Southeast Brazil. *Water Science & Technology*.61(4): 995 – 1002.

Bassani, L; Pelissari, C; Brinkert, B; Sezerino, P. 2021. Influência das condições operacionais sobre o consumo e transferência de oxigênio em um wetlands construído vertical de fundo saturado. *In: Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias*. 282pg.

Bedoya, J; Ardila, A; Reyes, J. 2014. Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Rev. Int. Contam. Ambie*. 30 (3): 275-283.

Benvenuti, T; Hamerski, F; Giacobbo, A; Bernardes, A; Zoppas-Ferreira, J; Rodrigues, M. 2018. Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: A real-scale study, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. DOI: [org/10.1016/j.jece.2018.08.067](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.067).

Bohórquez, E; Paredes, D; Arias, C. 2016. Vertical flow-constructed wetlands for domestic wastewater treatment under tropical conditions: effect of different design and operational parameters, *Environmental Technology*, DOI: [10.1080/09593330.2016.1230650](https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1230650)

Cabred, S; Giunta, V; Busalmen, J E; Busalmen, J P; Bonanni, S. 2019. Reduced depth stacked constructed wetlands for enhanced urban wastewater treatment *Chemical Engineering Journal* (372) 708–714.

Cabrera, V. 2016. Un nuevo enfoque de gestión desconcentrada del agua y saneamiento rural. En: EXPO AGUA PERÚ 2016, Lima, Perú.

CONAGUA. 2018. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales.; SEMARNAT, Ed.; SEMARNAT: Ciudad de México, México, México.

Cahuaya, D; Padilla, J. 2019. Tratamiento de agua residual doméstica mediante humedal artificial en cascada, Rímac.

Calijuri, M; Bastos, R; de Brito, T; Cesca, B; Oliveira, E. 2009. Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/wetlands construídas de fluxo

horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. *Engenharia Sanitária Ambiental* 14 (3): 421-430.

Campos, JM; Teixeira Filho, J. 2019. Balanço de fósforo e nitrogênio em leitos cultivados com *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Engenharia Sanitária Ambiental* 24 (1): 1-11.

Cárdenas, D. 2029. Desarrollo de un prototipo para el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en la PTAR “Juan Velasco Alvarado” ubicado en el Distrito de Villa El Salvador”. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Perú.

Cardozo, C; Peralta, I; Benítez, G; Samudio, A; Ávalos, C. 2016. Uso de *Typha domingensis* en flotación para el tratamiento de aguas residuales de viviendas unifamiliares. Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua a Santa Fe, Argentina.

Carvajal, C; Ortiz, P; Vega, A. (2017). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando *Bambusa* sp en la finca el recreo ubicado en Tauramena, Casanare. *Revista de Tecnología*. 16 (1): 65-76.

Carvalho, O; Costa, M; Martins, F; Machioni, M. 2018. Nitrogen Removal in a Partially Saturated Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland Used for Restaurant Wastewater Treatment. *Journal Environmental Engineering*, 144 (7): 04018042. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001384

Caselles-Osorio, A; Eslava, P; Palmieri, F.; Villafañe, P.; Caballero, V; Manzano, Y. 2010. Humedales construidos experimentales y su potencial como sistemas de tratamiento de aguas residuales en la Región Caribe colombiano. Revista La Torre de Marfil.01 (01): 20 – 24.

Caselles-Osorio, A; Villafañe, P; Caballero, V; Manzano, Y. 2011. Efficiency of Mesocosm-Scale Constructed Wetland Systems for Treatment of Sanitary Wastewater Under Tropical Conditions. Water Air Soil Pollut. 220:161–171

Caselles-Osorio, A; Hernández, A; Jiménez, G; Castilla, F. 2014. Removal efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with corn (*Zea mays*) and sesame (*Sesamum indicus*) in a rural zone of Santa Marta, Colombia. Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Morelia, Michoacán, México.

Caselles-Osorio, A; Vega, H; Lancheros, J; Casierra, H; Mosquera, J. 2017. Horizontal subsurface-flow constructed wetland removal efficiency using *Cyperus articulatus* L. Ecological Engineering 99: 479 – 485.

Caselles-Osorio, A; Mendoza, G; Simanca, Romero, I; Mosquera, J; Eslava, P. 2018. Tomato (*Lycopersicon esculentum*) production in sub surface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment in rural a colombian community. Ingeniería, Investigación y Tecnología. XIX (4): 1-10.

Casierra, H; Casalins, J; Vargas, X; Caselles-Osorio, A. 2016. Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. Tecnología y Ciencias del Agua. VII (4): 97-111.

Casierra, H; Charris, J; Caselles-Osorio, A; Parody A. 2017. Organic Matter and Nutrients Removal in Tropical Constructed Wetlands Using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae) Water Air Soil Pollut: 228- 338.

Cejas, M. 2019. Implementación piloto de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal en la Universidad Nacional de Moquegua, para el tratamiento del agua residual de la laguna primaria de la planta de tratamiento de agua residual – PTAR del distrito de Pacocha, Ilo 2017. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú.

Chagas, R; Matos, A; Cecon, P; Lo Monaco, P; França, L. 2011. Cinética de remoção de matéria orgânica em sistemas alagados construídos cultivados com lírio amarelo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 15 (11): 1186–1192.

Charris, J, Caselles-Osorio, A. 2016. Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). Tecnología y Ciencias del Agua. VII (6): 93-103.

Charris, J, Caselles-Osorio, A, Casierra, H. 2016a. Efecto del modo de operación hidráulico en la eficiencia de eliminación de contaminantes en humedales construidos plantados con *Cyperus ligularis* y *Echinochloa colonum*. Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Santa Fe, Argentina.

Charris, J, Caselles-Osorio, A, Casierra, H. 2016b. Uso de macrófitas acuáticas nativas en humedales construidos bajo condiciones tropicales. Memorias de la III

Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Santa Fe, Argentina

Colares, C y Sandri, D. 2013. Eficiência do tratamento de esgoto com tanques sépticos seguidos de leitos cultivados com diferentes meios de suporte. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 8 (1): 172-185.

Colares, G; De Souza, G; Pereira, F; Carvalho, A; Lutterbeck, CA; Kist, Machado, E. 2019. Combined system for the treatment and reuse of urban wastewater: the efficiency of anaerobic reactors þ hybrid constructed wetlands þ ozonation. *Water Science & Technology*. 80(2):254-264.

Colares, G; Dell' Osbel, N; Oliveira, G; Lutterbeck, C; Rodríguez, A; Machado, E. 2021. Hybrid constructed wetlands integrated with microbial fuel cell and ornamental plants for wastewater treatment and energy generation. *Caderno da V Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias*. 282pg.

Collins, C; Carrillo, V; Vidal, G. 2021. Long-term phosphorus mass balance in a wetland constructed at pilot scale level. *Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias*. 2021, 282pg

CONAGUA. 2020. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Subdirección General de

Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: www.gob.mx/conagua.

Cordesius, H; Hedstrom, S. 2019. A Feasibility Study on Sustainable Wastewater Treatment Using Constructed Wetlands—An Example from Cochabamba, Bolivia. Disponible en: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/1388945>

Cóndor, H. 2019. Humedal artificial en remoción de la materia orgánica de las aguas residuales domésticas de Paccha – La Oroya a nivel laboratorio. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero químico. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Cordón, A. 2020. Tratamiento de aguas residuales para remoción de nitrógeno y fósforo, utilizando *Eichhornia crassipes* en EMAPET. Sistematización de práctica profesional. Universidad Rafael Landívar.

Córdova, O; Díaz, J. 2020. Fitotratamiento del agua de la quebrada Indañe con *Chrysopogon zizanioides* en un humedal artificial para nitratos y fosfatos, Moyobamba, 2020. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad César Vallejo. Lima, Perú.

Córdoba, D; Huamán, T. 2018. Humedal artificial con *Chrysopogon zizanioides* para la remoción de aguas residuales domésticas en el Distrito de Habana – Moyobamba. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario. Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Perú.

Costa, J; Paoli, A; Seidl, M; von Sperling, M. 2013. Performance and behaviour of planted and unplanted units of a horizontal subsurface flow constructed wetland

system treating municipal effluent from a UASB reactor. *Water Science & Technology* 68(7): 1495 – 1502.

Costa, J; Pinto, W; Seidl, M; von Sperling, M. 2015. Role of vegetation (*Typha latifolia*) on nutrient removal in a horizontal subsurface-flow constructed wetland treating UASB reactor–trickling filter effluent. *Water Science & Technology* 71(7): 1004 – 1010.

Costa, J; Oliveira, A; Von Sperling, M; Seidl, M. 2018. Avaliação do desempenho de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial tratando efluente de reator UASB, com base em quatro anos de monitoramento. *Engenharia Sanitária Ambiental*. 23 (1) 191-200.

Couto, E; Assemany, P; Calijuri, MA; Santiago, A; Simões, LG. 2013. Reuse of treated sewage effluent in airports: Irrigation of ornamental plant nursery. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7 (2):264-273.

Cruz, L. 2018. Tratamiento de aguas grises domésticas por el sistema de humedales artificiales con el *Nuphar Luteum* en el AA. HH La Rivera–Carabayllo, 2018. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

Cruz, M; Núñez, R. 2018. Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro). Libro de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p. Lima, Perú.

Cubas, J; Mireles, J. 2019. Eficiencia del humedal artificial con totora (*Scirpus californicus*) en la depuración de efluentes de las lagunas de estabilización del C.P. La Otra banda. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Lambayeque. Lambayeque, Perú.

Cubillos, J; García, J; Giraldo, M; Paredes, D. 2014. Efecto de la carga hidráulica y medio filtrante sobre la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales construidos sembrados con *Guadua angustifolia kunth*. Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Morelia, Michoacán, México. 48 – 51.

Damián, L; Mancha, E. 2021. Efecto del humedal artificial Waylla Ichu (*Calamagrostis rigida*). en el tratamiento de aguas servidas del barrio de Santa Ana-Huancavelica-2021. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad César Vallejo. Lima, Perú.

DATTAS 2022. Diagnóstico sobre el abastecimiento de agua y saneamiento en el ámbito rural. Disponible en: <https://datass.vivienda.gob.pe/>

De Anda, J; López, A; Villegas, E; Valdivia, K. 2018. High-Strength Domestic Wastewater Treatment and Reuse with Onsite Passive Methods. *Water* 10 (99). DOI: 10.3390/w10020099 www.mdpi.com/journal/water

De la Cruz, H. 2020. Humedal artificial empleando especies fitodepuradoras nativas para el tratamiento de aguas residuales en el Distrito de San Antonio-Huarochirí. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad César Vallejo. Lima, Perú.

Decezaró, S; Wolff, D; Pelissari, C; Ramírez, R; Formentini, T; Goerck, J; Rodrigues, L; Sezerino, P. 2019. Influence of hydraulic loading rate and recirculation on oxygen transfer in a vertical flow constructed wetland. *Science of the Total Environment* 668: 988–995.

Decezaró, S; Wolff, D; Araújo, R; Faccenda, H; Perondi, T; Sezerino, P. 2018. Vertical flow constructed wetland planted with *Heliconia psittacorum* used as decentralized posttreatment of anaerobic effluent in Southern Brazil. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, DOI: 10.1080/10934529.2018.1530106

Del Toro, A; Vargas, JL; Razo, S; Zurita, F. 2018. Remoción de nitrógeno total en humedales verticales parcialmente saturados, con mazorca de maíz como fuente interna de carbono. IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 2018, 310 p.

Dell' Osbel, N; Stolzenberg, G; Alves, G; Ribeiro, L; Pereira, F; Lawish, A; López, D; Lutterbeck, C; Oliveira, E; Kist, L; Machado, L. 2020. Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: Increased nutrient removal and landscape potential. *Ecological Engineering* 158: 106072.

De Jesus, FL; Matos; AT; Matos, MP. 2020. Efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands cultivated with grasses of different root systems. *Water Supply*. 20 (8).

Dornelas, F; Machado, B; von Sperling, M. 2009. Performance evaluation of planted and unplanted subsurface-flow constructed wetlands for the post-treatment of UASB reactor effluents. *Water Science & Technology—WST*. 60 (12): 3025 – 3033.

Dos Santos, V; Turini, E; Montagnolli, R; Matos, P; Otenio, M. 2013. Journal of Environment and Ecology. Constructed Wetland System as Secondary Treatment for Stabilization Pond Domestic Effluent. Journal of Environment and Ecology. 4 (1): 86 – 96.

Douglas, W; de Almeida, A; da Conceição, E; Batista, J. 2019. Constructed wetlands as post treatment of a decanter digester followed by an anaerobic filter. Revista Ambiental Água.14 (4) e2335.

Dotro, G; Langergraber, G; Molle, P; Nivala, J; Puigagut, J; Stein, O; Von Sperling, M. 2017. Treatment Wetlands. Biological Wastewater Treatment Series. IWA Publishing 7: 1-172.

Durand, L. 2014. Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas grises. Trabajo de Titulación para Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

Eustáquio, J; Matos, A; Lo Monaco, P; Campos, L; Borges, A. 2012. Efficiency of constructed wetland systems cultivated with black oats treatment of domestic sewage. Acta Scientiarum Technology (34) 4: 391-398.

Fernández, A; Verduzco, M; Senés-Guerrero, S; Yebra-Montes, C; de Anda, J; Gradilla-Hernández, M. 2020. Mathematical Modeling of a Domestic Wastewater Treatment System Combining a Septic Tank, an Up Flow Anaerobic Filter, and a Constructed Wetland. Water (12): 3019. DOI:10.3390/w12113019.

Filho, F; Alves, T; Steffen, J; Arias, C; Paulo, P. 2018. Hydraulic and hydrological aspects of an evapotranspiration-constructed wetland combined system for household greywater treatment, Journal of Environmental Science and Health, Part A, DOI: 10.1080/10934529.2017.1422954

Flores, M. 2013. Tratamiento secundario de aguas residuales en un humedal artificial con dos densidades de siembra de *Schoenoplectus totra* en el distrito de Cabanaconde – Arequipa. Tesis para optar el Título Profesional de Biología. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Fortes, P; Perondi, N; Cost Neves, E; Fragoso, R; Marcos, A; Lewis, A; Santos, L. 2019. Performance of sewage treatment plant with septic tank, anaerobic filter and constructed wetland with *Typha* spp. Revista Ambiental Água. 7. DOI:10.4136/1980-993X

FUNASA (Fundação Nacional de Saúde). 2018. Wetlands construídos, aplicados no tratamento de esgoto sanitário: Recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção. Ministério da Saúde. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 56 p.

Gamarra, J. 2016. Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas grises con humedal artificial en una asociación de viviendas en ate vitarte. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

García, J; Paredes, D; Cubillos, J. 2013. Effect of plants and the combination of wetland treatment type systems on pathogen removal in tropical climate conditions. Ecological Engineering 58: 57– 62.

García, J; Von Sperling, M. 2018. Performance of the first stage of the French system of vertical flow constructed wetlands with only two units in parallel: influence of pulse time and instantaneous hydraulic loading rate. Water Science & Technology. 78(4): 848 – 859.

