RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Bairon Josue Londoño Torrado Adrian Felipe Arenas Garnica
FACULTAD	**Facultad de Ingenierías**
PLAN DE ESTUDIOS	**Ingeniería Civil**
DIRECTOR	Dibrey Paola Quintero Criado
CODIRECTOR (si aplica)	No aplica
TÍTULO DE LA TESIS	La biotecnología como alternativa sostenible al tratamiento de aguas servidas domesticas en Ocaña, Norte de Santander
TITULO EN INGLES	Biotechnology as a sustainable alternative to the treatment of domestic wastewater in Ocaña, Norte de Santander

RESUMEN
(70 palabras)

Este estudio analiza la biotecnología como alternativa sostenible para tratar aguas residuales domésticas en Ocaña. Mediante revisión técnica, casos internacionales y evaluación multicriterio, se identificó que los sistemas combinados anaerobios (biodigestores o UASB) con humedales artificiales híbridos son la opción más viable por su alta eficiencia, bajo costo, adaptabilidad climática y cumplimiento normativo.

RESUMEN EN INGLES

This study analyzes biotechnology as a sustainable alternative for treating domestic wastewater in Ocaña. Through technical review, international case studies, and multi-criteria evaluation, it was identified that combined anaerobic systems (biodigesters or UASB) with hybrid constructed wetlands are the most viable option due to their high efficiency, low cost, climate adaptability, and regulatory compliance.

PALABRAS CLAVES	Biotecnología, tratamiento de aguas, microorganismos, remoción de contaminantes, biorreactores, biorremediación
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Construction systems, Efficiency, Execution times, Industrialized construction, Quality, Social housing, Sustainability

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 181	PLANOS:	ILUSTRACIONES:39	CD-ROM:

La biotecnología como alternativa sostenible al tratamiento de aguas servidas domesticas en Ocaña, Norte de Santander

Bairon Josue Londoño Torrado

Adrian Felipe Arenas Garnica

Facultad de ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Ing. Dibrey Paola Quintero Criado

6 de mayo de 2026

Tabla de Contenido

Introducción 15

Capítulo 1: Introducción de la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales 17

1.1. Contexto internacional de la biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales .. 17

1.1.1.Principales biotecnologías aplicada 17

1.1.2. Implementación internacional y casos relevantes 35

1.1.3. Investigación e Innovaciones Biotecnológicas en Colombia para el Tratamiento de Aguas Residuales 50

1.2. Normatividad de los Tratamientos de las aguas residuales domesticas (A.R. D) 64

1.1.1. Línea de tiempo legal en Colombia 65

1.1.2. Normativa a nivel internacional 66

1.3. Caracterización del sistema de aguas servidas y contexto socio ambiental de Ocaña 68

1.3.1. Descripción del sistema de aguas residuales 68

1.3.2 Caracterización del Sistema de Alcantarillado 69

1.3.3. Comportamiento hidráulico y desafíos operativos. 73

1.3.4. Infraestructura y estado de la red. 74

1.3.5 Tendencias de modernización del sistema 76

1.3.6 Inventario de puntos de vertimiento 77

1.3.7. Impactos ambientales en cuerpos hídricos 78

1.3.8. Costos de implementación y operación 81

1.3.9. Gestión de lodos y control de olores 82

Capítulo 2. Análisis bibliométrico 84

2.1. Introducción 84

2.2. Fuentes más relevantes 86

2.3. Autores más relevantes 87

2.3. Afiliaciones más importantes 88

2.4. Nube de palabras 89

2.5. Mapa de arboles 90

2.6 Documentos Más Citados 91

2.7 Red de Concurrencia 92

2.8 Producción Científica por país 93

3. Experiencia autores y estudios del caso 95

3.1 Encuestas para identificar fortalezas en el tema en los profesionales de Ocaña 95

3.2. Revisión de estudios de casos internacionales y su aplicabilidad 117

3.2.1. Caso de Chile: Sistema Tohá y Humedales artificiales 117

3.2.2. Caso China: Sistemas descentralizados (FBBR y humedales artificiales) 118

3.2.3. Caso Europa (Países Bajos y Alemania): Tecnologías avanzadas y Biofactorías 119

3.2.4. Cuadro Comparativo 121

3.3. Estudios previos en Colombia sobre biotecnologías aplicadas al tratamiento de aguas

domesticas 123

3.3.1. Sistemas Anaerobios para el Tratamiento Descentralizado 124

3.3.2. Uso de microorganismos autóctonos y biorremediación..... 124

3.3.3. Humedales artificiales híbridos 125

3.3.4. Tecnologías combinadas y Tecnologías emergentes en plantas urbanas 126

3.3.5. Cuadro comparativo 127

3.4. Contextualización en el marco normativo 131

3.4.1. La PTAR Salitre como caso de referencia..... 131

3.4.2. Cumplimiento normativo y desafíos..... 132

3.4.3. Desafíos identificados en el caso de la PTAR Salitre 134

3.4.4. Tabla de aplicabilidad normativa para Ocaña 134

3.5. Aportes de autores clave en el campo del tratamiento biotecnológico..... 137

3.5.1. Bruce E. Rittmann (EE.UU.) 137

3.5.2. Mark C. M. van Loosdrecht (Países Bajos)..... 137

3.5.3. Damien J. Batstone (Australia)..... 138

3.5.4. Mogens Henze (Dinamarca)..... 138

3.5.5. George A. Ekama (Sudáfrica) 138

3.5.6. Peter Wilderer (Alemania)..... 139

3.5.7. Thomas P. Curtis (Reino Unido) 139

3.5.8. Perry L. McCarty (EE.UU.)..... 139

Capítulo 4: Criterios y Propuesta de Implementación para Ocaña 141

4.1. Aportes de la Biotecnología al Contexto Específico de Ocaña 141

4.1.2. Síntesis 144

4.2. Criterios Técnicos para la Selección de Tecnologías Biotecnológicas Prioritarias 144

4.2.1. Definición de Criterios de Selección 145

4.2.2. Evaluación multicriterio de tecnologías 146

4.2.3. Análisis de resultados 148

4.3. Criterios Normativos y de Sostenibilidad para la Implementación 149

4.3.1. Criterios Normativos Fundamentales 149

4.3.2. Criterios de Sostenibilidad 153

4.3.3. Tabla de Verificación Normativa y de Sostenibilidad para Ocaña 155

4.3.4. Análisis Técnico integrado 158

4.4. Evaluación Multicriterio y Selección de Alternativas Priorizadas para Ocaña 158

4.4.1. Alternativa priorizada para Ocaña 159

4.4.2. Matriz de evaluación multicriterio 160

4.4.4. Análisis de sensibilidad y consistencia 167

4.4.5. Validación de resultados con diagnóstico situacional 168

4.4.6. Alternativa priorizada 169

5. Conclusiones 171

6. Recomendaciones 173

7. Referencias..... 174

Lista de figuras

Figura 1 Proceso de sistemas de lodos activados 19

Figura 2 Proceso de sistema de biorreactores de membrana (MBR)..... 22

Figura 3 Proceso de sistema de lagunas de estabilización..... 25

Figura 4 Procesos de sistemas de biofiltros y filtros percoladores..... 28

Figura 5 Proceso de sistema de fitorremediación..... 31

Figura 6 Proceso de Macrófitas en humedales artificiales 34

Figura 7 Porcentaje de flujos de aguas residuales domesticas tratadas de forma segura por país37

Figura 8 Proceso de sistema de digestores anaerobio..... 38

Figura 9 Procesos de sistema tecnología Nereda®..... 41

Figura 10 Proceso de sistema biorreactores de lecho (FBBR) 43

Figura 11 Proceso de sistema humedales artificiales más biorremediación 45

Figura 12 Procesos de sistema Lumbrifiltro o Biofiltro Dinámico Aeróbico..... 48

Figura 13 Proceso de sistemas Anaerobios para el tratamiento descentralizado..... 52

Figura 14 Proceso de Microorganismos Autóctonos 55

Figura 15 Proceso de sistemas de biorremediación de metales pesados 57

Figura 16 Procesos de sistemas Humedales Artificiales Híbridos y Saneamiento Descentralizado 59

Figura 17 Procesos de tecnologías emergentes en plantas urbanas..... 62

Figura 18 Localización Puntos de vertimientos..... 77

Figura 19 Autores Relevantes..... 85

Figura 20 Fuentes más relevantes..... 86

Figura 21 Autores más relevantes..... 87

Figura 22 Nube de palabras 89

Figura 23 Mapa de arboles..... 90

Figura 24 Red de Concurrencia 93

Figura 25 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada primera pregunta..... 96

Figura 26 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada segunda pregunta 97

Figura 27 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada tercera pregunta 98

Figura 28 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada cuarta pregunta 100

Figura 29 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada quinta pregunta 101

Figura30 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada sexta pregunta..... 103

Figura31 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada séptima pregunta..... 104

Figura32 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada octava pregunta..... 106

Figura 33 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada novena pregunta..... 107

Figura34 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada decima pregunta..... 109

Figura35 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada undecima pregunta..... 110

Figura 36 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada duodécima pregunta..... 112

Figura 37 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada decimotercera pregunta..... 113

Figura 38 Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada decimocuarta pregunta..... 115

Figura 39 Tabla calificativa 161

Lista de tabla

Tabla 1 Eficiencia de remoción de sistema de lodos activados 20

Tabla 2 Eficiencia de remoción de sistema biorreactores de membrana (MBR) 23

Tabla 3 Eficiencia de remoción de sistemas de lagunas de estabilización 26

Tabla 4 Eficiencia de remoción en sistemas de biofiltros y filtros percoladores 29

Tabla 5 Eficiencia de remoción de contaminantes de sistemas de fitorremediación 32

Tabla 6 Eficiencia de remoción en Macrófitas para humedales artificiales 35

Tabla 7 Eficiencia de remoción de sistema digestores anaerobio 39

Tabla 8 Eficiencia de remoción de sistema de tecnología Nereda® 41

Tabla 9 Eficiencia de remoción en sistemas de lechos fijo (FBBR) 43

Tabla 10 Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas de humedales artificiales más biorremediación 46

Tabla 11 Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas Lumbrifiltros o Biofiltro Dinámico Aeróbico 48

Tabla 12 Eficiencia de remoción en sistemas Anaerobios para el tratamiento descentralizado .. 53

Tabla 13 Eficiencia de remoción en sistemas microorganismos autóctonos 55

Tabla 14 Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas de biorremediación de metales pesados. 57

Tabla 15 Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas humedales artificiales híbridos y Saneamiento Descentralizado 60

Tabla 16 Eficiencia de remoción de contaminantes en tecnologías emergentes en plantas urbanas 63

Tabla 17 Localización y Caracterización de los vertimientos Zona urbana-Rio Tejo 70

Tabla 18 Costo y Mantenimiento 81

Tabla 19 Cantidad de documentos 84

Tabla 20 Afiliaciones más importantes 88

Tabla 21 Documentos más citados 91

Tabla 22 Producción científica por país 94

Tabla 23 Comparación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicada en Chile, China y Europa, con análisis de aplicabilidad en Ocaña, Norte de Santander 121

Tabla 24 Síntesis de estudios en Colombia sobre biotecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales domesticas 127

Tabla 25 Cumplimiento normativo 133

Tabla 26 Evaluación de tecnologías para Ocaña considerando normativa, carga y eficiencia .. 134

Tabla 27 Condición del sistema de alcantarillados Ocaña 141

Tabla 28 Conversación de calificación cualitivas a porcentajes 145

Tabla 29 Evaluación de las multicriterio tecnologías en Ocaña 146

Tabla 30 Criterios normativos aplicables en Ocaña 149

Tabla 31 Criterios de sostenibilidad en Ocaña 153

Tabla 32 Verificación normativo y de sostenibilidad 155

Tabla 33 Alternativa de selección 159

Tabla 35 Matriz evaluativa multicriterio 162

Tabla 36 Tecnologías con alto puntaje 165

Tabla 37 Tecnologías con puntaje medio 166

Tabla 38 Tecnología con puntaje bajo 167

Tabla 39 Validación del diagnostico 168

Ilustraciones

Ilustración 1 Línea del tiempo normativa nacional 65

Ilustración 2 Línea del tiempo marco normativo a nivel internacional 66

Resumen

La presente investigación analiza la aplicación de la biotecnología como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Ocaña, Norte de Santander. El estudio integra un enfoque técnico, normativo y contextual, con el fin de evaluar diferentes tecnologías biológicas y su viabilidad de implementación en condiciones locales.

