

Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y El Caribe

Autora:
Irene Altafin

Editor:
David Wilk

División de Agua y Saneamiento

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-01911

Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y El Caribe

Autora:
Irene Altafin

Editor:
David Wilk

Mayo 2020

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo
Altafin, Irene.

Innovaciones en el desarrollo e implementación de humedales construidos para el
tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica y El Caribe / Irene
Altafin; coordinador y editor, David Wilk.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1911)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Constructed wetlands-Technological innovations-Latin America. 2. Constructed
wetlands-Technological innovations-Caribbean Area. 3. Sewage disposal plants-
Technological innovations-Latin America. 4. Sewage disposal plants-Technological
innovations-Caribbean Area. I. Wilk, David, editor. II. Banco Interamericano de
Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. III. Título. IV. Serie.
IDB-TN-1911

Palabras clave: Innovación, Aguas residuales, Humedales.

Códigos JEL: Q25, Q55.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y El Caribe

**Coordinador y Editor:
David Wilk, INE/WSA**

**Autora Principal:
Irene Altafin, Consultora**

Tabla de Contenido

PREFACIO	1
1. INTRODUCCIÓN	4
2. VISIÓN GENERAL DEL USO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN ALC	6
3. IMPLEMENTACIÓN DE HC EN ALC	15
4. TIPOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CASOS	42
5. ESTUDIOS DE CASO	52
6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	68
7. BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Clasificación de los HC por Régimen de Flujo -----	9
Figura 2 : Clasificación de los HC por la utilización de la macrófita predominante -----	10
Figura 3 : Utilización de HC en distintas etapas de tratamiento de aguas residuales -----	12
Figura 4 : Distribución de las PTARs en Brasil en función de los procesos de tratamiento -----	17
Figura 5 : Población Equivalente atendida por procesos de tratamiento de aguas residuales -----	17
Figura 6 : HC en la ciudad de Agronómica, SC, Brasil -----	21
Figura 7 : Sistema de Humedales en el Municipio de Campos Novos, SC, Brasil -----	22
Figura 8 : HC en el Condominio Residencial Palhoça, SC, Brasil -----	22
Figura 9 : São José dos Pinhais, PR, Brasil -----	23
Figura 10 : PTAR Ponte dos Leites -----	23
Figura 11 : Canteros de Mineralización de Lodo, con macrófitas -----	24
Figura 12 : Distribución de las PTARs en Perú en función de los procesos de tratamiento -----	26
Figura 13 : Sistema francés de HC en una Casa de Ancianos, en Chíncha -----	30
Figura 14 : Compactación del lecho del humedal -----	31
Figura 15 : Plantación de carrizos en el lecho del humedal -----	31
Figura 16 : El Colegio San Christoferus -----	32
Figura 17 : HC en México, según el pretratamiento adoptado -----	34
Figura 18 : Distribución de los HC precedidos sistema fosa séptica, según el caudal -----	34
Figura 19 : Distribución de los PTARs compuesto solamente por HC, según el caudal -----	35
Figura 20 : Distribución de los PTARs precedidos de RAFA, según el caudal -----	35
Figura 21 : Distribución de los PTARs precedidos de Tanques de sedimentación, según el caudal --	36
Figura 22 : Macrófitas fluctuantes en las lagunas de sedimentación -----	54
Figura 23 : HC-FSS-H en la PTAR dos Leites -----	54
Figura 24 : Proyecto ECOFIBRAS en la PTAR dos Leites -----	55
Figura 25 : Compostaje de la biomasa y lodos -----	56
Figura 26 : Sistema Masaya -----	57
Figura 27 : Área de Cultivo en Masaya -----	58
Figura 28 : El remplazo por la macrófita Pennisetum purpureum -----	59
Figura 29 : Humedales en operación y proyectados para Nicaragua -----	60
Figura 30 : Ubicación del Lago Patzcuaro -----	61
Figura 31 : Chuspata - planta macrófita utilizada en los HC -----	63
Figura 32 : El HC de Cucuchucho desde su construcción -----	64
Figura 33 : El HC de Santa Fé, antes y después de su construcción -----	65
Figura 34 : Beneficios económicos de las PTARs -----	66
Figura 35 : Subproductos para aprovechamiento comercial -----	66

LISTA DE TABLAS

Tabla	1 : Eficiencias de los HC, utilizados en distintas etapas del tratamiento de aguas residuales ----	13
Tabla	2 : Experiencias conducidas/monitoreadas por Universidades y grupos de investigación -----	19
Tabla	3 : Otros Sistemas en escala real de operación -----	20
Tabla	4 : Características de Sistemas de HC en Perú -----	27
Tabla	5 : Consideraciones para la definición de una tipología de HC -----	42
Tabla	6 : Elementos para enmarcar las experiencias de HC en ALC -----	48
Tabla	7 : Posibilidades de Estudios de Caso -----	52

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ABNT	Asociación Brasileña de Normas Técnicas
AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional al Desarrollo
ALC	América Latina y el Caribe
ANA	Agencia Nacional de Aguas
CAVIMA	Asociación de la Ruta de Turismo Rural del Camino del Vino
CePTS	Centro de Investigación y Entrenamiento en Saneamiento (Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento)
Coli F	Coliformes fecales o Termotolerantes
Coli T	Coliformes totales
COLMEX	Colegio de México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAMA	Consejo Nacional de Medio Ambiente
CONAPAS	Comisión Nacional de Agua y Saneamiento de Nicaragua
COPASA	Empresa de Agua y Saneamiento de Minas Gerais
COT	Carbono Orgánico Total
CONSUDE	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación
CW	Constructed Wetlands - Humedales Construidos
DBO₅	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EMATER	Empresa de Asistencia Técnica y Extensión Rural

ENACAL	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios
EPAGRI	Empresa de Investigación Agropecuaria y Extensión Rural de Santa Catarina
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FCAPFyV	Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, Forestales y Veterinarias
FBPA	Filtro biológico percolador
H + V	Flujo Híbrido
FV	Flujo Vertical
GEI	Gases de efecto invernadero
GO	Goiás
HC	Humedales Construidos
HC-FS	Humedal Construido de Flujo Superficial
HC-FSS	Humedal Construido de Flujo Sub Superficial
HC-FSS-H	Humedal Construido de Flujo Sub Superficial Horizontal
HC-FSS-V	Humedal Construido de Flujo Sub Superficial Vertical
IBGE	Instituto Brasileño de Geografía y Estadística
IDRC	Centro Internacional para el Desarrollo de Canadá (International Center for Development for Canada)
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INAA	Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados
IPCC	Inter-Governmental Panel on Climate Change
IUCMA	Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia
IWA	International Water Association
JASS	Juntas Administradoras de Servicios y Saneamiento
ALC	América Latina y Caribe (Latin America & the Caribbean)
KNL	Departamento de Conocimiento
LCA	Análisis De Ciclo de Vida (Life Cycle Assesment)
MG	Minas Gerais
MS	Mato Grosso do Sul
MVCS	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, de la Dirección Nacional del Saneamiento
N	Nitrógeno
N total	Nitrógeno Total
NH₄⁺	Amoniaco
NMP	Número más probable, arrojado por técnicas de recuento de coliformes
N-NH₃	Nitrógeno amoniacal
NO₂	Nitrito

NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
ONG	Organización No Gubernamental
OTASS	Organismo Técnico de la Administración de los Servicios de Saneamiento
P	Fósforo
P libre	Fósforo libre
PAC	Plan Nacional de Aceleración del Crecimiento
PE	Personas Equivalentes
PO₄⁻³	Fosfato
PR	Paraná
PROATAS	Programa de Asistencia Técnica en Agua y Saneamiento
Pt-	Fósforo Total
PTAR	Planta de Tratamiento las Aguas Residuales
PUCPR	Pontificia Universidad Católica de Paraná
RAFA	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
SA MAE	Servicio Autónomo Municipal de Agua y Alcantarillado
SC	Santa Catarina
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
SEI	Stockholm Environment Institute
SEMA	Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y Caribe
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
SEMAG	Secretaría de Agricultura del Estado de Santa Catarina
SP	São Paulo
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SUNASS	Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento
SuSanA	Alianza para la Sanidad Sustentable (Sustainable Sanitation Alliance)
SW Brasil	Simposio Brasileño de Aplicación de Wetlands Construidos en el Tratamiento de Aguas Residuales
TA	Tanque de Acumulación
TRH	Tiempo de Retención Hídrica
TS	Tanque Séptico
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UB	Universidad de Barcelona

UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFPR	Universidade Federal de Paraná
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UMNG	Universidade Militar Nueva Granada
UMSS	Universidad Mayor de San Simón, Bolivia
UNALM	Universidad Nacional Agraria la Molina
UN-HABITAT	Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos
UNICAMP	Universidade de Campinas
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal de Paraná
WSP	Water and Sanitation Program

PREFACIO

Las tecnologías de HC ofrecen soluciones adaptables a varios contextos (urbanos, peri-urbanos, rurales) y ecosistemas (costeros, de montaña, tropicales, áridos, etc.), con buenas eficiencias de remoción así como con bajos costos de operación y mantenimiento.

El tratamiento y disposición de efluentes domésticos e industriales representan un gran reto en América Latina y el Caribe (ALC). A pesar de que la cobertura de saneamiento alcanza un 82% en la región, 110 millones de habitantes carecen de un sistema mejorado de saneamiento. Para alcanzar cobertura universal en el 2020, los países en la región tendrían que extender la cobertura a 170 millones de personas, principalmente en áreas rurales. El tratamiento de aguas residuales urbanas es bajo, con un promedio para la región de 15% de tratamiento, variando desde 48% en México y 35% en Brasil y Uruguay, a 5% en Centroamérica. La única notable excepción es Chile, con un 100%. Además del déficit de cobertura, los sistemas convencionales instalados han resultado costosos y muy difíciles de mantener, especialmente en municipalidades con poca capacidad técnica y financiera que no logran garantizar su funcionamiento en el largo plazo. Cerrar la brecha existente y servir la demanda futura de tratamiento de aguas residuales es uno de los mayores retos para la región.

Los humedales construidos (HC) – o definidos de manera más genérica como humedales de tratamiento – para el tratamiento de efluentes municipales, domésticos e industriales han demostrado ser una alternativa efectiva y de menor costo para el tratamiento de aguas residuales. Los HC abordan de manera más “sistémica” la contaminación ambiental, al eliminar una variedad de contaminantes (DBO5, DQO, nitrógeno, fósforo, contaminantes orgánicos emergentes en procesos industriales, y contaminantes en otras cadenas de desechos, como lixiviados en rellenos sanitarios), y pueden contribuir al logro de objetivos más amplios de gestión del recurso hídrico, como la protección de fuentes de agua, el tratamiento de aguas residuales para aliviar la escasez, la restauración de ecosistemas y la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y adaptación al cambio climático y al abastecimiento futuro de agua. Las tecnologías de HC ofrecen soluciones adaptables a varios contextos (urbanos, peri-urbanos, rurales) y ecosistemas (costeros, de montaña, tropicales, áridos, etc.), con buenas eficiencias de remoción así como con bajos costos de operación y mantenimiento.

Alguna de la evidencia en la aplicación de sistemas de HC en contextos de países desarrollados y en vías de desarrollo ya ha sido documentada, incluyendo revisiones históricas, su aplicación en tratamiento de efluentes industriales, saneamiento de ecosistemas (principalmente en Europa e Israel), y sistemas de tratamiento en comunidades rurales. Más recientemente (2013), la IPCC publicó las “Guías para inventarios de gases de efecto invernadero: Humedales”, donde se incorporó un suplemento sobre “Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales”, reconociendo la contribución de estas tecnologías en la mitigación de GEI. Sin embargo, aún no ha sido desarrollado un estudio más amplio sobre los beneficios actuales y potenciales de los HC, a nivel global y aún menos en Latinoamérica. Más aún, no se han analizado las oportunidades que ofrecen los HC para atacar de manera más sistémica los problemas de seguridad hídrica en cuencas críticas, saneamiento ambiental en cuencas, energía limpia y mitigación/adaptación al cambio climático.

El BID, a través del Departamento de Conocimiento (KNL) ha apoyado el desarrollo de este producto de conocimiento “Cutting Edge” cuyo objetivo es analizar la implementación de HC en Latinoamérica, enfocándose en efluentes domésticos bajo la responsabilidad de autoridades municipales, empresas de agua y saneamiento, u organizaciones comunitarias. Los aspectos críticos de implementación que se abordaron son:

- **Análisis de soluciones tecnológicas y sus modalidades, particularmente su efectividad en la remoción de contaminantes para reúso seguro del efluente tratado.**
- **Aplicabilidad y elementos críticos de diseño.**
- **Beneficios económicos y sociales, incluyendo reúso para consumo urbano, industrial, agrícola y/o recreativo.**
- **Barreras institucionales y de política, así como oportunidades para su aplicación.**
- **Factores críticos de implementación, como son costos de inversión y mantenimiento, sostenibilidad de las inversiones y operaciones, capacidad institucional, participación de los actores, y oportunidades para crecer a escala la tecnología.**

Este documento cubre una revisión de experiencias y aplicaciones tecnológicas, principalmente centradas en los siguientes países: Brasil, México, Nicaragua, Perú y Bolivia. El análisis cubre aspectos básicos de los humedales construidos, su desarrollo en las últimas décadas, el alcance en su aplicación por parte de los prestadores de servicios, y los principales elementos de éxito o barreras en el uso de la tecnología. Mediante una tipología de análisis, considerando aspectos técnicos e institucionales, se analizan a detalle tres iniciativas/experiencias (en Brasil, México y Nicaragua), arrojando conclusiones y lecciones para su disseminación. Los resultados de este estudio fueron presentados y discutidos en el International Water Association (IWA) Water and Development Congress and Exhibition (Buenos Aires), así como un taller de cierre del producto “Cutting Edge” en el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (Washington D.C.), ambos llevados a cabo en noviembre del 2017. Se extiende un especial agradecimiento a la Gerencia de Conocimiento (KNL) del BID por su constante apoyo.

División de Agua y Saneamiento (INE/WSA)



1. INTRODUCCIÓN

Este reporte está estructurado en seis capítulos:

El capítulo 2 presenta los conceptos básicos y generales de los humedales construidos (HC) y su evolución en las últimas décadas, incluyendo innovaciones tecnológicas. Se buscó profundizar el conocimiento sobre los HC de manera general y en sus distintas configuraciones, principalmente en ALC, haciendo énfasis en sistemas utilizados por prestadores de servicios en el tratamiento de aguas residuales domésticas, y en los factores de éxito o fracaso asociados al uso de la tecnología. Para ello, se realizó una búsqueda de información de diversas fuentes, incluyendo universidades, empresas contratistas, empresas prestadoras de servicios de agua y saneamiento, y redes nacionales y latinoamericanas de humedales. En Brasil, además de dicha investigación base, también se contactó a instituciones, docentes, consultores y grupos de investigación para el levantamiento de información. En el resto de los países analizados, se contó con el apoyo de especialistas del BID, de profesores de universidades y de centros de investigación.

El Capítulo 3 presenta un perfil detallado de la implementación de proyectos de HC en diferentes escalas y contextos biofísicos y socioeconómicos, centrando el análisis en cinco países: Brasil, Perú, México, Colombia y Nicaragua. Aunque las fuentes de información a veces no son recientes, se trata de información documentada y se buscó corroborar su veracidad. Para cada país se describen el tipo de soluciones y su resultado general, con una síntesis detallando el origen del efluente tratado, la modalidad de HC adoptada, el caudal de tratamiento y observaciones específicas. En seguida se presentan algunos ejemplos, con una descripción de las soluciones y aplicaciones tecnológicas, y algunos resultados.

El Capítulo 4 presenta una tipología para analizar las experiencias y aplicaciones tecnológicas, según sus aspectos tecnológicos e institucionales. Se incluyen: 1) las modalidades y soluciones tecnológicas de humedales construidos (HC-FS; HC-FSS-V; HC-FSS-H y Híbridos), aplicabilidad, efectividad en la remoción de contaminantes para la disposición segura de efluente, y beneficios económicos y sociales (incluyendo reutilización de agua para

uso urbano, agrícola y /o recreativo); 2) desafíos clave en el diseño de soluciones, tales como desafíos técnicos, económicos, biológicos/ambientales, hidrológicos y climáticos (reducción de GEI, seguridad hídrica y adaptación al clima); y 3) restricciones y oportunidades en materia normativa, regulatoria e institucional.

El Capítulo 5 presenta un análisis de casos de aplicaciones específicas en tres países (Brasil, Nicaragua y México), a partir de la tipología desarrollada y resaltando las fortalezas de cada uno de los sistemas, teniendo en cuenta escala-dimensionamiento, el contexto y particularidades de su aplicación, y capacidad de replicación. En Brasil, el caso analizado es el uso de la tecnología como tratamiento complementario a una planta de tratamiento de aguas residuales que sirve a una población de 200,000 personas. En Nicaragua, el caso analizado es de un sistema piloto que fue desarrollado para su implementación en ciudades con población mayor a 5,000 personas, y en la incorporación de estas plantas de tratamiento a los servicios ofrecidos a la población por la Empresa ENACAL. En México, el caso es del uso de HC como parte de un programa de saneamiento y recuperación de las aguas del Lago Pátzcuaro, Michoacán.

El capítulo 6 de conclusiones y consideraciones finales se centra en las principales observaciones extraídas del trabajo, en la identificación de los factores que impiden la disseminación de la tecnología en ALC y en sugerencias para la mejora de su disseminación.¹



1 Este reporte contó con insumos de los siguientes profesionales, a quienes se extiende un especial agradecimiento: Heyke Hoffman, Pablo Heleno Sezerino, André Baxter Barreto, Felipe Vitorino, Maria Cristina Marondin, Ana Tonello y Jaison Brito, en Brasil; Rosa María Miglio Toledo de Rodríguez, en Perú; Armando Rivas Hernández y Florentina Zurita, en México; y Gladys Vidal, en Chile.

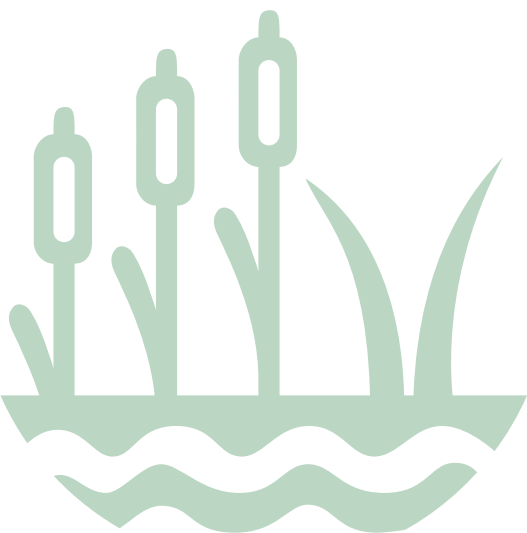
2. VISIÓN GENERAL DEL USO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS (HC) EN ALC

En los países en desarrollo, incluyendo ALC, los intentos de aumentar el acceso a los servicios de saneamiento mediante el empleo de soluciones centralizadas no han resultados exitosos.

LOS HC COMO RESPUESTA A LA PROBLEMÁTICA DE SANEAMIENTO

El acceso deficiente al agua potable y al saneamiento es uno de los mayores problemas que afectan a las poblaciones de los países en desarrollo. En la actualidad, más de 800 millones de personas no disponen de fuentes seguras de agua, y alrededor de 2.5 miles de millones de personas no cuentan con servicios adecuados de saneamiento. Como es posible predecir, dichos déficits están mayormente concentrados en los países con niveles de desarrollo más bajos. La situación se agrava cuando se considera que la mayoría de esos países va camino a enfrentar, en un futuro próximo, graves problemas de escasez de agua, exacerbados por los impactos del cambio climático. Considerando este contexto, se hace imperiosa la adopción de una visión integral de la gestión del agua que considere el empleo de los conceptos del saneamiento ecológico con el propósito de reducir al mínimo la contaminación del agua, asegurar el reciclaje y recuperar la bioenergía disponible.