García, F; Patiño, J; Zhinín, F; Donoso, S; Flores del Pino, L; Avilés, A. 2019. Performance of *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus* in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. *International Soil and Water Conservation Research* 7 (2019) 286-296.

García, L. 2021. Sostenibilidad de un humedal artificial de flujo vertical, para el tratamiento de aguas contaminadas con fines de reúso. Tesis para optar el título de ingeniera agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

Garzón, M; González, J; García, R. 2016. Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista Internacional Contaminación Ambiental* 32 (2): 199 – 211.

Goldoni, A; Golfeto, C; Teixeira, J; Blumm G; Wilhelm, C; Telöken, F; Bianchi, E; Schmitt, J; Gehlen, G; Rodrigues, M. 2014. Cytotoxic and genotoxic evaluation and chemical characterization of sewage treated using activated sludge and a floating emergent macrophyte filter in a municipal wastewater treatment plant: a case study in Southern Brazil. *Environmental Earth Science*. DOI: 10.1007/s12665-014-3055-6

Gómez, Y. 2017. Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales verticales empleando *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento de aguas servidas. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria la Molina. 185 p.

Gómez, M; Miglio, R; Sánchez, G. 2018. Comparación de la eficiencia de dos macrófitas: *Chrysopogon zizanioides* y *Cyperus alternifolius*, en el tratamiento de aguas residuales domésticas, usando humedales artificiales de flujo vertical. Libro

de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p. Lima, Perú.

Guarachi, E; Mamani, E. 2018. Implementación de humedales artificiales de flujo subterráneo horizontal para tratamiento de aguas residuales domésticas en el altiplano norte de La Paz Bolivia. Libro de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p. Lima, Perú.

Guevara, B; Hoffmann, H; Miglio, R; León, V; Vela, R. 2021. Comparación entre un humedal artificial de flujo vertical y un humedal horizontal para el tratamiento del efluente de la primera etapa del sistema francés, bajo condiciones climáticas cálidas. Libro de Memorias V Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p Florianópolis, Brasil.

Hernández, J; Pérez, M; Domínguez, E; Cachaldora, I. 2012. Humedal subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales: diseño, construcción y evaluación. Revista Cubana de Química, 14 (2): 147-154.

Hernández, M; Lagunes, G. 2018. Remoción de contaminantes y crecimiento de plantas ornamentales en humedales a escala piloto con diferente tipo de sustrato. IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p.

Herrera Ramos, H. 2018. Eficiencia de la *Guadua angustifolia* (Bambú) en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedal artificial en el centro poblado Santa Catalina, distrito y provincia de Moyobamba, 2017. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Sanitario. Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Perú.

Hoffmann, H; Rüd, S; Schöpe, A, 2009. Case study of SuSanA projects Blackwater and greywater reuse system. Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). Documento disponible en: www.susana.org

Hoffmann, H; Platzer, C, Winker, M, Von Münch, E. 2011. Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ, Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN, Eschborn, Alemania. 39 p.

Horn, T; Vargas, F; Teresinha, L; Machado, E. 2014. Constructed wetland and photocatalytic ozonation for university sewage treatment. *Ecological Engineering* 63:134–141.

Huamán, C. 2017. Evaluación de la eficiencia de la remoción de materia orgánica en función a la carga orgánica al ingreso de humedal artificial con lecho volcánico. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

INEI (Instituto Nacional de Estadísticas e Informática). 2017. Censo Nacional 2017: XII de Población y VII de Vivienda.

Jiménez, E; López, G; Bautista, R; Castelán, M; Guerrero, A; Hernández, J; Torres, C; De la cruz, E; Romellón, J; Solís, R. 2017. Wastewater treatment by constructed wetlands with *Thalia geniculata* and *Paspalum paniculatum* in a tropical system of Mexico. *Int. J. Sus. Dev. Plann.* 12 (1).

Katsenovich, Y; Hummel, A; Ravinet, A; Miller, J. 2009. Performance evaluation of constructed wetlands in a tropical region. *Ecological Engineering* 35, 1529–1537

Kottek, M; Grieser, J; Beck, C; Rudolf, B; Rubel, F. 2006. World map of the Koppen- Geiger climate classification updated. *Meteorol Z.* 15(3):259–63.

Lana, L; Moraes, D; Von Sperling, M; Morato, M; Vasconcellos, G; Paraense, M; Moreira, T. 2013. Performance of a single stage vertical flow constructed wetland system treating raw domestic sewage in Brazil. *Water Science & Technology.* 68 (7): 1599 – 1606.

Land, M; Granéli, W; Grimvall, A; Hoffmann, C; Tonderski, K; Verhoeven, J; Mitsch, W. 2016. How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environ Evid,* 5:9.

Larico, C. 2021. Reducción de materia orgánica y nutrientes mediante un humedal artificial sub superficial de flujo vertical en función de la carga hidráulica y la composición del medio granular. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero sanitario. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Leiva, A; Núñez, R; Gómez, G; López, D; Vidal, G. 2018. Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. *Ecological Engineering* 120: 116–125.

Leiva, A; Albarrán, A; López, D; Vidal, G. 2019. Evaluation of phytotoxicity of effluents from activated sludge and constructed wetland system for wastewater reuse. *Water Science & Technology* 79 (4).

Leiva, A; Albarrán, A; López, D; Vidal, G. 2019. Evaluation of phytotoxicity of effluents from activated sludge and constructed wetland system for wastewater reuse. *Water Science & Technology* 79 (4).

León, V; Höllmann, M; Hoffmann, H; Miglio, R. 2018. Adaptación del dimensionamiento del sistema francés con fines de reúso de agua residual doméstica en la costa peruana. Libro de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p. Lima, Perú.

León, V. 2020. Incremento de cargas y su efecto en la operación de un sistema francés para tratar aguas residuales domésticas. Tesis para optar el grado de maestro en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

León, V; Miglio, R; Hoffmann, H. 2021. Optimización de un Sistema Francés para tratar aguas residuales domésticas en climas templados, bajo condiciones típicas de Perú. Libro de Memorias V Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p Florianópolis, Brasil.

Lima, M; Carvalho, K; Passig, F; Borges, A; Filippe, T; Azevedo, J; Nagalli, A. 2018. Performance of different substrates in constructed wetlands planted with *E. crassipes* treating low-strength sewage under subtropical conditions. *Science of the Total Environment* 630: 1365–1373.

Llanos, A; Barraza, E; Narvaez, A; Varela, L; Caselles-Osorio, A. 2019. Efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands and microbial community composition operating under tropical conditions,

Lobo, J; Alencar, M; Pereira, L; Ismael de Souza, T. 2021. Wetlands Construídos em região semiárida: estudo de caso de módulo na região sul do Ceará. Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias. 122 – 125.

Lombard, R; Pelus, L; Fina, N; Etang, F; LeGuenec, B; Molle, P. 2018. Resilience and reliability of compact vertical-flow treatment wetlands designed for tropical climates. *Science of the Total Environment* 642, 208–215.

Lopes, P; Lacerda, S; Pacheco, A; Passig, F. 2021. Influência da variação da altura do maciço filtrante no comportamento de sistemas de wetlands construídos ascendente vegetados com *Capim Vetiver*. Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias. 174 – 177.

López, D; Fuenzalida, D; Vera, I; Rojas, K; Vidal, G. 2014. Evaluación de las emisiones de metano provenientes de humedales de flujo subsuperficial que tratan aguas servidas a través de actividad metanogénica. Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Morelia, Michoacán, México.

López, D; Fuenzalida, D; Vera, I; Rojas, K; Vidal, G. 2015. Relationship between the removal of organic matter and the production of methane in subsurface flow

constructed wetlands designed for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 83:296 – 304.

López, T; Duré G, Doldán, M; Galeano, E; Marín, D. 2016. Eficiencia de humedales artificiales construidos a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales urbanas de baja carga utilizando *Cyperus giganteus* y *Typha domingensis*. Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua Santa Fe, Argentina.

López, D; Sepúlveda, M; Vidal, G. 2016. *Phragmites australis* and *Schoenoplectus californicus* in constructed wetlands: Development and nutrient uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 16 (3): 763-777.

López, G; Bautista, R; Ramos, S; Torres, C. 2018. Phytoremediation of wastewater with *Thalia geniculata* in constructed wetlands: Basic pollutants distribution. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 228. 53 – 63.

López, D; Sepúlveda, M; Ruiz-Tagle, N; Sossa, K; Uggetti, E; Vidal, G. 2019. Potential methane production and molecular characterization of bacterial and archaeal communities in a horizontal subsurface flow constructed wetland under cold and warm seasons. *Science of the Total Environment* 648: 1042–1051.

Lutterbeck, C; Kist, L; Lopez, D; Zerwes, F; Machado, E. 2017. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural áreas. *Journal of Cleaner Production* 148: 527-536.

Lutterbeck, C; Vargas, F; Radtke, J; Köhler, A; Kist, L; Machado, L. 2018. Integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property – Evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics. *Ecological Engineering* 115: 1–8.

Marín, J; Correa, J. 2010. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua angustifolia Kunth*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Machado, AI; Beretta, M; Fragoso, R; Duarte, E. 2016. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management* 30: 1-11.

Mancilla, R; Zuñiga, J; E, Salgado, Schiappacasse, M; Chamy, R. 2013. Constructed wetlands for domestic wastewater treatment in a Mediterranean climate region in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology* DOI: 10.2225/vol16-issue4-fulltext-5

Manjate, E; Lana, L; Moraes, D; Vasconcellos, G; Maciel, G; von Sperling, M. 2015. First stage of the French vertical flow constructed wetland system: experiments with the reduction of surface area and number of u. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 05 (1): 50 – 55.

Manzo, L; Epele, L; Horak, C; Kutschker, A; Miserendino, M. 2020. Engineered ponds as environmental and ecological solutions in the urban water cycle: A case study in Patagonia. *Ecological Engineering* (154)105915.

Marcelino, G; Carvalho, K; Lima, X; Passig, F; Belini, A; Bernardelli, J; Nagalli, A. 2020. Construction waste as substrate in vertical subsuperficial constructed wetlands treating organic matter, ibuprofenhene, acetaminophen and ethinylestradiol from low-strength synthetic wastewater. *Science of the Total Environment* 728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138771>

Mariñelarena, A; Di Giorgi, H. 2016. Humedales construidos de flujo vertical ascendente para la depuración de aguas residuales de una escuela rural. *Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedal para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua*. Santa Fe, Argentina.

Martínez, N; Tejada, A; Zurita, F. 2016. Remoción de nitrógeno total en humedales de tratamiento verticales de dos fases (Aerobia-anaerobia). *Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua*. Santa Fe, Argentina.

Martins, J; Mourão, J; Ribeiro, L; Pires, M. 2016. Evaluation of a constructed wetland with horizontal Flow for sanitary wastewater treatment. *Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua* Santa Fe, Argentina. 105 – 106.

Matos, A; Brasil, M; Lo Monaco, P. 2013 Efeito da taxa de carregamento sobre a remoção de poluentes de esgoto em sistemas alagados construídos. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*. 33 (2): 319-331.

Matos, M; von Sperling, M; Teixeira, A; Cristelo, D; Rodrigues, C. Soares. 2018. Colmatção e desempenho de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial ao longo de oito anos de operação. *Engenharia Sanitária Ambiental*. 23 (6):1227-1237.

Medina, F; López, E 2015. Determinación de la eficiencia del humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en el barranco del sector cruce de Uchuglla, de la ciudad de Moyobamba. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario. Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Perú.

Mejía, S. 2017. Eficiencia de la macrófita flotante *Eichhornia Crassipes* en un Humedal Artificial para mejorar la calidad del agua residual. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Ambiental.

Mello, D; Carvalho, K; Passig, F; Freire, F; Borges, A; Lima, M; Marcelino, G. 2017. Nutrient and organic matter removal from low strength sewage treatment. *Environmental Technology*. DOI: 10.1080/09593330.2017.1377291

Méndez, A; Bello, R; Herrera, D; Mejía, G; Calixto, A. 2015. Performance of constructed wetlands with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of South Mexico. *Water Practice & Technology* 10 (1): 110 – 123.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 4 edition. New York: Mc Graw Hill.

Miglio, R Case. 2011. Case study of SuSanA projects “Reúso de efluentes de un sistema de humedales artificiales, Trujillo, Perú” Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). Documento disponible en: www.susana.org

Miglio, R; García, A; Nemcova, E; Poblet, R. 2016. Diseño urbano sensible al agua en Lima Metropolitana, Perú (“Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales”): creación de humedales artificiales de flujo vertical en espacio público abierto para la reutilización de aguas residuales tratadas (Peru) En:

Hettiarachchi, H; Ardakanian, R (eds). Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas. UNU-FLORES.

Miglio, R; Hoffmann, H; Altafin, I. 2018. Sistematización de las experiencias con diferentes tecnologías de humedales construidos en América Latina y Caribe. En: Libro de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p. Lima, Perú.

Miranda, J. 2012. Determinación de parámetros de diseño, puesta en marcha y evaluación de la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Molle, P; Lombard, R; Latune, Riegel, C; Lacombe, G; Esser, D; Mangeot, L. 2015. French vertical-flow constructed wetland design: adaptations for tropical climates. *Water Science & Technology*, 71.10.

Montalván, P; López, K. 2017. Eficiencia del humedal artificial con *Cyperus papyrus* y *Typha angustifolia* en la depuración de aguas residuales domésticas Habana – 2015. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Sanitario. Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Perú.

Montoya, J; Ceballos, L; Casas, J. 2010. Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 14, p. 75-84.

Moreira, F y Oliveira, E. 2020. Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. *Environmental Research* 190:110016.

Narváez, A; Charris, J; Casierra, H; Varela, L; Caselles, A. 2018. *Thalia geniculata* L. y *Cyperus articulatus* L. en la reducción de materia orgánica y nutrientes en humedales construidos tropicales. Libro de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Newman, J; Acreman, M; Palmer-Felgate, E; Verhoeven, J; Scholz, M; Maltby, E. 2015. Do on-farm natural, restored, managed and constructed wetlands mitigate agricultural pollution in Great Britain and Ireland?. Version disponible en: <http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/33873/>

Navarro, A; Durán, MC. 2019. El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: los humedales construidos, una tecnología a considerar. *Revista Cubana de Química*, 31 (1): 87-104.

Neira, P; Ruiz, M. 2021. Reducción de parámetros físico-químicos y microbiológicos en aguas residuales crudas, mediante humedal artificial – Distrito Santiago de Chuco-La Libertad. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad, Perú.

Núñez, M; Cárdenas, C; Ramírez, Y; Rincón, S; Saules, L; Morales, E. 2011. Removal of nitrogen and phosphorus by *Typha dominguensis* and *Lemna* sp. in laboratory scale constructed wetlands. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 34 (3): 246 – 254.

Ojeda, L; Romero, S; Reyes, J; Gallegos, R; Herrera, A. 2014. Evaluación de la depuración de agua gris en un humedal artificial a escala piloto. Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Morelia, Michoacán, México. 66 – 69.