Inicialmente, se realiza una revisión del contexto internacional, identificando tecnologías como lodos activados, biorreactores de membrana (MBR), lagunas de estabilización, biofiltros, sistemas anaerobios, fitorremediación y humedales artificiales, destacando sus eficiencias de remoción y condiciones operativas. Asimismo, se analizan casos de éxito en países como Alemania, Países Bajos, China y Chile, donde se evidencia el uso de soluciones avanzadas y sostenibles orientadas a la recuperación de recursos y la eficiencia energética.

Posteriormente, se examina el panorama colombiano, evidenciando limitaciones en cobertura y eficiencia de tratamiento, especialmente en zonas rurales y municipios intermedios. En este contexto, se destacan desarrollos en sistemas anaerobios, uso de microorganismos autóctonos, biorremediación y humedales híbridos como alternativas de bajo costo y alta adaptabilidad.

El estudio incluye un diagnóstico del sistema de aguas residuales de Ocaña, caracterizado por un alcantarillado mixto, múltiples puntos de vertimiento y deficiencias operativas que

generan impactos ambientales significativos en cuerpos hídricos. Con base en este análisis, se establecen criterios técnicos, normativos y de sostenibilidad para la selección de tecnologías.

Finalmente, mediante una evaluación multicriterio, se identifica como alternativa prioritaria la implementación de sistemas combinados anaerobios (biodigestores o UASB) con humedales artificiales híbridos, debido a su alta eficiencia, bajo costo, facilidad de operación y adecuada adaptación al contexto local. Esta propuesta contribuye al cumplimiento normativo, la reducción de la carga contaminante y la promoción de un enfoque de economía circular en la gestión del agua.

Introducción

El tratamiento de aguas residuales domésticas constituye uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios en el contexto actual, especialmente en municipios intermedios donde las limitaciones técnicas, económicas y de infraestructura dificultan la implementación de sistemas convencionales eficientes. En este escenario, la biotecnología surge como una alternativa innovadora y sostenible, al aprovechar la capacidad de microorganismos, plantas y procesos biológicos para degradar, transformar o remover contaminantes presentes en el agua residual.

A nivel global, las tecnologías biotecnológicas han evolucionado desde sistemas tradicionales, como los lodos activados, hacia soluciones más avanzadas como biorreactores de membrana, humedales artificiales híbridos y sistemas anaerobios con recuperación de energía. Sin embargo, su adopción ha sido desigual, evidenciando una brecha tecnológica entre países desarrollados y en desarrollo, lo que impacta directamente en la calidad de los cuerpos hídricos y en el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad.

En Colombia, y particularmente en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, esta problemática se acentúa debido a la presencia de sistemas de alcantarillado mixtos, múltiples puntos de vertimiento y una cobertura limitada de tratamiento efectivo. Esto genera impactos negativos en fuentes hídricas receptoras y plantea la necesidad de implementar soluciones adaptadas al contexto local.

La presente monografía tiene como propósito analizar el potencial de la biotecnología en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Ocaña, mediante la revisión de tecnologías existentes, el estudio de experiencias internacionales y nacionales, el análisis del marco normativo vigente y la evaluación de alternativas sostenibles. De esta manera, se busca identificar soluciones técnicamente viables, ambientalmente sostenibles y socialmente adaptables que contribuyan a mejorar la gestión del recurso hídrico en el municipio.

Capítulo 1: Introducción de la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales

1.1. Contexto internacional de la biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales

1.1.1. Principales biotecnologías aplicada

La biotecnología en el tratamiento de aguas residuales se basa en la utilización de microorganismos, enzimas, y en algunos casos organismos fotosintéticos, para degradar, transformar o inmovilizar compuestos contaminantes presentes en el agua residual, tales como: sistemas de lodos activados, biorreactores de membrana (MBR), lagunas de estabilización, biofiltros y filtros percoladores,

1.1.1.1. Sistemas de lodos activados: Es un proceso de tratamiento de aguas residuales que se fundamenta en la utilización de microorganismos (sobre todo bacterias heterótrofas facultativas), que crecen en el agua residual, convirtiendo la materia orgánica disuelta en productos más simples como nuevas bacterias, dióxido de carbono y agua. Es un tratamiento secundario o biológico en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) y es el comúnmente más utilizado tanto municipal como industrialmente. (iAgua, 2020). El proceso de tratamiento de lodos activados consiste en varios pasos fundamentales los cuales son:

- **Aireación:** El primer paso en el proceso de los lodos activados es la aireación, donde se introduce aire en las aguas residuales que contienen dichos lodos. Este procedimiento

permite que las bacterias que requieren oxígeno descompongan la materia orgánica presente en el agua.

- **Sedimentación:** Tras la aireación, la mezcla se dirige a un tanque de sedimentación secundaria o clarificador. En este lugar, los lodos activados se depositan en el fondo, creando un lodo biológico.

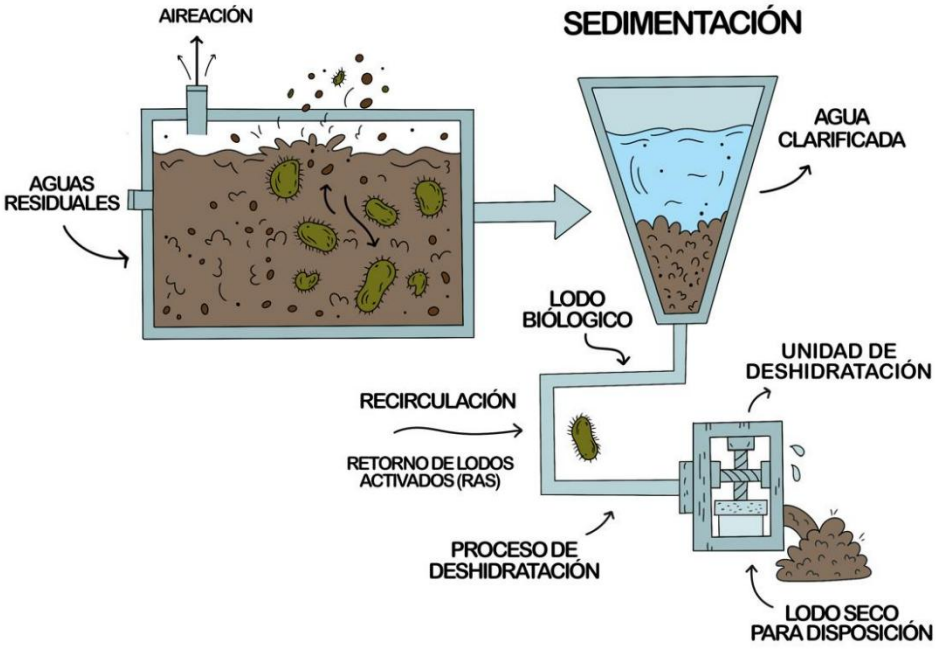
- **Recirculación**: Una parte del lodo biológico es reciclada y devuelta al tanque de aireación. Esto ayuda a mantener un nivel elevado de biomasa en el tanque de aireación para acelerar la descomposición de la materia orgánica.

- **Deshidratación:** Por último, se lleva a cabo la deshidratación de los lodos para disminuir su volumen y facilitar su manejo. Se pueden emplear diversas técnicas como centrífugas, filtración o secado térmico.

A continuación, se muestra la figura 1 se explica el proceso de la biotecnología de lodos activados y en la tabla 1 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

Figura 1

Proceso de sistemas de lodos activados



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico de lodos activados.

Tabla 1

Eficiencia de remoción de sistema de lodos activados

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno	85 – 95 %	Alta eficiencia debido a la biodegradación aerobia
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	75 – 90 %	Depende de la fracción biodegradable
SST (Sólidos Suspendidos Totales)	85 – 95 %	Remoción en el clarificador secundario
Nitrógeno total	20 – 50 % (hasta 80 % con nitrificación-desnitrificación)	Requiere etapas adicionales para mayor remoción
Fósforo total	10 – 30 % (hasta 80–90 % con tratamiento químico o EBPR)	Limitado sin procesos específicos
Coliformes	90 – 99 % (no completo)	Requiere desinfección posterior
Metales pesados	Variable (20 – 70 %)	Depende de adsorción al lodo
Contaminantes emergentes	Baja – moderada (10 – 60 %)	No diseñado específicamente para estos

Nota. Adaptado de Metcalf & Eddy (2014), Tchobanoglous et al. (2014) y literatura técnica sobre tratamiento biológico de aguas residuales

1.1.1.2. Biorreactores de membrana (MBR): Es un proceso de tratamiento de aguas residuales que combina la filtración por membranas con el tratamiento biológico por fangos activos en que se aplica una succión para provocar el paso del agua clarificada a través de la membrana mientras que el fango queda retenido. El proceso de tratamiento de Biorreactores de membrana (MBR) consiste en varios pasos fundamentales, los cuales son:

- **Pretratamiento:** Las aguas residuales son sometidas a un procedimiento de pretratamiento para remover sólidos grandes y otros contaminantes que podrían perjudicar la membrana o interferir en el proceso biológico.

- **Degradación biológica:** Una vez tratadas previamente, las aguas residuales entran en el biorreactor, donde se lleva a cabo la degradación biológica de los contaminantes orgánicos gracias a la acción de microorganismos.

- **Filtración por membrana:** El agua que ha sido tratada biológicamente pasa a través de membranas de ultrafiltración o microfiltración, las cuales retienen los sólidos suspendidos, incluidos bacterias y virus, y permiten que el agua tratada fluya.