Hacer frente a los desafíos de reducir los déficits en saneamiento en ALC requiere un enorme esfuerzo, teniendo en cuenta los déficits en el acceso a redes de alcantarillado y a sistemas de tratamiento efectivos ya mencionados en el prefacio. En los países en desarrollo, incluyendo ALC, los intentos de aumentar el acceso a los servicios de saneamiento mediante el empleo de soluciones centralizadas no han resultados exitosos. La baja capacidad de inversión del sector público para la construcción y el mantenimiento de los sistemas (principalmente plantas de tratamiento) y la ausencia de personal técnico capacitado para su operación son las principales causas del fracaso de estos sistemas. Como alternativa a estos sistemas centralizados, algunas soluciones descentralizadas para el tratamiento de las aguas residuales han ganado espacio, tanto en pequeños núcleos rurales y zonas poco densas, como en ciudades pequeñas y centros urbanos de mayor tamaño (Massoud, et al., 2009). Además, se adjunta a la propuesta de la descentralización la dimensión del saneamiento ecológico y resiliencia climática ya referida.



A partir de las últimas décadas del siglo XX, el uso de HC se ha expandido y, actualmente, ha sido consolidado en muchos países industrializados.

Las tecnologías empleadas en los HC, o Constructed Wetlands (CW) en inglés, se encuentran entre las soluciones ecológicas descentralizadas en expansión en la actualidad, y son consideradas como tecnologías prometedoras para soluciones rurales y núcleos urbanos.

Los HC pueden ser definidos como sistemas de ingeniería, diseñados y construidos para emplear las funciones naturales de los humedales y su hidrología, de los suelos y de las poblaciones microbianas con el propósito de descontaminación de las aguas (Vymazal, J., 2007). En el proceso de tratamiento, son utilizadas plantas macrófitas, definidas como aquellas que pueden vivir en terrenos inundados durante toda su vida, o encharcadas durante largos períodos de tiempo. Los HC son sistemas que muestran gran potencial en el tratamiento de varios tipos de aguas residuales, ya sean municipales, aguas grises, industriales, agrícolas, o lixiviados de rellenos sanitarios, entre otros. Cuando son comparados con otras tecnologías, resaltan como sistemas que pueden remover un largo espectro de contaminantes por medio de la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos, a costos más bajos, principalmente de operación y mantenimiento. Además, presentan la ventaja adicional de producir pocos residuos.

LAS DISTINTAS NOMENCLATURAS

Una gran variedad de términos ha sido utilizada para referirse a los HC. En el idioma español, son conocidos como *humedales artificiales, humedales construidos, biofiltros, humedales de tratamiento*, entre otros. En la Inglés se les conoce como *constructed wetlands, artificial wetlands, treatments wetlands, planted soil filters, reed bed treatment system, vegetated submerged beds*, entre otros. El idioma portugués se refiere a ellos como *filtros plantados com macrófitas, sistemas de alagados construídos, leitos cultivados, banhados construídos, biofiltros com macrófitas, leitos de raízes, sistemas fitopedológicos*, para mencionar algunos ejemplos. Esta multiplicidad de denominaciones dificulta el proceso de investigación, compilación, organización y evaluación de experiencias entre diferentes países.

Las primeras investigaciones realizadas para verificar las posibilidades de utilización de los humedales artificiales en la depuración de aguas residuales fueron llevadas a cabo durante la década de 1950 por el Instituto Max Planck, en Alemania. Desde entonces, es creciente el interés de universidades y centros de investigación en profundizar el conocimiento sobre los mecanismos que ocurren en la depuración, así como por parte del poder público y de los usuarios en el empleo de dicha tecnología a escala real (BRIX, H et al., 2007, MACIASKEK et al., 2002, REYES, C.P; VIDAL, G, 2007).

A partir de las últimas décadas del siglo XX, el uso de HC se ha expandido y, actualmente, ha sido consolidado en muchos países industrializados (Vymazal, 2010,). Hoy en día muchos manuales, guías y revisiones orientan el diseño y la operación de los HC en países desarrollados (Urban Pollution Research Center, 2003; UN-Habitat, 2008, US- EPA, 1993, Melbourne Water, 2010; Wu ,H., et al., 2015; Dotro,G., et al, 2017).

Sin embargo, en los países en desarrollo la tecnología todavía no se expandió principalmente por el conocimiento insuficiente y la poca experiencia en diseño y operación de los sistemas. La escasa información disponible dificulta delinear el panorama de su utilización en estos países, y todavía son pocas las revisiones del empleo de dicha tecnología en los países en desarrollo (Zhang, D., et al, 2015; Machado et al, 2016).

Las revisiones de la literatura muestran que los HC ofrecen estabilidad en la operación, eficiencia en la remoción de materia orgánica, capacidad de operar sin consumo energético, operación sencilla y de bajo costo, integración con el paisaje urbano y rural por medio de jardines y parques, y, en general, se observa la ausencia de olores desagradables. Por otro lado, requieren grandes extensiones de terreno de acuerdo con el caudal de tratamiento, cuidados específicos con la operación para evitar la colmatación del lecho, y diligencia con la disposición final de los efluentes, pues el proceso no elimina todos los posibles agentes patógenos.

EL PROCESO DE DEPURACIÓN

El proceso de depuración en los HC ocurre por medio de la interacción entre fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como fuente principal de energía. Distintos mecanismos actúan de forma interrelacionada en el proceso de descontaminación del agua, tales como: la sedimentación de las partículas suspendidas; la filtración y la precipitación química; la adsorción e intercambio iónico en las superficies de las plantas, sustrato y sedimento; la descomposición y transformación de contaminantes por microorganismos y plantas; la depredación y muerte natural de patógenos (Arias, et al, 2003).

Los sólidos suspendidos son removidos principalmente por medio de la sedimentación y filtración de la materia orgánica, por medio de la sedimentación de partículas, y por medio de la degradación biológica aerobia o anaerobia para la materia disuelta. El nitrógeno es removido por el proceso de nitrificación y subsecuente de desnitrificación, así como por la absorción de las plantas. El fósforo es extraído por medio de reacciones de adsorción y precipitación, y por la absorción de las plantas. Adicionalmente, la remoción de patógenos se da por medio de sedimentación, filtración y depredación (Vymazal, J., 2007).



Los efectos de las plantas macrófitas en HC están asociados principalmente al transporte del oxígeno a la zona de raíces, al mantenimiento de la conductividad hidráulica del sustrato de arena, al crecimiento de colonias de bacterias y otros microorganismos que forman una biopelícula adherida a la superficie de las raíces y a las partículas del sustrato, a la absorción, y a la disponibilidad de oxígeno en las raíces para los procesos microbianos.

CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Convencionalmente, los HC son clasificados según el flujo del agua (Figura 1) y el uso de las plantas macrófitas (Figura 2). Con respecto al flujo, se dividen en Humedal Construido de Flujo Superficial (HC-FS) y Humedal Construido de Flujo Sub Superficial (HC-FSS), el cual se subdivide en flujo vertical (HC-FSS-V), flujo horizontal (HC-FSS-H), y Sistemas Híbridos con el uso de las dos modalidades, como muestra la Figura 1. Con respecto a las macrófitas, en términos bióticos, son utilizadas plantas emergentes, que son aquellas que tienen la mayoría de sus partes fuera del agua, pero con las raíces en un sustrato; plantas con hojas flotantes, que son enraizadas y con las hojas en la superficie; plantas sumergidas, que crecen enteramente bajo el agua, y que pueden ser libres o enraizadas; y las plantas flotantes, las cuales flotan libremente en la superficie del agua.

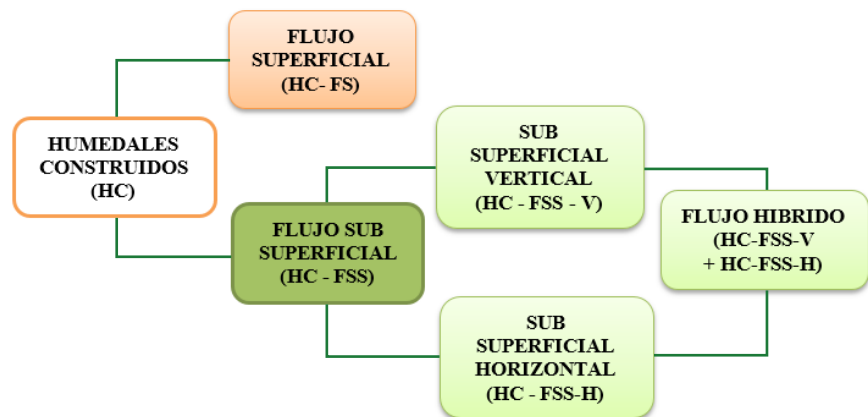


Figura 1- Clasificación de los HC por Régimen de Flujo. Fuente: Vymazal, 2008.

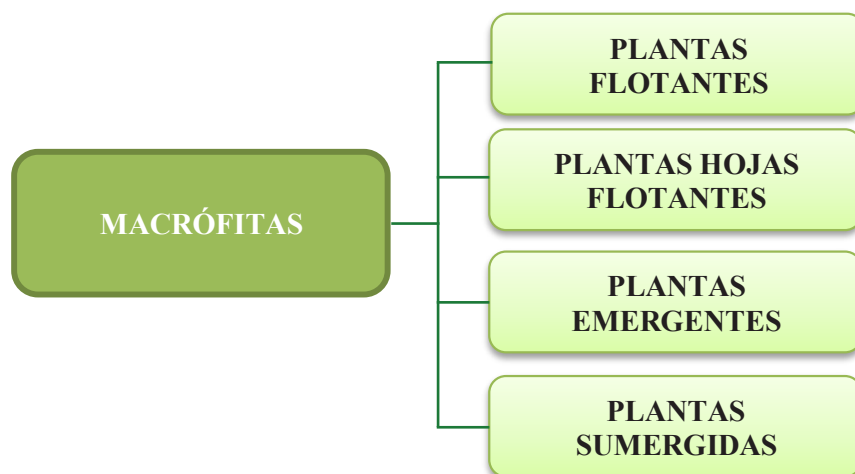


Figura 2 - Clasificación de los HC por la utilización de la macrófita predominante.
Fuente: Vymazal, 2008.

Los HC-FS son sistemas rasos, con una profundidad máxima de 50 cm. Generalmente, más de 50% de su superficie está cubierta por plantas emergentes. Estos sistemas son recomendados para el pulimiento final de efluentes, con poca concentración de materia orgánica.

Los HC-FSS tienen por lo general una profundidad de 60 a 80 cm. Son diseñados para mantener el nivel de agua siempre por debajo de la superficie del lecho filtrante, lo que evita los problemas derivados de la proliferación de insectos. Como sustrato, se utilizan principalmente dos tipos de material de relleno: arena o grava. Los sistemas de lecho con grava son más utilizados en América Latina, África, Asia, Australia y Nueva Zelanda. Los sistemas de lecho con arena tienen su origen en Europa, pero hoy en día son utilizados en todo el mundo.

En los HC-FSS-H, el tipo del material filtrante es un factor muy importante en la eficiencia del sistema. En general, se obtienen buenos niveles de eficiencia con la misma arena gruesa (en su mayoría entre 0.2 – 4.0 mm) que es utilizada para los HC verticales presentados a continuación, inclusive algo más gruesa en algunas ocasiones. Para un clima caliente, se recomienda un área de 2.4m² por persona equivalente (PE) (Hoffmann, et al, 2011). En los sistemas horizontales, la nitrificación es limitada, debido a la limitada oferta de oxígeno.

En los HC-FSS-V, las aguas servidas traspasan verticalmente el lecho plantado con macrófitas, y el sistema es alimentado de forma intermitente. Este tipo de alimentación proporciona una buena transferencia de oxígeno, creando condiciones adecuadas para la nitrificación. Arena gruesa es utilizada como material filtrante (en su mayoría entre 0.2- 4.0 mm). Debido a su operación intermitente, la alimentación se hace por medio de bomba o por sifón. Se recomienda dividir la superficie en dos o más áreas de humedales de gran escala, para permitir su secado parcial, de forma opcional (Platzer, et al, 2016).

Para el humedal de flujo vertical en ALC, con oxidación completa de materia orgánica (inclusive con una nitrificación completa), es recomendada una carga orgánica de 25 a 32 g DOB5/m²/d. Se indican cargas máximas de 41 g DQO /m²/día y 15 g SST /m²/día (Sezerino, 2006), lo que corresponde a una aplicación de 1.2 a 1.5 m² por PE. En caso de efluentes con baja concentración de materia orgánica (aguas grises claras, agua de lluvias), la carga hidráulica es el factor determinante para el diseño, que no debe sobrepasar (de forma continua) 200 L/m² (Platzer, et al, 2016).

Los sistemas híbridos combinan el uso de sistemas de flujo horizontal y vertical, en células interconectadas o en una misma célula. En la parte vertical se procesa la nitrificación, mientras en la parte horizontal la desnitrificación.

PRINCIPALES APLICACIONES

En su gran mayoría, los HC son utilizados como tratamiento secundario o terciario en el tratamiento de aguas residuales municipales pretratadas, y en el tratamiento de aguas grises. No obstante, se amplía la tendencia de su uso para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, de aguas pluviales, de efluentes de refinería de petróleo, de efluentes agrícolas, así como en el tratamiento natural de ríos y lagos contaminados.

También son utilizados en el tratamiento de aguas residuales in natura, con la aplicación del denominado “Sistema Francés”, descrito en la siguiente sección. Además, con un diseño un poco diferente, son recientemente empleados en el tratamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua residuales y de agua potable (Maine, M.A., et al., 2016; Bidone, R.F., 2008; Pelissari, C., 2012; Silva Junior, 2013; Hoffmann, 2017²).

2 Contactos personales establecidos en octubre, 2017.

La Figura 3 presenta la utilización de HC en las distintas etapas de tratamiento de aguas residuales y sus correspondencias a otras tecnologías de tratamiento. Dicha figura servirá de base para enmarcar las experiencias identificadas en ALC.

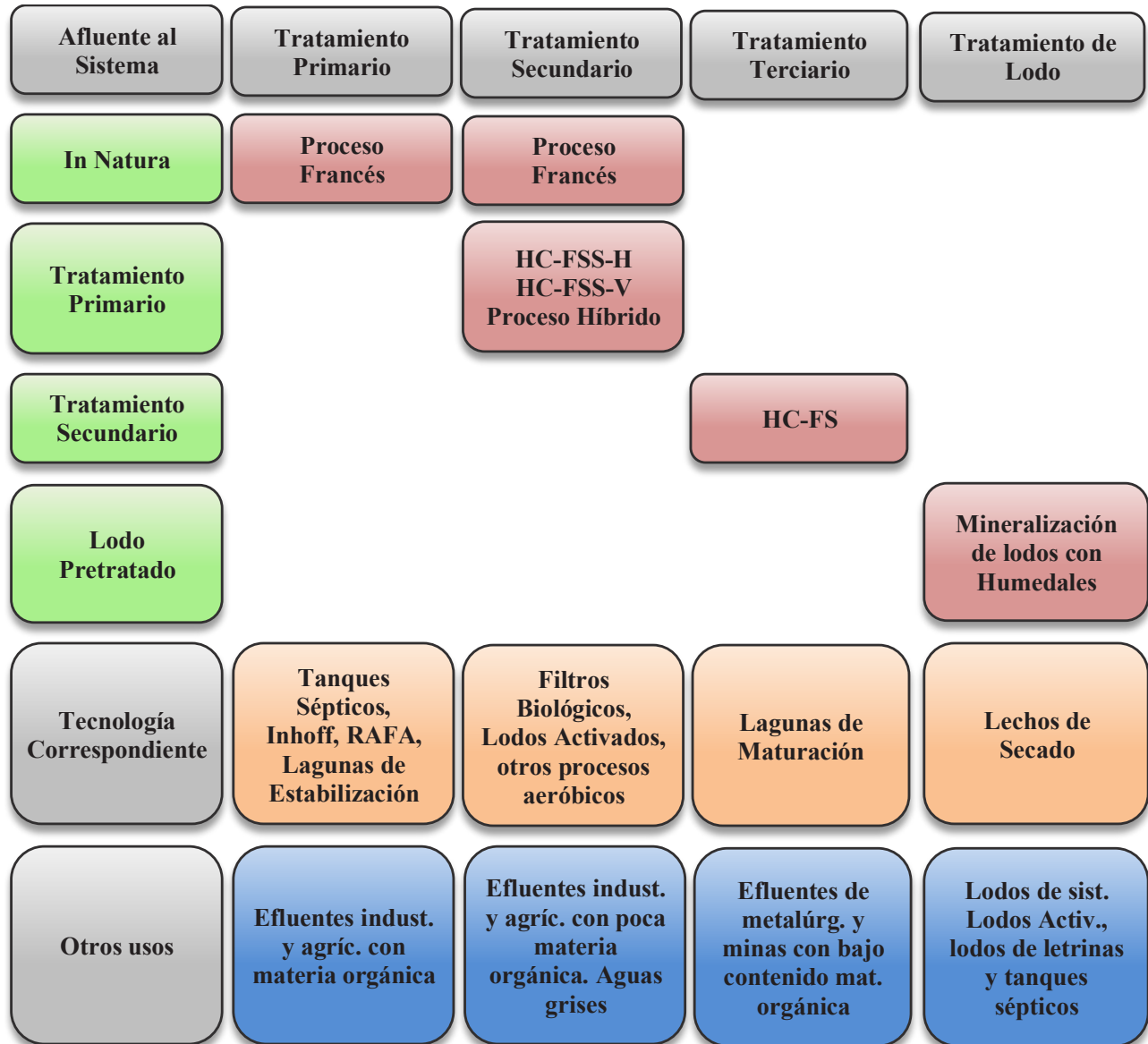


Figura 3 -Utilización de HC en distintas etapas de tratamiento de aguas residuales.
Fuente: Heike Hoffman, 2017 (Comunicación Personal).

Las eficiencias típicas en remoción de contaminantes obtenidas con el uso de los HC en las distintas etapas del tratamiento de aguas residuales son presentadas en Tabla 1.

Tabla 1 - Eficiencias de los HC, utilizados en distintas etapas de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Heike Hoffman, 2017 (Comunicación personal). Fuente: Dotro, G., et al, 2017 .

ETAPA DE TRATAMIENTO				
	Primario + Secundario	Secundario	Secundario	Terciario
HC	Sistema Francés	HC- FSS- H	HC-FSS-V	HC- FS
DBO5	>90 %	>80 %	> 90 %	>80%
Sólidos Suspendidos	>90 %	>80 %	> 90 %	> 80%
Nitrógeno Total	<20 %	30 – 50 %	< 20 %	30 -50 %
Fósforo Total	10 – 20 %	10 -20 %	10 – 20 %	10 -20 %
Coliformes	1 a 3 log ₁₀	2 log ₁₀	2- 4 log ₁₀	1 log ₁₀

EL PRETRATAMIENTO

Los HC para el tratamiento de aguas residuales, generalmente, son precedidos de pretratamientos que funcionan como tratamiento preliminar, primario o secundario, variando según la etapa que los HC cumplirán en el proceso de tratamiento. En pequeñas plantas de tratamiento, los tanques sépticos y los tanques Imhoff son utilizados con mayor frecuencia. En los sistemas más grandes suele ser utilizado Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente (UASB, por su nombre en inglés, y RAFA en español).

El Sistema Francés es una modalidad de utilización de humedales que se distingue de las configuraciones tradicionales, pues incorpora el tratamiento primario, precedido del cribado, al tratamiento secundario. Una de sus principales características es la reducción de la generación de lodos. Las aguas residuales son tratadas en dos etapas: la primera con el propósito de separar y tratar la parte sólida, y en la segunda con el tratamiento de la parte líquida, correspondiente al tratamiento usual de HC de flujo vertical (Morvannou, et al, 2015). En la primera etapa se utiliza grava para evitar la colmatación, mientras que en la segunda se utiliza arena. La primera etapa se divide en áreas, que por lo general forman 3 subetapas, para permitir la alternancia de la aplicación, el secado del lodo y evitar la colmatación. Su utilización ha ganado relevancia en los últimos años en ALC, con ejemplos en Perú y Brasil (Hoffmann, H., 2013).