Oliveira, E; Wink, M; Zappe, A; Kist, T; Machado. 2019. Sistema integrado com microalgas e wetland construído de fluxo vertical no tratamento de efluentes urbanos Integrated system with microalgae and constructed wetland in vertical flow for urban wastewater treatment. Engenharia Sanitária 24 (2): 305-310.

Oliveira, M; Arruda, A; Farias, B; Sabioni, P; Migliolo, L; Magalhães, F. 2019. Ibuprofen and caffeine removal in vertical flow and free-floating macrophyte constructed wetlands with *Heliconia rostrata* and *Eichornia crassipes*. *Chemical Engineering Journal* 37: 458–467.

OMS (Organismo Mundial para la Salud) y UNICEF (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia). 2016. Desigualdades en materia de saneamiento y agua potable en América Latina y el Caribe. Programa Conjunto de Monitoreo OMS/UNICEF del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento. 3 p.

OMS (1989). Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Grupo Científico sobre los aspectos sanitarios del uso de aguas residuales tratadas para la agricultura y la acuicultura. Serie de informes técnico; no. 778. Organización Mundial de la Salud.

OPMI (Oficina de Programación Multianual de Inversiones). 2022. Diagnóstico de la situación de brechas de infraestructura o de acceso a servicios públicos del

sector vivienda, construcción y saneamiento. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Pacheco, A; Zanetti, F; Roth, J; Lopes, P; Lacerda, S; Carvalho, K. 2021. Avaliação do tempo de inundação/drenagem do de um Sistema Wetland tipo TidalFlow no tratamento de Esgoto Sanitário. Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias. 130 – 133.

Paima, D; Grately, W. 2021. Eficiencia de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal en el tratamiento de aguas residuales domésticas en una vivienda del A.H 9 de octubre, Pucallpa. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional de Ucayali, Ucayali, Perú.

Palta, G; Morales, S. 2013. Fitodepuración de aguas residuales domesticas con poaceas: *Brachiaria mutica*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum maximun* en el municipio de Popayán, Cauca. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. 11 (2): 57-65.

Paredes, D. 2018. Evaluación del comportamiento de un sistema de tratamiento a escala real con diferentes tipos de humedales para el tratamiento de aguas residuales domésticas bajo condiciones tropicales. Libro de memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Paredes, D; Galeano, C. 2018. Estudio del efecto de la aireación artificial en humedales construidos para el tratamiento de agua residual doméstica a escala piloto en el eje cafetero colombiano. Libro de memorias IV Conferencia

Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Paulo, P, Begosso, L; Pansonato, N; Roshan, R; Shrestha and M. A. Boncz. 2009. Design and configuration criteria for wetland systems treating greywater. *Water Science & Technology*. 60 (8):2001-2007.

Paulo, P; Azevedo, C; Begosso, L; Galbiati, A; Boncz, M. 2013. Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecol. Eng.* 2013, 50,95–100. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.022

Paulo, P; Galbiati, A; Correa, F; Silva, F; Altrão, G; Árpád, M. 2019. Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater. *Resources, Conservation & Recycling* 147: 61–66

Pavlineri, N; Skoulikidis, N; Tsihrintzis, V. 2017. Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis, *Chem. Eng. J.* 308: 1120–1132. DOI:10.1016/j.cej.2016.09.140.

Pelissari, C; Ávila, C; Trein, C; García, J; Dultra, R; Sezerino, P. 2017. Nitrogen transforming bacteria within a full-scale partially saturated vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater. *Science of the Total Environment* 574: 390–399.

Pérez, M; Domínguez, E; Tack, F; Hernández, J; Sánchez, R; Arteaga, L. 2012. Vertical subsurface wetlands for wastewater purification. *Procedia Engineering* 42: 1960 – 1968.

Pérez, R; Alfaro, C; Sasa, J; Agüero, J. 2013. Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. UNICIENCIA 27 (1): 332-340.

Pérez, M; Hernández, J; Bossens, J; Jiménez, T; Ros, E; Tack, F. 2014. Vertical flow constructed wetlands: kinetics of nutrient and organic matter removal. Water Science & Technology 70 (1).

Pires, I; Barbosa, G; Thomaz, J; Loureiro, M. 2020. Effect of hydraulic retention time on chemical oxygen demand and total nitrogen removal in intermittently aerated constructed wetlands. Revista Ambiente & Água. 15 (2): 2504.

Portilla, E. 2019. Sistema integrado tanque séptico y humedal de flujo horizontal para el tratamiento de agua residual doméstica. Tesis para optar el título profesional de Ingeniera Agrícola. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

Prata, R; De Matos, A; Cecon, P; Lo Monaco, P; Pimenta, L. 2013. Tratamiento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com Lírio-amarelo. Engenharia Agrícola Jaboticabal, 33 (6): 1144-1155.

Quispe, K; Ayala, M. 2019. Utilización de la *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* en la remoción de nitrógeno y fósforo, de las aguas residuales de la Laguna de Oxidación de la Empresa EMAPACOP S.A. – Ucayali. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional de Ucayali, Ucayali, Perú.

Ríos-Montes, K; Casas, J; Briones, R; Peñuela, G. 2017. Optimal conditions for chlorothalonil and dissolved organic carbon in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of environmental science and health*. DOI: 10.1080/03601234.2016.1273005.

Rivas, A. s.f. Experiencia exitosa del uso de humedales de tratamiento para la protección de la calidad del agua del lago de Pátzcuaro. IMTA. México. Disponible en: http://www.utzmg.edu.mx/UT/documentos/Experiencia_Cucuchucho.pdf

Rivas, A; Barceló, I; Moeller, G. 2011. Pollutant removal in a multi-stage municipal wastewater treatment system comprised of constructed wetlands and a maturation pond, in a temperate climate. *Water Science & Technology*. 64(4).

Rodríguez, S; Vargas, Y. 2019. Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales del piedemonte llanero. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental. Universidad Santo Tomás. Villavicencio. Colombia

Rodriguez, M; Konnerup, D; Brix, H, Arias, A. 2020 Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences During the Last Decade. *Water* 12, 1744.

Rodriguez, E; Silveira, D; Renan, B; Everton, S; Lapolli, F. 2021. Utilização do Biocarvão como Meio Filtrante em um Sistema Wetland Vertical no Tratamento de Esgoto Bruto. *Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio*

Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias. Abril. Evento Online. 71 – 74.

Rojas, K; Vera, I; Vidal, G. 2013. Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 69: 289-299. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Rojas, M; Purihuamán, C. 2018. Tratamiento de aguas residuales domésticas con la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en humedales de flujo subsuperficial - Rev. Tzhoeoen 2018 10 (1). ISSN: 1997-8731.

Romero, M; Colín, A; Sánchez, E; Ortiz, L.2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 25 (3): 157-167.

Roth, J; de Carvalho, K. 2021. Influência do tempo de cheia em um sistema de Wetland Construído tipo Tidal Flow na remoção de poluentes e na comunidade bacteriana. Caderno da Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias. 282 pg.

Rouso, BZ; Santos, MO; Freitas, MN; Pelissari, C; Sanchez, GC; Sezerino, P. 2016. Performance of a hybrid constructed wetland employed as sanitary wastewater treatment solution during its operational starting period. Memorias de

la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Santa Fe, Argentina.

Rubio, J; Montenegro, A. 2018 Humedal Artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la 3ra Brigada de Fuerzas Especiales, batallón de servicios N° 300, Distrito de Rioja, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín” Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario. Universidad Nacional de San Martín, San Martín, Perú.

Sá Salomão, A; Marques, M; Gonçalves, R; Da Cruz, O. 2012. Engineered ecosystem for on-site wastewater treatment in tropical áreas. *Water Science & Technology* 66 (10): 2131 – 2137.

Saldaña, S. 2021. Tratamiento de aguas residuales en unidades básicas de saneamiento construyendo humedales artificiales, campo alegre – Bagua Grande – 2021. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad César Vallejo. Lima, Perú.

Sanchez, A; Ferreira, AC; Martins, J; Cardoso, F; Araújo, T; Gomes, L; Domingues, M; Subtil, E; Matheus, D; Benassi, R. 2018 Organic matter, turbidity, and apparent color removal in planted (*Typha* sp. and *Eleocharis* sp.) and unplanted constructed wetlands *Journal of Environmental Engineering*. 144(10).

Sánchez-Meca, J. 2010. Cómo realizar una revisión sistemática y un meta-análisis. *Aula Abierta*. 38 (2): 53 – 64.

Santos, M; Freitas, M; Pelissari, C; Sánchez, G; Rousso, B; Sezerino, P. 2016. Remoción de carbono y nitrógeno en un humedal construido de flujo vertical con fondo saturado aplicado en el tratamiento de aguas residuales de alcantarillado.

Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Santa Fe, Argentina.

Segami, M. 2018. Efecto de la aplicación de microorganismos benéficos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un humedal artificial. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

Sepúlveda, M; López, D; Vidal, G. 2017. Methanogenic activity in the biomass from horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering* 105: 66–77.

Sérvulo, AC; Da Silva Tavares, J; Pereira, R; Sandri, D.2019. Vazão e tratamento secundário de esgoto doméstico em estação de pequeno porte com sistema de zona de raízes. *Irriga, Botucatu, Edição Especial Inovagri – notas técnicas*. 1 (1): 62-71.

Sezerino, P; Bento, A; Decezaró, S; Carissimi,E; Philippi, L. 2012 Constructed wetlands and sand filter applied as onsite post-treatment of anaerobic effluent. *Water Practice & Technology*. 7 (3). DOI:10.2166/wpt.2012.047.

Sezerino, P; Fachine, V; dos Santos, M; Rousso, B; Dotta, D; Pelissari, C. 2018. Two configurations of constructed wetlands applied for urban wastewater treatment in south of Brazil. *Libro de Memoria IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua*, 310 p.

Sidrach-Cardona, R; Sánchez, O; Garrido, L; Mas, J; Bécares, E. 2015. Molecular Characterization of Microbial Communities in Constructed Wetlands: The effect of plant species, organic matter and hydraulic design. Wastewater Treatment. Barret LM (Ed.). Nova Science Publishers, Inc.

Silva, S; Silveira, R; Gerosa, M. 2015. Remoção de matéria orgânica do esgoto em solo de wetland construído. Engenharia Sanitária Ambiental.20 (4): 533-542.

Silva, J. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en un sistema descentralizado de tratamiento de aguas residuales domésticas: filtro anaerobio + humedal construído. Ingeniería y Competitividad.18 (2): 101 – 112.

Silva, J; Valverde, A. 2011. Estimación de gases de efecto invernadero en humedales construídos de flujo subsuperficial. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 15 (2): 519-533.

Silva, A; Bassani, L; Bortoluzzi, A; Pelissari, C; Sezerino, P. 2021. Influência da taxa hidráulica específica no desempenho de um wetland construído vertical empregado no tratamento de esgoto sanitário. Libro de Memoria V Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Abril, Evento Online. 55 – 58.

Silveira, D; Belli, P; Philippi, L; Kim, B; Molle, P. 2015. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. Ecological Engineering 77: 257–264.

Silveira, E; Machado, EL; Moura, D; Rieger, A; Lutterbeck, C. 2017. Performance of an integrated system combining microalgae and vertical flow constructed wetlands for urban wastewater treatment. Environmental Science Pollution Research. DOI: 10.1007/s11356-017-9656-3

Silveira, E; Wink, M; Zappe A; Kist, A; Machado, E. 2019a. Sistema integrado com microalgas e wetland construído de fluxo vertical no tratamento de efluentes urbanos. *Engenharia Sanitária Ambiental* 24 (2):305-313.

Silveira, E; Lutterbeck, C; Machado, E; Ribeiro, L; Rieger, A; Beckenkamp, F; Alcayaga, E. 2019b. Biomonitoring of urban wastewaters treated by an integrated system combining microalgae and constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135864>

Silveira, E; Rodrigues, L; Silva, F; Luterbeck, C; Felizolla, N; Machado, E. 2021. Eco design aplicado ao saneamento ambiental através de sistema integrado de microalgas e wetlands contruídos como tecnologia de tratamento sustentável. V Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Abril. Evento Online.

Solís, R; López, G; Bautista, G; Hernández, J; Romellón, M. 2016. Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófitas. *Interciencia*. 41 (01): 40 – 47.

Souza, D; Iwakura, L; Lima, S; Locastro, J. 2019. Comparative effect of temperature on the performance of *Typha domingensis* pers. and *Pontederia parviflora* Alexander in phytotreatment. *Acta Scientiarum. Technology*. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v41i1.39038>

Souza, G; Stolzenberg, G; Machado, E; Lobo, E. 2019. Algae turf scrubber and vertical constructed wetlands combined system for decentralized secondary wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research* DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04425-6>

Starkl, M; Martinez, J. 2010. Water Quality Improvements through Constructed Wetlands: A Case Study in Mexico. Presentation from the 2010 World Water Week in Stockholm.

Suero, D; Pastor, R; Miglio, R; Saca, M. 2018. Humedales construidos para el saneamiento en la comunidad campesina de Haparquilla, Cusco, Perú. Libro de Memorias IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. 310 p. Lima, Perú.

Tejeda, A; Del Toro, A; Morales, A; Sánchez, P; Zurita, F. 2021. Humedades verticales parcialmente saturados (con mazorca de maíz) para la remoción de nitrógeno total, después de dos años de operación. Caderno da V Conferência Panamericana de Sistemas Wetlands para Tratamento e Melhoramento da Qualidade da Água e do 5º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias. 282pg.

Toro, A; Madera, C; Peña, M; García, H; Yee, W; Walker, S; Lens, P. 2017. Longitudinal Removal of Bisphenol-A and Nonylphenols from Pretreated Domestic Wastewater by Tropical Horizontal Sub-Surface Constructed Wetlands. Applied sciences. 7, 834.

Torres, G. 2018. Humedal artificial con la especie *Typha dominguensis* para el tratamiento de aguas grises domésticas, AA.HH. San Benito – Carabayllo. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Ambiental. Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

Torres, A; Hernández, A; Fausto, A; Zurita, F. 2017. Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. 2020. Rev. Int. Contam. Ambie. 33 (1): 37 – 47.

Trein, C; Pelissari, C; Hoffmann, H; Platzer, C; Sezerino, PH. 2015. Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimentos comercial e residencial empregando a ecotecnologia dos wetlands construídos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre 15 (4):351-367.

Trein, C; García, J; de Andrade, M; von Sperling, M. 2019a. Performance of a French system of vertical flow wetlands (first stage) operating with an extended feeding cycle. *Water Science & Technology* 80 (8): 1443-1455.

Trein, C; García, J; de Andrade, M; von Sperling, M. 2019b. Reduction of area and influence of the deposit layer in the first stage of a full-scale French system of vertical flow constructed wetlands in a tropical área. *Water Science & Technology*. 80(2): 347 – 356.

Ucker, F; de Araújo, R; da Cunha, P. 2012. Remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto sanitário em um sistema de alagados construídos utilizando o capim vetiver. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 7 (3).

Uggetti, E; Ferrer, I; Llorens, E; Garcia, J. 2010 Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresrtource Technology* 101: 2905–2912.

UN-HABITAT (United Nations Human Settlements Programme) 2008. *Constructed Wetlands Manual*. Water for Asian Cities Programme. Nepal, Kathmandu. 102 p.