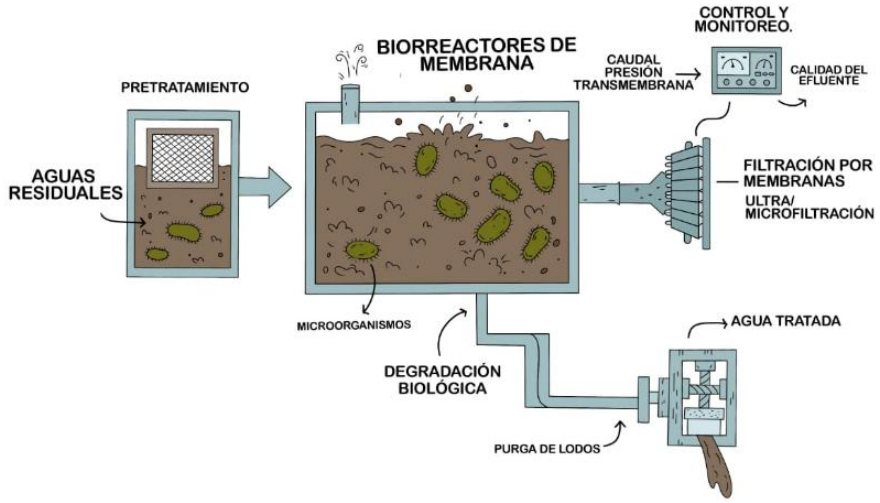
- **Gestión de lodos:** Los sólidos que son atrapados por la membrana (lodos) se eliminan del sistema de forma habitual para su tratamiento y disposición final.

- **Control y monitoreo:** Se lleva a cabo un control y monitoreo constante de varios parámetros del proceso, como el caudal, la presión transmembrana (TMP) y la calidad del efluente, asegurando así que el funcionamiento sea eficiente y que el agua tratada cumpla con los estándares deseados.

A continuación, se muestra la figura 2 se explica el proceso de la biotecnología biorreactores de membrana (MBR) y en la tabla 2 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

Figura 2

Proceso de sistema de biorreactores de membrana (MBR)



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico de biorreactores de membrana.

Tabla 2

Eficiencia de remoción de sistema biorreactores de membrana (MBR)

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	95 – 99 %	Muy alta por biodegradación + retención por membrana
DQO	90-98 %	Alta eficiencia incluso en compuestos difíciles
SST	> 99 %	Prácticamente eliminación total por membrana
Nitrógeno total	70 – 95 %	Alta con nitrificación–desnitrificación
Fósforo total	50 – 90 %	Mejora con eliminación biológica o química
Coliformes	99 – 99.99 %	Barrera física de la membrana
Metales pesados	60 – 95 %	Adsorción + retención en biomasa
Contaminantes emergentes	0 – 90 %	Mejor que sistemas convencionales

Nota. Adaptado de Metcalf & Eddy (2014), Tchobanoglous et al. (2014) y literatura técnica sobre tratamiento biológico de aguas residuales.

1.1.1.3. Sistemas de Lagunas de estabilización: Son cuerpos que se encuentra en el agua de manera artificial en las que bacterias y algas colaboran para depurar el agua de forma natural, fomentando la oxidación biológica de los contaminantes. Consiste en varios pasos fundamentales los cuales son:

- **Pretratamiento:** Antes de que las aguas residuales lleguen a las lagunas, son sometidas a un sistema de pretratamiento, que puede incluir (Rejillas, desarenadores, desengrasadores).

- **Ingreso a la primera laguna:** Laguna anaerobia: Esta es la fase inicial del sistema de lagunas opera en ausencia de oxígeno (entorno anaerobio). Las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica, generando gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Se disminuye significativamente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

- **Segunda laguna: Laguna facultativa.** En esta etapa hay áreas con oxígeno (aerobias) y áreas sin oxígeno (anaerobias). La capa superior recibe oxígeno de la atmósfera, lo que favorece el crecimiento de algas, que producen oxígeno durante la fotosíntesis. Las bacterias aerobias utilizan ese oxígeno para descomponer la materia orgánica. El fondo permanece anaerobio, descomponiendo lo que no se procesó en la fase inicial.

- **Tercera laguna: Laguna de maduración**. Este es un período final de refinamiento. La meta principal es suprimir patógenos (bacterias, virus, parásitos). La influencia solar, el

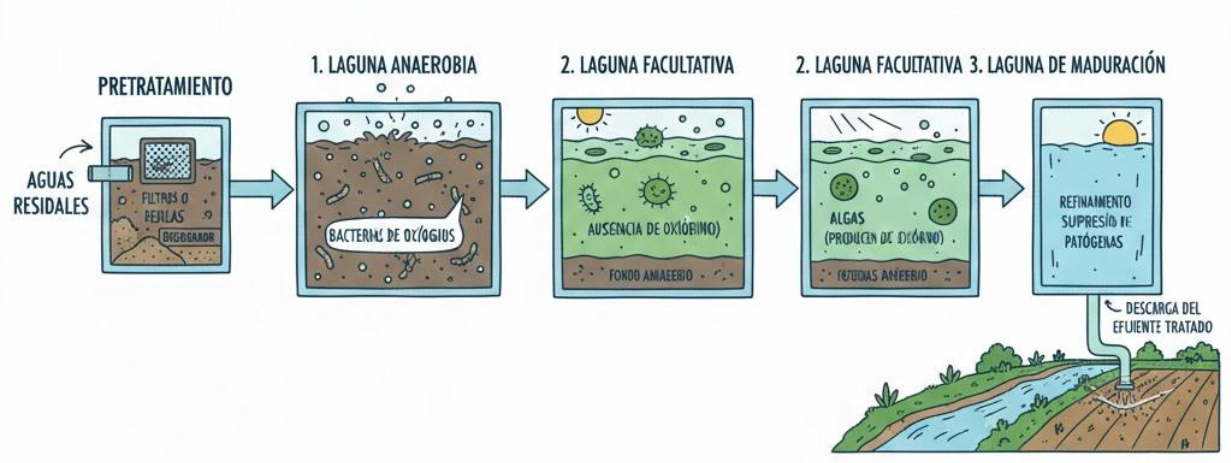
tiempo de permanencia y el oxígeno colaboran en la purificación del agua y en el aumento de su calidad antes de su liberación.

- **Descarga del efluente tratado:** El agua que ha sido tratada puede ser liberada en un cuerpo de agua receptora (como un río o un arroyo) y utilizarse para el riego de cultivos (si cumple con las regulaciones de salud). Tener otras aplicaciones conforme a la normativa local. En la tabla 3 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

A continuación, se muestra la figura 3 se explica el proceso de la biotecnología lagunas de estabilización y en la tabla 3 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

Figura 3

Proceso de sistema de lagunas de estabilización



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico de lagunas de estabilización

Tabla 3

Eficiencia de remoción de sistemas de lagunas de estabilización

Parámetro	**Porcentaje de remoción**	**Análisis Técnico**
DBO_5	70 – 90 %	Alta en sistemas bien dimensionados (especialmente con varias etapas)
DQO	60-85 %	Depende de la fracción biodegradable
SST	60-90 %	Sedimentación + acción biológica
Nitrógeno total	30 – 70 %	Remoción por volatilización y procesos biológicos
Fósforo total	20 – 50 %	Limitada, principalmente por sedimentación
Coliformes	90 – 99.99 %	Muy alta en lagunas de maduración (radiación solar + tiempo de retención)
Metales pesados	20-60%	Adsorción y sedimentación
Contaminantes emergentes	0 – 90 %	No diseñado específicamente para estos

Nota. Adaptado de Mara (2004), Von Sperling (2007) y literatura técnica sobre lagunas de estabilización.

1.1.1.4. Biofiltros y filtros percoladores: Emplean los medios poroso-colonizados por microrganismos que transforman la materia orgánica en aguas residuales, disminuyendo de esta manera la carga de contaminación. Consiste en varios pasos fundamentales los cuales son:

- **Generación de biopelícula (biofilm):** La biopelícula se forma cuando los microorganismos colonizan el medio filtrante y se adhieren mediante polímeros extracelulares (EPS). Se genera una estructura estratificada con bacterias aerobias en la superficie y anaerobias en el interior.

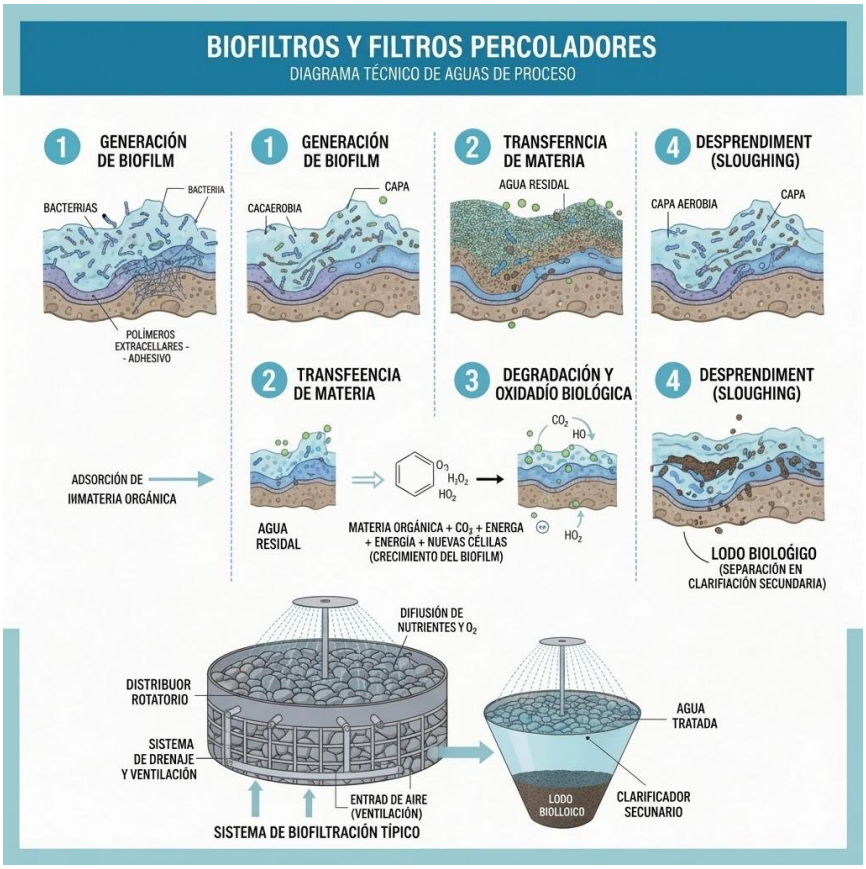
- **Transferencia de materia**: El tratamiento ocurre en la interfaz biopelícula–agua residual. La materia orgánica se adhiere (adsorción) y el oxígeno y los nutrientes penetran por difusión para ser utilizados por los microorganismos.

- **Degradación biológica:** La materia orgánica (DBO_5) es degradada por los microorganismos. El catabolismo produce energía, agua (H_2O) y CO_2, mientras que el anabolismo permite el crecimiento de la biopelícula.

A continuación, se muestra la figura 4 se explica el proceso de la biotecnología biofiltros y filtros percoladores y en la tabla 4 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

Figura 4

Procesos de sistemas de biofiltros y filtros percoladores



Nota. Adaptado de “Biofiltros y filtros percoladores: diagrama técnico de aguas proceso”, por Odour Solution (s. f.).