PARÁMETROS DE PROYECTO, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y ESPACIO REQUERIDO PARA HC

Los parámetros de proyectos para la construcción de HC consideran diversas variables como características y tipo del efluente a tratar, eficiencia deseada en la eliminación de nutrientes, tipos de contaminantes, espacio disponible, posibilidad de reutilización y uso previsto de la biomasa producida, entre otros. Sin embargo, el dimensionamiento siempre está asociado a la carga de materia orgánica (DBO_5), generalmente considerada como el área necesaria (m^2) por PE, o la tasa de aplicación hidráulica por m^2 de área.

La exigencia de área-espacio, debido a las restricciones en disponibilidad y altos costos en las regiones urbanas, es uno de los principales desafíos a ser enfrentado para la implementación de sistemas de HC, y que hasta hoy requiere mayor investigación y documentación. Para disminuir la necesidad de espacio, se destaca la utilización del HC aireado, desarrollado y patentado por la empresa Naturally Wallace Consulting³. Su propósito es reducir el área ocupada por medio de la aceleración de los procesos biológicos. Su aplicación resulta interesante en situaciones en las que hay restricción de área (Andrade, H.B., 2015).

Otro tema importante de investigación es el referente a la eficiencia en la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), tanto en las asociaciones de sistemas horizontales y verticales, como en la exploración de las flexibilidades del sistema vertical.

Por último, se menciona la mineralización del lodo, con una adaptación del sistema de HC. Esta configuración fue inicialmente desarrollada con el propósito de resolver los problemas derivados del tratamiento de los lodos provenientes de las plantas de aguas residuales. Su utilización fue ampliada, y sin embargo se requiere de mayor documentación. Actualmente también se aplica en el tratamiento de lodos de fosas y tanques sépticos, y de lodos producidos en las plantas convencionales de tratamiento de aguas servidas y de plantas de potabilización del agua⁴.

3 <http://www.globalwettech.com/en/members/naturallywallace.html>

4 <http://brasil.rotaria.net/www.rotaria.net/>.

3. IMPLEMENTACIÓN DE HC EN ALC

En la actualidad, instituciones de investigación y universidades concentran sus esfuerzos en la búsqueda de aplicaciones específicas de HC, que no siempre están dirigidos al tratamiento de aguas residuales.

El presente trabajo incluyó una intensa búsqueda sobre el uso de la tecnología en los países de ALC, con énfasis en su aplicación en sistemas de mayor tamaño, utilizados principalmente por las empresas prestadoras de servicios de agua y alcantarillado. Aunque se observa una creciente expansión de estudios y experimentos con el uso de HC⁵ (Hadad, H.R., Maine, M.A., 2016; Hernández, A.R., Cuervo, D.P., 2014), también se percibe un gran vacío en dichos trabajos, en términos de documentación y sistematización de parámetros de diseño, de los métodos y de las estructuras utilizados en escala real.

No obstante, fue posible constatar que a pesar del HC ser recomendado en los estudios y evaluaciones realizadas por instituciones nacionales y organismos internacionales, su utilización no suele en general estar incorporada a los sistemas de servicios públicos, ni siquiera a los de pequeño tamaño, donde se esperaría que pudieran ser implementados. Por lo tanto, las experiencias suelen ser más frecuentemente relatadas en los trabajos e informes académicos e informes de empresas de proyectos, relacionados a pequeños núcleos tales como escuelas, hogares de retiro, y hoteles. En la actualidad, instituciones de investigación y universidades concentran sus esfuerzos en la búsqueda de aplicaciones específicas de HC, tales como el tratamiento de residuos fármacos o de derivados del petróleo, que no siempre están dirigidos al tratamiento de aguas residuales.

En realidad, además de los manuales, guías de orientación (GIZ, 2011; Delgadillo, et al, 2010) y de la evaluación de experiencias en ALC, no se encuentran muchos trabajos en que retraten aspectos relacionados a la sostenibilidad de dichos sistemas a medio o a largo plazo, considerando la calidad del proyecto, la operación y el mantenimiento.

A continuación, se presentan las síntesis de las experiencias identificadas en los siguientes países de ALC: Brasil, Perú, México, Colombia y Nicaragua. Para cada uno de esos países se presenta primero el contexto de agua y saneamiento, para después documentar y analizar, con ejemplos, la aplicación de HC.

5 <http://humedalespanamericanos.org/>; <https://www.utp.edu.co/>; <https://www.utp.edu.co/>, <http://wetlandsconstruidos.blogspot.com.br/>; <http://humedales-construidos-wetlands.fr/>

Solo el 83 % de la población brasileña dispone de servicios de abastecimiento de agua y el 52.4 % dispone sistemas de alcantarillado. Además de esto, solo 46 % de las aguas residuales domésticas generadas son tratadas.

LOS HC EN BRASIL

El Sector de Agua y Saneamiento en Brasil

La aprobación de la Ley de Agua y Saneamiento en Brasil⁶ (Ley 11.445/2007), y la concomitante retomada de las inversiones en este sector a través del Plan Nacional de Aceleración del Crecimiento (el PAC), trajeron nuevas perspectivas a la universalización de los servicios de saneamiento en el país, tras décadas de bajas inversiones y fragilidades en el marco regulatorio del Sector.

No obstante, después de diez años de la aprobación de la Ley, Brasil todavía enfrenta enormes carencias en los servicios de agua y saneamiento⁷. Según el Sistema Nacional de Informações (SNIS, 2017), solo el 83 % de la población brasileña dispone de servicios de abastecimiento de agua y el 52.4 % dispone sistemas de alcantarillado. Además de esto, solo 46 % de las aguas residuales domésticas generadas son tratadas⁸.

SPERLING, 2016, a partir de datos de la Agencia Nacional de Aguas (ANA) sobre 2187 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Brasil, identificó los principales procesos de tratamiento y la población equivalente que es atendida por cada proceso (Figuras 4 y 5). Los principales procesos utilizados en Brasil son: i) lagunas, en sus modalidades facultativas, anaeróbicas, aireadas y en sus combinaciones; ii) sistemas de reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA), seguido por tratamiento y sistemas con lodos activados. La utilización de HC fue identificada en solamente 1.5% de los sistemas de tratamiento, de forma dispersa y diluida con los otros sistemas. El estudio no se profundizó en los aspectos de proyecto y de operación de los HC, confirmando la constatación de su empleo de manera poco difundida entre los prestadores de los servicios.

6 http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm

7 En la actualidad se discute el Proyecto de Ley 3261/19 que establece el nuevo Marco regulatorio para el sector de agua y saneamiento en Brasil.

8 En 2017 la población de Brasil era de 207 millones de personas. El SNIS registra informaciones de Empresas de Agua y Saneamiento que sirven a 167 millones de personas con agua y a 105 millones de personas con alcantarillado.

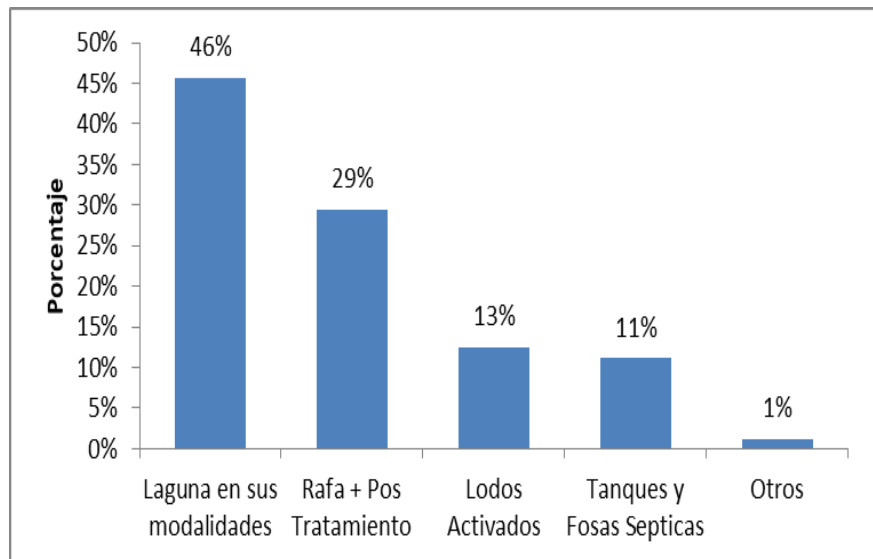


Figura 4 - Distribución de las PTARs en Brasil, en función de los procesos de tratamiento. Fuente: Sperling, 2016 a partir de ANA.

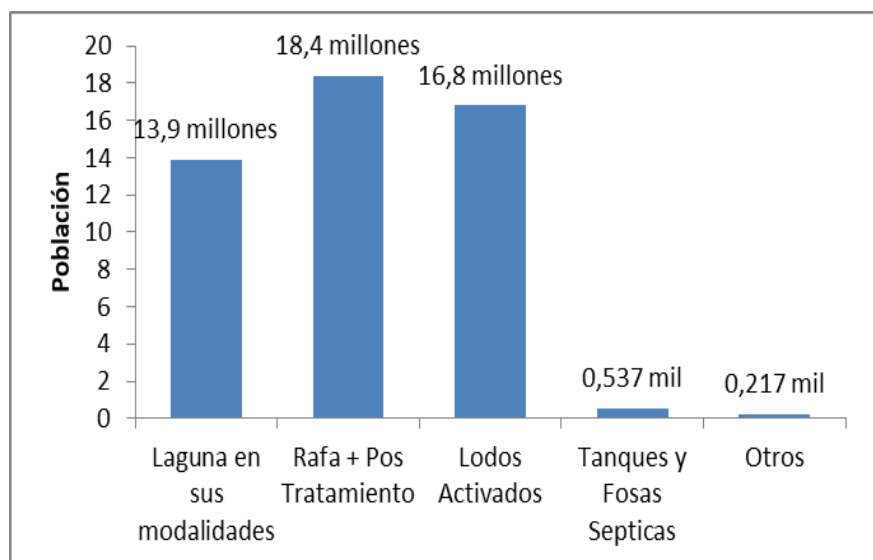


Figura 5 - Población atendida por procesos de tratamiento de aguas residuales en Brasil. Fuente: Sperling, 2016 a partir de ANA.

Ejemplos de HC en Brasil

Las primeras experiencias con HC en Brasil sucedieron en 1982, con la construcción de una laguna artificial en las cercanías del Río Piracicamirim, en el estado de São Paulo (Salati, et al, 1999). La década de 1990 fue productiva, principalmente en las zonas rurales, para los experimentos de tratamiento de las aguas residuales con HC, principalmente en el estado de Santa Catarina (Sezerino, et al, 2015).

A partir del año 2000, se observa que las investigaciones son más diseminadas. Los experimentos presentan un gran avance en toda la extensión territorial, con aplicaciones para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales, empleando diferentes configuraciones, materiales filtrantes y especies de macrófitas (Beda, J.N., 2011; Calijuri, M.L., et al, 2009; Begoso L., 2009; Costa, J.F., 2013; Monteiro, V.R.C., 2014; Pelissari, C., et al, 2012; Sezerino, P.H., et al, 2015).

En la actualidad, se observa que la presencia de la iniciativa privada avanza en la oferta de proyectos, ejecución y obras para condominios residenciales privados, resorts y escuelas. La formación del Grupo de Estudios en Wetlands Construidos Aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales (Wetlands Brasil) en 2013, con la participación de varios centros de investigaciones en Brasil y coordinada por la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), puede ser considerada como un marco en la articulación de estas instituciones sobre dicho tema, en Brasil. El grupo dio nuevo impulso a la diseminación de los estudios y tecnologías en el país; fueron creadas plataformas virtuales, grupos electrónicos, blog, periódicos, y llevados a cabo diversos encuentros y talleres anuales, a partir de 2013⁹.

Además, algunas universidades como la UFSC y la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), se destacan como puntos focales en la conducción de investigaciones y experimentos en campo. La Universidad de Minas Gerais alberga, como incubadora, la empresa Wetlands Construidos. La Universidad, en conjunto con la Empresa de Agua y Saneamiento de Minas Gerais (COPASA), creó el Centro de Investigación y Entrenamiento en Saneamiento (CePTS)¹⁰, en el cual el sistema francés de HC es estudiado.

9 <http://gesad.ufsc.br/boletins/>

10 <http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/esgotamento-sanitario/valorizacao-do-esgoto/conteudos/cepts>

A continuación se presenta información sobre diez sistemas de HC, situados en ocho estados brasileños, conducidos y/o evaluados por parte de la comunidad académica. Cuatro de estos sistemas operan en escala real, cinco en escala piloto y uno en escala de laboratorio. Los afluentes de dichos sistemas son aguas residuales domésticas, aguas grises y lixiviados de rellenos sanitarios.

En los estudios mencionados, los caudales tratados variaron de 0.45 a 355 m³/día para los sistemas en escala real, de 1 a 30 m³/día para experimentos en escala piloto y 0.15 a 0.61 l/h, para el experimento en escala de laboratorio. Los periodos de retención hídrica en estos casos variaron entre 1.2 y 6.45 días en la escala real y piloto, y entre 24 y 155h en el estudio llevado a cabo en escala de laboratorio.

Como pretratamiento, se emplearon efluentes de desarenadores y laguna facultativa; RAFA y RAFA + Filtro Biológico Percolador (FBPA, trickling filter, en su denominación en inglés); fosas, tanques sépticos y tanques de acumulación. La Tabla 2 ilustra las principales características de estos sistemas.

Tabla 2 -Experiencias conducidas/monitoreadas por Universidades y grupos de investigaciones.

Identificación	Origen del efluente	Tamaño de la PTAR	Caudal / PE	Modalidad	Ubicación
PTAR Arrudas	Doméstico	Piloto	7.5 m ³ /d	HC-FSS-H	Belo Horizonte MG
Residencia Rural y Oficina	Aguas Grises	Real	0.45m ³ /d 2.89 m ³ /d	HC-FSS-H HC-FSS-V	Palhoça SC Florianópolis SC
PTAR Goiânia	Doméstico	Piloto	sin datos	HC-FSS-V	Goiânia GO
PTAR Campo Grande	Aguas Grises	Real	sin datos	HC-FSS V + HC- FSSH	Campo Grande MS
Central de Resíduos do Recreio	Lixiviado de Aterro	Real	355 m ³ /d	HC-FS e HC-FSS-H	Minas do Leão RS
Unidade Experimental de Viçosa	Doméstico	Piloto	1.0-2.5 m ³ /d	HC-FS e HC-FSS-H	Viçosa MG
PTAR Samambaia	Doméstico	Piloto	sin datos	HC-FSS-V	Goiânia GO
PTAR Ponta Negra	Doméstico	Piloto	15 e 30 m ³ /d	HC-FSS-V	Natal RN

Campus USP	Doméstico	Escala de Laboratorio	0.15 L/h 0.30 L/h 0.61 L/h	HC-FS e HC-FSS-V	São Paulo SP
Colonia Agrícola Mergulhão (5 empresas)	Doméstico	Real	4 m³/d 0.36 m³/d 11.25 m³/d 3.25 m³/d 0,48 m³/d	HC-FSS-V	S. José Pinhais PR

Fuente: Elaboración propia a partir de las lecturas y contactos mantenidos.

A continuación, la Tabla 3 presenta información general de otros sistemas en escala real.

Tabla 3 - Otros HC en escala real de operación.

Identificación	Origen del efluente	Caudal / PE	Modalidad (arreglos de humedales)	Ubicación
Pousada Rural	Doméstico	150 PE	HC-FSS-H	Agronômica SC
Condomínio Resid.	Doméstico	2000 PE	HC-FSS-V	Palhoça SC
Camino del Vino	Doméstico	sin datos	HC-FSS-V	S. José Pinhais PR
Escuela (SAMAE)	Doméstico	200 PE	HC-FSS-H	Campos Novos SC
Localidades diversas	Doméstico	200 a 2000 PE	HC-FSS-H	Campos Novos SC
PLASC Industria de Plásticos	Doméstico	250 PE	HC-FSS-V	Biguaçu – SC
Alojamiento rural	Doméstico	150 PE	Híbrido	Videira SC
PTAR Ponte dos Leites	Doméstico	200 L/s	HC- S + HC- -FSS-H	Araruama RJ

Fuente: Elaboración propia a partir de las lecturas y contactos mantenidos.

Detalles de sistemas que operan en escala real son presentados a continuación.

- **Pousada Rural en Agronómica, Santa Catarina**

El sistema más antiguo que utiliza la tecnología de HC en Brasil está situado en el municipio de Agronómica, en el estado de Santa Catarina, y ha estado en funcionamiento durante 23 años. Es una unidad de flujo horizontal, con un área de 340 m², que utiliza un tanque séptico como tratamiento previo. Pertenece a la Empresa de Investigación Agropecuaria y de Extensión Rural de Santa Catarina (EPAGRI), y posee una capacidad para tratar hasta 150 PE, pero trata un promedio de 74 PE (Figura 6)



Figura 6 - HC en Agronómica, SC, Br.
Fuente: UFSC, Brasil.

El sistema es precedido por un tanque de sedimentación. Se utilizó como criterio de proyecto un área superficial de 4.6 m² por PE. Son utilizadas las macrófitas *Zizania bonariensis* y el medio filtrante es compuesto por arena y cáscara de arroz. Desde 2004, sus resultados son monitoreados por la UFSC, y muestran remociones de DBO₅ entre 73 a 98%; TSS entre 53 a 87%, y *E. Coli* entre 1 y 3 e-log (Phillipp, 2006).

A pesar del largo tiempo de operación, este sistema demuestra ser bastante resistente. Varios episodios de inundaciones, encharcamiento y obstrucción fueron registrados. No obstante, el sistema resistió y no hubo necesidad de intervención en el sistema hidráulico o cambio del medio filtrante. (Sezerino, 2015).

- **Escola Rural en Campos Novos - Santa Catarina**

El Servicio Autónomo de Agua y Alcantarillado del municipio de Campos Novos, en Santa Catarina incorporó el uso de HC para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas aglomeraciones. El primer sistema (HC-FSS-H) fue instalado en el año 2011, en una escuela rural con 200 alumnos (Figura 7). La implantación del sistema contó con intensa participación de los estudiantes de la escuela. El sistema consiste de tratamiento anaeróbico, seguido de los humedales.



Figura 7 - Sistema de Humedales en Campos Novos, SC, Br.

Fuente: Rodrigues, 2015.

Rodrigues et al, 2015, constató valores de remoción de 72.1% de DBO5, 77.4% de DQO (un poco más bajas de lo que se espera para esa utilización), y de 80.7% de PO4 y NH4. La experiencia obtenida con el empleo de HC en la escuela sirvió de referencia para el proyecto e implementación de otros sistemas en condominios particulares.

- **Condomínio Residencial Palhoça, Santa Catarina.**

Sistema de HC-FSS-V fue construido en 2005 para atender a una población de 2,000 PE (Figura 8). Se utilizó como criterio de proyecto un área superficial de 1.57 m2 por PE. El sistema es constituido por cuatro módulos, y es precedido de reactores anaeróbicos compartimentados (GESAD, 2017). El medio filtrante es arena gruesa, y la planta macrófita utilizada es la *Cyperus Papyrus*. El lecho filtrante tiene una profundidad de 0.7m, de los cuales 0.2m constituye el fondo saturado. En dicho sistema, se observan remociones de materia orgánica de 83% (DQO) y de fósforo de 73% (Monteiro, et al, 2014).



Figura 8 - HC en el Condominio Residencial Palhoça, SC, Br. Fuente: GESAD, UFSC, Santa Catarina, Brazil.