UN-WATER (2020). *Progress on Wastewater Treatment (SDG target 6.3)*
<https://sdg6data.org/indicator/6.3.1>

Valle, J. 2017. Tratamiento de aguas grises mediante el sistema acoplado de humedal artificial y lombrifiltro en la Urbanización Santo Domingo – Carabaylo, 2017. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Ambiental. Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

Vargas, R. 2021. Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial de flujo vertical con *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento de aguas grises en la urbanización El Cóndor-Callao, 2021. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero ambiental. Universidad César Vallejo. Lima, Perú.

Vasconcellos, G; Von Sperling, M; Silva, R. 2019. From start-up to heavy clogging: performance evaluation of horizontal subsurface flow constructed wetlands during 10 years of operation. *Water Science & Technology* 79 (7): 1231-1240.

Vera, A; Andrade, C; Flores, E; Núñez, M; Cárdenas, C; Morales, E. 2010. Removal of nutrients and organic matter in a constructed wetland, in function of the development of the macrophyte *Typha dominguensis* Pers. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 33 (2): 145 – 152.

Vera, I; Saravia, M; Olave, J; Arias, C; Alarcon, E; Valdes, H. 2020. Potential Application of Chilean Natural Zeolite as a Support Medium in Treatment Wetlands for Removing Ammonium and Phosphate from Wastewater. *Water* 2020, 12: 1156; doi:10.3390/w12041156

Vera, I; Jorquera, C; López, D; Vidal, G. 2016. Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: Reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(3): 19-35.

Vizcaíno, L; Fuentes, N. 2016. Efectos de *Eisenia foetida* y *Eichhornia crassipes* en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 19 (1): 189 – 198.

Von Sperling M; Dornelas, F; Assuncao, F; de Paoli, A; Mabub, M. 2010. Comparison between polishing (maturation) ponds and subsurface flow constructed wetlands (planted and unplanted) for the post-treatment of the effluent from UASB reactors. Water Science & Technology: 61 (5).

Von Sperling M. 2015. Comparison of simple, small, full-scale sewage treatment systems in Brazil: UASB–maturation ponds–coarse filter; UASB–horizontal subsurface-flow wetland; vertical-flow wetland (first stage of French system). Water Science & Technology.71(3), 329 - 337.

Von Sperling, M; Sezerino, P. 2018. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. Boletim Wetlands Brasil, Ed. Esp.65 p.

Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment 380 (2007) 48–65.

Vymazal, J; Kröpfelová, L. 2008. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Environmental Pollution 14: 1 -539.

Vymazal, J. 2010. Constructed wetlands for wastewater treatment: A review. Water 2: 530-549

Wallace, B; Lajeunesse, M; Dietz, G; Dahabreh, I; Trikalinos, T; Schmid, C; Gurevitch, J. 2017. OpenMEE: Intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology. *Methods in Ecology and Evolution* 2017,8,941–947 doi: 10.1111/2041-210X.12708

Zamora, S; Marín, L; Sandoval, L; Nakase, C; Fernández, G; Sandoval, L. 2019. Wastewater Treatment by Constructed Wetland Eco-Technology: Influence of Mineral and Plastic Materials as Filter Media and Tropical Ornamental Plants. *Water*. 11, 2344; DOI:10.3390/w11112344www.

Zurita, F; De Andab, J; Belmontc, M. 2009. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* (35): 861–869.

Zurita, F; Castellanos, O; Rodríguez, A. 2011. El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. Núm. 1*. 139-150.

Zurita, F; Belmont, M; De Anda, J; White, J. 2011. Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science & Technology*. 63(4): 654 – 659.

Zurita, F y Carreón, A. 2015. Performance of three pilot-scale hybrid constructed wetlands for total coliforms and *Escherichia coli* removal from primary effluent – a 2-year study in a subtropical climate. *Journal of Water and Health*. 13(2): 446 – 458.

Zurita, F y White, J. 2014. Comparative study of three two-Stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing. *Water* 2014, 6, 213-228; DOI:10.3390/w6020213

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la selección de artículos para cada país

Tabla 19: Artículos seleccionados para cada país con las referencias correspondientes

País	Artículo seleccionado (Títulos se encuentran en Referencias Bibliográficas)
Argentina	Alasino <i>et al.</i> (2015), Cabred <i>et al.</i> (2019), Manzo <i>et al.</i> (2020), Mariñelarena <i>et al.</i> (2016)
Bolivia	Cordesius <i>et al.</i> (2019), Guarachi y Mamani (2018)
Brasil	Avelar <i>et al.</i> (2019), Bassani <i>et al.</i> (2021), Bastos <i>et al.</i> (2010), Bassani <i>et al.</i> (2021), Benvenuti <i>et al.</i> (2018), Calijuri <i>et al.</i> (2009), Campos <i>et al.</i> (2019), Carvalho <i>et al.</i> (2018), Chagas <i>et al.</i> (2011), Colares <i>et al.</i> (2013), Colares <i>et al.</i> (2019), Colares <i>et al.</i> (2021), Costa <i>et al.</i> (2013), Costa <i>et al.</i> (2015), Costa <i>et al.</i> (2018), Couto <i>et al.</i> (2013), Decezaro <i>et al.</i> (2018), Decezaro <i>et al.</i> (2019), Dell' Osbel <i>et al.</i> (2020), De Jesus <i>et al.</i> (2020), Dornelas <i>et al.</i> (2009), Dos Santos <i>et al.</i> (2013), Douglas <i>et al.</i> (2019), Eustáquio <i>et al.</i> (2012), Filho <i>et al.</i> (2018), Fortes <i>et al.</i> (2019), García y Von Sperling (2018), Godoni <i>et al.</i> (2014), Horn <i>et al.</i> (2014), Lana <i>et al.</i> (2013), Lima <i>et al.</i> (2018), Lobo <i>et al.</i> (2021), Lopes <i>et al.</i> (2021), Lutterbeck <i>et al.</i> (2017), Lutterbeck <i>et al.</i> (2018), Manjate <i>et al.</i> (2015), Marcelino <i>et al.</i> (2015), Martins <i>et al.</i> (2016), Matos <i>et al.</i> (2013), Matos <i>et al.</i> (2018), Mello <i>et al.</i> (2017), Oliveira <i>et al.</i> (2019), Pacheco <i>et al.</i> (2021), Paulo <i>et al.</i> (2009), Paulo <i>et al.</i> (2009), Paulo <i>et al.</i> (2013), Paulo <i>et al.</i> (2019), Pelissari <i>et al.</i> (2017), Pires <i>et al.</i> (2020), Prata <i>et al.</i> (2013), Rodrigues <i>et al.</i> (2021), Roth y de Carvalho (2021), Rouso <i>et al.</i> (2016), Sá Salomão <i>et al.</i> (2012), Sanchez <i>et al.</i> (2018), Santos <i>et al.</i> (2016), Sérvulo <i>et al.</i> (2019), Sezerino <i>et al.</i> (2012), Sezerino <i>et al.</i> (2018), Silva <i>et al.</i> (2015),

	Silva <i>et al.</i> (2021), Silveira <i>et al.</i> (2015), Silveira <i>et al.</i> (2017), Silveira <i>et al.</i> (2019a), Silveira <i>et al.</i> (2019b), Silveira <i>et al.</i> (2021), Souza <i>et al.</i> (2019a), Souza <i>et al.</i> (2019b), Trein <i>et al.</i> (2015), Trein <i>et al.</i> (2019a), Trein <i>et al.</i> (2019b), Ucker <i>et al.</i> (2012), Vasconcellos <i>et al.</i> (2019), Von Sperling <i>et al.</i> (2010), Von Sperling (2015)
Chile	Collins <i>et al.</i> (2021), Leiva <i>et al.</i> (2018), Leiva <i>et al.</i> (2019), López <i>et al.</i> (2014), López <i>et al.</i> (2015), López <i>et al.</i> (2016), López <i>et al.</i> (2019), Mancilla <i>et al.</i> (2013), Rojas y Vera (2013), Sepúlveda <i>et al.</i> (2017)
Colombia	Agudelo <i>et al.</i> (2010a), Agudelo <i>et al.</i> (2010b), Agudelo <i>et al.</i> (2011), Agudelo <i>et al.</i> (2012), Ascuntar <i>et al.</i> (2009), Bedoya <i>et al.</i> (2014), Bohórquez <i>et al.</i> (2016), Caselles-Osorio <i>et al.</i> (2010), Caselles-Osorio <i>et al.</i> (2011), Caselles-Osorio <i>et al.</i> (2014), Caselles-Osorio <i>et al.</i> (2017), Caselles-Osorio <i>et al.</i> (2018), Casierra <i>et al.</i> (2017), Carvajal <i>et al.</i> (2017), Charris y Caselles-Osorio (2014), Charris y Caselles-Osorio (2016), Charris <i>et al.</i> (2016a), Charris <i>et al.</i> (2016b), Cubillos <i>et al.</i> (2014), García <i>et al.</i> (2013), Llanos <i>et al.</i> (2019), Marín y Correa (2010), Montoya <i>et al.</i> (2010), Narváez <i>et al.</i> (2018), Palta <i>et al.</i> (2013), Paredes (2018), Paredes y Galeano (2018), Rios <i>et al.</i> (2017), Rodríguez y Vargas (2019), Silva (2016), Silva y Valverde (2011), Toro <i>et al.</i> (2017), Vizcaíno y Fuentes (2016)
Costa Rica	Alfaro <i>et al.</i> (2013), Pérez <i>et al.</i> (2019)
Cuba	Hernández <i>et al.</i> (2012), Pérez <i>et al.</i> (2012), Pérez <i>et al.</i> (2014)
Ecuador	García <i>et al.</i> (2019)
El Salvador	Katsenovich <i>et al.</i> (2009)
Guatemala	Cordón (2020), Miranda (2012)
Guyana	Molle <i>et al.</i> (2015)
Martinica	Lombard <i>et al.</i> (2018)
México	Barceló <i>et al.</i> (2014), De Anda <i>et al.</i> (2018), Del Toro <i>et al.</i> (2018), Fernández <i>et al.</i> (2020), Garzón <i>et al.</i> (2016), Hernández y Lagunes (2018), Jiménez <i>et al.</i> (2017), López <i>et al.</i> (2018), Martínez <i>et al.</i> (2016), Méndez <i>et al.</i> (2015), Navarro y Durán (2019), Ojeda <i>et al.</i> (2014), Pérez <i>et al.</i> (2013), Rivas <i>et al.</i> (2011), Romero <i>et al.</i> (2009),

	Solís <i>et al.</i> (2016), Starkl y Martínez (2010), Tejeda <i>et al.</i> (2021), Torres <i>et al.</i> (2017), Zamora <i>et al.</i> (2019), Zurita <i>et al.</i> (2009), Zurita <i>et al.</i> (2011), Zurita y Carreón (2015), Zurita y White (2014),
Paraguay	Cardozo <i>et al.</i> (2016), López <i>et al.</i> (2016)
Perú	Cruz y Nuñez (2018), Guevara <i>et al.</i> (2021), Gómez <i>et al.</i> (2018), León <i>et al.</i> (2018), León <i>et al.</i> (2021), Miglio <i>et al.</i> (2016), Sánchez <i>et al.</i> (2018)
Venezuela	Nuñez <i>et al.</i> (2011), Vera <i>et al.</i> (2010)

Anexo 2. Resultados del análisis y evaluación de calidad de las experiencias de humedales construidos en América Latina y el Caribe para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Tabla 20: Experiencias de humedales construidos analizadas en América Latina y el Caribe para el tratamiento de aguas residuales domésticas

N°	Etiqueta	País	Estado/ Departamento	Escala	Área (m ²)	Tipo HC	Periodo	Catego ría
1	Cabred et al (2019)_P1	Argentina	Buenos aires	Pil	N.D.	HC-FSS-V	4 meses	C1
2	Cabred et al (2019)_P2	Argentina	Buenos aires	Pil	N.D.	HC-FSS-V	4 meses	C1
3	Manzo et al (2020)WT2	Argentina	Chubut	Real	N.D.	HC-FSS-H	11 meses	C1
4	Alasino et al (2015)	Argentina	Córdoba	Real	10	HC-FSS-H	9 meses	C1
5	Mariñelarena (2016)_FSS	Argentina	Buenos aires	Real	15	HC-FSS-V	1 año y 4 meses	C1
6	Mariñelarena (2016)_FS	Argentina	Buenos aires	Real	15	HC-FSS-V	1 año y 4 meses	C1
7	Cordesius et al (2019) PTAR	Bolivia	Cochabamba	Real	17.5	HC-FSS-H	6 meses	C1
8	Cordesius et al (2019)Müsch	Bolivia	Cochabamba	Real		HC-FSS-H	N.D.	-
9	Guarachi y Mamani (2018) A	Bolivia	La Paz	Pil	75	HC-FSS-H	N.D.	-
10	Guarachi y Mamani (2018) B	Bolivia	La Paz	Pil	75	HC-FSS-H	N.D.	-
11	Douglas et al (2018) TCW	Brasil	Mato Grosso	Pil	1.56	HC-FSS-H	5 meses	C1
12	Douglas et al (2018) HCW	Brasil	Mato Grosso	Pil	1.56	HC-FSS-H	5 meses	C1
13	Douglas et al (2018) PCW	Brasil	Mato Grosso	Pil	1.56	HC-FSS-H	5 meses	C1
14	Campos y Teixeira (2018) LCA1	Brasil	Sao Paulo	Pil	4.40	HC-FSS-H	2 meses	C1
15	Campos y Teixeira (2018) LCA2	Brasil	Sao Paulo	Pil	4.6	HC-FSS-H	2 meses	C1
16	Avelar et al (2019) 1C	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
17	Avelar et al (2019) 2C	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
18	Avelar et al (2019) 3C	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
19	Avelar et al (2019) 4C	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
20	Costa et al (2018)	Brasil	Minas Gerais	Real	72.3	HC-FSS-H	4 años	C3
21	Trein et al (2015) S1	Brasil	Santa Catarina	Real	189	HC-FSS-V	20 meses	C3
22	Trein et al (2015) S2	Brasil	Santa Catarina	Real	3141	HC-FSS-V	20 meses	C3
23	Silveira et al (2019a)	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.506	HC-FSS-V	1 año	C3
24	Ucker et al (2012) VH1	Brasil	Goiás	Pil	1.45	HC-FSS-V	6 meses	C3