Tabla 4

Eficiencia de remoción en sistemas de biofiltros y filtros percoladores

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	70 – 90 %	Alta degradación biológica en el sustrato
DQO	60-85 %	Depende de la fracción biodegradable
SST	70-95 %	Filtración y sedimentación
Nitrógeno total	30 – 70 %	Nitrificación–desnitrificación parcial
Fósforo total	20 – 60 %	Adsorción en el sustrato y asimilación vegetal
Coliformes	90 – 99.99 %	Muy Filtración + acción microbiana + radiación
Metales pesados	40-80%	Adsorción y Fito acumulación
Contaminantes emergentes	20 – 70 %	Remoción variable (biodegradación y adsorción)

Nota. Adaptado de Kadlec y Wallace (2009), Vymazal (2010) y literatura técnica sobre humedales construidos

1.1.1.5. Fitorremediación: Uso de plantas acuáticas como el jacinto de agua y el lirio acuático para absorber metales pesados y otros contaminantes, mejorando la calidad del agua sin recurrir a procesos químicos agresivos.

- **Fitoextracción:** Proceso en el que las plantas asimilan metales pesados como el cadmio, el plomo y el cromo. Las raíces absorben los contaminantes y los llevan a las hojas y tallos (translocación), donde se acumulan, por lo que es necesario cosechar la biomasa y administrarla de manera adecuada.

- **Filtración a través de las raíces:** Sucede en la rizosfera, en donde las raíces funcionan como un filtro físico que atrapa sólidos suspendidos y contaminantes. Estos pueden permanecer pegados a la superficie o ser asimilados. Es más eficiente con niveles bajos pero estables de contaminantes.

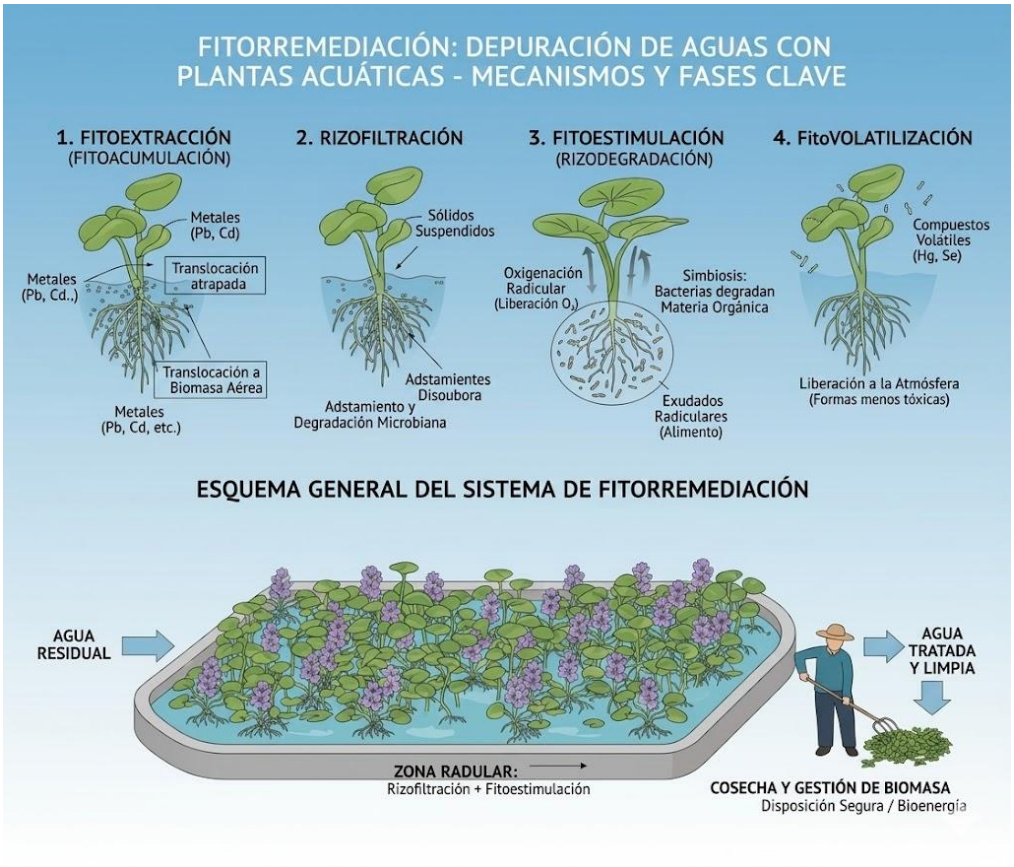
- **Fito estimulación**: Las plantas estimulan la actividad de microorganismos en sus raíces. Liberan oxígeno y exudados orgánicos, que son compuestos orgánicos. Estos estimulan a las bacterias que descomponen sustancias tóxicas y materia orgánica.

- **Fito volatilización:** Por medio de la transpiración, algunas plantas eliminan contaminantes después de absorberlos y transformarlos; esto es particularmente cierto en los compuestos orgánicos volátiles y algunos metales.

A continuación, se muestra la figura 5 se explica el proceso de la biotecnología fitorremediación y en la tabla 5 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

Figura 5

Proceso de sistema de fitorremediación



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico de fitorremediación

Tabla 5

Eficiencia de remoción de contaminantes de sistemas de fitorremediación

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	60 – 85 %	Degradación por microorganismos de rizosfera
DQO	50-80 %	Depende de la biodegradabilidad
SST	60-90 %	Sedimentación + filtración radicular
Nitrógeno total	30 – 70 %	Asimilación vegetal + procesos microbianos
Fósforo total	20 – 60 %	Absorción por plantas y adsorción en sedimentos
Coliformes	80 – 99 %	Acción combinada biológica y ambiental
Metales pesados	50-90%	Alta eficiencia por fitoextracción y acumulación
Contaminantes emergentes	30 – 70 %	Biodegradación + adsorción + transformación

Nota. Adaptado de Pilon-Smits (2005), Salt et al. (1998) y literatura técnica sobre fitorremediación aplicada al tratamiento de aguas residuales.

1.1.1.6. Macrófitas en humedales artificiales: la fitodepuración, que es una biotecnología, se utiliza para el tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales. Este procedimiento emplea plantas acuáticas (macrófitos) para eliminar contaminantes mediante métodos químicos, físicos y biológicos. El éxito del sistema depende de la interacción en la rizosfera, donde la transferencia de gases y el soporte de biopelículas bacterianas optimizan la degradación de la carga orgánica (Vymazal, 2011). Hay diferentes tipos de planta que sirven para este procedimiento.

- **Typha spp. (totora o enea):** Actúa como un filtro físico que permite la sedimentación de sólidos en suspensión (SST). Posee una gran capacidad para acumular fósforo y sus raíces promueven biopelículas que optimizan la eliminación de materia orgánica.

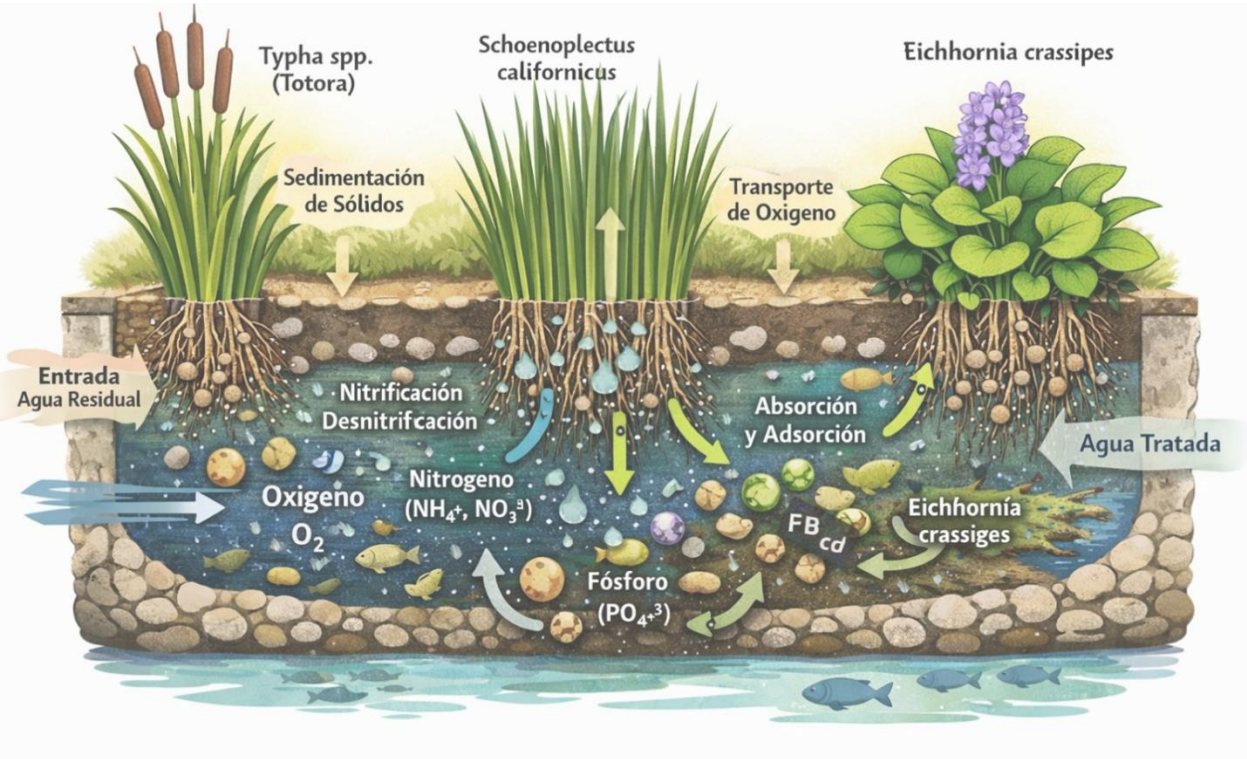
- **Schoenoplectus californicus:** Facilita el transporte de oxígeno a la rizosfera, lo que favorece la nitrificación. Asimismo, disminuye la velocidad del caudal, optimiza el proceso de sedimentación y se ajusta adecuadamente a las condiciones ambientales cambiantes.

- **Eichhornia crassipes (lenteja de agua):** Muestra una gran habilidad para absorber metales pesados, nitrógeno y fósforo. Sus raíces densas promueven las biopelículas y los procesos aeróbicos. Precisa cosecha para impedir la salida de contaminantes acumulados.

A continuación, se muestra la figura 6 y se explica el proceso de la biotecnología de proceso de Macrófitas en humedales naturales y en la tabla 6 se muestra la eficiencia de remoción del sistema en cuestión:

Figura 6

Proceso de Macrófitas en humedales artificiales



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico.

Tabla 6

Eficiencia de remoción en Macrófitas para humedales artificiales

Especie	SST (%)	DBO_5 (%)	N total (%)	P total (%)	Metales pesados
Typha spp.	80 – 95	70 – 85	50 – 75	70 – 85	50 – 75
Schoenoplectus californicus	75 – 90	70 – 90	60 – 85	40 – 65	30 – 60
Eichhornia crassipes	50 – 75	80 – 95	80 – 95	80 – 95	70 – 95
Lemna minor	30 – 60	60 – 80	80 – 95	80 – 95	20 - 50

Nota. Adaptado de Vymazal (2010), Kadlec y Wallace (2009) y Pilon-Smits (2005), quienes reportan eficiencias variables de remoción de contaminantes en sistemas de humedales construidos y fitorremediación según especie vegetal, condiciones operativas y características del afluente.