- **São José dos Pinhais – Paraná**

En la ciudad São José dos Pinhais, Paraná, fueron formadas importantes asociaciones entre la Universidad Federal, la Empresa Brasileira de Extensão Rural-EMATER y la Vigilancia Sanitaria de la localidad para el desarrollo y la difusión de varias unidades de HC, tanto para el tratamiento de aguas residuales domésticas, como para los efluentes de pequeñas empresas de la región. Como ejemplo, se presenta el sistema HC-FSS-V que fue instalado en 2006 en un restaurante y espacio de eventos, para recibir 500 personas por semana, principalmente en los fines de semana (Figura 9). Como pretratamiento, se utiliza un tanque de sedimentación y remoción de grasas, mientras que el medio filtrante está compuesto de grava y arena gruesa. Este sistema presenta eficiencias de DBO5 entre 52% y 95%; DQO de 47% a 94.5%; fósforo entre 21.5% y 96%; E. Coli de 80% a 99%.



Figura 9 - São José dos Pinhais, PR, Br.
Fuente: EMATER, 2006

- **PTAR Ponte dos Leites, Araruama, Rio de Janeiro**

La planta de tratamiento de Araruama, Rio de Janeiro, Brasil, inaugurada en 2005 pasó a adoptar el sistema de HC como tratamiento complementario a partir de 2009 (Figura 10). El sistema trata un caudal de 200 L/s y posee una superficie instalada de 6.8 hectáreas. Detalles de la PTAR Ponte dos Leites serán presentados en el Capítulo 5 del presente documento.



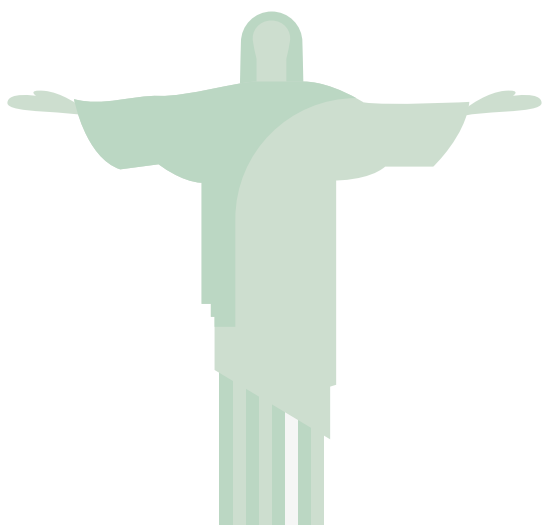
Figura 10 - PTAR Ponte dos Leites, RJ, Br.
Fuente: Aguas de Juturnaíba, RJ .

- **HC en canteros de mineralización de lodos**

Es importante resaltar el uso creciente en Brasil de canteros de mineralización de lodos, con el empleo de macrófitas en sistemas destinados a retener y mineralizar los sólidos de lodos producidos de plantas de tratamiento de desechos agroindustriales, industriales, de aguas servidas o de agua potable. Son sistemas que se comparan a los lechos de secado en términos de eficiencia, pero se diferencian por el periodo de permanencia de más de 10 años, permitiendo la mineralización total sin necesidad de manejo adicional. Las experiencias realizadas en el Sur de Brasil, durante el año de 2002, mostraron potencial bastante promisorio¹¹ (Figura 11). Además, merece destaque el trabajo del CePTS y de la UFMG en este tema.



Figura 11 – Canteros de Mineralización de Lodos com Macrófitas. Fuente: Rotaria, 2017



11 <http://brasil.rotaria.net/produtos/humedal/>

De las aguas residuales recolectadas en las áreas urbanas, solo el 68 % reciben tratamiento efectivo antes de ser descargadas en un cuerpo receptor. No hay registros de tratamiento de aguas residuales en las áreas rurales.

LOS HC EN PERÚ

El Sector de Agua y Saneamiento en Perú

Al igual que muchos países de América Latina y Caribe, Perú todavía enfrenta déficits en la provisión de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, aunque avance en los servicios. Según el Plan Nacional de Saneamiento 2017- 2021¹² (Gobierno de Perú, 2017), las estimaciones de cobertura muestran que, en el ámbito urbano, 94.5 % de la población cuenta con servicios de agua potable y el 88.3% con los servicios de alcantarillado. De las aguas residuales recolectadas en las áreas urbanas, solo el 68 % reciben tratamiento efectivo antes de ser descargadas en un cuerpo receptor.

En el ámbito rural, la cobertura de los servicios es estimada en 71 % en agua potable y 24 % en alcantarillado. Esto significa que 3.4 y 8.3 millones de peruanos no disponen de los servicios de agua y alcantarillado en los ámbitos urbano y rural, respectivamente. No hay registros de tratamiento de aguas residuales en las áreas rurales.

La provisión de los servicios de saneamiento en el ámbito urbano es responsabilidad, principalmente, de 50 empresas prestadoras de servicio, que atienden al 62 % de la población del país. Del total de conexiones registradas, Lima Metropolitana, atendida por el Servicio de Agua y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL), tiene 41 % de las conexiones domiciliarias. Adicionalmente, existen alrededor de 500 municipalidades menores que administran directamente los servicios en pequeñas ciudades.

En el ámbito rural la prestación de servicios de saneamiento la realizan las Organizaciones Comunes, siendo las más comunes las Juntas Administradoras de Servicios y Saneamiento (JASS), que son organizaciones elegidas voluntariamente por las comunidades y se constituyen con el propósito de administrar, operar y mantener los servicios de saneamiento de uno o más centros poblados.

Las reformas realizadas a partir de fines de la década de 2000 llevaron a la creación del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, de la Dirección Nacional del Saneamiento (MVCS), al fortalecimiento de la estructura regulatoria por medio de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS)

12 <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3680-018-2017-vivienda>

y a la creación del Organismo Técnico de la Administración de los Servicios de Saneamiento (OTASS), con la misión de brindar apoyo técnico a las empresas prestadoras de servicios en la modernización de sus procesos de gestión, adscrito al MVCS.

Los principales problemas relacionados al acceso a los servicios son la baja calidad operacional, institucional y financiera; las tarifas que no permiten cubrir los costos de inversión, operación y mantenimiento de los servicios; y la falta de personal adecuado para operar y mantener las estructuras (Ruiz, L.O., 2010).

El Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (SUNASS, 2015), muestra que las tecnologías utilizadas varían de sistemas anaerobios, lagunas y tratamiento por lodos activados (Figura 12). El Diagnóstico registra que la aplicación de lagunas, en sus diferentes tipologías, es predominante (81%), seguida por el tratamiento por lodos activados (6%). Sin embargo, el diagnóstico no menciona las experiencias con humedales construidos como una modalidad de uso consolidado.

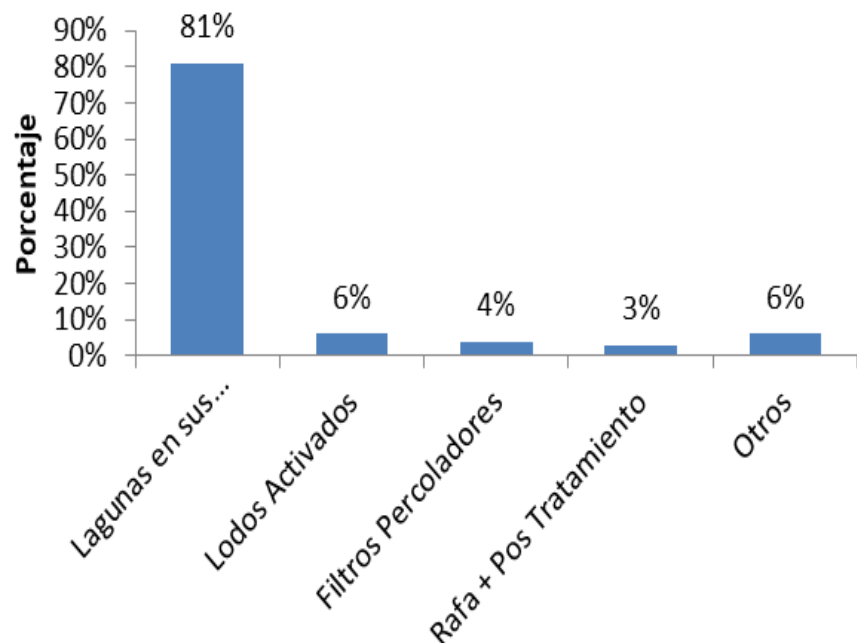


Figura 12 - Distribución de las PTARs en Perú en función de los procesos de tratamiento. Fuente: SUNASS, 2015.

Ejemplos de HC en Perú

Las consultas realizadas durante este trabajo confirman que el uso de humedales artificiales en Perú todavía no es frecuente entre los prestadores de servicios de agua y alcantarillado. Por ejemplo: en la Región Metropolitana de Lima, se constata que los filtros percoladores y humedales artificiales, juntos, manejan solamente el 0.4% de las aguas residuales tratadas en la región, y se han concentrado en experiencias pequeñas y pilotos para el riego de áreas verdes muy específicas (Cavalinni, 2011; Velasquez, E.A., 2004). Las experiencias de utilización en sistemas públicos están direccionadas principalmente a pequeños sistemas locales que no están registrados en ninguna base más amplia de información.

En la Tabla 4, se presentan algunas experiencias y utilizaciones de HC en pequeños sistemas en Perú. La mayoría está ubicada en Lima y es utilizada para el tratamiento de caudales oriundos de escuelas, retiros para personas mayores y plantas piloto en universidades.

Tabla 4 - Características de Sistemas de HC en Perú.

Identificación	Origen del Efluente	Modalidad (arreglos de humedales)	Caudal de Tratamiento	Observaciones
El Mirador – Nuevo Pachacutec - LIMA (3 PTARs)	Doméstico	HC-FSS	3.5 L/s	Proyecto estatal. Proyecto operativo con problemas
Colegio Christopherus - Chorrillos - LIMA	Aguas grises	HC-FSS-V	2.8 L/d	Proyecto privado
	Aguas negras	HC-FSS-V	3.7 L/d	Proyecto privado
Universidad Nacional de Ingeniería - LIMA	Doméstico	HC-FSS-H	0.4 L/s	Proyecto institucional
Humedal Colegio El Milagro - TRUJILLO	Doméstico	HC-FSS-H	1.8 m³/día	Proyecto institucional
PTAR Humedales Cementos Lima – Atocongo - LIMA	Doméstico	HC-FSS-H	7.2 L/s	Proyecto privado
Humedales de Lacabamba- ANCASH	Doméstico	HC-FSS-H	3 m³/día	Proyecto institucional
Casa de Retiro- Cieneguilla	Aguas grises	HC-FSS-V	3.65 m³/día	Proyecto privado
Parque de los Niños- Chuquitanta - Lima	Agua de canal de regadío	HC-FSS-V	5.57 m³/día	Desarrollado por el Proyecto LiWa

Casa de Retiro de Ancianos - Chincha	Doméstico	Sistema Francés HC-SS-FV	7.5 m ³ /día	Proyecto financiado por la ONG alemana Ayúdame
Planta piloto demostrativa UNALM - LIMA	Doméstico	Sistema Francés HC-SS-FH HC-SS-FV	18 m ³ /día	Proyecto institucional

Fuentes: Hoffman, H., 2017; Miglio, 2017, *comunicación personal*.

A continuación, se resumen información adicional acerca de sistemas que operan en escala real.

- **Trujillo: Colegio Toni Real Vines**

El proyecto piloto de HC para la reutilización de aguas residuales tratadas en una escuela de la periferia de Trujillo fue construido en 2009 para tratar los efluentes generados por 200 alumnos del Colegio Toni Real Vines, ubicado cerca de un botadero de residuos sólidos, con un caudal de proyecto de 2 m³/día. Se instaló una planta de HC con la utilización de “la totora” (*Scirpus californica*) y “el paragüitas” (*Cyperus alternifolius*). El proyecto fue promovido y realizado por la Alianza de Saneamiento Sostenible (SuSanA, por su nombre en inglés), en conjunto con la Universidad Nacional Agraria la Molina (diseño y monitoreo), y con la Universidad de Islas Baleares (diseño y capacitación) (SuSaNa, 2011; Miglio, R., 2010).

Como tratamiento preliminar, se utilizó un sistema de remoción de grasas y tanques de sedimentación. Para el humedal, se eligió el confitillo, a excepción de la zona de ingreso y salida, donde fue utilizada la grava. El efluente del tratamiento fue desinfectado con cloro, para luego ser aplicado en el riego para especies forestales y algunos frutales de tallo alto.

La construcción del sistema fue seguida de un proceso de capacitación de los profesores y de los niños de las escuelas, así como de otros maestros de colegios vecinos, acerca de temas de salud pública, tratamiento con humedales, y reutilización del agua. Un factor de éxito determinante en la utilización del proceso consistió en la participación intensa del personal directivo del centro educativo, y en el involucramiento de los actores locales: profesores, alumnos y visitantes, los cuales fueron capacitados sobre el funcionamiento del sistema.

Datos recientes muestran que el sistema está operando, con las siguientes características: i) caudal promedio: 1.82 m³/d; área superficial: 25.44 m²; especie vegetal: “totora” (*Scirpus californica*) y “paragüitas” (*Cyperus alternifolius*); material del lecho filtrante: confitillo, a una profundidad de 0.6m. Las remociones actuales son: DBO₅ - 62%; sólidos suspendidos totales - 19%; coliformes fecales (NMP/100 mil) - 99.99%, después de cloración (Miglio, 2017).

- **Sistema El Mirador**

En 2006, por iniciativa del MVCS, fueron construidos tres sistemas de HC de flujo subsuperficial (HC-SS) en el Distrito de Ventanilla, en el Mirador Pachacutec. Cada uno de estos sistemas tiene capacidad de atender a una población de 2,500 personas, con caudal de proyecto de alrededor de 100 m³/d cada. Los sistemas también tenían el propósito de crear áreas verdes en la geografía árida de la región de Lima y, a la vez, proveer una “barrera verde” contra los vientos fuertes.

Los mencionados sistemas son precedidos de tratamiento preliminar y primario, y operan por medio de la gravedad. Como medio filtrante, se utilizó la planta macrófita local Cattai (*Typha domingensis*), mientras que la grava fue adoptada como material filtrante, combinada con una camada superficial de arena. Los tres sistemas muestran alta capacidad de remoción de materia orgánica (DBO₅), alrededor de 95%, como también de patógenos, alrededor de 103 (3 unidades logarítmicas). El efluente de las plantas es destinado a la irrigación. La operación de los sistemas quedó a cargo de SEDAPAL, que también es responsable por la operación del sistema de recolección por condominios. La experiencia es considerada como un importante avance en la práctica de descentralización del tratamiento de aguas residuales en áreas periferias urbanas en el país¹³. Sin embargo, información reciente muestra que el sistema presenta algunos problemas de operación y mantenimiento (Miglio, 2017).

13 Todavía no se identificaron informaciones más recientes acerca del desempeño de esos humedales.

- **La utilización del sistema francés en la ciudad de Chíncha.**

El Proyecto financiado por la ONG alemana “Ayúdame” utiliza el sistema francés de HC en una casa de ancianos, en Chíncha, con 60 personas. Su objetivo es tratar las aguas residuales crudas y no producir lodos, estando proyectado para el tratamiento de un caudal final de proyecto de 7.5m³/día (Figura 13). El sistema comprende dos unidades (dos etapas de tratamiento): la primera es formada por filtro de grava, y está dividida en dos partes para operar en modo alternado, cada parte durante tres días; ya la segunda es formada por filtro de arena.



Figura 13 - Sistema francés de HC en una Casa de Ancianos, en Chíncha.
Fuente: Heike Hoffmann, 2015.

La primera unidad del sistema tiene superficie efectiva de 60 m² y altura total de 1.40 m. Las plantas macrófitas utilizadas son: el “papiro chino” (*Cyperus alternifolius*) y “el Vetiver” (*Chrysopogon zizanioides*). La segunda unidad tiene una superficie de 60 m² y altura total de 1.10 m. El filtro es hecho de arena, con una profundidad de 60cm, y las plantas utilizadas son las mismas de la primera etapa. El sistema opera desde fines de 2011 y todo el efluente es utilizado para irrigación de área verde y productiva. Hasta 2013, no se reportaron mayores problemas en la operación y mantenimiento de su estructura. El sistema cuenta con monitoreo en línea y supervisión de los empleados del abrigo. Las remociones reportadas son: 97% de materia orgánica, en términos de DBO₅; 95% de sólidos totales; 95% de remociones de nitrógeno y E. Coli (Miglio, 2017).

- **La adaptación de un sistema de aguas residuales en Lacabamba, Ancash, Perú.**

El sistema fue construido en 2005, en la ciudad de Lacabamba (3,450 habitantes, a una altitud de 3,346 m, con clima templado y frío). El proyecto tuvo como propósito implantar y evaluar un sistema integrado de manejo de aguas residuales, con la utilización de HC-FSS-H y vertimiento de los efluentes en un bio-huerto comunal. La iniciativa recibió financiamiento del Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y Caribe (SEMA /EMS), y del Centro Internacional de Desarrollo (IDRC, por su nombre en inglés) de Canadá (Lovera, D., et al, 2006) (Figuras 14 y 15).

Antes de la implantación de los HC, las aguas residuales eran tratadas en un tanque Imhoff y después vertidas en una acequia de riego. Los HC complementan el pretratamiento. Las principales características de los HC son: caudal promedio de 3 m³/día; área superficial de 58.5 m²; flujo horizontal subsuperficial; planta macrófita “el Carrizo” (*Phragmites australis*); lecho filtrante compuesto de confitillo y arena gruesa. Actualmente, el sistema remueve 48% de DBO₅; 90 % de sólidos suspendidos totales; y 63% de coliformes fecales (NMP/100 ml) (Miglio, 2017).



Figura 14 - Compactación del lecho del humedal - Lacabamba, Ancash, Perú.
Fuente: Miglio, 2017 de IIGEO, 2005.



Figura 15 - Plantación de carrizos en el lecho. Lacabamba, Ancash, Perú.
Fuente: Miglio, 2017 de IIGEO, 2005.

- **La experiencia en el Colegio San Christoferus, Lima.**

El Colegio San Christoferus es un centro educativo dedicado a niños con necesidades especiales que se encuentra en el distrito de Chorillos, Lima. Una de las motivaciones para el desarrollo del proyecto fue la necesidad de agua para el riego y mantenimiento de las áreas verdes o destinadas a cultivos. El proyecto se inició en 2007, con separación de aguas grises (Sistema 1) y aguas negras (Sistema 2) e implantación de dos sistemas de humedales, cuyas características son presentadas a continuación (Figura 16).

Para el tratamiento de las aguas grises (Sistema 1), el pretratamiento consiste en una trampa de grasa. En el tratamiento de las aguas negras (Sistema 2), se instaló un filtro de compostaje.

Además, sistemas de humedales subsuperficiales de flujo vertical fueron implantados en ambos sistemas. El Sistema 1 trata un caudal producido por 23 PE (2.8 m³/d), mientras el Sistema 2, recibe el caudal producido por 30 PE (3.7 m³/d). Las plantas macrófitas empleadas son “el

Papiro” (*Cyperus papyro*) y las “Paragüitas” (*Cyperus alternifolius*). El personal del colegio realiza el mantenimiento de los sistemas, así como la operación de las bombas y del sistema de riego. El Sistema 1 llega a remociones de DBO₅ de 95%¹⁴, y de coliformes fecales (NMP/100 ml) de 71%. A la época de la evaluación del Sistema 1, no se evaluó el Sistema 2 por la poca producción de efluente (Miglio, 2017).