25	Ucker et al (2012) VH2	Brasil	Goiás	Pil	1.45	HC-FSS-V	6 meses	C3
26	Chagas et al (2011) SAC 1	Brasil	Mato Grosso	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
27	Chagas et al (2011) SAC 2	Brasil	Mato Grosso	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
28	Chagas et al (2011) SAC 3	Brasil	Mato Grosso	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
29	Chagas et al (2011) SAC 4	Brasil	Mato Grosso	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
30	Calijuri et al (2009) W1-4_F1	Brasil	Mato Grosso	Pil	N.D.	HC-FS	10 meses	C1
31	Calijuri et al (2009) W2-3_F1	Brasil	Mato Grosso	Pil	N.D.	HC-FSS-H	10 meses	C1
32	Calijuri et al (2009) W1-4_F2	Brasil	Mato Grosso	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
33	Calijuri et al (2009) W2-3_F2	Brasil	Mato Grosso	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
34	Matos et al (2018)	Brasil	Minas Gerais	Real	75	HC-FSS-H	8 años	C1
35	Silveira et al (2019b)	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.506	HC-I	6 meses	C2
36	Prata et al (2013) SAC 1	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
37	Prata et al (2013) SAC 2	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
38	Prata et al (2013) SAC 3	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
39	Prata et al (2013) SAC 4	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	N.D.	-
40	Colares y Sandri (2013) L1	Brasil	Goiás	Real	12	HC-FSS-H	20 días	C1
41	Colares y Sandri (2013) L2	Brasil	Goiás	Real	12	HC-FSS-H	20 días	C1
42	Colares y Sandri (2013) L3	Brasil	Goiás	Real	12	HC-FSS-H	20 días	C1
43	De Matos (2013) SAC1	Brasil	Mato Grosso	Pil	24	HC-FSS-H	3 meses	C1
44	De Matos (2013) SAC2	Brasil	Mato Grosso	Pil	24	HC-FSS-H	3 meses	C1
45	De Matos (2013) SAC3	Brasil	Mato Grosso	Pil	24	HC-FSS-H	3 meses	C1
46	De Matos (2013) SAC4	Brasil	Mato Grosso	Pil	24	HC-FSS-H	3 meses	C1
47	Benvenuti et al (2018)	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	289	HC-FI	1 año	C3
48	Decezaró et al (2019) P1	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	24.5	HC-FSS-V	6 meses	C1
49	Decezaró et al (2019) P2	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	24.5	HC-FSS-V	6 meses	C1
50	Decezaró et al (2019) P3	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	24.5	HC-FSS-V	6 meses	C1
51	Silveira et al (2015) CW1	Brasil	Santa Catarina	Real	N.D.	HC-Fr	1 año	C3
52	Silveira et al (2015) CW2	Brasil	Santa Catarina	Real	N.D.	HC-Fr	1 año y 1 mes	C3
53	Lutterbeck et al (2018)	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	5.00	HC-FSS-H	N.D.	-
54	Paulo et al (2013)	Brasil	Mato Grosso	Real	6.91	HC-H	1 año y 1 mes	C1
55	Eustaquio et al (2012) HC1	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
56	Eustaquio et al (2012) HC2	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
57	Eustaquio et al (2012) HC3	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1

58	Eustaquio et al (2012) HC4	Brasil	Minas Gerais	Real	24	HC-FSS-H	2 meses	C1
59	Souza et al (2019) Td	Brasil	Paraná	Pil	N.D.	HC-FSS-H	4 meses	C1
60	Souza et al (2019) Pv	Brasil	Paraná	Pil	N.D.	HC-FSS-H	4 meses	C1
61	De Jesus et al (2019)	Brasil	Minas Gerais	Pil	4	HC-FSS-H	5 meses	C1
62	De Jesus et al (2019)	Brasil	Minas Gerais	Pil	4	HC-FSS-H	5 meses	C1
63	Dell Osbel et al (2020) FI	Brasil	Rio Grande del Sur	Pil	N.D.	HC-FI	1 año	C3
64	Dell Osbel et al (2020) V	Brasil	Rio Grande del Sur	Pil	N.D.	HC-FSS-V	1 año	C3
65	Dell Osbel et al (2020) H	Brasil	Rio Grande del Sur	Pil	N.D.	HC-FSS-H	1 año	C3
66	Marcelino et al (2020) CWL	Brasil	Paraná	Meso	0.2	HC-FSS-V	6 meses	C2
67	Marcelino et al (2020) CWLP	Brasil	Paraná	Meso	0.2	HC-FSS-V	6 meses	C2
68	Marcelino et al (2020) CWB	Brasil	Paraná	Meso	0.2	HC-FSS-V	6 meses	C2
69	Pires et al (2020) CW1	Brasil	Sao Paulo	Meso	0.20	HC-FSS-H	9 meses	C1
70	Pires et al (2020) CW2	Brasil	Sao Paulo	Meso	0.20	HC-I	9 meses	C1
71	Trein et al (2019)	Brasil	Minas Gerais	Real	29.4	HC-Fr	1 año y 3 meses	C1
72	Colares et al (2019)	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.51	HC-H	11 meses	C1
73	Vasconcellos et al (2019)	Brasil	Minas Gerais	Real	75	HC-FSS-H	10 años	C3
74	Souza et al (2019)	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.51	HC-FSS-V	9 meses	C1
75	Silveira et al (2019) HC	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.56	HC-FSS-V	12 meses	C1
76	Mello et al (2017) HC1	Brasil	Paraná	Meso	0.52	HC-FSS-H	N.D.	-
77	Mello et al (2017) HC2	Brasil	Paraná	Meso	0.52	HC-FI	N.D.	-
78	Campos y Teixeira (2019) 1	Brasil	Sao Paulo	Pil	4.4	HC-FSS-H	49 días	C1
79	Campos y Teixeira (2019) 2	Brasil	Sao Paulo	Pil	4.6	HC-FSS-H	41 días	C1
80	Sérvulo et al (2019) SZR1	Brasil	Goiás	Real	7.5	HC-FSS-H	4 días	C1
81	Sérvulo et al (2019) SZR2	Brasil	Goiás	Real	7.5	HC-FSS-H	4 días	C1
82	Sérvulo et al (2019) SZR3	Brasil	Goiás	Real	7.5	HC-FSS-H	4 días	C1
83	Fortes et al (2019)	Brasil	Sao Paulo	Real	7.07	HC-FSS-H	11 meses	C2
84	Decezaró et al (2018)	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	24.5	HC-FSS-V	5 meses	C1
85	Sanchez et al (2018) T1	Brasil	Sao Paulo	Pil	2.4	HC-FSS-H	40 días	C1
86	Sanchez et al (2018) T2	Brasil	Sao Paulo	Pil	2.4	HC-FSS-H	40 días	C1
87	Sanchez et al (2018) T3	Brasil	Sao Paulo	Pil	2.4	HC-FSS-H	40 días	C1
88	Lima et al (2018) CWG-P	Brasil	Paraná	Meso	0.2	HC-FSS-H	7 meses	C2
89	Lima et al (2018) CWC-P	Brasil	Paraná	Meso	0.2	HC-FSS-H	7 meses	C2
90	Lima et al (2018) CWB-P	Brasil	Paraná	Meso	0.2	HC-FSS-H	7 meses	C2

91	Carvalho et al (2018)	Brasil	Paraná	Meso	1	HC-FSS-V	8 meses	C2
92	Dos Santos et al (2013) 1	Brasil	Paraná	Pil	1.82	HC-FSS-H	5 meses	C1
93	Dos Santos et al (2013) 2	Brasil	Paraná	Pil	2.82	HC-FSS-H	5 meses	C1
94	Goldoni et al (2014)	Brasil	Rio Grande del Sur	Pil	289	HC-FI	1 día	C1
95	Oliveira, M et al (2019)	Brasil	Mato Grosso	Pil	N.D.	HC-H	N.D.	-
96	Von Sperling et al (2010)	Brasil	Minas Gerais	Pil	72.3	HC-FSS-H	1 año	C3
97	Von Sperling et al (2015)	Brasil	Minas Gerais	Pil	72.3	HC-FSS-H	4 años	C3
98	Von Sperling et al (2015)	Brasil	Minas Gerais	Pil	28.83	HC-FSS-V	10 meses	C2
99	García (2018) F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-Fr	2 años y 4 meses	C3
100	García (2018) F2	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-Fr	1 año y 11 meses	C3
101	Silveira et al (2017) HC+MA	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.506	HC-FSS-V	1 año	C1
102	Silveira et al (2017) HC	Brasil	Rio Grande del Sur	Meso	0.506	HC-FSS-V	1 año	C1
103	Lutterbeck et al (2017)	Brasil	Rio Grande del Sur	Real	5	HC-FSS-H	N.D.	-
104	Pelissari et al (2017)	Brasil	Santa Catarina	Real	3144	HC-FSS-V	1 año	C3
105	Silva et al (2015) S1	Brasil	Goiás	Meso	0.26	HC-FSS-V	10 meses	C1
106	Silva et al (2015) S2	Brasil	Goiás	Meso	0.26	HC-FSS-V	10 meses	C1
107	Silva et al (2015) S3	Brasil	Goiás	Meso	0.26	HC-FSS-V	10 meses	C1
108	Manjate et al (2015)	Brasil	Minas Gerais	Pil	87.3	HC-Fr	9 meses	C2
109	Manjate et al (2015)	Brasil	Minas Gerais	Pil	87.3	HC-Fr	9 meses	C2
110	Costa et al (2015)	Brasil	Minas Gerais	Pil	72.3	HC-FSS-H	1 año y 10 meses	C3
111	Dornelas et al (2009)	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-FSS-H	10 meses	C2
112	Lana et al (2013) F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	28.83	HC-FSS-V	1 año y 9 meses	C3
113	Lana et al (2013) F2	Brasil	Minas Gerais	Pil	28.83	HC-FSS-V	7 meses	C2
114	Paulo et al (2009)	Brasil	Mato Grosso	Pil	14.52	HC-H	N.D.	-
115	Da Costa et al (2013)	Brasil	Minas Gerais	Pil	72.3	HC-FSS-H	2 años	C3
116	Do Couto et al (2013)	Brasil	Minas Gerais	Pil	16	HC-FSS-H	N.D.	-
117	Sezerino et al (2012) H	Brasil	Santa Catarina	Real	10	HC-FSS-H	5 años	C1
118	Sezerino et al (2012) V	Brasil	Santa Catarina	Pil	2.57	HC-FSS-V	1 año	C2
119	Bastos et al (2012)_CW1-F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	24	HC-FSS-H	6 meses	C1
120	Bastos et al (2012)_CW2-F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
121	Bastos et al (2012)_CW3-F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	14.62	HC-FSS-H	6 meses	C1
122	Bastos et al (2012)_CW4-F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
123	Bastos et al (2012)_CW5-F1	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
124	Bastos et al (2012)_CW1-F2	Brasil	Minas Gerais	Pil	24	HC-FSS-H	10 meses	C1
125	Bastos et al (2012) CW2-F2	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-FSS-H	10 meses	C1
126	Bastos et al (2012) CW3-F2	Brasil	Minas Gerais	Pil	14.62	HC-FSS-H	10 meses	C1
127	Bastos et al (2012) CW4-F2	Brasil	Minas Gerais	Pil	N.D.	HC-FSS-H	10 meses	C1
128	Rouso et al (2016) V	Brasil	Santa Catarina	Real	23.6	HC-FSS-V	7 meses	C2

129	Roussou et al (2016) H	Brasil	Santa Catarina	Real	23.6	HC-FSS-H	7 meses	C2
130	Santos et al (2016)	Brasil	Santa Catarina	Pil	7.3	HC-FSS-V	6 meses	C2
131	Martins et al (2016)	Brasil	Sao Paulo	Meso	0.2178	HC-FSS-H	6 meses	C1
132	Sa Salomao et al (2012) FS	Brasil	Río de Janeiro	Pil	2.06	HC-FS	11 meses	C2
133	Sa Salomao et al (2012) V	Brasil	Río de Janeiro	Pil	2.06	HC-FSS-V	11 meses	C2
134	Sa Salomao et al (2012) H	Brasil	Río de Janeiro	Pil	2.06	HC-FSS-H	11 meses	C2
135	Filho (2018) CevacT	Brasil	-	Meso	0.3	HC-FSS-H	4.5 meses	C1
136	Siliveira et al (2021)	Brasil	Río Grande del Sur	Pil	N.D.	HC-FSS-V	N.D.	-
137	Silva et al (2021) E1	Brasil	Santa Catarina	Pil	N.D.	HC-FSS-H	21 meses	C1
138	Silva et al (2021) E2	Brasil	Santa Catarina	Pil	N.D.	HC-FSS-H	28 meses	C1
139	Bassani et al (2021)	Brasil	Santa Catarina	Pil	7.5	HC-FSS-V	4 meses	C1
140	Rodrigues et al (2021)	Brasil	Santa Catarina	Pil	3.08	HC-FSS-V	3 días	C1
141	Lobo et al (2021)	Brasil	Ceara	Pil	N.D.	HC-FSS-V	2 días	C1
142	Pacheco et al (2021) F1	Brasil	Paraná	Meso	0.515	HC-FSS-V	N.D.	-
143	Pacheco et al (2021) F2	Brasil	Paraná	Meso	0.515	HC-FSS-V	N.D.	-
144	Colares et al (2021)	Brasil	Río Grande del Sur	Meso	N.D.	HC-I	1 año	C1
145	Lopes et al (2021) CW1	Brasil	Paraná	Meso	0.26	HC-FSS-V	2 meses	C1
146	Lopes et al (2021) CW2	Brasil	Paraná	Meso	0.26	HC-FSS-V	N.D.	-
147	Lopes et al (2021) CW3	Brasil	Paraná	Meso	0.26	HC-FSS-V	N.D.	-
148	Roth y Carvalho (2021) E1	Brasil	Paraná	Meso	0.515	HC-FSS-V	N.D.	-
149	Roth y Carvalho (2021) E2	Brasil	Paraná	Meso	0.515	HC-FSS-V	N.D.	-
150	Pelissari et al (2018)	Brasil	Santa Catarina	Pil	7.5	HC-FSS-V	1 año y 1 mes	C1
151	Sezerino et al (2018) Cf1	Brasil	Santa Catarina	Pil	23.5	HC-H	2 años y 5 meses	C1
152	Sezerino et al (2018) Cf2	Brasil	Santa Catarina	Pil	24.5	HC-H		-
153	Diniz et al (2018) C1	Brasil	Mato Grosso	Meso		HC-FSS-V	3 meses	C1
154	Diniz et al (2018) C2	Brasil	Mato Grosso	Meso		HC-FSS-V	3 meses	C1
155	Rojas et al (2013) Ph	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	6 meses	C3
156	Rojas et al (2013) Sc	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	6 meses	C3
157	López et al (2015) Ph	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	1 año	C3
158	López et al (2015) Sc	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	1 año	C3
159	López et al (2016) Ph	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	3 años	C1
160	López et al (2016) Sc	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	3 años	C1
161	Sepúlveda et al (2017) Sc	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	2 años y 6 meses	C1
162	Sepúlveda et al (2017) Ph	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	2 años y 6 meses	C1
163	López et al (2019) Ph_Cold	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	3.7 años	C3
164	López et al (2019) Sc_Cold	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	3.7 años	C3
165	Leiva et al (2018) Cyp/Zant	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	2 años	C3
166	Leiva et al (2018) Cyp	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	2 años	C3
167	Leiva et al (2019)_Cl	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	N.D.	-
168	Leiva et al (2019)_UV	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	N.D.	-