1.1.2. Implementación internacional y casos relevantes

El desarrollo y uso de tecnologías biotecnológicas en el tratamiento de aguas residuales ha presenciado un desarrollo notable en los últimos años; no obstante, su aplicación a escala global ha sido desigual. Esta falta de uniformidad se debe a varios factores conectados, como las condiciones económicas, la disposición política, las prioridades sociales y las características climáticas de cada área (UNESCO, 2023; Rajasulochana y Preethy, 2016).

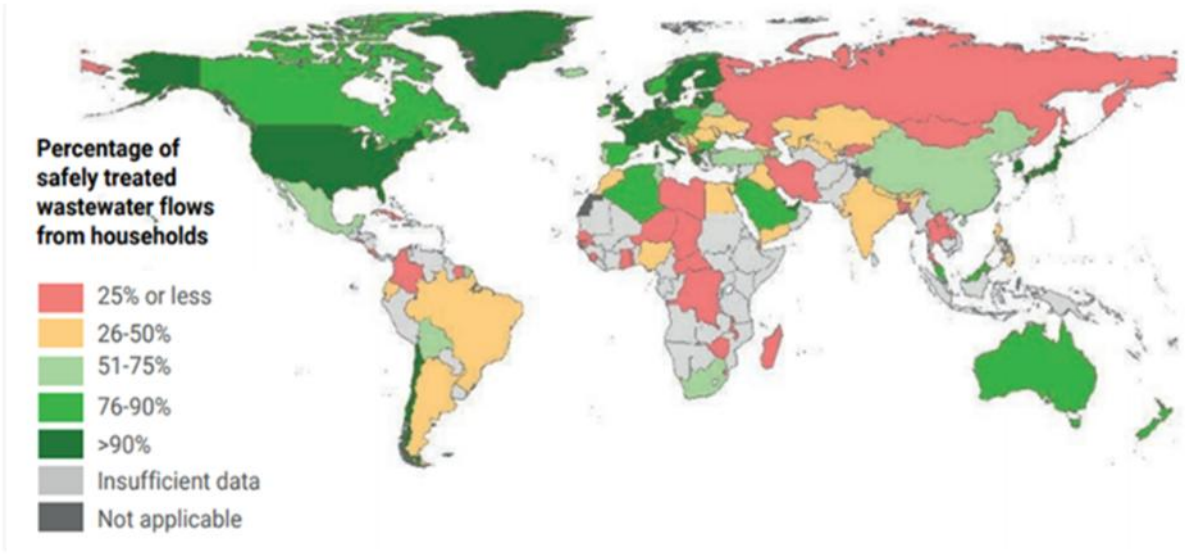
En este contexto, los países desarrollados han conseguido integrar tecnologías de avanzadas, como los biorreactores de membrana (MBR), métodos perfeccionados de lodos activados y tácticas enfocadas en la recuperación de recursos. Estas soluciones posibilitan la eliminación de contaminantes con eficacia y un manejo más sustentable del recurso hídrico. Sin embargo, en numerosos países en desarrollo todavía prevalecen tecnologías tradicionales o de escasa complejidad. Aunque estas son más asequibles, tienen restricciones en cuanto a control operacional y eficiencia.

Esta brecha tecnológica tiene implicaciones directas en la equidad del acceso a servicios de saneamiento adecuados, dificultando el cumplimiento de compromisos internacionales como el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6), que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (ONU, 2015).

En la Figura 7 se presenta la proporción estimada de aguas residuales domésticas tratadas de manera segura a nivel mundial, evidenciando las diferencias regionales en el acceso a sistemas de tratamiento adecuados.

Figura 7

Porcentaje de flujos de aguas residuales domesticas tratadas de forma segura por país



Nota. Proporción estimada de aguas residuales domésticas tratadas de manera segura a nivel mundial. Fuente: UN-Hábitat-WHO (2021).

A continuación, algunos ejemplos de los avances más significativos del tratamiento de aguas residuales domesticas a nivel internacional.

1.1.2.1. Alemania: Se ha convertido en uno de los países más destacados en el uso de tecnologías sostenibles para el manejo de aguas residuales, sobresaliendo por su amplia utilización de digestores anaerobios para estabilizar lodos y generar biogás, que es una fuente de energía renovable. Además, ha impulsado métodos avanzados para recuperar nutrientes, como la precipitación controlada de estruvita, que permite el aprovechamiento del fósforo presente en efluentes y lodos, en línea con los conceptos de economía circular y una gestión de residuos más

integral (DWA, 2018). Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia energética de las plantas de tratamiento, sino que también disminuyen la contaminación y producen subproductos reutilizables en la agricultura, una de las plantas de tratamiento que usa este método es la de Braunschweig.

A continuación, se muestra la figura 8 se explica el proceso de la biotecnología de digestores anaerobio y en la tabla 7 se muestra la eficiencia de remoción del sistema:

Figura 8

Proceso de sistema de digestores anaerobio



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico de Eficiencia de remoción de contaminantes de sistemas digestores anaerobio.

Tabla 7

Eficiencia de remoción de sistema digestores anaerobio

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	95 – 99 %	Digestor anaerobio + aireación
DQO	90-98 %	Alta eficiencia por tratamiento combinado
SST	> 99 %	Eliminación total por tratamiento avanzado
Nitrógeno total	70 – 95 %	Nitrificación por aireación
Fósforo total	80 – 90 %	Recuperación como estruvita
Coliformes	99 – 99.99 %	Barrera del tratamiento avanzado
Metales pesados	60 - 95%	Adsorción en biomasa y lodos
Contaminantes emergentes	0 – 90 %	Mejor que sistemas convencionales

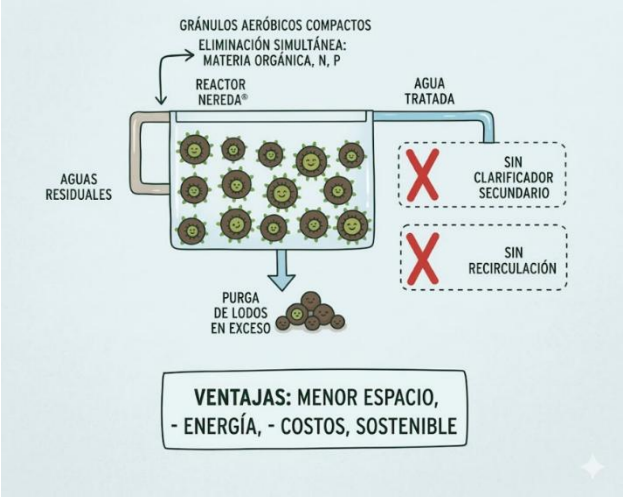
Nota. Adaptado de Metcalf & Eddy (2014), Tchobanoglous et al. (2014) y literatura técnica sobre sistemas combinados de tratamiento anaerobio–aerobio.

1.1.2.2. Países bajos: Se destacan a nivel internacional por la implementación de tecnologías biotecnológicas de última generación en el tratamiento de aguas residuales, siendo pioneros en la aplicación de la tecnología Nereda®. Este sistema se basa en el uso de gránulos aeróbicos compactos que concentran comunidades microbianas especializadas capaces de llevar a cabo simultáneamente los procesos de eliminación de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación y eliminación biológica de fósforo. A diferencia de los sistemas convencionales de lodos activados, Nereda no requiere clarificadores secundarios ni tanques de recirculación, lo que reduce significativamente el espacio requerido, el consumo energético y los costos operativos (van Loosdrecht & Pronk, 2017). Esta tecnología representa una solución altamente eficiente, sostenible y escalable para plantas de tratamiento urbanas e industriales, y ha sido adoptada exitosamente en múltiples instalaciones dentro y fuera de Europa, la planta más destacada que usa este método es la planta de tratamiento EDAR en Epe, países Bajos.

A continuación, se muestra la figura 9 se explica el proceso de la biotecnología de Nereda, y en la tabla 8, se hace muestra la eficiencia de remoción del sistema.

Figura 9

Procesos de sistema tecnología Nereda®



Nota. Elaboración propia con base en el funcionamiento del proceso de tratamiento biológico.

Tabla 8

Eficiencia de remoción de sistema de tecnología Nereda®

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	95 – 99 %	Gránulos aeróbicos compactos
DQO	90-98 %	Alta estabilidad del granulo
SST	> 99 %	Sin clarificador secundario, retención por los gránulos
Nitrógeno total	85 – 95 %	Eliminación simultánea en un solo reactor

Fósforo total	85 – 95 %	Eliminación biológica mejorada por gránulos
Coliformes	99 – 99.99 %	Retención física en la biomasa granular
Metales pesados	60-95%	Adsorción en la estructura granular
Contaminantes emergentes	40 – 85 %	Mayor retención que lodos convencionales

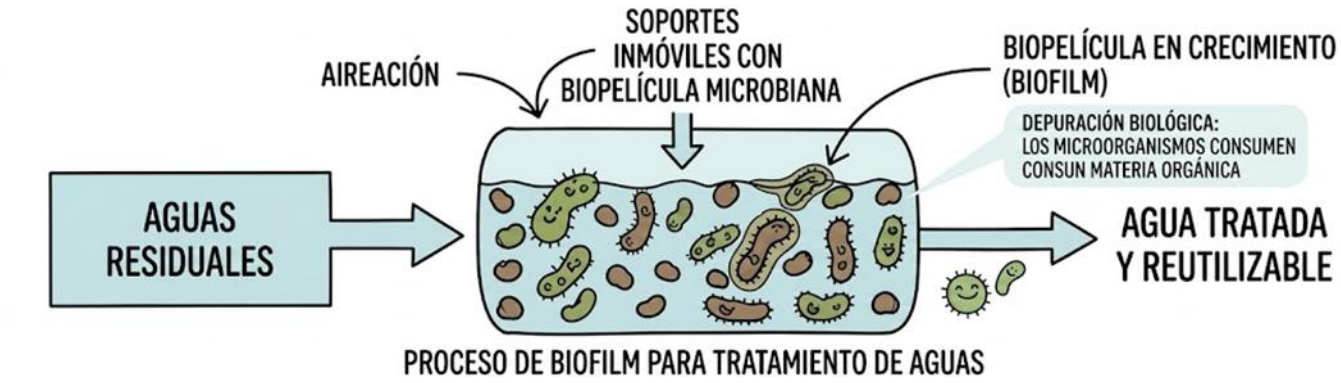
Nota. Adaptado de de Kreuk y van Loosdrecht (2006), Pronk et al. (2015) y literatura técnica sobre lodos granulares aeróbicos.

1.1.2.3. China: Ha llevado a cabo inversiones clave y de gran magnitud en la creación y uso de sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en áreas rurales y periurbanas, donde la instalación de infraestructuras centralizadas no resulta práctica ni económicamente viable. Dentro de las tecnologías más utilizadas están los biorreactores de lecho fijo (FBBR), que emplean soportes inmóviles para fomentar el crecimiento de biopelículas microbianas capaces de descomponer eficientemente compuestos orgánicos y nutrientes, incluso con variaciones en las cargas hidráulicas. Estos sistemas se distinguen por su bajo consumo energético, facilidad de operación y gran estabilidad ante alteraciones.