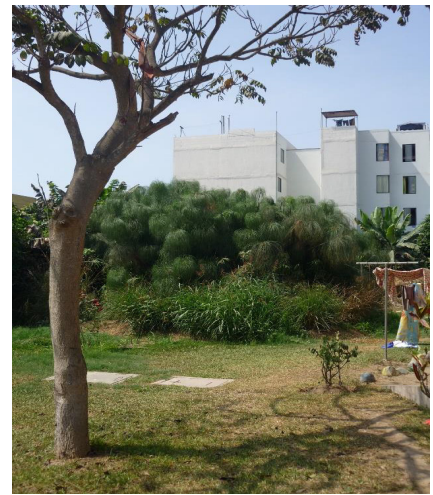
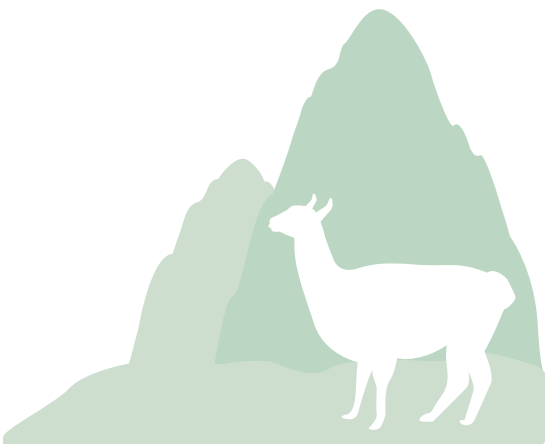


Figura 16 - El Colegio San Christoferus.
Fuente: Miglio, 2010.



14 No se obtuvieron las remociones del Sistema 2.

El tratamiento de las aguas residuales es apenas 52.7% respecto al caudal colectado, y está principalmente centrado en las áreas urbanas mayores.

LOS HC EN MÉXICO

El Sector de Agua y Saneamiento en México

Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), la prestación de los servicios de agua alcanza a la fecha 92.4% a nivel nacional; 95.1 % en las zonas urbanas y 82.9% en las zonas rurales. El servicio de alcantarillado llega a 96.3% en las zonas urbanas y 72.8% en las zonas rurales¹⁵. El tratamiento de las aguas residuales todavía es bajo, alcanzando apenas 52.7% respecto al caudal colectado, y está principalmente centrado en las áreas urbanas mayores.

El Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación de México (CONAGUA, 2015), registró el número de 2,447 plantas municipales de tratamiento en el país, las cuales proveen tratamiento a 57% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Dichas plantas revelan el empleo de diferentes procesos de tratamiento, dispuestos en distintas configuraciones, entre los cuales se encuentran los HC, como se presenta a continuación.

Ejemplos de HC en México

Al contrario de lo que se observó en los demás países de ALC, en México, el empleo de las tecnologías de HC está insertado en los procesos adoptados por las empresas operadoras de los servicios. De las 2,447 plantas de tratamiento, 219 aplican HC, tratando un caudal de 930L/s, lo que equivale a 0.8% del caudal total tratado en el país.

En la Figura 17, se presenta la distribución de estos HC, según los procesos de pretratamiento. Se observa que prevalece la combinación de fosa séptica con humedales (99). Esas combinaciones constituyen sistemas muy pequeños, con caudales hasta 5 L/s (Figura 18).

¹⁵ En México, se considera comunidades rurales aquellas con poblaciones inferiores a 2500 personas.

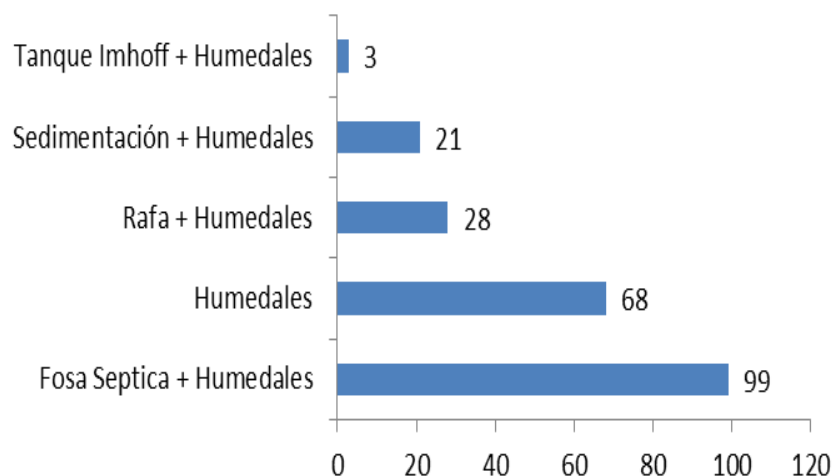


Figura 17 - HC en México, según el pretratamiento adoptado.

Fuente: Elaboración propia a partir de Conagua, 2015.

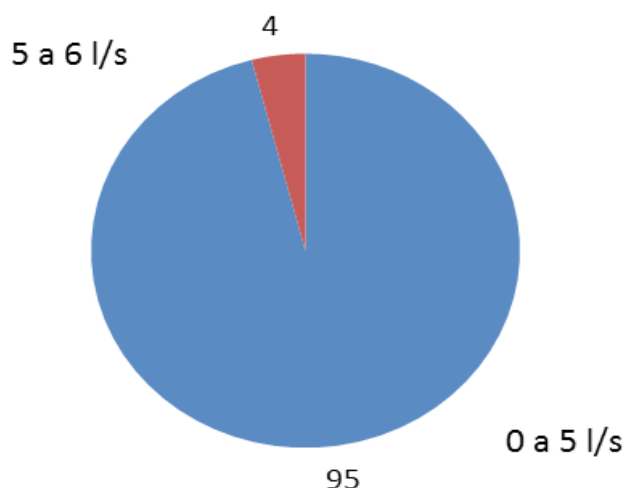


Figura 18 - Distribución de los HC precedidos sistema fosa séptica, según el caudal.

Fuente: Elaboración propia a partir de Conagua, 2015.

En las plantas que utilizan solamente los humedales (68), el caudal varía entre 1 L/s y 125L/s. Huimanguillo y Macultepec, ciudades del estado de Tabasco, tratan los mayores caudales (100 L/s y 125L/s, respectivamente)¹⁶.

¹⁶ Todavía no se tienen informaciones detalladas sobre las plantas mencionadas, sin tratamiento preliminar.

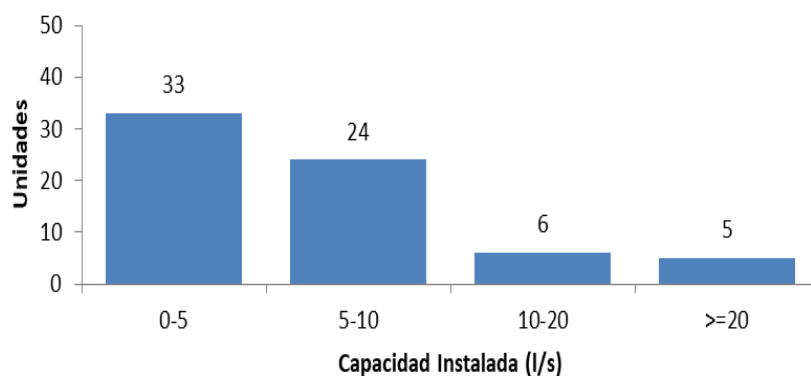


Figura 19 - Distribución de los PTARs compuesto solamente por HC, según el caudal.
Fuente: Elaboración propia a partir de Conagua, 2015.

Los HC precedidos de RAFA están presentes en 28 sistemas, conforme se observa en la Figura 20. Mientras tanto, los HC con pretratamiento de tanques de sedimentación son empleados en 21 plantas, y tienen la mayoría un caudal de hasta 5 L/s, como muestra la Figura 21.

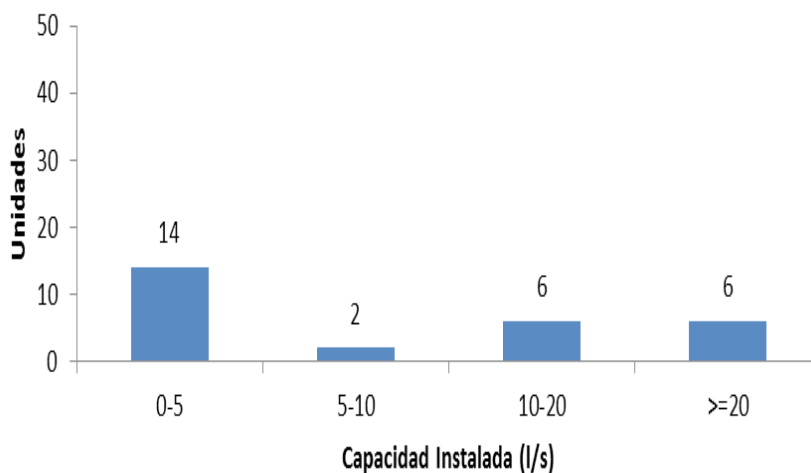


Figura 20 - Distribución de los PTARs precedidos de RAFA, según el caudal.
Fuente: Elaboración propia a partir de Conagua, 2015.

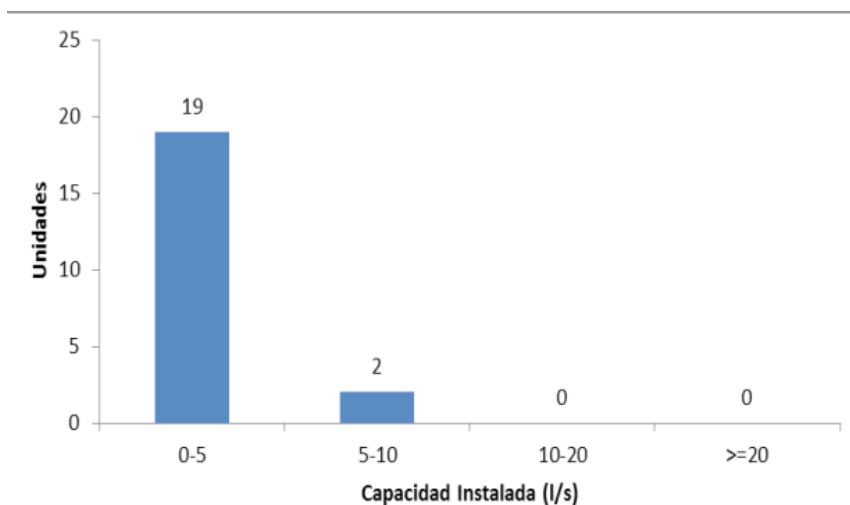
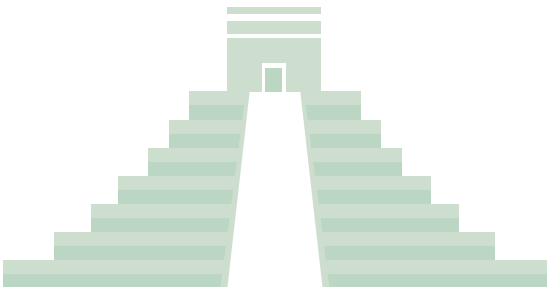


Figura 21 - Distribución de los PTARs precedidos de Tanques de sedimentación, según el caudal. Fuente: Elaboración propia a partir de Conagua, 2015.

A partir de la información recolectada, se puede considerar que los HC en México son utilizados mayormente para caudales pequeños, o sea, para el tratamiento de pequeños aglomerados urbanos. De hecho, Zurita-Martínez, 2011, afirma que los sistemas de tratamiento más empleados en las comunidades rurales son las lagunas de estabilización y los humedales artificiales, precedidos de sedimentación o fosa séptica. Aunque el uso de lagunas de estabilización esté consolidado en el país, el uso de HC es más reciente, siendo que los primeros sistemas fueron implementados después de los años 2000. Los estados con mayor número de humedales son: Oaxaca (39 plantas y 145.2L/s de caudal total) y Sinaloa (94 plantas y 158.8L/s de caudal total). No obstante, Tabasco también se destaca por el porte de sus sistemas (4 plantas con 272.2L/s total).

La experiencia con el uso de HC en el Programa de Recuperación del lago Pátzcuaro, ubicado en el estado de Michoacán, en la región sur del Altiplano Mexicano, muestra la inserción de la tecnología en un abordaje amplio de gestión de los recursos hídricos, la cual será mejor presentada en el Capítulo 5.



**En términos de
tratamiento de las
aguas residuales,
grandes avances
fueron observados en
la presente década,
pasando del 28% en el
año 2010 al 42% para el
año 2017.**

LOS HC EN COLOMBIA

El Sector de Agua y Saneamiento de Colombia

En Colombia, la cobertura de los servicios de agua en las áreas urbanas es casi universal (97.4%) y en las áreas rurales es de 73.2 %, para un total nacional de 92.4 %. Los servicios de alcantarillado urbano tienen una cobertura de 92.4 %, en las áreas rurales es de 70.1 % y el total nacional es de 88.2%. En términos de tratamiento de las aguas residuales, grandes avances fueron observados en la presente década, pasando del 28% en el año 2010 al 42% para el año 2017. Sin embargo, hay una brecha significativa a ser completada ya que más de la mitad de las aguas residuales producidas en el país se descargan a los cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento (Viceministerio de Agua y Saneamiento, 2018).

Ejemplos de HC en Colombia

La utilización de los HC por los operadores de los servicios de agua y saneamiento del país no está compilada. En el presente trabajo, se constató que las universidades ejercen el principal papel en la promoción y disseminación de la tecnología de HC. Entre ellas, se destacan la Universidad Tecnológica de Pereira y la Universidad Javeriana, con la producción de tesis y estudios, y con el desarrollo de sistemas pilotos, los cuales simulan y estimulan la construcción de sistemas en gran escala (escala real).

A continuación, se presentan algunos sistemas en escala piloto y en escala real implementados en el país.

- **Humedal en Tunja**

En la ciudad de Tunja, fue construido un humedal como sistema de tratamiento complementario de agua residual doméstica tratada previamente en un reactor anaeróbico RAFA, con un caudal promedio de 2.2 m³/día. La vegetación macrófita utilizada fue el “Junco” (*Typhadomingueis*). Se obtuvieron eficiencias de remoción de: DQO de 51.7%; DB05 de 45.1%; nitrógeno total de 15.0%; fósforo total de 31.0%; sólidos suspendidos totales de 88.6%; y sólidos totales (ST) de 22.5%. El sistema fue implantado en 1997 y siguió operando por un tiempo estimado de 2 años (Ariel, D., 2014).



- **Sistema de la Universidad Javeriana - Sistema Piloto**

En 2004, en la ciudad de Cúcuta, la Universidad Javeriana construyó un HC-SS, precedido de un tanque séptico prefabricado. El humedal trató un caudal promedio de 1.34 m³/d, con un afluente en DBO₅ de 132 mg/L y un efluente de 44 mg/L. Las remociones obtenidas fueron: DBO₅ entre 66% y 80%; sólidos suspendidos totales entre 44% y 90%₁₇ (Ariel, D., 2014).

- **Sistema La Bananera**

En 2009, en la vereda La Bananera del municipio de Pereira, fue instalado un sistema de HC-SS como tratamiento complementario para aguas residuales domésticas oriundas de La Bananera. Se dispusieron ocho humedales de 90m² construidos a escala real que trabajaban por pares y eran precedidos por un sistema de separación de aguas de exceso, un tratamiento preliminar integrado por cribado, desarenación, tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente. Los promedios de remoción observados fueron de 49.58% para DBO₅, y 45.83% para DQO. Los humedales de la planta de tratamiento estuvieron sometidos a un caudal medio de 0.27L/s. Fueron utilizadas cuatro diferentes especies de macrófitas: “Platanilla” (Musa Velutina), “Junco” (Scirpus holoschoenus), “Rascadera” o “Bore” (Alocasia macrorrhiza), y “Enea” (Thypha Latifolia).

- **Universidad Nacional de Bogotá- Prototipo HUMEDAR**

La Universidad Nacional de Bogotá ha desarrollado un prototipo de humedal artificial denominado HUMEDAR, cuya configuración comprende un reactor anaerobio seguido de un humedal conformado por macrófitas nativas. El sistema ya se encuentra en funcionamiento en diversas poblaciones e instituciones, habiéndose comprobado su funcionalidad y eficiencia en el tratamiento de aguas residuales urbanas. Sin embargo, todavía no se avanzó en la identificación de los nombres de las localidades (Ariel, D.,2014)

17 No se obtuvo información actualizada acerca de la operación del HC.

- **Humedal en el Campus UMNG – CAJICÁ -
Universidad Militar Nueva Granada - Piloto**

Fue diseñada una unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HC- FSSV) para tratamiento de aguas residuales domésticas en la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), Sede Campus, Cajicá, Cundinamarca, con fines de reutilización del agua.

Se seleccionaron cuatro especies diferentes de macrófitas, que presentan gran capacidad de absorción y depuración de aguas residuales, para ser posteriormente sembradas en el HC-FSSV: *Polygonum punctatum*, *Eichhornia crassipes*, *Limnobium laevigatum*, *Typha* spp. El diseño del HC-FSSV puede llegar a ser una opción a largo plazo para la descontaminación de aguas domésticas residuales de la UMNG-Cajicá, ya que demostró ser eficiente en la disminución de 90% de los valores obtenidos en el afluente de la PTAR en las variables temperatura, pH, conductividad, color, OD, turbidez, DQO, sólidos sedimentados, alcalinidad total, sulfatos, dureza total, fosfatos, nitratos, cloruros, DBO5, materiales pesados (como Ag, Se, Zn y Pb), coliformes totales y fecales. (Lopez, O., 2014)

- **Colegio Mayor de Antioquia - Piloto**

El HC-SS fue implementado para el tratamiento de agua residual generada por la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA). Las plantas macrófitas utilizadas fueron de las especies *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus*, autóctonas de esta región. Los humedales fueron alimentados con un caudal de 15L/día, y se instaló un tanque de almacenamiento previo al humedal simulando las características de una fosa séptica (Perez, et al, 2014).

LOS HC EN NICARAGUA

El Sector de Agua y Saneamiento en Nicaragua

En Nicaragua, los servicios de agua potable y saneamiento son suministrados, principalmente en las áreas urbanas, por la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL). En las zonas rurales, los servicios suelen ser prestados por los Comités de Agua Potable. El acceso a los servicios de abastecimiento de agua es de 84% (urbano) y 27% (rural), mientras que los servicios de alcantarillado son de 22% (urbano) y prácticamente cero en las áreas rurales. La Comisión Nacional de Agua y Saneamiento (CONAPAS) es responsable de la formulación de las políticas de agua, y el Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA) de la regulación de dichos servicios.

La baja cobertura de redes de alcantarillado indujo al apoyo de organizaciones internacionales a la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento, entre los cuales se encuentran los HC.

Ejemplos de HC en Nicaragua

El empleo de HC en Nicaragua empezó con el programa de asistencia técnica de la Universidad Nacional de Ingeniería y de la Agencia de Cooperación Austriaca para el Desarrollo. Inicialmente, fue realizado por medio del desarrollo e implementación de la tecnología del biofiltro - así se referían a los HC de flujo subsuperficial horizontal - cuya diseminación fue promovida por el Programa de Agua y Saneamiento (WSP, por su sigla en inglés) (World Bank, 2008). La experiencia resultó muy importante para la diseminación de los HC en el país, como será presentado en el Capítulo 6.



LOS HC EN OTROS PAÍSES DE ALC

Como el propósito del presente trabajo es investigar el uso de HC en ALC, de una manera general, se buscaron también referencias en Chile, Costa Rica, Paraguay, Argentina, El Salvador, y Bolivia.

En Bolivia, la mayor evidencia del uso de HC es considerado el “Proyecto Zonas Húmedas Construidas para la Depuración de Aguas Residuales”- Proyecto HUMEDAL, desarrollado por el Centro AGUA, de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), con participación de la Universidad de Barcelona, y apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional al Desarrollo (AECID). El proyecto se desarrolló en dos fases: de 2006 a 2007, y de 2007 a 2008. La Universidad de Barcelona apoyó, en los años 2009 y 2010, al monitoreo del funcionamiento de los sistemas.

Se construyó un humedal en la planta de tratamiento de aguas residuales del Municipio de Punata, mientras otros dos humedales fueron construidos, uno en la comunidad de Thaqo (Punata) y otro en predios de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, Forestales y Veterinarias (FCAPFyV) de la UMSS. La publicación Depuración de Aguas Residuales por Medio de Humedales Artificiales (Delgadillo, 2010), es uno de los resultados de la mencionada cooperación, cuyo contenido está destinado a orientar la construcción de HC.