169	Mancilla et al (2013) TyNM	Chile	Valparaíso	Pil	2	HC-FS	9 meses y medio	C1
170	Mancilla et al (2013) TyGF	Chile	Valparaíso	Pil	2	HC-FSS-H	9 meses y medio	C1
171	Mancilla et al (2013) TyG	Chile	Valparaíso	Pil	2	HC-FSS-H	9 meses y medio	C1
172	Mancilla et al (2013) Sci_NM	Chile	Valparaíso	Pil	2	HC-FS	9 meses y medio	C1
173	Mancilla et al (2013) Sci_GF	Chile	Valparaíso	Pil	2	HC-FSS-H	9 meses y medio	C1
174	Mancilla et al (2013) Sci_G	Chile	Valparaíso	Pil	2	HC-FSS-H	9 meses y medio	C1
175	López et al (2014) Pa	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	1 año	C1
176	López et al (2014) Sc	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	1 año	C1
177	Collins et al (2021) Ph	Chile	Biobío	Pil	4.5	HC-FSS-H	8 años	C1
178	Collins et al (2021) SC	Chile	Biobío	Pil	5.5	HC-FSS-H	8 años	C1
179	Charris y Caselles (2016) Cl	Colombia	Atlántico	Meso	0.6	HC-FSS-H	4 meses	C1
180	Charris y Caselles (2016) Ec	Colombia	Atlántico	Meso	0.6	HC-FSS-H	4 meses	C1
181	Silva (2016) Cp	Colombia	Valle del Cauca	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
182	Silva (2016) H	Colombia	Valle del Cauca	Pil	N.D.	HC-FSS-H	6 meses	C1
183	Casierra et al (2016)	Colombia	Atlántico	Meso	0.61	HC-FSS-H	6 meses	C2
184	Vizcaíno & Fuentes (2016)	Colombia	La Guajira	Meso	0.54	HC-FSS-H	1.5 meses	C1
185	Palta y Morales (2013) PP	Colombia	Cauca	Pil	3	HC-FSS-H	6 meses	C2
186	Palta y Morales (2013) PE	Colombia	Cauca	Pil	3	HC-FSS-H	6 meses	C2
187	Palta y Morales (2013) PG	Colombia	Cauca	Pil	3	HC-FSS-H	6 meses	C2
188	Silva y Valverde (2011) H	Colombia	Cauca	Real	28.5	HC-FSS-H	1 semana	C1
189	Silva y Valverde (2011) P	Colombia	Cauca	Real	28.5	HC-FSS-H	8 días	C1
190	Montoya et al (2010) A	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	3 meses	C1
191	Montoya et al (2010) B	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	3 meses	C1
192	Montoya et al (2010) C	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	3 meses	C1
193	Agudelo et al (2010) A-B-C	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	4 meses	C1
194	Agudelo et al (2010) D-E-F	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FS	4 meses	C1
195	Caselles et al (2018) 5cl	Colombia	Magdalena	Real	5	HC-FSS-H	8 meses	C1
196	Caselles et al (2018) 1cl	Colombia	Magdalena	Real	1.8	HC-FS	8 meses	C2
197	Bedoya et al (2014) Tl	Colombia	Antioquia	Meso	0.66	HC-FSS-H	3 meses	C1
198	Bedoya et al (2014) Cp	Colombia	Antioquia	Meso	0.66	HC-FSS-H	3 meses	C1
199	Caselles et al (2010) 6cl	Colombia	Magdalena	Real	6.8	HC-H	5 meses	C1
200	Caselles et al (2011) A	Colombia	Atlántico	Meso	0.66	HC-FSS-H	6 meses	C2
201	Caselles et al (2011) B	Colombia	Atlántico	Meso	0.66	HC-FSS-H	6 meses	C2
202	Ascuntar et al (2009)	Colombia	Valle del Cauca	Pil	27	HC-FSS-H	5 meses	C1
203	Caselles et al (2017)	Colombia	Atlántico	Meso	0.66	HC-FSS-H	4 meses	C1
204	García et al (2013) HV	Colombia	Risaralda	Meso	0.24	HC-FSS-V	N.D.	-
205	García et al (2013) HH	Colombia	Risaralda	Meso	0.24	HC-H	N.D.	-
206	García et al (2013) Hho	Colombia	Risaralda	Meso	0.24	HC-FSS-H	N.D.	-
207	Llanos et al (2019) Thalia	Colombia	Atlántico	Meso	0.564	HC-FSS-H	6 meses	C3
208	Llanos et al (2019) Cyperus	Colombia	Atlántico	Meso	0.564	HC-FSS-H	6 meses	C3
209	Casierra et al (2017) C	Colombia	Atlántico	Meso	0.66	HC-FSS-H	4 meses	C1
210	Casierra et al (2017) E	Colombia	Atlántico	Meso	0.66	HC-FSS-H	4 meses	C1
211	Agudelo et al (2011) A-C	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	-	-
212	Agudelo et al (2011) B-D	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	-	-
213	Toro et al (2017) He	Colombia	Valle del Cauca	Pil	27	HC-FSS-H	7 semanas	C1

214	Toro et al (2017) Ph	Colombia	Valle del Cauca	Pil	27	HC-FSS-H	7 semanas	C1
215	Agudelo et al (2010) A.B.C.D	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	6 meses	C1
216	Bohórquez et al (2016) Ar20	Colombia	Risaralda	Pil	1.09	HC-FSS-V	9 meses	C3
217	Bohórquez et al (2016) Ar10	Colombia	Risaralda	Pil	1.09	HC-FSS-V	9 meses	C3
218	Bohórquez et al (2016) Gr20	Colombia	Risaralda	Pil	1.09	HC-FSS-V	9 meses	C3
219	Bohórquez et al (2016) Gr10	Colombia	Risaralda	Pil	1.09	HC-FSS-V	9 meses	C3
220	Agudelo et al (2012)	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	4 meses	C1
221	Agudelo et al (2012)	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FS	4 meses	C1
222	Carvajal et al (2017)	Colombia	Casanare	Meso	0.58	HC-FSS-H	5 meses	C1
223	Carvajal et al (2017)	Colombia	Casanare	Meso	0.58	HC-FSS-H	5 meses	C1
224	Marin y Correa (2010) H1-Ar	Colombia	Risaralda	Pil	4.75	HC-FSS-H	5 meses	C1
225	Marin y Correa (2010) H2-Gr	Colombia	Risaralda	Pil	4.75	HC-FSS-H	5 meses	C1
226	Rodriguez y Vargas (2019) 1	Colombia	Meta	Meso	0.46	HC-FSS-H	9 semanas	C1
227	Rodriguez y Vargas (2019) 2	Colombia	Meta	Meso	0.46	HC-FSS-H	9 semanas	C1
228	Rios et al (2017) A	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	1 mes	C1
229	Rios et al (2017) B	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	1 mes	C1
230	Rios et al (2017) C	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	3 meses	C1
231	Rios et al (2017) D	Colombia	Antioquia	Meso	0.6	HC-FSS-H	3 meses	C1
232	Charris et al (2016) ACI	Colombia	Atlántico	Meso	1	HC-FSS-H	4 meses	C1
233	Charris et al (2016) AEc	Colombia	Atlántico	Meso	1	HC-FSS-H	4 meses	C1
234	Charris et al (2016) BEm	Colombia	Atlántico	Meso	1	HC-FSS-H	4 meses	C1
235	Charris et al 2016 (b)Ea	Colombia	Atlántico	Meso	1	HC-FSS-H	4 meses	C1
236	Charris et al 2016 (b)_Ca	Colombia	Atlántico	Meso	1	HC-FSS-H	4 meses	C1
237	Charris et al 2016 (b)_Cl	Colombia	Atlántico	Meso	1	HC-FSS-H	4 meses	C1
238	Paredes (2018) S1	Colombia	Risaralda	Real	260	HC-H	2 meses	C1
239	Paredes (2018) S2	Colombia	Risaralda	Real	260	HC-H	2 meses	C1
240	Paredes y Galeno (2018) 1/3	Colombia	Risaralda	Meso	0.24	HC-I	2 meses	C1
241	Paredes y Galeno (2018) 2/3	Colombia	Risaralda	Meso	0.24	HC-I	2 meses	C1
242	Narváez et al (2018) Tg	Colombia	Atlántico	Meso	0.564	HC-FSS-H	4 meses	C1
243	Narváez et al (2018) Ca	Colombia	Atlántico	Meso	0.564	HC-FSS-H	4 meses	C1
244	Cubillos et al (2014) F1	Colombia	Risaralda	Pil	4.77	HC-FSS-H	1 mes y medio	C1
245	Cubillos et al (2014) F2	Colombia	Risaralda	Pil	4.77	HC-FSS-H	1 mes y medio	C1
246	Caselles et al (2014) Zm	Colombia	Magdalena	Real	18.7	HC-FSS-H	3 meses	C1
247	Caselles et al (2014) Si	Colombia	Magdalena	Real	18.7	HC-FSS-H	3 meses	C1
248	Charris y Caselles (2014) Cl	Colombia	Atlántico	Meso	0.6	HC-FSS-H	4 meses	C1
249	Charris y Caselles (2014) Ec	Colombia	Atlántico	Meso	0.6	HC-FSS-H	4 meses	C1
250	García 2019-2020_Pa	Ecuador	Azuay	Pil	3	HC-FSS-V	3 meses	C1
251	García 2019-2020_Cp	Ecuador	Azuay	Pil	3	HC-FSS-V	3 meses	C1
252	Molle et al (2015) sin	Guyana Francesa	-	Pil	312	HC-Fr	1 año	C1

253	Molle et al (2015) A	Guyana Francesa	-	Pil	312	HC-Fr	1 año	C1
254	Molle et al (2015) B	Guyana Francesa	-	Pil	312	HC-Fr	1 año	C1
255	Cardozo et al (2016)	Paraguay	Asunción	Real	25	HC-FI	3 meses	C1
256	López et al (2016) Cp	Paraguay	Central	Pil	N.D.	HC-FSS-H	3 meses	C1
257	López et al (2016) Td	Paraguay	Central	Pil	N.D.	HC-FSS-H	3 meses	C1
258	León et al (2021) F1	Perú	Lima	Pil	51	HC-Fr	6 - 12 semanas	C1
259	León et al (2021) F2	Perú	Lima	Pil	51	HC-Fr	6 - 12 semanas	C1
260	León et al (2021) F3	Perú	Lima	Pil	51	HC-Fr	6 - 12 semanas	C1
261	León et al (2021) F4	Perú	Lima	Pil	51	HC-Fr	6 - 12 semanas	C1
262	Guevara et al (2021)	Perú	Lima	Pil	33	HC-Fr	6 meses	C1
263	Cruz y Núñez (2018)	Perú	Cajamarca	Real	0.72	HC-FSS-H	3 meses	C1
264	Gómez et al (2018) Cz	Perú	Lima	Pil	15	HC-FSS-V	2 meses	C1
265	Gómez et al (2018) Ca	Perú	Lima	Pil	15	HC-FSS-V	3 meses	C1
266	León et al (2018) C1	Perú	Lima	Pil	66	HC-Fr	6 meses	C1
267	León et al (2018) C2	Perú	Lima	Pil	66	HC-Fr	6 meses	C1
268	Miglio et al (2016)	Perú	Lima	Real	50	HC-FSS-V	2 meses	C1
269	Núñez et al (2011) ARST	Venezuela	Maracaibo	Meso	0.20	HC-FS	6 meses	C2
270	Núñez et al (2011) ARSL	Venezuela	Maracaibo	Meso	0.20	HC-FS	6 meses	C2
271	Núñez et al (2011) ARSTL	Venezuela	Maracaibo	Meso	0.20	HC-FS	6 meses	C2
272	Vera et al (2010) 1	Venezuela	Maracaibo	Pil	22.5	HC-FS	3 meses	C1
273	Vera et al (2010) 2	Venezuela	Maracaibo	Pil	22.5	HC-FS	3 meses	C1
274	Katsenovich et al (2009) A1	El Salvador	San Juan Opico	Real	133.2	HC-FSS-H	11 meses	C2
275	Katsenovich et al (2009) B1	El Salvador	San Juan Opico	Real	133.2	HC-FSS-H	11 meses	C2
276	Katsenovich et al (2009) C1	El Salvador	San Juan Opico	Real	133.2	HC-FSS-H	11 meses	C2
277	Katsenovich et al (2009) A2	El Salvador	San Juan Opico	Real	733.3	HC-FS	11 meses	C2
278	Katsenovich et al (2009) B2	El Salvador	San Juan Opico	Real	733.3	HC-FS	11 meses	C2
279	Katsenovich et al (2009) C2	El Salvador	San Juan Opico	Real	733.3	HC-FS	11 meses	C2
280	Perez et al (2019) S1	Costa Rica	Puntarenas	Real	12	HC-FSS-H	5 años	C1
281	Pérez et al (2019) S2	Costa Rica	Puntarenas	Real	24	HC-FSS-H	5 años	C1
282	Pérez et al (2019) S3	Costa Rica	Puntarenas	Real	24	HC-FSS-H	5 años	C1
283	Pérez et al (2019) S4	Costa Rica	Puntarenas	Real	24	HC-FSS-H	5 años	C1
284	Alfaro (2013)	Costa Rica	Heredia	Real	20	HC-FSS-H	5 meses	C1
285	Cordón (2020)	Guatemala	Petén	Pil	15	HC-FSS-H	3 meses	C1
286	Miranda (2012)	Guatemala	Guatemala	Real	12.02	HC-FSS-H	8 meses	C2
287	Torres et al (2017) S1_H	México	Jalisco	Meso	0.48	HC-FSS-H	1 año	C3
288	Torres et al (2017) S2_H	México	Jalisco	Meso	0.48	HC-FSS-H	1 año	C3