A continuación, se muestra la figura 10 se explica el proceso de la biotecnología de biorreactores de lecho (FBBR) y en la tabla 9 se muestra la eficiencia de remoción del sistema

Figura 10

Proceso de sistema biorreactores de lecho (FBBR)



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de sistema biorreactores de lecho fijo

Tabla 9

Eficiencia de remoción en sistemas de lechos fijo (FBBR)

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	85 – 95 %	Biopelícula microbiana en soportes inmóviles
DQO	80–92 %	Retención por el medio fijo y sedimentación
SST	85–95%	Eliminación total por tratamiento avanzado
Nitrógeno total	60–85 %	Nitrificación/desnitrificación en biopelícula

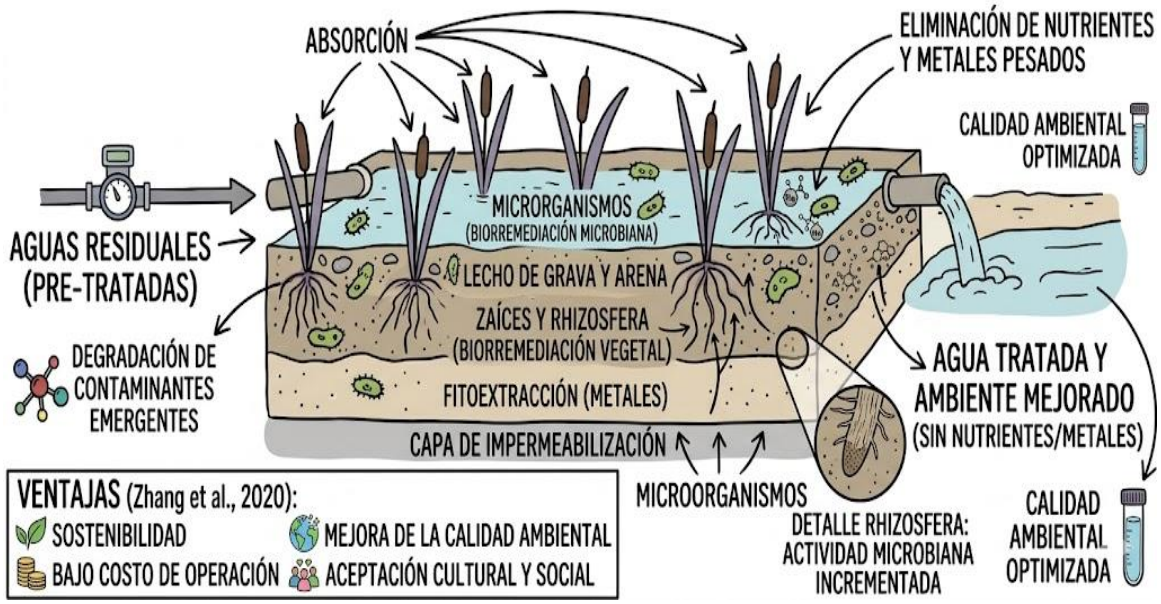
Fósforo total	50–80 %	Requiere complemento químico o biológico
Coliformes	90 –99 %	Retención y decaimiento en el biofilm
Metales pesados	40-80%	Adsorción en la biopelícula
Contaminantes emergentes	30 – 70 %	Mayor retención que sistemas convencionales

Nota. Adaptado de Ødegaard (2006), Metcalf & Eddy (2014) y literatura técnica sobre sistemas de biopelícula en tratamiento de aguas residuales.

Además, se ha incentivado la utilización de humedales artificiales, que se combinan con métodos de biorremediación tanto microbiana como vegetal, para mejorar la eliminación de nutrientes, metales pesados y contaminantes emergentes. Estas soluciones basadas en ecosistemas naturales presentan beneficios destacados en términos de sostenibilidad, bajo costo de operación y mejora de la calidad ambiental, además de ser aceptadas cultural y socialmente en comunidades rurales (Zhang et al., 2020).

Figura 11

Proceso de sistema humedales artificiales más biorremediación



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de sistema humedales artificiales más biorremediación

A continuación, en la figura 11 como en la tabla 10 se explica el proceso de la biotecnología de sistema humedales artificiales más biorremediación, donde además se muestra la eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas de humedales artificiales más biorremediación.

Tabla 10

Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas de humedales artificiales más biorremediación

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	70 – 90 %	Degradación por microorganismos y plantas
DQO	65–85 %	Acción combinada de biopelícula y raíces
SST	80–95%	Filtración por lecho de grava
Nitrógeno total	40–80 %	Nitrificación/desnitrificación + absorción por plantas
Fósforo total	40–70 %	Adsorción en sustrato + absorción vegetal
Coliformes	90 –99.9 %	Filtración, radiación solar y actividad microbiana
Metales pesados	50-85%	Adsorción en grava y absorción por plantas
Contaminantes emergentes	20 – 70 %	Fitorremediación y degradación microbiana

Nota. Adaptado de De Kreuk y van Loosdrecht (2006), Pronk et al. (2015) y literatura técnica sobre lodos granulares aeróbicos.

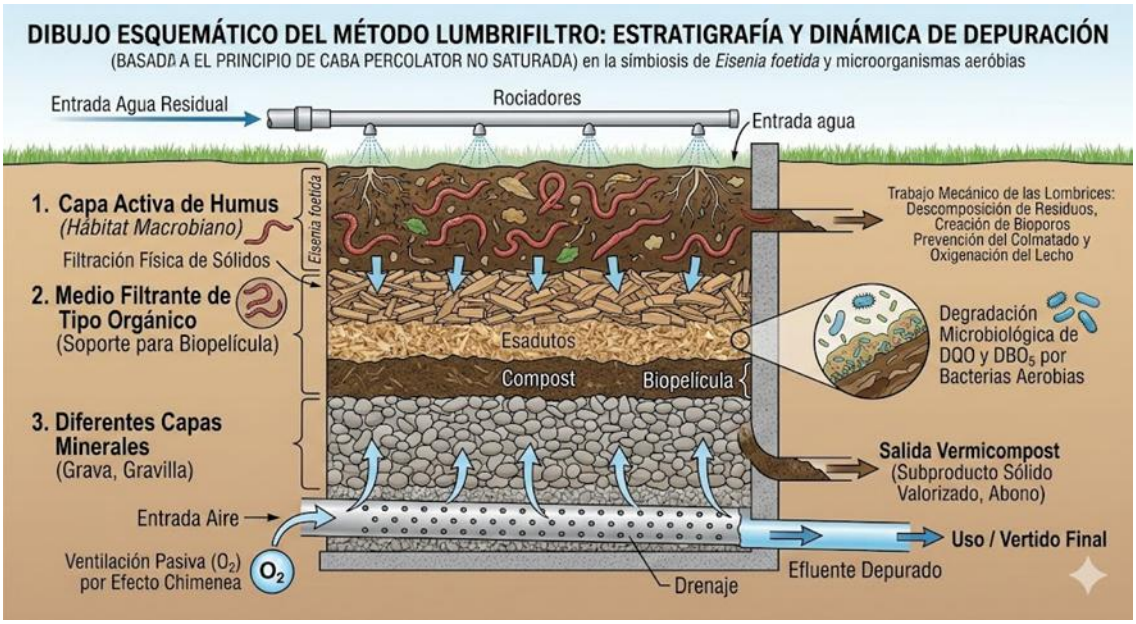
1.1.2.4. Chile: uno de los hitos más importantes de la biotecnología en Chile es el Sistema Tohá, también llamado Lumbrifiltro o Biofiltro Dinámico Aeróbico. Desarrollado a finales de la década de 1980 en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile por el Dr. José Tohá Castellá, surge como una respuesta innovadora y de bajo costo para el tratamiento de aguas servidas y Residuos Industriales Líquidos (Riles).

El Lumbrifiltro es una biotecnología de lecho percolador no saturado que utiliza la simbiosis entre oligoquetos (Eisenia foetida) y microorganismos aerobios para limpiar aguas residuales. Su composición se basa en una estratigrafía vertical que contiene una capa activa de humus (un hábitat microbiano), un medio filtrante de tipo orgánico (que sirve como soporte para biopelícula) y diferentes capas minerales que permiten el drenaje y la ventilación pasiva. La eficacia del sistema radica en una dinámica compuesta por tres partes: la filtración física de sólidos en la matriz orgánica, el trabajo mecánico de las lombrices —que se encargan de descomponer los residuos y generar bioporos para prevenir el colmatado y oxigenar el lecho. La degradación a nivel microbiológico de la DQO y DBO_5. Este procedimiento transforma los contaminantes en un efluente depurado y un subproducto sólido que se puede valorizar (vermicompost), mejorando el ciclo de nutrientes con un bajo consumo de energía.

A continuación, en la figura 12 como en la tabla 11 se explica el proceso de la biotecnología de procesos de sistema Lumbrifiltro o Biofiltro Dinámico Aeróbico, donde además se muestra la eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas Lumbrifiltros o Biofiltro Dinámico Aeróbico

Figura 12

Procesos de sistema Lumbrifiltro o Biofiltro Dinámico Aeróbico



Nota. *Se observa cómo se observa el procedimiento de sistema Lumbrifiltro o Biofiltro Dinámico Aeróbico*

Tabla 11

Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas Lumbrifiltros o Biofiltro Dinámico Aeróbico

Parámetro	**Porcentaje de remoción**	**Análisis Técnico**
DBO_5	85 – 95 %	Degradación microbiológica por bacterias aerobias en biopelícula

DQO	80–92 %	Acción combinada de biopelícula y actividad microbiana
SST	90–98%	Filtración física en capa activa de humus + medio filtrante orgánico
Nitrógeno total	60–85 %	Nitrificación aerobia; desnitrificación parcial en zonas anóxicas
Fósforo total	40–70 %	Adsorción en capas minerales y captura por biomasa
Coliformes	95 –99.9 %	Filtración, radiación solar y actividad microbiana
Metales pesados	50-80%	Adsorción en compost, biopelícula y capas minerales
Contaminantes emergentes	30 – 80 %	Biodegradación por bacterias y metabolismo de lombrices

Nota. Adaptado de Sinha et al. (2008), Arora et al. (2016) y literatura técnica sobre vermifiltración en el tratamiento de aguas residuales.

1.1.3. Investigación e Innovaciones Biotecnológicas en Colombia para el Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de aguas residuales es un aspecto clave en la administración ambiental y el progreso sostenible de cualquier país. En Colombia, el aumento de la población, la rápida urbanización y el crecimiento de la industria han provocado un notable aumento en la generación de aguas residuales de todos los tipos. No obstante, las instalaciones de tratamiento existentes siguen siendo insuficientes en términos de cobertura y eficiencia tecnológica, lo que impacta de manera adversa en la calidad de los cuerpos de agua que reciben estas aguas y en la salud de la población.

A pesar de la presencia de regulaciones como el Decreto 1076 de 2015 y la Resolución 0631 de 2015, los niveles de tratamiento efectivo de aguas residuales son bajos. Se calcula que menos del 20 % del total de agua contaminada generada en el país recibe un tratamiento adecuado antes de ser desechada, con una notable cantidad de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) utilizando tecnologías básicas o tradicionales que no eliminan contaminantes emergentes ni patógenos de forma efectiva (Bancolombia, 2024; UdeA, 2023).