En Argentina, se destaca la actuación de la Universidad Nacional del Litoral, en la conducción de experimentos pilotos de HC-FS para el tratamiento final de efluentes de la industria metalúrgica, los cuales fueron posteriormente implementados en escala real. (Hadad, H.R., Maine, M.A., 2016).

En El Salvador, con la asistencia técnica de la ONG PRO-VIDA y apoyo de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) se construyó un sistema de HC sobre la base de la experiencia obtenida en Nicaragua en San José Las Flores Chalatenango, para una población de 1,365 personas (World Bank, 2008).

En Chile, algunos artículos proponen el uso de HC en áreas rurales, pero todavía no se obtuvieron ejemplos prácticos.



4. TIPOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CASOS

CRITERIOS DE ENCUADRAMIENTO

Además de las dificultades encontradas en la documentación y sistematización de las experiencias y del uso real de los HC, la Tabla 5 a continuación presenta las consideraciones relevantes para la definición de una tipología necesaria para el desarrollo del estudio de caso, cuyos criterios serán llevados en cuenta para analizar en los casos estudiados. Esos criterios están basados en los casos explorados y en la literatura consultada.

Tabla 5- Consideraciones para la definición de una tipología de HC.

TEMAS Y CONSIDERACIONES A PARTIR DE LA REVISIÓN
<p>1. SOLUCIONES TECNOLÓGICAS DE HC (HC-FS; HC-FSS-V; HC-FSS-H Y HÍBRIDOS): APLICABILIDAD; EFECTIVIDAD EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES PARA LA DESCARGA SEGURA O REUTILIZACIÓN DE LOS EFLUENTES PRODUCIDOS.</p>
<ul style="list-style-type: none">● HC son recomendados para pequeños sistemas descentralizados, con poblaciones que pueden alcanzar entre 10,000 y 15,000 PE. Pero la gran mayoría de los sistemas es usado con poblaciones menores que 1,000 PE.<ul style="list-style-type: none">○ <i>Excepciones fueron encontradas en Nicaragua, donde se encuentran HC proyectados para poblaciones de hasta 15,000; en México, donde hay sistemas que tratan las aguas residuales de poblaciones mayores que 10,000; y en Brasil, específicamente en el sistema de la PTAR dos Leites, RJ, para poblaciones de hasta 140,000 personas.</i>● Prevalencia de los sistemas subsuperficiales horizontales (HC-FSS0-H) en sitios poco urbanizados, o cuando el área no es un problema.

- Tendencia notable en privilegiar el flujo vertical (HC-FSS-V) en los nuevos sistemas, por requerir menores áreas y por permitir modificaciones en los sistemas, con el propósito de promover la nitrificación y la desnitrificación.
- Los sistemas híbridos (HC-FSS-V seguidos de HC-FSS-H) son más frecuentes en experimentos conducidos por universidades y centros de investigación.
- Humedales Superficiales no parecen ser de uso frecuente en ALC.

Con respecto a la eficiencia en el tratamiento.

- Tanto el HC-FSS-V como el HC-FSS-H son muy eficientes en la remoción de materia orgánica y de sólidos, pero los HC de flujo vertical presentan límites superiores de remoción más altos (hasta 99%).
- Por otro lado, la remoción de nitrógeno no es alta en estas modalidades tradicionales de HC. Las investigaciones con el uso de las zonas de saturación en los HC-SS-V muestran que se puede ampliar las tasas de remoción de nitrógeno.
- Las tasas de eliminación del fósforo es una función directa del material del filtro y del tiempo de operación de los sistemas (pero no es significativa, en general).
- En términos de eficiencia en remoción de patógenos, los HC-FSS-H son más eficientes que los HC-FSS-V. Los sistemas que utilizan lechos de arena son más eficientes que los lechos de grava.
- La reutilización de los efluentes de HC es más frecuente en la irrigación de áreas verdes y en el cultivo de árboles frutíferos (ejemplos encontrados en México, Perú y Nicaragua).

2. ELEMENTOS PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA

- Los dos elementos principales para la realización de un análisis económico de la implementación de los HC son los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento. En el presente trabajo, se buscó identificar a ambos costos, pero no se alcanzó el éxito esperado en su identificación, en su comparación con otros sistemas de tratamiento. Con rarísimas excepciones, los costos no son presentados en las descripciones identificadas. Por otro lado, dado que estos costos son directamente dependientes de las condiciones locales de mercado (en general son utilizadas mano de obra y materiales locales), los costos identificados no sirven como referencias generales.
- Según los documentos evaluados, los costos de inversión para la construcción de los sistemas de HC no son necesariamente más bajos que los de otros sistemas de tratamiento de aguas servidas, además de no presentar economía de escala. Dependiendo del sistema, pueden incluso ser más costosos. Los costos de inversión están directamente relacionados a los costos del terreno y del medio filtrante.
- No obstante, los costos de operación y mantenimiento de los HC suelen ser mucho más bajos que los procesos de tratamiento tradicionales. Ellos son significativamente más bajos que los sistemas aeróbicos de alta carga (uso de energía, capacitación de los operadores).
- Por ello, se hace posible concluir que los costos de inversión deben ser menos importantes que aquellos asociados a la continuidad y a la sostenibilidad a largo plazo de la planta de tratamiento, que está fuertemente influenciada por la operación y mantenimiento.
- En los sistemas implementados en Nicaragua con HC horizontales, los costos variaron entre US\$50 y US\$100, incluyendo el pretratamiento. A la época, dichos valores fueron comparados a los costos de otras tecnologías de tratamiento. Los costos de operación y mantenimiento fueron estimados de US\$2 a US\$5 por persona atendida por año.

- En Chíncha, Perú, son reportados costos de inversión de US\$317 por PE, teniendo en cuenta todo el sistema proyectado para atender a 60 personas.
- La notable variabilidad de costos en cada país confirma la dificultad en establecer patrones de costos generales para los HC en ALC.

3. DESAFÍOS CLAVE EN EL DISEÑO DE SOLUCIONES CON EL USO DE HC: TÉCNICO, ECONÓMICO, BIOLÓGICO/AMBIENTAL, HIDROLÓGICO, CLIMÁTICO.

- Los estudios hidráulicos previos son esenciales en la fase de diseño de los sistemas HC. Muchas experiencias fracasaron por falta de dichas investigaciones.
- La proyección de la población futura en el diseño es crucial para evitar la sobrecarga con el tiempo. La adaptación al crecimiento de la población puede ser solucionada por medio de la construcción de sistemas modulares.
- Es importante considerar el uso de macrófitas que sean adaptadas a las condiciones locales.
- El diseño de los puntos de llegada de los afluentes, de los sistemas de distribución y de los puntos de salida de los efluentes, son igualmente determinantes de éxito del HC.
- La eficiencia de los HC-FSS-V suele ser más sensible a la distribución desigual.
- El revestimiento impermeabilizado del fondo del HC, principalmente en HC-FSS-H y HC-FSS-V, a pesar de los costos adicionales que ocasiona, se torna necesario según el nivel de la capa freática, para evitar contaminación.
- La adecuada definición, diseño y operación de las unidades de pretratamiento son factores fundamentales para el éxito de sistemas de HC (a excepción del Sistema Francés, donde el tratamiento primario ocurre en el propio HC).

4. BENEFICIOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LOS HC (INCLUYENDO REUTILIZACIÓN DE AGUA PARA USO URBANO, AGRÍCOLA Y /O RECREATIVO).

- En la mayoría de los casos identificados, los efluentes de los HC son descargados en cursos de aguas superficiales. En estos casos, las normas utilizadas son los requisitos legales para la descarga de efluentes tratados en cuerpos receptores.
- Se observó que la reutilización es aplicada principalmente en el riego de zonas verdes o en la producción de cultivos.
- También se constató el uso de cloración del agua tratada para su utilización en el riego de áreas verdes (Miglio, 2017).
- El uso de la biomasa producida en los HC (las plantas macrófitas) en la artesanía es un diferencial observado en la PTAR Pontes dos Leites, localizada en el estado de Rio de Janeiro, Brasil, y en el sistema Cuchuchuco, ubicado en México.

5. BENEFICIOS CLIMÁTICOS (REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, SEGURIDAD DEL AGUA/ADAPTACIÓN AL CLIMA, ETC.), ESTANDO INCLUIDAS LAS SINERGIAS ENTRE LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA ADAPTACIÓN AL CLIMA EN HC.

- En términos ambientales, se buscó información acerca de los impactos ambientales de los HC en términos de la Evaluación de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA, por su nombre en inglés), pues la literatura indica que tanto la operación como la construcción son factores importantes. Sin embargo, no se identificó ningún estudio de esta naturaleza en sistemas implementados en ALC.

6. RESTRICCIONES NORMATIVAS, REGULATORIAS E INSTITUCIONALES Y OPORTUNIDADES PARA LA APLICACIÓN DE HC.

- En los países investigados, no se ha detectado la existencia de legislación específica para la reglamentación del uso de los HC. La legislación existente se refiere a PTAR en general y a parámetros de descarga de efluentes en los cuerpos de agua.
 - Sin embargo, la municipalidad de Campos Novos, Santa Catarina, Brasil creó una normativa interna que estimula el uso de HC en nuevos condominios, pero su implementación no fue evaluada en este trabajo.

7. FACTORES CLAVE PARA LA IMPLEMENTACIÓN EFECTIVA DE HC EN ALC

- Un factor clave en la implementación de HC en ALC es la calidad de los proyectos. En contraste con los procesos de tratamiento tradicionales, los parámetros de proyecto de HC son muy variables y están relacionados con las condiciones en que los sistemas serán implementados: temperatura, características del efluente, disponibilidad de plantas macrófitas en la región, disponibilidad de área, pretratamiento, entre otros. Ello lleva a la dificultad en estandarizar estos parámetros, crea un espacio para el empirismo y sub-dimensionamiento de las unidades (principalmente en las plantas más antiguas). Además, favorece el uso generalizado de patrones que no siempre son adecuados al lugar.
- La necesidad de garantizar la operación y el mantenimiento continuo de los sistemas también es otro factor determinante.
 - Algunas de las iniciativas gubernamentales en Brasil, promocionadas a fines de la década de 1990, hoy se encuentran abandonadas o han sido sustituidas por otras tecnologías, principalmente por falta de mantenimiento.
- El estímulo a la alianza entre universidades, iniciativa privada y órganos públicos es un factor relevante para la expansión y sustentabilidad de los HC proyectados, construidos y operados.

- La disseminación de buenas prácticas, la creación de base de datos en internet con registro de casos, manuales de operación y mantenimiento, y guías de proyectos, también aparecen como aspectos relevantes para la disseminación de la tecnología en ALC.

Fuente: Elaboración propia a partir de las lecturas y contactos mantenidos.

PROPUESTA DE TIPOLOGÍA

A partir de la revisión realizada y de los comentarios presentados, se propone una tipología y un marco de referencia para el uso de HC en ALC, cuyos elementos son expuestos a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6 - Elementos para enmarcar las experiencias de HC en ALC.

ELEMENTOS	MARCO
CONTEXTO INSTITUCIONAL	
Apoyo de los entes públicos y prestadores de servicios al uso de la tecnología	<ul style="list-style-type: none"> ● Nicaragua - a partir de las experiencias con la cooperación austriaca y con el presente estímulo de la cooperación alemana. ● México – debido al registro de HC en el inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, realizado en el país, y también por inserir el uso de HC en el Programa de Recuperación de Cuenca Hidrológica.

ELEMENTOS	MARCO
Motivación y actividad de universidades	<ul style="list-style-type: none"> ● Colombia, México, Argentina: Gracias a la organización de la Red Panamericana Sistemas de Humedales de Tratamiento (http://humedalespanamericanos.org/), por medio de las instituciones: Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia; Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México; Universidad Nacional del Litoral, Argentina; y de la Universidad de Quebec, Canadá y la Universidad de Aarhus, Dinamarca. ● Brasil: A través de la organización del Grupo Wetlands Brasil, coordinado por la UFSC, con la creación de una plataforma web (http://gesad.ufsc.br/); de grupos de discusiones (wetlands@yahoogroups.com.br); de publicaciones semestrales de periódicos y realización de simposios nacionales. ● En Brasil, también se destacan las investigaciones conducidas por la UFMG, en el CePTS, sobre las tecnologías de saneamiento, entre las cuales se destaca el uso de HC en distintas etapas del tratamiento de aguas residuales.

ELEMENTOS	MARCO
Motivación y actividad de universidades	<ul style="list-style-type: none"> ● México: Con las iniciativas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y del Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara. ● Perú: Por las investigaciones acerca de HC en la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM). ● Bolivia: Por el Proyecto Humedal, desarrollado en el periodo de 2006 a 2010, por el Centro Agua, de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS) en conjunto con la Universidad de Barcelona (UB). ● Argentina: Con las investigaciones de la Universidad Nacional del Litoral, acerca del uso de HC para el tratamiento terciario de efluentes industriales.
Alianzas Universidades/ Prestadores de Servicios/ Iniciativa Privada	<ul style="list-style-type: none"> ● Fueron identificadas pocas iniciativas de alianzas. Brasil se destaca gracias a la creación de la empresa start up Humedales Construidos, apoyado por la UFMG, así como a la alianza Operadores de Servicios/ Universidad, y a la creación del CePTS, una cooperación de la Compañía de Agua e Saneamiento (COPASA) y la UFMG, desde 2002.

ELEMENTOS	MARCO
SOLUCIONES TECNOLÓGICAS	
HC incorporando el tratamiento primario (Sistema Francés)	<ul style="list-style-type: none"> ● Brasil: Con las experiencias desarrolladas en el CePTS ● Perú: Con el sistema tipo francés utilizado en Chíncha; y con las experiencias en desarrollo de la UNALM.
HC modificado para el tratamiento de lodos	<ul style="list-style-type: none"> ● Brasil: Por las experiencias en el sur del país, conducidas por la empresa Rotaria; y por los estudios desarrollados por el CePTS.
Configuraciones en HC-FSS-V para la minimización del área y remoción de nutrientes.	<ul style="list-style-type: none"> ● Se constató una notable tendencia de los centros de investigación en ALC, por la búsqueda de configuraciones en los sistemas verticales, con el propósito de reducción de las áreas requeridas. También predominan los estudios sobre estructuras que promuevan la nitrificación y la desnitrificación (UFSC, Brasil; UNALM, Perú)
CAPACIDAD DE LOS SISTEMAS	
Sistemas pequeños, destinados a comunidades o áreas rurales, centros públicos o privados, centros habitacionales (condominios)	<ul style="list-style-type: none"> ● Se trata de la gran mayoría de los casos identificados, que atienden a una población de hasta 1,000PE.
Sistemas de mayor porte (10,000PE) destinados a áreas urbanas más pobladas.	<ul style="list-style-type: none"> ● Sistemas identificados en Brasil, México, Nicaragua que son de mayor porte.

Fuente: Elaboración propia a partir de las lecturas y contactos mantenidos.

5. ESTUDIOS DE CASO

Teniendo como base las consideraciones anteriores y las propuestas realizadas durante el desarrollo del estudio, se eligieron los siguientes proyectos como estudios de caso para documentar (Ver Tabla 7).

Tabla 7 - Posibilidades de Estudios de Caso.

TEMA	SITIOS
CAUDAL: Uso de HC en sistemas de tratamiento de aguas residuales de mayor porte	Brasil: PTAR Ponte dos Leites, Araruama -RJ.
CONTEXTO INSTITUCIONAL: Incorporación del uso de HC por los servicios públicos de agua y saneamiento	Nicaragua: Acciones del Gobierno para estimular el uso de HC. México: El uso de HC incorporado en un Plan de Recuperación de una cuenca hidrográfica

Fuente: Elaboración propia.

BRASIL

La PTAR Ponte dos Leites, Araruama, RJ, Brasil

La ciudad de Araruama está ubicada en el Estado de Rio de Janeiro, Brasil. Es una típica ciudad turística debido a su laguna de mismo nombre (laguna híper salina, con superficie de 220 km² y volumen de agua de 636 millones de m³). Hasta el año 2004, los servicios de alcantarillado y tratamiento estaban a cargo de la municipalidad, que recolectaba parte de las aguas servidas, conduciéndolas a la Planta de Tratamiento Ponte dos Leites (PTAR Ponte dos Leites). A la época, el sistema se constituía de un conjunto de lagunas de estabilización (anaeróbicas, seguidas por facultativa y de maduración). El sistema incompleto de alcantarillado y las deficiencias en el tratamiento causaban grande impacto en la calidad de las aguas de la laguna de Araruama.

A partir de la concesión de los servicios a la iniciativa privada en 2004, los sistemas de alcantarillado y de tratamiento pasaran por numerosos cambios, con el propósito de reducir, a corto plazo, las cargas de contaminantes que aportaban a la laguna. En términos de alcantarillado, se construyó un anillo de red de drenaje pluvial alrededor de la laguna, que recibe mayormente aguas residuales durante el tiempo sin lluvias. Las aguas recolectadas son destinadas a la PTAR Ponte dos Leites, que fue reformulada.

Actualmente, la planta de tratamiento recibe un caudal de 200 L/s (correspondiendo a una población de 140,000 personas). El sistema recibe asimismo el efluente de digestores anaeróbicos que tratan residuos de fosas sépticas. Ocupa un área de 7 hectáreas y es compuesta por: tratamiento preliminar (cribado y desarenadores), tratamiento primario y secundario (lagunas de aeración y lagunas de sedimentación)¹⁸ y tratamiento terciario, con HC-FSS-V. En términos globales, la planta de tratamiento reduce en 90% la materia orgánica (DBO₅), 90 % de sólidos totales y 82 % de nitrógeno y fósforo (Vitorino, 2010).

18 Por ocasión de la visita realizada al PTAR, el sistema de aeración mecánica estaba desactivado, funcionando las unidades como lagunas facultativas).

- **Los HC en la PTAR Ponte dos Leites.**

Los sistemas de HC fueron introducidos en la planta Ponte dos Leites en el año de 2009, con el propósito de reducir las cargas de nutrientes. Las dos lagunas de sedimentación existentes fueron adaptadas para también actuar como HC- FS. Para ello, fueron introducidas plantas macrófitas *Salvina auriculata* y *Pistia stratiotes* en 40% del área (Figura 22).



Figura 22 – Macrófitas flotantes en las lagunas de sedimentación.
Fuente: Vitorino et. al., 2010.

El efluente de las dos lagunas adaptadas de sedimentación es dirigido al sistema de HC-FSS-H, compuesto de tres células con áreas de 9,000 m², 15,000m² y 16,000 m², respectivamente (Figura 23). El medio filtrante adoptado es grava con tierra. Las macrófitas son dispuestas en círculos concéntricos: alrededor son plantados *Cyperus fífanteus*; en la parte intermedia, se encuentran *Cyperus comosus*, y en la parte interna, se plantaron *Cyperus alternifolius* (Figura 23). (Franco, B.F.J, Moura, M.J.S, 2017). Cada una de las células del sistema opera de forma alternada, en ciclos de 4 a 5 días de duración, con los lechos inundados.



Figura 23 - HC-FSS-H en la PTAR dos Leites.
Fuente: Aguas de Juturnaíba, 2017

El monitoreo de las estructuras muestra remociones medias de nitrógeno total de 64% y de fósforo de 62% en el sistema HC-FS. En el sistema HC-FSS- V, los promedios de remoción fueron 47% de nitrógeno y 63% de fósforo (Vitorino, 2013)¹⁹.

¹⁹ <http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/wp-content/uploads/2013/01/>

- **La gestión de la biomasa producida.**

La PTAR genera cerca de 45 toneladas de residuos por mes (macrófitas flotantes y emergentes). Parte de estos residuos se destina al Proyecto ECOFIBRAS, donde algunas cooperativas los reciclan, produciendo productos artesanales que son vendidos en la región. No obstante, la gran mayoría es enviada a una planta de compostaje en la propia PTAR, para producir abono de calidad (Pestana, et al, 2016).