289	Torres et al (2017) S2_V	México	Jalisco	Meso	0.23	HC-FSS-V	9 meses	C3
290	Torres et al (2017) S3_V	México	Jalisco	Meso	0.23	HC-FSS-V	1 año	C3
291	Torres et al (2017) S3_H	México	Jalisco	Meso	0.48	HC-FSS-H	1 año	C3
292	Navarro y Durán (2019) G	México	Ciudad de México	Pil	N.D.	HC-FSS-H	N.D.	-
293	Navarro y Durán (2019) G	México	Ciudad de México	Pil	N.D.	HC-FSS-H	N.D.	-
294	Navarro y Durán (2019) B	México	Ciudad de México	Pil	N.D.	HC-FSS-V	N.D.	-
295	Navarro y Durán (2019) L1	México	Ciudad de México	Pil	N.D.	HC-H	N.D.	-
296	Navarro y Durán (2019) L2	México	Ciudad de México	Pil	N.D.	HC-H	N.D.	-
297	Romero et al (2009)	México	Morelos	Meso	0.48	HC-FSS-H	10 días	C1
298	Garzón et al (2016)	México	Morelos	Pil	4.2	HC-FSS-H	1 mes	C1
299	Solis et al (2016) HAFL-T	México	Tabasco	Pil	3	HC-FS	3 meses	C1
300	Solis et al (2016) HAFL-E	México	Tabasco	Pil	3	HC-FS	3 meses	C1
301	Solis et al (2016) HAFS_C	México	Tabasco	Pil	3	HC-FSS-H	3 meses	C1
302	Solis et al (2016) HAFS_P	México	Tabasco	Pil	3	HC-FSS-H	3 meses	C1
303	Zurita et al (2009) H_ZA	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-H	9 meses	C2
304	Zurita et al (2009) H_3sp	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-H	9 meses	C2
305	Zurita et al (2009)_V_ZA	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-V	9 meses	C2
306	Zurita et al (2009)_V_3sp	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-V	9 meses	C2
307	Fernandez et al (2020)	México	Jalisco	Real	336	HC-FSS-H	3 meses	C1
308	Zamora et al (2019) C.ind_A	México	Veracruz	Meso	0.495	HC-FSS-H	6 meses	C2
309	Zamora et al (2019) C.ind_B	México	Veracruz	Meso	0.495	HC-FSS-H	6 meses	C2
310	Zamora et al (2019) C.pap_A	México	Veracruz	Meso	0.495	HC-FSS-H	6 meses	C2
311	Zamora et al (2019) C.pap_B	México	Veracruz	Meso	0.495	HC-FSS-H	6 meses	C2
312	Zamora et al (2019) H.coro_A	México	Veracruz	Meso	0.495	HC-FSS-H	6 meses	C2
313	Zamora et al (2019) H.coro_B	México	Veracruz	Meso	0.495	HC-FSS-H	6 meses	C2
314	Hernández et al (2018)	México	Veracruz	Pil	20	HC-FSS-H	5 meses	C1
315	De Anda et al (2018)	México	Jalisco	Real	336	HC-FSS-H	1 año	C1
316	Jimenez et al (2017) C1	México	Tabasco	Pil	3	HC-FSS-H	7 días	C1
317	Jimenez et al (2017) C1	México	Tabasco	Pil	3	HC-FS	7 días	C1
318	Jimenez et al (2017) C2	México	Tabasco	Pil	3	HC-FS	7 días	C1
319	Jimenez et al (2017) C2	México	Tabasco	Pil	3	HC-FSS-H	7 días	C1
320	Zurita et al (2015) SI	México	Jalisco	Meso	0.48	HC-FSS-H	1 año y 8 meses	C3
321	Zurita et al (2015) SII_H	México	Jalisco	Meso	0.71	HC-FSS-H	1 año y 8 meses	C3
322	Zurita et al (2015) SII_V	México	Jalisco	Meso	0.71	HC-FSS-V	1 año y 8 meses	C3
323	Zurita et al (2015) SIII_V	México	Jalisco	Meso	0.71	HC-FSS-V	1 año y 8 meses	C3
324	Zurita et al (2015) SIII_H	México	Jalisco	Meso	0.71	HC-FSS-H	1 año y 8 meses	C3

325	Méndez et al (2015)Hs	México	Chiapas	Pil	27.5	HC-FSS-H	4 meses	C1
326	Méndez et al (2015)Hp	México	Chiapas	Pil	27.5	HC-FSS-H	4 meses	C1
327	Méndez et al (2015)Ap	México	Chiapas	Pil	27.5	HC-FSS-H	4 meses	C1
328	Méndez et al (2015)Td	México	Chiapas	Pil	27.5	HC-FSS-H	4 meses	C1
329	Zurita et al (2011) cel1	México	Jalisco	Meso	0.248	HC-FSS-H	6 meses	C1
330	Zurita et al (2011) cel2	México	Jalisco	Meso	0.248	HC-FSS-H	6 meses	C1
331	Zurita et al (2011) cel3	México	Jalisco	Meso	0.248	HC-FSS-H	6 meses	C1
332	Zurita et al (2011) cel4	México	Jalisco	Meso	0.248	HC-FSS-H	6 meses	C1
333	Zurita et al (2011) cel5	México	Jalisco	Meso	0.248	HC-FSS-H	6 meses	C1
334	Zurita et al (2011) B	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-H	9 meses	C1
335	Zurita et al (2011) C	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-H	9 meses	C1
336	Zurita et al (2011) D	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-V	9 meses	C1
337	Zurita et al (2011) E	México	Jalisco	Pil	3.24	HC-FSS-V	9 meses	C1
338	López et al (2018)	México	Tabasco	Pil	3	HC-FSS-H	7 días	C1
339	Barceló et al (2014)	México	Ciudad de México	Pil	31.59	HC-FSS-H	N.D,	-
340	Ojeda et al (2014)	México	ND	Pil	1.67	HC-FSS-H	9 días	C1
341	Martínez et al (2016) SI	México	Jalisco	Meso	0.2	HC-FSS-V	7 meses	C2
342	Martínez et al (2016) SII	México	Jalisco	Meso	0.2	HC-FSS-V	7 meses	C2
343	Martínez et al (2016) SIII	México	Jalisco	Meso	0.2	HC-FSS-V	7 meses	C2
344	Martínez et al (2016) SIV	México	Jalisco	Meso	0.2	HC-FSS-V	7 meses	C2
345	Del Toro et al (2018) SI	México	Jalisco	Meso	0.23	HC-FSS-V	9 meses	C2
346	Del Toro et al (2018) SII	México	Jalisco	Meso	0.23	HC-FSS-V	9 meses	C2
347	Hernández y Lagunes (2018)G	México	Veracruz	Real	12	HC-FSS-H	6 meses	C1
348	Hernández y Lagunes (2018)Z	México	Veracruz	Real	12	HC-FSS-H	6 meses	C1
349	Tejeda et al (2021) S1	México	Jalisco	Meso	0.23	HC-FSS-V	6 meses	C2
350	Tejeda et al (2021) S2	México	Jalisco	Meso	0.23	HC-FSS-V	6 meses	C2
351	Rivas et al (2011) A	México	Michoacán	Real	3.4	HC-FSS-H	3 meses	C1
352	Rivas et al (2011) B	México	Michoacán	Real	3.4	HC-FSS-H	3 meses	C1
353	Stalks (2010)	México	Michoacán	Real	2.15	HC-FSS-H	1 día	C1
354	Hernández et al (2012)	Cuba	Villa Clara	Pil	20	HC-FSS-V	N.D.	-
355	Perez et al (2014)	Cuba	Villa Clara	Real	20	HC-FSS-V	3 meses	C1
356	Perez et al (2012)	Cuba	Villa Clara	Real	20	HC-FSS-V	3 meses	C1
357	Lombard et al (2018) LL	Martinica	Le Marin	Pil	720	HC-Fr	1 año	C1
358	Lombard et al (2018) NL	Martinica	Le Marin	Pil	720	HC-Fr	1 año y 6 meses	C1
359	Lombard et al (2018) OL	Martinica	Le Marin	Pil	720	HC-Fr	1 año y 6 meses	C1

Leyenda: Meso=Mesocosmo, Pil= Piloto, HC-FS=Humedal construido de flujo superficial HC-FSS-V=Humedal construido de flujo subsuperficial vertical, HC-FSS-H=Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, HC-FI=Humedal construido flotante, HC-Fr= Humedal Francés, ND= No determinado, C1= Categoría 1 y C2=Categoría 2.

Anexo 3. Datos extraídos para el análisis de la remoción de materia orgánica y nutrientes de las experiencias en categoría 2 y 3

Tabla 21: Remoción de materia orgánica y nutrientes en las experiencias de humedales construidos seleccionadas

N° HC	Etiqueta	DQO				NT				PT			
		n (af/ef)	Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia (%)	n (af/ef)	Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia (%)	n af/ef	Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia (%)
1	Costa et al (2018)	107/111	179 ± 75	50 ± 19	72	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	9/24	11.5 ± 4.9	4.1 ± 3.6	64.4
2	Trein et al (2015) S1	27	724 ± 395	603 ± 108	17	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
3	Trein et al (2015) S2	28	276 ± 138	157 ± 60	43	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
4	Silveira (2019a)	9/24	576.9 ± 238.1	427.2 ± 46.9	25.95	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	24	1.7 ± 1.4	0.7 ± 0.1	61.3
5	Ucker et al (2012) VH1	29	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	9	4.9	1.1	90.5
6	Ucker et al (2012) VH2	40	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	9	4.9	1.9	70.2
7	Benvenuti et al (2018)	17/18	487 ± 138	220 ± 68.4	56	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
8	Silveira et al (2015) CW1	52	115 ± 34	57 ± 14	47	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
9	Silveira et al (2015) CW2	52	133 ± 36	212 ± 88	50	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
10	Dell Osbel et al (2020) FI	52	295 ± 202.6	245.2 ± 152.4	17	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
11	Dell Osbel et al (2020) V	16	245 ± 152.37	159.2 ± 122.2	35.06	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
12	Dell Osbel et al (2020) H	16	159 ± 122.17	123.4 ± 169.7	22.48	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
13	Marcelino et al (2020)CWL	16	98 ± 17.05	31 ± 22.2	68.37	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	16	9 ± 1.8	5 ± 2.1	44.4
14	Marcelino et al (2020)CWLP	266/222	98 ± 17.05	27 ± 16.2	72.45	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	16	9 ± 1.8	6 ± 1.6	33.3
15	Marcelino et al (2020) CWB	28	98 ± 17.05	40 ± 25.5	59.18	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	16	9 ± 1.8	5 ± 3.0	44.4

16	Vasconcellos et al (2019)	28	138	51 ± 35	64	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	102	31	2.1 ± 1.8	93.2
17	Lima et al (2018) CWG-P	28	203 ± 48.8	85 ± 66.1	60	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	14	19 ± 1.9	13.98 ± 3.6	26
18	Lima et al (2018) CWC-P	132	203 ± 48.8	89 ± 47.1	55	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	14	19 ± 1.9	13.7 ± 2.2	28
19	Lima et al (2018) CWB-P	18	203 ± 48.8	56 ± 28.9	73	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	14	19 ± 1.9	2.5 ± 0.8	87
20	Fortes et al (2019)	50	139.9 ± 15	88.1 ± 12.4	37.03	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	132	31.5 ± 4.3	10.6 ± 3.7	66.3
21	Carvalho et al (2018)	60/130	752.92 ± 201	34.8 ± 3.7	95.34	13	85.7 ± 26.8	25.17 ± 8.	69.4 ± 8.8	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
22	Von Sperling et al (2010)	30/60	391	43	89	50	37	31	14.0	50	3	2.19	27
23	Von Sperling et al (2015)	112	414	50	72	60 - 130	29	30	6.0	60/130	3.2	2.3	28
24	Von Sperling et al (2015)	95	465	71	85	30 - 60	31	27	13.0	30/ 60	3.9	2.1	46
25	García (2018)F1	12	441 ± 123	87 ± 48	79	12	52 ± 18	22 ± 10	56.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
26	García (2018)F2	36	319 ± 99	151 ± 61	63	36	31	27	12.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
27	Pelissari et al (2017)	32	154 ± 65	17 ± 14	89	12	52 ± 18	22	10	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
28	Mantaje et al (2015)F1	44	465	71	81	36	31	27	12.9	36	3.9	2.1	21
29	Mantaje et al (2015)F2	25	465	245	59	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
30	Costa et al (2015)	84	400 ± 159	26 ± 15	76	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	44	4.2 ± 2.3	1.3 ± 0.99	69
31	Dornelas et al (2009)	28	528 ± 473	42 ± 18	71	25	29 ± 8	27 ± 7	25.0	25	1.4 ± 0.8	1.2 ± 0.85	44
32	Lana et al (2013) F1	16	465	117	74.84	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	84	3.9	2.5	36
33	Lana et al (2013) F2	29	465	72	84.52	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	28	3.9	2.1	46
34	Da Costa et al (2013)	19	414 ± 195	50 ± 19	72	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	16	3.2	2	2.3
35	Sezerino et al (2012) V	19	176 ± 75	49 ± 16	72.16	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
36	Rouso et al (2016) V	18	586 ± 168	92 ± 64	97	9	79 ± 15	57 ± 17	73.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
37	Rouso et al 2016_H	18	92 ± 64	17 ± 21	81.52	9	57 ± 17	21 ± 13	63.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
38	Santos et al 2016	18	582 ± 176	75.7 ± 62.8	86.99	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
39	De Sa Salomao et al (2012)FS	18	111.6 ± 33	66.4 ± 18.5	40.50	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	18	19 ± 3.7	18.8 ± 2.1	1
40	De Sa Salomao et al	12	52.3 ± 15	39.2 ± 13.5	25.05	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	18	16.1 ± 2.8	14.5 ± 2.6	10

(2012)V													
41	De Sa Salomao et al (2012)H	12	39.2 ± 13.5	36.3 ± 12.7	7.40	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	18	14.5 ± 2.6	14 ± 2.5	3
42	Rojas et al (2013) Ph	50	356.3	207.72	41.7	6	86.1	50.3	41.6	6	15.25	13.23	13
43	Rojas et al (2013) Sc	50	356.3	229.10	35.7	6	86.1	54.7	36.5	6	15.25	13.67	10
44	López et al (2015) Ph	26	296.5 ± 89.57	121.75	58.94	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
45	López et al (2015) Sc	26	296.5 ± 89.57	68.5	76.90	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
46	López et al (2019) Ph_Cold	19	237.45	112.6	52.58	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
47	López et al (2019) Sc_Cold	19	237.45	121.25	48.94	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
48	Leiva et al (2018) Cyp/Zant	72	295.28	102.8 ± 32.8	65.18	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
49	Leiva et al (2018) Cyp	12	295.28	123.8 ± 43.2	60.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
50	Casierra et al (2016)	12	234 ± 93	49.14	79	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
51	Palta y Morales (2013) PP	12	612.5 ± 33.73	325.24	46.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
52	Palta y Morales(2013) PE	32	612.5 ± 33.73	325.48	46.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
53	Palta y Morales (2013) PG	24	612.5 ± 33.73	270.85	45.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
54	Caselles et al (2018)	24	326 ± 176	189 ± 55	42.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
55	Caselles et al (2011) A	40	132 ± 76	54	59.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
56	Caselles et al (2011) B	40	132 ± 76	50	62.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
57	Llanos et al (2019) Th	35/21	143.9 ± 56.1	31.5 ± 19	82.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
58	Llanos et al (2019) Cyp	35/21	143.9 ± 56.1	21.6 ± 11.8	85.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
59	Bohórquez et al (2016) Ar20	35/21	331 ± 93	26.48	92.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
60	Bohórquez et al (2016) Ar10	35/21	331 ± 93	29.79	91.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