Esta problemática se intensifica en áreas rurales y en municipios menos poblados, donde la disponibilidad de tratamientos puede ser menor al 10 %, y la utilización de sistemas como pozos sépticos, biodigestores o lagunas de oxidación no siempre asegura que se eliminen las sustancias contaminantes dentro de los niveles permitidos. Al mismo tiempo, investigaciones recientes muestran un aumento en la presencia de bacterias multirresistentes y de contaminantes

cada vez más preocupantes, como los residuos de medicamentos, los microplásticos y los metales pesados en aguas que han sido tratadas de manera inadecuada (El Espectador, 2024).

1.1.3.1. Sistemas anaerobios para el tratamiento descentralizado. Una de las estrategias más significativas ha sido el diseño y optimización de sistemas anaerobios de bajo costo, como los biodigestores, especialmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales y periurbanas. Instituciones como la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Antonio Nariño han impulsado estos desarrollos, considerando las limitaciones técnicas, económicas y geográficas que dificultan la implementación de infraestructura convencional de saneamiento.

Los biodigestores funcionan mediante un proceso biológico en ausencia de oxígeno, en el cual comunidades microbianas (hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas) degradan la materia orgánica presente en las aguas residuales. Este proceso se lleva a cabo en reactores cerrados (de concreto, PVC o geomembranas), donde se controlan variables como el pH, la temperatura, el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica.

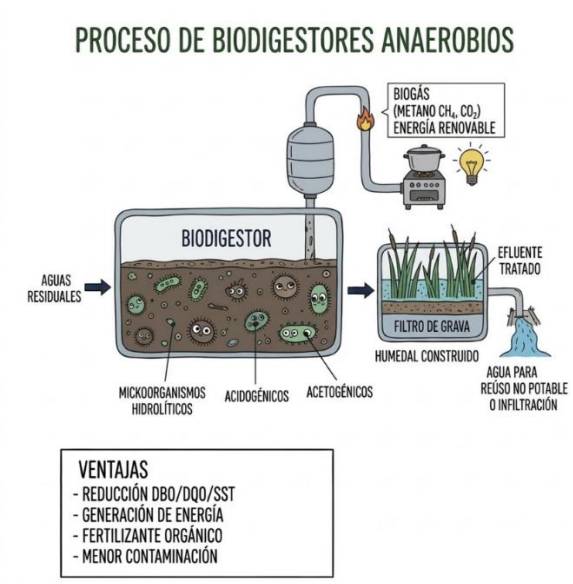
Durante la fase de metanogénesis, los compuestos orgánicos son transformados en biogás (principalmente metano y dióxido de carbono), que puede ser captado y utilizado como fuente de energía renovable para cocción o generación eléctrica. Esto no solo aporta valor energético a los desechos, sino que también reduce el uso de combustibles fósiles.

Además del aprovechamiento energético, los biodigestores disminuyen significativamente parámetros contaminantes como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST), mejorando la calidad del efluente tratado. En muchos casos, se complementan con sistemas de afinamiento como filtros de grava o humedales construidos, que permiten alcanzar estándares adecuados para infiltración o reúso no potable.

A continuación, se muestra en la figura 13 el proceso de la biotecnología de sistemas Anaerobios para el tratamiento descentralizado, y, además, en la tabla 12 se hace muestra la eficiencia de remoción de los sistemas Anaerobios para el tratamiento descentralizado.

Figura 13

Proceso de sistemas Anaerobios para el tratamiento descentralizado



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de sistemas Anaerobios para el Tratamiento Descentralizado.

Tabla 12

Eficiencia de remoción en sistemas Anaerobios para el tratamiento descentralizado

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	85 – 95 %	Hidrólisis + acidogénesis + acetogénesis + postratamiento
DQO	80–95 %	Degradación anaerobia en biodigestor + pulimento final
SST	85–95%	Sedimentación + filtro de grava + humedal
Nitrógeno total	40–70 %	Remoción parcial en biodigestor; complemento en humedal
Fósforo total	30–60 %	Adsorción en filtro de grava y humedal construido
Coliformes	90 –99 %	Filtración + decaimiento en humedal
Metales pesados	40-80%	Adsorción en lodos, grava y sustrato del humedal
Contaminantes emergentes	20 – 70 %	Degradación anaerobia parcial + retención en postratamiento

***Nota*.** Adaptado de Metcalf & Eddy (2014), Tchobanoglous et al. (2014) y literatura técnica sobre sistemas combinados anaerobio–humedal para el tratamiento de aguas residuales.

1.1.3.2. Uso de Microorganismos Autóctonos y Biorremediación de Metales Pesados.

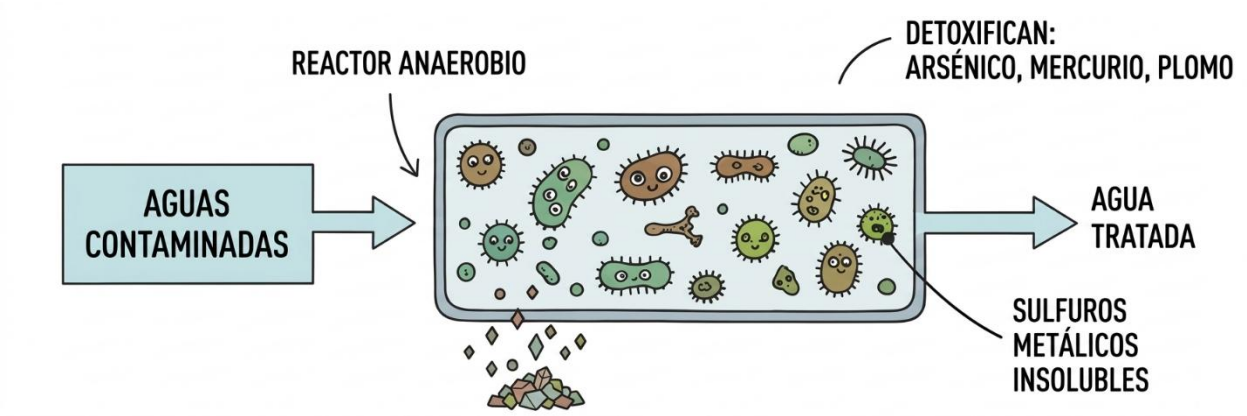
En paralelo, se ha fortalecido la investigación en el uso de microorganismos nativos para la biorremediación de cuerpos de agua contaminados por actividades industriales, mineras y agrícolas. Estos estudios buscan aprovechar las capacidades metabólicas adaptativas de cepas microbianas locales que han evolucionado en entornos contaminados, capaces de inmovilizar, transformar o detoxificar metales pesados como arsénico, mercurio, cadmio y plomo, así como compuestos orgánicos persistentes.

En regiones como Antioquia y Chocó, donde la minería informal ha generado alta contaminación hídrica, se han desarrollado proyectos experimentales con bacterias sulfato-reductoras (BSR) de géneros como Desulfovibrio, Desulfotomaculum y Desulfobacter. Estas bacterias promueven la formación de sulfuros metálicos insolubles, facilitando la remoción de metales mediante biosorción, bioprecipitación y complejación química en entornos anaerobios. Estos procesos se favorecen en reactores de flujo continuo o humedales anaeróbicos enriquecidos con materia orgánica (Gómez-Muñoz et al., 2020).

A continuación, se muestra en la figura 14 el proceso de la biotecnología de Microrganismos Autóctonos, y, además, en la tabla 13 se hace muestra la eficiencia de remoción del sistema igualmente de microorganismos autóctonos.

Figura 14

Proceso de Microorganismos Autóctonos



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de sistemas Microorganismos Autóctonos.

Tabla 13

Eficiencia de remoción en sistemas microorganismos autóctonos

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
Arsénico	70 – 95 %	Precipitación como sulfuros metálicos insolubles
Mercurio	80–98 %	Reducción microbiana + formación de sulfuros insolubles
Plomo	75–95%	Precipitación como sulfuro de plomo (PbS)
DBO_5	60–85 %	Degradación anaerobia de materia orgánica

DQO	55–80 %	Reducción en reactor anaerobio
SST	70 –90 %	Sedimentación y retención en biomasa

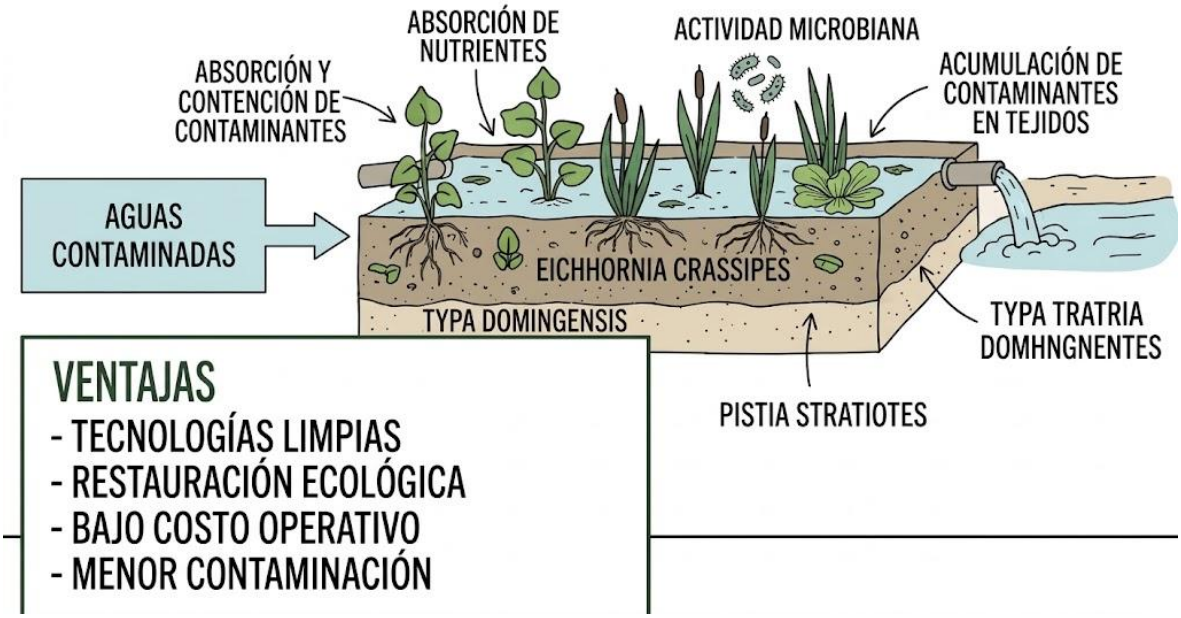
Nota. Adaptado de Lens et al. (1998), Muyzer y Stams (2008) y literatura técnica sobre reducción biológica de sulfatos en tratamiento de aguas residuales.

También se ha promovido la fitorremediación con plantas nativas como Eichhornia crassipes (buchón de agua), Typha domingensis (enea) y Pistia stratiotes, reconocidas por su capacidad de absorber, acumular o estabilizar contaminantes. Estas especies no solo remueven eficientemente metales traza, sino que también mejoran las condiciones fisicoquímicas del ecosistema acuático. Tales enfoques se alinean con los principios de tecnologías limpias, restauración ecológica y economía circular, resultando especialmente valiosos en territorios con escasa infraestructura y alto impacto ambiental.

A continuación, se muestra en la figura 15 el debido proceso de la biotecnología de sistemas de biorremediación de metales pesados, y además, en la tabla 14 se hace muestra la eficiencia de remoción contaminantes en sistemas de biorremediación de metales pesados.