El Proyecto ECOFIBRAS utiliza podas de las macrófitas y las transforma en artesanía. Cuenta con una dirección pedagógica, que está orientada al desarrollo de la creatividad, y de la concientización socio ambiental (Figura 24).



Figura 24 - Proyecto ECOFIBRAS en la PTAR dos Leites. Fuente: Aguas de Juturnaíba.

- **El compostaje aeróbico de la biomasa.**

Los residuos orgánicos procedentes de las podas y de las cosechas constantes realizadas en las zonas de los humedales se juntan a los lodos procedentes de otras PTARs y de fosas sépticas. Luego, pasan por un proceso de compostaje, cuyo abono resultante es aprovechado en la agricultura (Figura 25).



La elección del proceso de compostaje fue precedida de un estudio económico, en el que se compararon los costos de transporte y lanzamiento de los residuos en rellenos sanitarios. Las inversiones para la planta de compostaje (cerca de US\$150,000)²⁰ y los costos operacionales anuales (alrededor de US\$30,000/año) presentan una nítida ventaja económica, cuando comparadas a los costos de lanzamiento en rellenos sanitarios (cerca de US\$370,000/año) (Pestana, et al, 2016).



Figura 25 - Compostaje de la biomasa y lodos. Fuente: Aguas de Juturnaíba.

La experiencia de la PTAR dos Leites está siendo difundida en otras ciudades, estando servida por la misma operadora de servicios de agua y alcantarillado. Como ejemplo, se puede mencionar la PTAR Caju, en la municipalidad de Silva Jardim, Rio de Janeiro, Brasil, que va a emplear el sistema de HC para la remoción de fósforo.

20 Tasa de cambio promedio de 2.1 R\$/US\$ en 2013

NICARAGUA

Acciones para estimular el uso de HC

Nicaragua se destaca en términos de uso de sistemas de HC, principalmente por la forma con que fue implementado el proceso. La primera etapa constó de estudios en sistema piloto para investigación, identificación de parámetros de proyectos, capacitación y demostración del funcionamiento del sistema. En seguida, se procedió a la implementación de sistemas en escala real, que fueron posteriormente incorporados por la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL), la cual diseminó su utilización. A mediados de la década de 1990, en cooperación con la Agencia de Desarrollo de Austria, la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua inició un programa de cooperación técnica con el propósito de estudiar e introducir en el país la tecnología de HC de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSS-H) – a la cual se referían como tecnología del biofiltro. El primer sistema (piloto) fue implementado en Masaya para atender 1,000 PE (caudal de 100m³/día), como muestra la Figura 26. El sistema, que sigue en operación, se constituye de redilas, desarenadores, tanque Imhoff y cuatro celdas de HC-FSS- H en paralelo. Entre 1997 y 2001, el sistema piloto permitió la conducción de un gran número de investigaciones: i) como plantas macrófitas fueron estudiadas la *Phragmites australis*, *Pennisetum purpureum*, *Typha domingensis*, *Phalaris arundinacea*, y *Arundo donax*; ii) para la selección de los medios de filtración, fueron investigados el uso de la grava volcánica roja y negra; y iii) como criterio de dimensionamiento, varias áreas superficiales fueron estudiadas, adoptándose valores entre 1.0 y 1.3m²/PE , con celdas de 0.9m de profundidad, y tiempo de retención de 1 a 3.5 días.



Figura 26 - El Sistema Masaya. Fuente: World Bank

Los resultados principales observados en la PTAR fueron muy optimistas: remoción de materia (DBO5) de 98% y DQO de 95%; sólidos suspendidos totales de 97%; nitrógeno total de 33%; fósforo total de 27%; y E. Coli de 2.4log. Específicamente con respecto a las remociones en los HC, los promedios fueron de 93% de DBO5 y de 85% de DQO; sólidos suspendidos totales de 86%; nitrógeno total de 33%; fósforo total de 18%; y E. Coli 1.7log. (World Bank, 2008).

En el contexto de la experiencia piloto en Masaya, fueron hechas investigaciones sobre el potencial de uso de los efluentes de la PTAR en la irrigación. Durante el periodo de 1997 a 2002, los efluentes fueron aplicados en diferentes tipos de cultivos. Los resultados identificaron la eficiencia de la irrigación de cultivos con tolerancia mediana a concentraciones de sales, siempre y cuando no tengan contacto directo con la irrigación, debido a las concentraciones de E. Coli en el efluente tratado. En consecuencia, los experimentos indicaron que el cultivo debe concentrarse en plantas altas, como las frutíferas o plantas que no son destinadas al consumo, como las ornamentales (Figura 27).



Figura 27 - Area de cultivo en Masaya . Fuente: World Bank

La planta piloto de Masaya proporcionó los parámetros para la construcción de otras unidades en Nicaragua. El éxito de la mencionada cooperación culminó con la adopción por el ENACAL, en 2001, de la tecnología como una solución promissora para el tratamiento de aguas servidas producidas por poblaciones entre 200 a 15,000 personas. Hoy, se encuentran operando los HC de las ciudades de Jalapa, San Carlos, Diriomo, Masapete, Chichigalpa, bajo la responsabilidad de ENACAL.

El Gobierno de Nicaragua, por medio de ENACAL y la Cooperación Alemana GIZ, conduce en la actualidad el Programa de Asistencia Técnica en Agua y Saneamiento (PROATAS), destinado a mejorar la operación de las PTARs de Nicaragua. En el contexto del PROATAS, se realizó una evaluación operacional de los cinco sistemas, que obtuvo los siguientes resultados: i) las áreas superficiales por PE son de 0.7 a 1.7 m²/PE; ii) las remociones de materia orgánica, en términos de DBO₅, están entre 85% y 97%, mientras los efluentes presentan concentraciones de sólidos suspendidos de 11 a 41 mg SST/L; iii) el material filtrante es predominantemente grava volcánica negra en las áreas de entrada y de salida, pero la grava volcánica roja, con granos menores, es aplicada como material filtrante propiamente; iv) la macrófita *Pennisetum purpureum* está reemplazando las demás, por la facilidad en el control y su potencial de cultivo (Figura 28). Aunque los sistemas hayan presentado buenos resultados, los principales problemas operacionales revelados incluyen la distribución inadecuada del afluente, al arrastre de lodos del pretratamiento, a la colmatación, y a la baja transferencia de oxígeno (Norori, C., 2016).



Figura 28 - El remplazo por la macrófita *Pennisetum purpureum* en Nicaragua.
Fuente: ENACAL, 2016.

Nuevos proyectos de HC-FSS-H están en preparación en las ciudades de Cardenas, Malpassillo, La Trinidad, con caudales entre 200 y 1,600m³/d (1,732 a 9,000 personas), precedidos de tanques Imhoff (Figura 29).

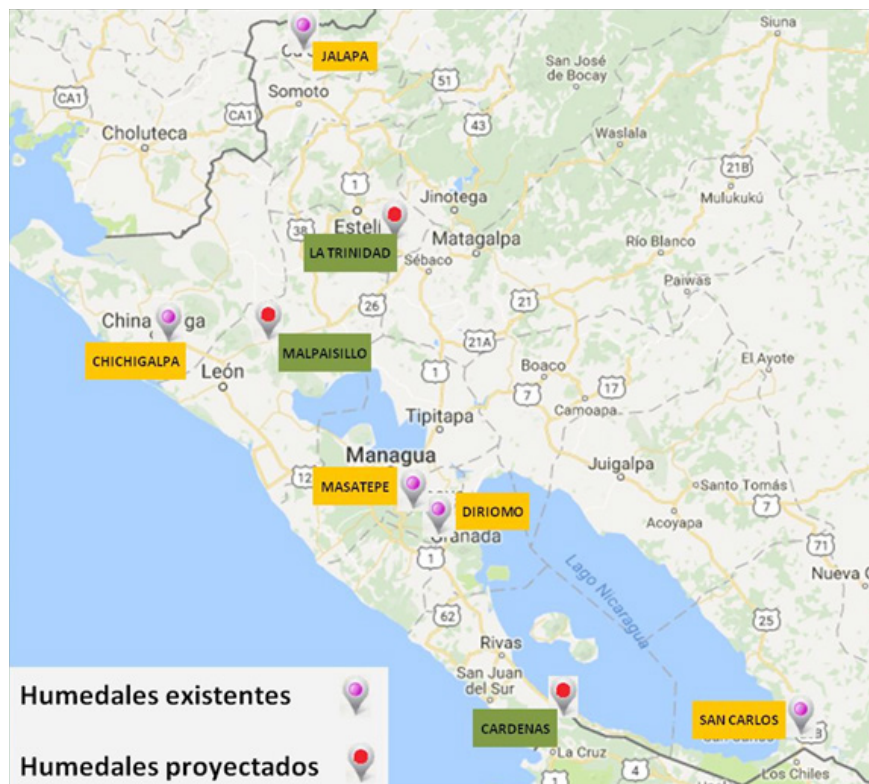


Figura 29 - Humedales en operación y proyectados para Nicaragua.
Fuente: ENACAL, 2016.

MÉXICO

El HC del Plan de Recuperación del Lago Patzcuaro, Michoacán

México se destacó, en la presente revisión de HC en ALC, gracias al gran número de sistemas registrados en el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales (CONAGUA, 2015).

Con el propósito de verificar cómo estos sistemas se introducen en un contexto de gestión de cuencas, se seleccionó como estudio de caso el empleo de HC en ciudades ubicadas en la cuenca del Lago Pátzcuaro, como parte del Programa de Recuperación del Lago Pátzcuaro.



Figura 30 - Ubicación del Lago Patzcuaro.

La cuenca del Lago de Pátzcuaro se localiza en la parte central del estado de Michoacán (Figura 30). Constituye uno de los atractivos turísticos más visitados del país, pues forma parte de un corredor de sitios arqueológicos, históricos, recreativos y culturales.

El clima de la región es templado. En términos territoriales, la cuenca del lago pertenece a los municipios de Pátzcuaro, Tzintzuntzan, Erongarícuaro y Quiroga, donde viven 120,000 personas.

Desde hace décadas, el lago ha sufrido una degradación severa, debido a la descarga de aguas residuales sin tratamiento, generadas por la población residente y turística. En 2003, inició el Programa de Recuperación del Lago de Pátzcuaro, a cargo del gobierno del estado, los principales ayuntamientos de la cuenca, la Fundación Gonzalo Río Arronte, la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Nacional Forestal y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)²¹.

El programa terminó su cuarta etapa. En la primera (2003-2004), se establecieron las bases de actuación en la cuenca (plan estratégico para la recuperación ambiental, cultura y conciencia ambiental, alternativas de bajo costo para tratar y depurar las aguas vertidas al lago, preservación de especies nativas y disposición de desechos sólidos). En el periodo 2004-2007, se promovieron los acuerdos y convenios requeridos para garantizar tanto su formalización, como la ejecución de compromisos a largo y mediano plazo. En la etapa 2008-2012, se buscó consolidar la participación ciudadana, dando a las comunidades y a las autoridades locales la priorización de los problemas. En la etapa 2013-2016, fueron realizados continuación, monitoreo y evaluación de los 179 proyectos desarrollados en el ámbito del Programa.

El uso de HC como parte del programa de recuperación del Lago Pátzcuaro se inserta en los objetivos estratégicos el de “identificar e implementar alternativas de bajo costo para tratar y depurar las aguas vertidas al lago”. En el contexto del Programa de Recuperación, fueron construidos seis HC en localidades de la cuenca, ubicados en Santa Fe de la Laguna (municipalidad de Quiroga), Cucuchucho (municipalidad de Tzintzuntzán), municipalidad de Erongarícuaro, municipalidad de San Jerónimo Purenchecuario y San Francisco Uricho. Estos HC están todavía operando. Cubren un área entre 0.2 y 1.16 ha, tratan un caudal de 43.2 a 432m³/d. El efluente de los sistemas es utilizado para la irrigación, acuacultura y producción de plantas ornamentales, y también en la producción de artesanías (García-García, 2016). A continuación, se presentan detalles de los sistemas de HC ubicados en Cucuchucho y Santa Fe de la Laguna.

21 <http://www.imta.gob.mx/programas-para-la-recuperacion-del-lago-de-patzcuaro>

- **HC en Cucuchucho.**

La PTAR de Cucuchucho fue construida para atender a una población de 1,080 personas. El sistema es compuesto de tratamiento preliminar, con rejillas y removedores de arena, tanque séptico; unidad de HC-FSS-H, laguna de maduración, unidad de HC-FSS-V y segunda laguna de maduración/laguna de piscicultura (Starkl, et al, 2010).



Figura 31 - Chuspata (*Thypha latifolia* utilizada en los HC.
<https://www.naturalista.mx/taxa/48685-Typha-latifolia>

Estudios preliminares conducidos por IMTA, identificaron las características del afluente (DBO5 340mg/L; SST 204 mg/L; nitrógeno total 76mg/L; fósforo total 19mg/L; bacteriológicos (E.Coli 2.63 x108 y Caudal de diseño de 1 L/s) (IMTA, 2008). El área total del sistema es de 3,270 m², de los cuales 2,150 m² son ocupados por HC, correspondiendo al área superficial de 2.4 de m²/PE. El medio filtrante es formado por material volcánico en cuatro camadas, cuyas dimensiones son 4-5cm, 3-4cm, 1.5-3cm, y 1 cm, totalizando 60 cm de espesura. La principal planta macrófita utilizada es la “Chuspata” (*Thypha latifolia*) una especie de junco que crece en las orillas del lago Pátzcuaro, utilizado para las artesanías en la región (Figura 31), seguida de *Scirpus validis* y *Phragmites communis* (Starkl, et al, 2010).

El monitoreo del sistema, realizado en 2008, muestra remociones de 97% de materia orgánica en términos de DBO5; nitrógeno total de 87%; fósforo total de 65%; y E. Coli de 99.92%. Todos estos parámetros cumplen con la Norma NOM001 - SEMARNAT, 1996 (IMTA, 2008).

La Figura 32 presenta el sitio del HC de Cucuchucho, antes y después de su construcción.



Figura 32 - El HC de Cucuchucho desde su construcción. Fuente: Rivas, IMTA, 2008.

- **HC en Santa Fe de la Laguna**

Los procesos de tratamiento y la estructura del sistema de HC en Santa Fe de la Laguna son semejantes a los de Cucuchucho, a pesar de sus configuraciones distintas. El sistema fue diseñado para 2,700 PE (259.2 m³/d) y comprende un tratamiento preliminar (tanque séptico) y dos módulos que funcionan en paralelo, cada uno compuesto por un HC-FSS-H, una laguna de maduración y un humedal de pulimento final, de flujo vertical. Según Starkl, et al, 2010, el área total de la PTAR es de 9,186m² y de las unidades de HC suman de 5,758m², correspondiendo a una aplicación superficial de 2.13 de m²/PE. El medio filtrante tiene la misma estructura del HC de Cucuchucho.

Después de dos años de operación, se realizó una investigación en el sitio para evaluar la eficiencia de los sistemas. Se han observado remociones de 94 % a 98 % de DBO₅, 91 % a 93 % de DQO, 93 % a 97% de sólidos suspendidos totales y 56 % a 88% de nitrógeno total. La eliminación significativa de fósforo no logró índices eficientes en este estudio (25-52%) (Rivas, et al, 2011).



Figura 33 - El HC de Santa Fe, antes y después de su construcción. Fuente: IMTA, 2008.

Características del proceso de implantación de HC en la cuenca del Lago Pátzcuaro

La participación de toda la población local desde la elección del sitio de las PTARs, de la construcción hasta el funcionamiento de los sistemas fue una característica que contribuyó considerablemente para el éxito del uso de la tecnología. Talleres, reuniones, discusiones y visitas a los sistemas en sus distintas etapas de construcción fueron fundamentales para el éxito de la iniciativa. También fueron importantes para este proceso la identificación, desde el principio, de las posibilidades de generación de ingresos económicos para la población, no solamente con el uso de trabajadores locales en la fase de construcción y operación de los sistemas, como también en la generación de ingresos económicos. Este aspecto es evidente en la acuacultura que utiliza el efluente para la irrigación y en la producción de especies de plantas macrófitas para aprovechamiento comercial, para obtener fibras y flores. (Figuras 34 y 35).



Figura 34 - Beneficios económicos de las PTARs. Fuente: IMTA.



Figura 35 –Subproductos para aprovechamiento comercial. Fuente: IMTA.

Los sistemas muestran ventajas ambientales, sociales y económicas, como la reducción de los contaminantes vertidos en el lago, la generación de empleos y posibilidades de mercado, la mejora visual y estética de la región, la capacitación de la población local, entre otros.

Por otro lado, evaluaciones recientes muestran que los sistemas presentan fragilidades en su sostenibilidad a medio plazo. Al analizar la evolución del desempeño de cuatro HC en la cuenca del Lago Patzcuaro (Erongarícuaro, Cucuchucho, Santa Fe de la Laguna y San Jerónimo Purenchécuaro), con 35 operaciones de monitoreo en cada uno de los humedales, se concluyó que, aunque tengan eficiencia en las remociones, todos los humedales estudiados presentan problemas de mantenimiento y operación (Chaves, et al, 2016). En general, ninguno de ellos cumple totalmente con la norma de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, SEMARNAT (NOM -001 - SEMANART - 1996), respecto a la calidad de los efluentes lanzados en el agua del lago.

Dicha constatación es confirmada por Stark, et al, 2010, que identifica los problemas operacionales y de mantenimiento como las principales restricciones al buen desempeño de los sistemas y al compromiso de la operación en el futuro. Entre ellos, encontramos: obstrucciones frecuentes en la llegada de los efluentes debido a la presencia de materiales inadecuados (plásticos, garrafas, residuos urbanos y otros materiales); gran aporte de arena, debido a que el sistema recibe aguas pluviales, y los residuos no son enteramente removidos en el tratamiento preliminar. Estos hallazgos confirman que los bajos costos atribuidos a la operación y al mantenimiento de HC, muchas veces, son confundidos con la falta de obligación en invertir en la manutención de los sistemas, lo que facilita que las estructuras se vuelvan inoperantes y favorece el rechazo a su implementación.

6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

ACCESO Y DISEMINACIÓN DE INFORMACIÓN

La ausencia de bases de datos sobre los sistemas de HC en los organismos proveedores de los servicios, instituciones de investigación y universidades, conteniendo informaciones sistematizadas y registros de las experiencias, fue una dificultad en el desarrollo del presente trabajo. Como, en general, los sistemas son pequeños y descentralizados, la documentación está dispersa y es de difícil acceso.

- Este tema fue identificado en las reuniones y contactos personales realizados como un impedimento a la evaluación y a la diseminación de la tecnología.
- Además de la falta de registros, normalmente las empresas prestadoras de servicios no se proponen a diseminar información del proyecto, de su operación y mantenimiento de forma detallada, siguiendo criterios y metodología que permitan evaluaciones consistentes.
- La información insuficiente de los parámetros de diseño, especialmente en sistemas a escala real, impide un análisis comparativo entre los sistemas estudiados.
- Las universidades y centros de investigaciones son los principales agentes de diseminación de la tecnología, pero sus artículos suelen tratar de ciertos elementos específicos de la investigación, y muchas veces se refieren apenas a sistemas piloto o a un período específico de investigación de un determinado HC.

CAPACIDAD DE LOS SISTEMAS

- En todos los países del estudio, los HC son recomendados y utilizados como una forma de tratamiento descentralizado para pequeños sistemas. La gran mayoría de los sistemas de tratamiento son proyectados para un caudal de hasta 5L/s (cerca de 2500 personas) y en casi todos los ejemplos identificados, la población atendida es de hasta 1,000 personas, con excepción de algunos sistemas encontrados en México (caudales hasta 125 L/s), Nicaragua (sistemas con 20 L/s) y Brasil (caudales hasta 200 L/s).