61	Bohórquez et al (2016) Gr20	48	331 ± 93	135.71	59.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
62	Bohórquez et al (2016) Gr10	48	331 ± 93	175.43	47.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
63	Núñez et al (2011) ARST	48	248 ± 53	125 ± 64	51	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	48	2.9 ± 0.4	2.04 ± 0.4	31
64	Núñez et al (2011) ARSL	9	248 ± 53	154 ± 46	36	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	48	2.9 ± 0.4	1.8 ± 0.4	38
65	Núñez et al (2011) ARSTL	9	248 ± 53	134 ± 58	46	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	48	2.9 ± 0.4	1.9 ± 0.6	36
66	Katsenovich (2009) A1	9	246.45 ± 119.1	84.32 ± 54.4	65.8	9 /11	19.7 ± 9.1	14.0 ± 4.7	29.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
67	Katsenovich (2009) B1	9	246.45 ± 119.1	106.3 ± 55.4	56.9	9 /11	19.7 ± 9.1	13.2 ± 2.9	33.3	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
68	Katsenovich (2009) C1	9	246.45 ± 119.1	73.5 ± 37.04	70.2	9 /11	19.7 ± 9.1	12.7 ± 2.5	35.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
69	Katsenovich (2009) A2	9	246.45 ± 119.1	74.3 ± 46.18	11.9	9 /11	14 ± 4.7	4.1 ± 4.1	70.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
70	Katsenovich (2009) B2	9	246.45 ± 119.1	68.9 ± 32.9	35.2	9 /11	13.2 ± 2.9	4.3 ± 3.1	67.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
71	Katsenovich (2009) C2	9	246.45 ± 119.1	59.48 ± 34.69	19.1	9 /11	12.74 ± 2.5	5.2 ± 2.9	58.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
72	Miranda (2012)	8	551.5 ± 62.7	97.25 ± 37.9	82.4	8	48.38 ± 6.4	12.6 ± 8.8	74.0	8	7.9 ± 0.4	4.09 ± 0.9	72.1
73	Torres et al (2017) S1H	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	24	100 ± 48.4	68.8 ± 35.6	31.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
74	Torres et al (2017) S2H	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	24	100 ± 48.4	69.7 ± 34.9	30.3	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
75	Torres et al (2017) S2V	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	24	69.7 ± 34.9	65.7 ± 31.1	5.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
76	Torres et al (2017) S3V	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	24	100 ± 48.4	77.8 ± 37.6	22.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
77	Torres et al (2017) S3H	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	24	77.8 ± 37.6	63.7 ± 41	18.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

78	Zurita et al (2009) HZA	36	247.5 ± 32.4	51.7 ± 5.3	75.5	36	28.7 ± 1.3	13.1 ± 1.9	53.7	36	8.3 ± 1.2	4.2 ± 0.4	44.7
79	Zurita et al (2009) H3sp	36	247.5 ± 32.4	51.3 ± 5.6	77.1	36	28.7 ± 1.3	13.8 ± 1.6	51.7	36	8.3 ± 1.2	4.9 ± 0.4	35.8
80	Zurita et al (2009) VZA	36	247.5 ± 32.4	56.4 ± 15.4	77.2	36	28.7 ± 1.3	14.8 ± 1.5	48.1	36	8.3 ± 1.2	3.9 ± 0.5	49.5
81	Zurita et al (2009) V3sp	36	247.5 ± 32.4	41.3 ± 8.9	83.3	36	28.7 ± 1.3	14.1 ± 1.5	50.5	36	8.3 ± 1.2	3.8 ± 0.4	50.6
82	Zamora et al (2019) C.ind_A	12	408 ± 49	35 ± 13	91.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
83	Zamora et al (2019) C.ind_B	12	408 ± 49	37 ± 11	90.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
84	Zamora et al (2019) C.pap_A	12	408 ± 49	33 ± 14	91.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
85	Zamora et al (2019) C.pap_B	12	408 ± 49	36 ± 14	91.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
86	Zamora et al (2019) H.coro_A	12	408 ± 49	37 ± 9.6	90.9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
87	Zamora et al (2019) H.coro_B	12	408 ± 49	35 ± 14	91.4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
88	Zurita et al (2015) SI	24	235.2 ± 167	60.20 ± 39.4	74.4	24	99.8 ± 44.6	69.4 ± 35.5	30.5	24	8.1 ± 3.4	5.20 ± 2.5	36
89	Zurita et al (2015) SII_H	24	235.2 ± 167	43.3 ± 15.8	81.6	24	99.8 ± 44.6	69.7 ± 35.2	30.2	24	8.1 ± 3.4	5.40 ± 2.5	33
90	Zurita et al (2015) SII V	24	43.30 ± 15.8	35 ± 17	19.2	24	99.8 ± 44.6	58.6 ± 23.1	41.3	24	5.40 ± 2.5	5.50 ± 2	-2
91	Zurita et al (2015) SIII V	24	235.2 ± 166.8	48.9 ± 41.1	79.2	24	99.8 ± 44.6	76.9 ± 32.2	22.9	24	8.1 ± 3.4	6.31 ± 3	22
92	Zurita et al (2015) SIII H	24	48.90 ± 41.1	54.5 ± 36.9	-11.45	24	99.8 ± 44.6	53.4 ± 41	46.5	24	6.3 ± 3	0.93 ± 1.1	85
93	Martínez et al (2016) SI	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	28	66.1	45.1 ± 5.5	47.2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

94	Martínez et al (2016) SII	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	28	66.1	50.1 ± 5.5	44.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
95	Martínez et al (2016) SIII	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	28	66.1	23.3 ± 5.5	69.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
96	Martínez et al (2016) SIV	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	28	66.1	22 ± 5.5	75.0	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
97	Del Toro et al (2018) SI	24	76.2 ± 13.9	63.9 ± 13.9	16.1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
98	Del Toro et al (2018) SII	24	76.2 ± 13.9	40 ± 13.9	47.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
99	Tejeda et al (2021) S1	27	193.3 ± 139	32.3 ± 12.7	96.5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	14	6.9 ± 3.2	7.2 ± 1.9	-4.35
100	Tejeda et al (2021) S2	27	193.3 ± 139	29.4 ± 12.9	96.7	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	14	6.9 ± 3.2	6.7 ± 2	2.90

Leyenda: af= afluyente, ef=efluente, N.E.= No evaluado

Anexo 4. Resultados de la búsqueda de experiencias de humedales construidos en Perú para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Tabla 22: Características de las experiencias de humedales construidos en Perú para el tratamiento de aguas residuales domésticas

N° HC	Etiqueta	Departamento	Provincia	Distrito	Clima	Escala	Área	Tipo de HC	DBO			DQO		
									Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia remoción (%)	Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia remoción (%)
1	Portilla (2019)	Lima	Lima	La Molina	Bwh	Pil	15	HC-FSS-H	146.2	58.2	60.2	269.5	128.5	52.3
2	Gómez (2017)	Lima	Lima	La Molina	Bwh	Pil	15	HC-FSS-V	91.6	1.3	98.6	158.1	11.1	93.0
3	Gómez (2017)	Lima	Lima	La Molina	Bwh	Pil	36	HC-FSS-V	91.6	3.3	96.4	158.1	15.6	90.1
4	Miglio <i>et al.</i> (2016)	Lima	Lima	San Martín de Porres	Bwh	Real	50	HC-FSS-V	9.3	2.1	77.6	N.E.	N.E.	N.E.
5	Medina y López (2015)	San Martín	Moyobamba	Moyobamba	Am	Real	1.02	HC-FSS-H	249	97.0	61.0	394.0	195.0	50.5
6	Mejía (2017)	Lambayeque	Ferreñafe	Manuel Antonio Mesones Muro	Bwh	Meso	0.18	HC-FSS-H	219.75	24.3	89.0	201.5	29.5	85.4
7	Cubas y Mirelas (2019)	Lambayeque	Chiclayo	Zaña	Bwh	Meso	0.54	HC-FSS-H	100	100.0	0.0	182.3	130.0	28.7
8	Cóndor (2019)	Junín	Yauli	Oroya	Cwb	Lab	0.097	HC-FSS-H	339.5	138.1	59.3	N. E.	N. E.	N. E.
9	Cejas (2021) SHAC	Moquegua	Ilo	Pacocha	Bwh	Pil	1.36	HC-FSS-H	220.33	67.3	69.4	374.0	141.3	62.2
10	Cejas (2021) SHAM	Moquegua	Ilo	Pacocha	Bwh	Pil	1.4	HC-FSS-H	220.33	51.7	76.5	374.0	105.0	71.9
11	Cárdenas (2019)	Lima	Lima	Villa El Salvador	Bwh	Pil	2.174	HC-FSS-V	95.8	10.0	89.6	88.3	10.8	87.8

12	Montenegro y Rubio (2018)	San Martín	Rioja	Base militar N° 300	Am	Real	12.25	HC-FSS-H	650	12.0	98.2	N.E.	N.E.	N.E.
13	Flores (2013) ad	Arequipa	Caylloma	Cabanaconde	BSk	Real	92.4	HC-FSS-V	132.2	160.0	-21.1	N.E.	N.E.	N.E.
14	Flores (2013) bd	Arequipa	Caylloma	Cabanaconde	BSk	Real	92.4	HC-FSS-V	132.2	169.7	-28.4	N.E.	N.E.	N.E.
15	Huamán (2017) lc	Lima	Lima	Rímac	Bwh	Pil		HC-FSS-H	239.4	76.1	68.2	685.0	180.4	73.7
16	Huamán (2017) lv	Lima	Lima	Rímac	Bwh	Pil		HC-FSS-H	239.4	37.7	84.2	685.0	109.9	84.0
17	Flores (2014)	San Martín	Moyobamba	Sector Punta de Doñe	Am	Real	25.92	HC-FSS-H	245.8	53.5	78.2	N.E.	N.E.	N.E.
18	Córdova y Huamán (2018)	San Martín	Moyobamba	Habana	Am	Real	3.3	HC-FSS-H	109	21.0	80.7	127.0	34.0	73.2
19	Herrera (2018)_H1_5	San Martín	Moyobamba	Moyobamba	Am	Real	2.58	HC-FSS-H	195.7	23.5	88.01	319.0	46.3	85.55
20	Herrera (2018)_H3_10	San Martín	Moyobamba	Moyobamba	Am	Rel	2.59	HC-FSS-H	189.8	23.5	87.61	296.0	39.7	86.59
21	Montalván y López (2017)	San Martín	Moyobamba	Habana	Am	Rel	1.89	HC-FSS-H	236.7	99.0	58.2	377.7	177.3	53.0
22	Padilla y Cahuaya (2019)	Lima	Lima	Rímac	Bwh	Meso	0.225	HC-FSS-V	418.2	186.1	55.5	837.7	408.0	51.3
23	De la Cruz (2020)_A1_6	Lima	Huarochirí	San Antonio	Bwh	Meso	0.6	HC-FSS-H	667.5	42.5	93.6	1320.0	80.2	93.9
24	De la Cruz (2020)_A2_12	Lima	Huarochirí	San Antonio	Bwh	Meso	0.6	HC-FSS-H	667.5	30.9	95.4	1320.0	69.0	94.8
25	De la Cruz (2020)_B1_6	Lima	Huarochirí	San Antonio	Bwh	Meso	0.6	HC-FSS-H	667.5	52.5	92.1	1320.0	136.7	89.6
26	De la Cruz (2020)_B2_12	Lima	Huarochirí	San Antonio	Bwh	Meso	0.6	HC-FSS-H	667.5	73.6	89.0	1320.0	103.3	92.2

27	Valle (2017)	Lima	Lima	Carabayllo	Bwh	Meso	0.208	HC-FSS-H	86.5	37.7	56.4	355.8	178.3	49.9
28	Torres (2017)	Lima	Lima	Carabayllo	Bwh	Lab	0.5	HC-FSS-H	1375.9	1.1	99.9	2727.7	5.6	99.8
29	León (2020)	Lima	Lima	La Molina	Bwh	Pil	51	HC-Fr	546	7.9	98.6	827.6	11.2	98.6
30	Miglio <i>et al</i> 2011	La Libertad	Trujillo	Huanchaco	Bwh	Real	25.44	HC-FSS-H	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
31	Córdova y Diaz (2020)	San Martín	Moyobamba	Moyobamba	Am	Pil	2	HC-FSS-H	25	7.7	69.3	N.E.	N.E.	N.E.
32	Segami (2018)_sin	Lima	Lima	Pachacámac	Bwh	Pil	5.76	HC-FSS-H	12.9	8.6	33.4	26.4	23.4	11.4
33	Segami (2018)_con	Lima	Lima	Pachacámac	Bwh	Pil	5.76	HC-FSS-H	12.9	11.0	14.5	26.4	28.9	-9.2
34	Gamarra (2016)	Lima	Lima	Ate	Bwh	Real	11.56	HC-FSS-H	232.6	17.7	92.4	525.3	60.2	88.5
35	Neira y Ruiz (2021)	La Libertad	Trujillo	Santiago de Chuco	Aw	Pil	21	HC-FSS-H	412.5	18.0	95.6	495.4	76.0	84.7
36	Paima y Grately (2021)	Ucayali	Coronel Portillo	Callería	Am	Real	1.28	HC-FSS-H	180	39.8	77.9	273.5	79.5	70.9
37	Arellano (2017)	Piura	Morropón	La Matanza	Bwh	Real	1.5	HC-FSS-H	100	3.0	97.0	247.5	12.0	95.2
38	Vargas (2021)	Lima	Callao	Callao	Bwh	Real	3.2	HC-FSS-V	367.5	4.4	98.8	1138.0	24.9	97.8
39	Larico (2021)_H1	Lima	Lima	Rímac	Bwh	Pil	1	HC-FSS-V	88.6	4.2	95.3	151.3	28.0	81.5
40	Larico (2021)_H2	Lima	Lima	Rímac	Bwh	Pil	1	HC-FSS-V	88.6	2.4	97.3	151.3	20.3	86.6
41	Saldaña (2021)	Amazonas	Uctubamba	Bagua grande	Aw	Real	4.35	HC-FSS-H	197	96.0	51.3	N.E.	N.E.	N.E.
42	Cruz (2018)_12	Lima	Lima	Carabayllo	Bwh	Meso	0.48	HC-FSS-H	74.4	11.3	84.9	125.1	43.1	65.5
43	Cruz (2018)_6	Lima	Lima	Carabayllo	Bwh	Meso	0.48	HC-FSS-H	74.4	16.7	77.6	125.1	51.7	58.7

44	Quispe y Ayala (2019)	Ucayali	Coronel Portillo	Manantay	Am	Meso	0.268	HC-FI	168	72.3	57.0	350.0	190.8	45.5
45	Quispe y Ayala (2019)	Ucayali	Coronel Portillo	Manantay	Am	Lab	0.268	HC-FI	168	65.3	61.1	350.0	89.7	74.4
46	Damián y Mancha (2021)	Huancavelica	Castrovirreyna	Huancavelica	Am	Lab	0.7	HC-FSS-H	936	98.0	89.5	946.0	138.0	85.4
47	Rojas (2018)	Cajamarca	Chota	Chota	Cwb	Pil	0.8	HC-FSS-H	113	32.8	71.0	344.0	118.8	65.5
48	Cruz y Núñez (2018)	Cajamarca	Hualgayoc	Bambamarca	Cwb	Real	0.72	HC-FSS-H	285.1	12.4	95.7	683.0	30.5	95.5
49	Durand (2014)	Lima	Lima	Cieneguilla	Bwh	Real		HC-FSS-V	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
50	Suero et al. (2018) PI	Cusco	Anta	Anta	Cwb	Real	24	HC-FSS-H	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
51	Suero et al. (2018) Es	Cusco	Anta	Anta	Cwb	Real	24	HC-FSS-H	31.0	23.8	23.1	N.E.	N.E.	N.E.

Leyenda: Meso=Mesocosmo, Pil= Piloto, HC-FS=Humedal construido de flujo superficial HC-FSS-V=Humedal construido de flujo subsuperficial vertical, HC-FSS-H=Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, HC-FI=Humedal construido flotante, HC-Fr= Humedal Francés, N.E. = No evaluado