A pesar del uso en sistemas pequeños, los HC pueden ser utilizados en plantas de tratamiento mayores de manera complementaria a los procesos donde se observa sobrecargada, o para promover el pulimiento final (ejemplo, la PTAR dos Leites).

CONFIGURACIONES TECNOLÓGICAS

- Respecto a las modalidades de HC:
 - *Se encontraron pocos ejemplos de HC – FS, pero buenos ejemplos en el pulimiento final de los efluentes.*
 - *Existió una tendencia de uso de HC- FSS-H en los primeros sistemas implementados en ALC. Muchos de estos sistemas todavía están en operación y presentan buenas remociones de contaminantes. Por sus ventajas en términos de simplicidad de operación, son sistemas cuya implementación puede ser estimulada en regiones de ALC, donde el área no es un problema.*
 - *La tendencia actual es el uso de HC-FSS-V en los nuevos sistemas, debido a los menores requerimientos de área y a la mayor flexibilidad para promover la remoción de nitrógeno (nitrificación y desnitrificación).*
 - *A pesar de las ventajas en el uso del Sistema Francés, que incorpora el tratamiento primario al secundario, su uso es todavía limitado en ALC.*
 - *La utilización de plantas macrófitas en el proceso de mineralización de lodos (una variación de la tecnología de HC) gana espacio en Brasil, pero en el este trabajo no se identificaron experiencias en otros países.*

LA EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS A LARGO PLAZO

- La eficiencia de los sistemas de HC está directamente relacionada a dos factores clave: A la calidad de los proyectos y a la garantía de la operación y mantenimiento continuo de las unidades.
 - *Dado que los parámetros de proyecto son directamente afectados por las características y condiciones locales, tales como temperatura, área, disponibilidad de plantas macrófitas y del medio filtrante en la región, se debe evitar el uso generalizado de patrones en los diseños, lo que va a afectar directamente la eficiencia del sistema.*

- *El hecho de que los sistemas HC son fáciles de operar y de mantener muchas veces lleva a que ese aspecto sea considerado irrelevante al largo del tiempo, conduciendo a reducciones graduales en la eficiencia. Es necesario garantizar la operación y el mantenimiento continuo de los sistemas implementados.*

LOS ACTORES Y SUS ARTICULACIONES

- *Las universidades y centros de investigación son los principales promotores y diseminadores de los HC. Se percibe un nítido movimiento de organización y articulación entre ellos, así como una creciente producción científica acerca del tema de los HC.*
- *Los gobiernos de los países, en general, reconocen la importancia y el potencial de uso de los HC. Sin embargo, sus incentivos todavía son muy débiles y dispersos.*
 - *La falta de apoyo y soporte por parte de los gobiernos, en sus diferentes niveles, al uso de la tecnología, es uno de los puntos considerados como impeditivos para su diseminación.*
- *Los proveedores de los servicios municipales de tratamiento de aguas servidas, en su mayoría, no son entusiastas del uso de la tecnología. Probablemente, ello se explique por las malas experiencias en el pasado o por falta de conocimiento más profundizado.*
- **Las comunidades beneficiadas:**
 - *Registros comprueban que la participación de la población, desde la etapa inicial del diseño e implantación, es un factor importante para la sostenibilidad de la tecnología. La posibilidad de generar ganancias financieras con el uso de dichos sistemas y el apoyo para que ello se torne viable son aspectos relevantes para la motivación positiva.*
- **La iniciativa privada:**
 - *Como los HC son en general sistemas de pequeño tamaño, la inserción de la iniciativa privada en la elaboración de los proyectos, construcción de los sistemas e implementación, ha creado buenas oportunidades para este segmento, seguidas de buenos resultados. En general, las empresas privadas actúan en condominios privados, escuelas y hoteles, pero tienen poco acceso a los servicios públicos municipales.*

- La articulación entre los sectores
 - *Hay un gran espacio de articulación entre las universidades y centros de investigaciones con los gobiernos y con las empresas prestadoras de los servicios municipales. La transición entre las investigaciones académicas y la implementación de los sistemas reales es todavía muy débil en la mayoría de los países considerados en el presente trabajo.*

FACTORES QUE IMPIDEN LA DISEMINACIÓN DE HC EN ALC

Entre los factores principales que interfieren en la diseminación de los HC en ALC se destacan:

- Los malos ejemplos en el pasado que se debieron a proyectos inadecuados, a la utilización de materiales impropios, bien como a la ausencia de operación y mantenimiento. Estas experiencias negativas han creado un descrédito respecto al uso de HC en ALC, y favorecieron cierto rechazo por parte de las empresas prestadoras de servicios, las cuales dejaron de considerar la tecnología como una alternativa de tratamiento descentralizado, en sus estudios.
- La ocupación de grandes áreas genera competencia con el uso de otras tecnologías más compactas, aunque ellas tengan mayores gastos de personal y energía eléctrica, lo que restringe su aplicación en áreas muy urbanizadas.
- Se debe reconocer que, dado los grandes déficits en alcantarillado y tratamiento de aguas servidas en las ciudades de ALC, el foco de los gobiernos se concentra principalmente en los grandes núcleos urbanos y los grandes sistemas centralizados son considerados prioritarios. Por tratarse de una tecnología aplicable a pequeños sistemas descentralizados, la aplicación de HC todavía no es debidamente estimulada.
- Se observa una falta de conocimiento sobre las nuevas posibilidades de uso de HC, introducidas en el ciclo de tratamiento. Estas nuevas perspectivas, como el uso del Sistema Francés, las configuraciones para remoción de nitrógeno y el uso en proceso de mineralización de lodos aún no se encuentran difundidas en ALC.

Las sugerencias ofrecidas para la diseminación del uso de HC en ALC incluyen:

- Construir y alimentar un repositorio de experiencias de HC en ALC, diseñado con el propósito de recibir y sistematizar: i) información de PTARs en escala real; ii) documentos académicos; iii) casos exitosos; y iv) manuales y guías, poniéndolos a la disposición de la sociedad.
- Crear mecanismos de orientación a diseñadores y prestadores de servicios acerca de las exigencias específicas de proyectos adaptados a pequeñas ciudades y comunidades, incluyendo entre ellos los HC.
- Generar mecanismos de diseminación de nuevas tecnologías que utilizan HC, ya consolidadas en otros países y con potencial de uso en ALC, como las mencionadas en los párrafos anteriores.
- Insertar y estimular el uso de HC en plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales como tratamiento complementario, como ya ocurrió en algunos países mencionados en la presente revisión.
- Promover la creación de estructuras locales para la operación y el mantenimiento de HC.
- Específicamente en el caso de Bancos de Desarrollo, como el BID, estimular la inserción de tecnologías de HC en los estudios de concepción de sus operaciones de préstamo, con objetivo de atender a localidades menores operadas por la empresa, o para la combinación de dicha tecnología con sistemas existentes de mayor porte.



7. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, H.H.B., 2015, Avaliação de um Sistema de Tratamento de Águas Residuárias por Wetland Construído com Etapa Aerada, Proceedings: 5th International Workshop - Advances in Cleaner Production, São Paulo. http://www.advancesincleanerproduction.net/fifth/files/sessoes/4B/4/andrade_h_h_b_academic.pdf

Ariel, D.A.C., 2014, Tratamiento de agua residual a través de humedales, Proceedings: V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, <http://www.ustatunja.edu.co/cong-civil/index.php/memorias/memorias2014>

Beda, J.N., 2011, Determinação do coeficiente de decaimento bacteriano em wetland - alagado construído, Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Hidráulica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15981>

Begosso, L., 2009, Determinação de parâmetros de projeto e critérios para dimensionamento e configuração de Wetlands Construídas para tratamento de água cinza, Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. <http://repositorio.cbc.ufms.br:8080/jspui/handle/123456789/1498>

Bidone R.F., 2008, Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: estudo de caso - Central de Resíduos do Recreio, em Minas do Leão/RS, Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-28052008-110000/pt-br.php>

Brix, H., et al, 2007, Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn?, Water Science and Technology, Vol 56, Agosto. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17802839>

Calijuri, M.L., et al, 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, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, Vol. 14, No. 3, Julio/Septiembre. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522009000300016

Cavallini, J.C.M., 2011, Estudio de opciones de tratamiento y reuso de aguas residuales en Lima metropolitana, University of Stuttgart. http://www.lima-water.de/documents/jmoscoso_informe.pdf> Accedido en: 07/07/2017.

Chaves, et al, 2016, Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Primera Edición, Argentina. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/basic-html/page1.html

Comisión Nacional del Agua, 2015, Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. www.gob.mx/conagua

Costa, J.F., 2013, Remoção de Poluentes em um sistema de alagados construídos atuando como póstratamento de efluente de reator UASB e de filtro biológico percolador, Tesis (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-9L5QC2>

Cuervo, D.P., 2010, Humedales construidos, Revista Construcción Sostenible, Colombia, Ed. 2, Junio. http://www.construdata.com/Bancomedios/Documentos%20PDF/notas_de_la_semana/Sostenible2_pags56a61.pdf

Dallas, S., et al, 2004, Reedbeds for greywater treatment-case study in Santa Elena-Monteverde, Costa Rica, Central America, Ecological Engineering, Vol. 23, Julio. <https://www.researchgate.net/publication/222167387>

Delgadillo, O., et al, 2010, Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales Artificiales, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. <http://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2011, Technology review of constructed wetlands - Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. https://ocw.un-ihe.org/pluginfile.php/643/mod_folder/content/0/Technology_Review_Wetlands.pdf

Dotro, G., et al, 2017, Treatment Wetlands, Biological Wastewater Treatment Series, Vol. 7. <https://www.iwapublishing.com/books/9781780408767/treatment-wetlands>

Franco, B.F.J., Moura, M.J.S., 2017, Emprego de Wetlands para reuso de águas cinza em um condomínio residencial, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Fluminense. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/123366>

García-García, P.L., et al, 2016, Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico?, IWA Publishing. <http://wp.iwaponline.com/content/18/3/654>

GESAD, UFSC, 2017, Wetlands Construídos: Experiências GESAD. <http://gesad.ufsc.br>

Gontijo, C.A.V., Vitorino, F.A., 2012, Uma ETE Sustentável. Práticas Sustentáveis em Processos de Tratamento de Esgotos, Proceedings: 4º ENA – Encontro Nacional das Águas, São Paulo. <http://abconsindcon.com.br>

Gobierno de Brasil, 2017, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. http://www.epsjv.fiocruz.br/upload/Diagnostico_AE2014.pdf

Gobierno de Perú, 2017, Decreto Supremo N° 007-2017- VIVIENDA. <https://www.ecolex.org/fr/details/legislation/decreto-supremo-no-007-2017-vivienda-politica-nacional-de-saneamiento-lex-faoc171776/>

Gutiérrez, A.A., 2010, Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial, Tesis (Magíster Scientiae en Ecotecnología) - Universidad Tecnológica de Pereira. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2115/333918A779.pdf;sequence=1>

Hadad, H.R., Maine, M.A., 2016, Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Primera Edición, Argentina. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/basic-html/page1.html

Hernández, A.R., Cuervo, D.P., 2014, Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua, Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Primera Edición, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/basic-html/page1.html

Hoffmann, H., et al, 2013, Combinação de tratamento primário e secundário de esgoto doméstico em sistema de filtros plantados como solução descentralizado de alta eficiência e baixo custo operacional, Proceedings: 1º Simpósio brasileiro sobre aplicação de wetlands construídos no tratamento de águas residuárias, Florianópolis.

Hoffmann, H., et al, 2011, Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas, GIZ. <http://www.susana.org/en/resources/library/details/1235>

Hoffmann, H., et al, 2016, Experiences with vertical flow constructed wetland in South America, Proceedings: IWA Specialist Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, September. http://brasil.rotaria.net/wp-content/uploads/2017/08/IWA-2016-wetland_vertical_experiences.pdf

Sockholm Environment Institute, 2010, Experiencias en Saneamiento Integral en Nicaragua. http://www.ecosanres.org/pdf_files/EXPERIENCIAS_DE_SANEAMIENTO_INTEGRAL_EN_NICARAGUA.pdf

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2013, Experiencia exitosa del uso de humedales de tratamiento para la protección de la calidad del agua del lago de Pátzcuaro. http://www.utzmig.edu.mx/UT/documentos/Experiencia_Cucuchucho.pdf

Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2016, Formas de Acceso al Agua y Saneamiento Básico, Perú. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_agua.pdf

Lovera, D.; Quipuzco, L.U., Laureano, L.V, Becerra, C.M, Nadezhda, D., Valencia, P., 2006, Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash - Perú, usando tecnologías de humedales artificiales, Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, Vol. 9, No 18.

López, O.J.B., 2014, Diseño de unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales domésticas en el campus UMNG-Cajicá con fines de reúso, Tesis (Maestría en Ciencias Ambientales) - Universidad Jorge Tadeo Lozano. <http://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/1749?show=full>

Machado, A.I. et al, 2017, Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil, Journal of Environmental Management, Vol. 187. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716308921>

Maciaszek, E., et al, 2002, Wastewater treatment using artificial wetlands, Proceedings: 28th WEDC Conference SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL SANITATION AND WATER SERVICES, India. <http://wedc.lboro.ac.uk/resources/conference/28/Maciaszek.pdf>

Maine, M.A., et al, 2016, Humedales contruidos para tratamiento de efluentes de industrias metalúrgicas en Santa Fe, Argentina, Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. VII, No. 1, Enero/Febrero. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100005

Massoud, M.A., et al 2009, Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries, Journal of Environmental Management, Vol. 90. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18701206>

Melbourne Water, 2010, Constructed Wetlands Guidelines. <https://www.melbournewater.com.au>

Miglio Toledo, R., 2017 Humedales Contruidos para la Depuración de Aguas Residuales, por publicarse.

MIGLIO, R., 2010, Reúso de efluentes de un sistema de humedales artificiales, Trujillo, Perú, Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). <http://www.susana.org/en/resources/library/details/754>

Monteiro, V.R.C., 2014, Wetlands construídos empregados no tratamento descentralizado de águas cinzas residencial e de escritório, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/123366>

Morvannou, A., et al, 2015, Treatment performances of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years, Water Science and Technology, IWA Publishing, Vol 71 (9), pp.1333-1339.

Noriri, C., et al, 2016, El Potencial de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en Nicaragua desde la Perspectiva de Utilidad Pública, Proceedings: XXX Congreso Centroamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental In Memoriam Del Ing. Federico Guardia Conte, Panama.

Pelissari, C., et al, 2012, Comportamento Inicial de wetlands construídos empregados no tratamento de efluentes da bovinocultura de leite, Engenharia Ambiental, Vol. 9, No. 2, Abril/Junio. <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=912>

Pérez, J.C.B., 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, Revista Internacional de Contaminación Ambiental. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37031522004>

Pestana, C.S., et al, 2016, Logística Reversa Aplicada a Resíduos de ETEcomProcessodeZonadeRaízes(ConstructedWetlands), Prêmio FITJAN de Ação Ambiental. <http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/wp-content/blogs.dir/6/files/2016/06/Artigo-Firjan.pdf>

Platzer, C., Hoffmann, H., 2007, ECOSAN - Experiências práticas da aplicação do ponto de vista de uma empresa privada de Saneamento, Proceedings: International Conference on Sustainable Sanitation: Foods and Water Security for Latin America. <http://www.sswm.info/library/7568>

Reyes, C.P., Vidal, G., 2007, Humedales construidos: una alternativa a considerar para el tratamiento de aguas residuales, Tecnología del Agua, Vol, 288, Septiembre. <https://www.researchgate.net/publication/256536707>

Rivas, A., et al, 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. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22097088>

Rodrigues, E.B., et al, 2015, Zona de Raízes: Experiência Vivenciada numa Escola Rural no Município de Campos Novos/SC, Revista Eng. Constr. Civ., Curitiba - PR, Vol. 2, No. 2, p. 34-44, Julio/Diciembre. <https://periodicos.utfpr.edu.br/recc/article/download/6641/4287>

Ruiz, L.O., 2010, Servicios de agua potable y saneamiento en el Perú: beneficios potenciales y determinantes de éxito, Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. <http://www.cepal.org/es/publicaciones>

Sabei, T.R., 2015, A inserção da educação ambiental não formal no processo de implantação de saneamento ambiental na comunidade rural Colônia Mergulhão, São José dos Pinhais, Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1806>

Salati, E., 1999, Wetland projects developed in Brazil, Water Science and Technology, Vol. 40, No. 3. <http://hdl.handle.net/11449/65865>

Sezerino, P.H., et al, 2015, Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais, Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 20, No. 1, Enero/Marzo. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522015000100151&script=sci_abstract&tlng=pt

Sezerino, P.H., 2006, Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical, Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/103142/225786.pdf?sequence=1>

Silva Junior, E.D., 2013, Tratamento do lodo de resíduos de fossas e tanques sépticos em um sistema de alagado construído, Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás. <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3447>

Sperling, M.V., 2016, Urban Wastewater Treatment in Brazil, Inter-American Development Bank, Agosto. <https://publications.iadb.org/handle/11319/7783>

Starkl, M., et al, Water quality improvements through constructed wetlands: a case study from Mexico, World Water Week. https://www.researchgate.net/publication/266632053_Water_Quality_Improvements_through_Constructed_Wetlands_A_Case_Study_in_Mexico

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), 2015, Diagnóstico de las plantas de tratamiento de Aguas Residuales en el Ámbito de Operación de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento, Primera Edición, Septiembre. <http://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>

Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA), 2011, Reúso de efluentes de un sistema de humedales artificiales, Trujillo, Perú, Marzo. <http://www.susana.org/en/resources/library/details/754>

U.S. EPA, 1993, Guía Para el Diseño Y Construcción de un Humedal Construido con Flujos Subsuperficiales. <https://nepis.epa.gov>

UN-HABITAT, 2008, Constructed Wetlands Manual, Kathmandu. <https://unhabitat.org/books/constructed-wetlands-manual/>

Urban Pollution Research Centre, 2003, Guidance Manual for Constructed Wetlands, Londres: Environment Agency. <https://www.gov.uk/government/publications/guidance-manual-for-constructed-wetlands>

Vera, I., et al, 2016, Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones, Tecnol. cienc. agua. Vol.7, No.3, Mayo/Junio. <http://www.scielo.org.mx>

Viceministro de Agua y Saneamiento Básico de Colombia, Plan Director de Agua y Saneamiento Básico – Vision Estrategia 2018 -2030, Gobierno de Colombia. www.minvivienda.gov.co.

Vitorino, F.A., et al, 2013, Wetlands - Processos Naturais para Remoção de Nutrientes em Estações de Tratamento de Esgotos. <http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/wp-content/uploads/2013/01/Wetland-Juturnaiba-.pdf>

Vitorino, F.A., 2010, Processos Naturais de Tratamento Terciário de Esgotos Sanitários – Wetlands, Proceedings: 2º ENA - Encontro Nacional das Águas, Rio de Janeiro. <http://www.abconsindcon.com.br>

Vymazal, J., 2008, Constructed wetlands for wastewater treatment: A review, Proceedings: Taal 2007: The 12th World Lake Conference, India. https://www.researchgate.net/publication/228407635_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment_A_Review

Vymazal, J., 2010, Constructed wetlands for wastewater treatment: A review, Water Vol. 2, No. 3, Julio. <http://www.mdpi.com/2073-4441/2/3/530>

World Bank, 2008, Constructed Wetlands: A promising wastewater treatment system for small localities, Water and Sanitation Program, Washington, DC. <http://documents.worldbank.org/curated/pt/224061468046774032>

Wu, H., et al, 2015, A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation, Bioresource Technology, Vol. 175, Enero. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414014904>

Zhang, D., 2015, et al, Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries-a review of recent developments (2000-2013), Journal of Environmental Sciences, Vol. 30, Abril. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714001509>

Zurita-Martínez, F., et al, 2011, El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México, Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, No. 1, Julio/Agosto, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Estado de México. <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263120987011.pdf>