Figura 15

Proceso de sistemas de biorremediación de metales pesados



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de. biorremediación de metales pesados**.**

Tabla 14

Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas de biorremediación de metales pesados.

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	65 – 85 %	Degradación por rizo bacterias asociadas a raíces
DQO	60–80 %	Absorción y degradación en rizosfera
SST	70–90%	Filtración por raíces y sedimentación

Nitrógeno total	40–75 %	Absorción por *Eichhornia crassipes*, *Typha domingensis*, *Pistia stratiotes*
Fósforo total	35-70 %	Absorción vegetal y adsorción en sustrato
Coliformes	50 –90 %	Fitoextracción, Fito estabilización y rizo filtración
Metales pesados	80-99%	Filtración + exudados radiculares antimicrobianos

Nota. Adaptado de Lens et al. (1998), Muyzer y Stams (2008) y literatura técnica sobre reducción biológica de sulfatos en tratamiento de aguas residuales.

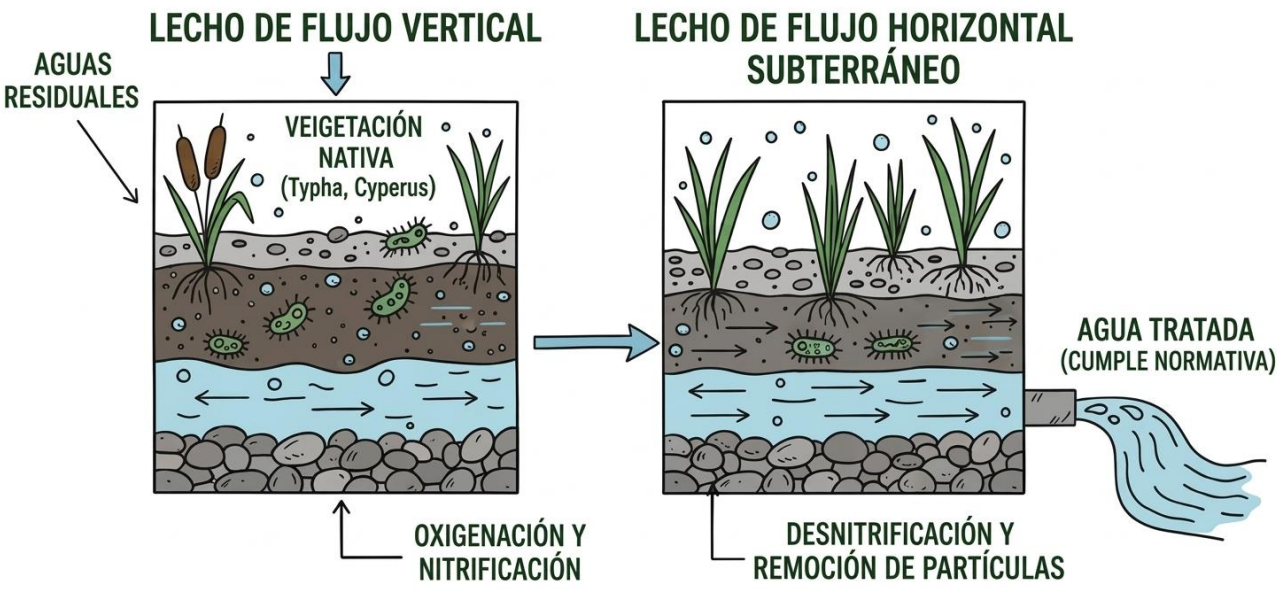
1.1.3.3. Humedales Artificiales Híbridos y Saneamiento Descentralizado: Una línea destacada de innovación ha sido el desarrollo de humedales artificiales híbridos, impulsados por universidades como la Universidad de los Andes. Estos sistemas combinan procesos aerobios y anaerobios dentro de un mismo módulo de tratamiento, integrando vegetación nativa altamente resistente a contaminantes, como Typha domingensis, Cyperus papyrus o Heliconia psittacorum.

Los humedales híbridos se organizan en lechos de flujo vertical y horizontal subterráneo, que actúan de manera complementaria: el flujo vertical favorece la oxigenación y nitrificación, mientras que el flujo horizontal permite la desnitrificación y la remoción de partículas finas. Este diseño permite una depuración integral mediante filtración física, degradación biológica, adsorción en sustratos y absorción vegetal.

A continuación, se muestra en la figura 16 el debido proceso de la biotecnología de sistemas de Humedales Artificiales Híbridos y Saneamiento Descentralizado, y además, en la tabla 15 se hace muestra la eficiencia de remoción contaminantes en sistemas de Humedales Artificiales Híbridos y Saneamiento Descentralizado.

Figura 16

Procesos de sistemas Humedales Artificiales Híbridos y Saneamiento Descentralizado



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de Humedales Artificiales Híbridos y Saneamiento Descentralizado

Tabla 15

Eficiencia de remoción de contaminantes en sistemas humedales artificiales híbridos y Saneamiento Descentralizado

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	85 – 95 %	Degradación aerobia en flujo vertical + anaerobia en flujo horizontal
DQO	80–92 %	Acción combinada de biopelícula y rizo filtración
SST	85–95%	Filtración en lechos + sedimentación
Nitrógeno total	80–90 %	Nitrificación en flujo vertical + desnitrificación en flujo horizontal subsuperficial
Fósforo total	50-80 %	Adsorción en sustrato + absorción por vegetación nativa
Coliformes	90 –99.99 %	Filtración + radiación solar + exudados radiculares
Metales pesados	50-85%	Adsorción en sustrato + fitoextracción por Typha, Cyperus

Contaminantes emergentes	30 – 75 %	Biodegradación en rizosfera + retención en sustrato

Nota. Adaptado de Vymazal (2010), Kadlec y Wallace (2009) y literatura técnica sobre humedales construidos híbrido.

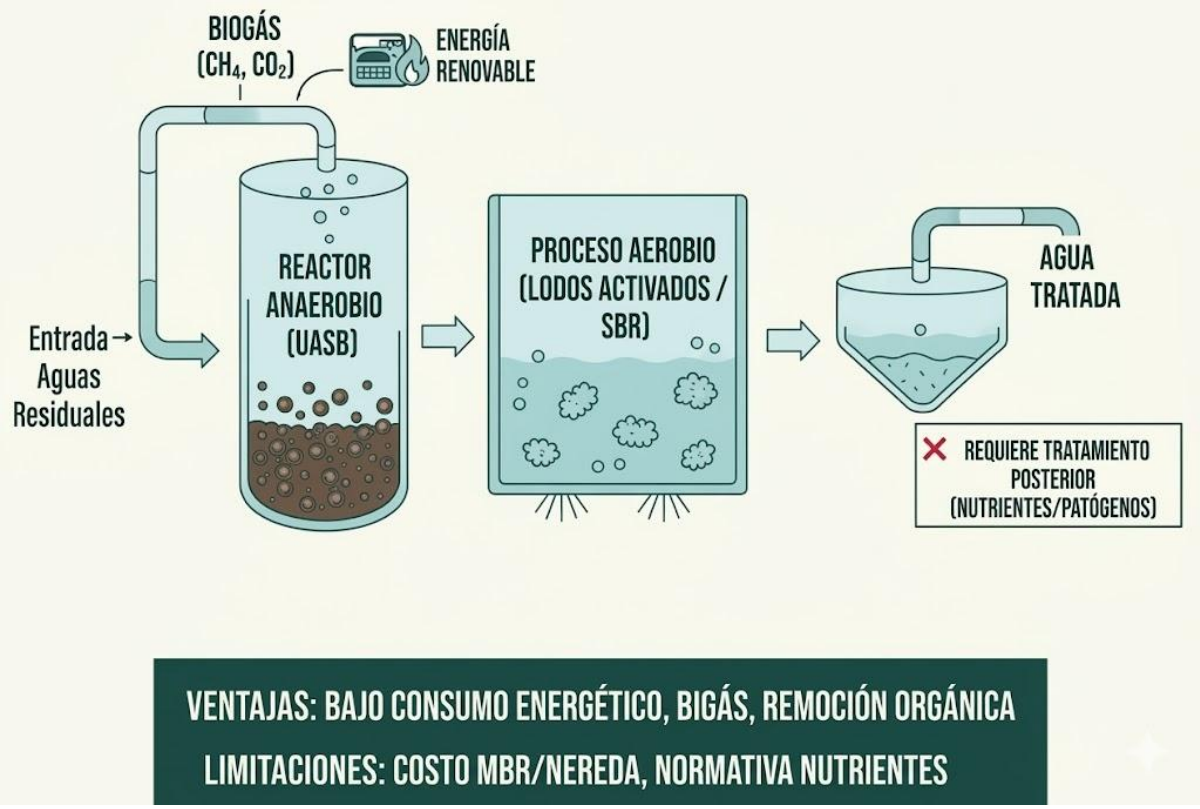
1.1.3.4. Tecnologías Emergentes en Plantas Urbanas: En zonas urbanas, varias Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) han comenzado a incorporar tecnologías innovadoras para optimizar la eficiencia en la remoción de contaminantes y minimizar su huella ambiental, especialmente en lo que respecta a emisiones de gases de efecto invernadero.

Entre estas tecnologías destacan los reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB), que se complementan con procesos aerobios como lodos activados o reactores biológicos secuenciales (SBR). Los UASB son particularmente útiles en países en desarrollo por su bajo consumo energético, adecuada remoción de carga orgánica y producción de biogás aprovechable. No obstante, requieren un tratamiento posterior para cumplir con los límites normativos de nutrientes y patógenos.

A continuación, se muestra en la figura 17 el debido proceso de la biotecnología de sistemas de tecnologías emergentes en plantas urbanas, y además, en la tabla 16 se hace muestra la eficiencia de remoción contaminantes en sistemas de tecnologías emergentes en plantas urbanas.

Figura 17

Procesos de tecnologías emergentes en plantas urbanas



Nota. Se observa cómo se observa el procedimiento de tecnologías emergentes en plantas urbanas

Tabla 16

Eficiencia de remoción de contaminantes en tecnologías emergentes en plantas urbanas

Parámetro	Porcentaje de remoción	Análisis Técnico
DBO_5	90 – 97 %	UASB remueve 70-80%; proceso aerobio complementa.
DQO	85–95 %	Alta eficiencia por combinación anaerobia-aerobia.
SST	85–95%	Sedimentación primaria en UASB + secundaria en aerobio.
Nitrógeno total	60–85 %	Limitado en UASB; proceso aerobio (SBR) logra nitrificación-desnitrificación.
Fósforo total	40-70 %	Eliminación biológica limitada; requiere postratamiento para cumplir normativa.
Coliformes	90 –99 %	Reducción parcial; requiere tratamiento posterior (desinfección).

Metales pesados	50-85%	Adsorción en lodos anaerobios y aerobios.
Contaminantes emergentes	30-80%	Mayor remoción que sistemas convencionales.

Nota. Adaptado de Metcalf & Eddy (2014), Tchobanoglous et al. (2014) y literatura técnica sobre sistemas combinados UASB–aerobios en tratamiento de aguas residuales.

1.2. Normatividad de los Tratamientos de las aguas residuales domesticas (A.R. D)

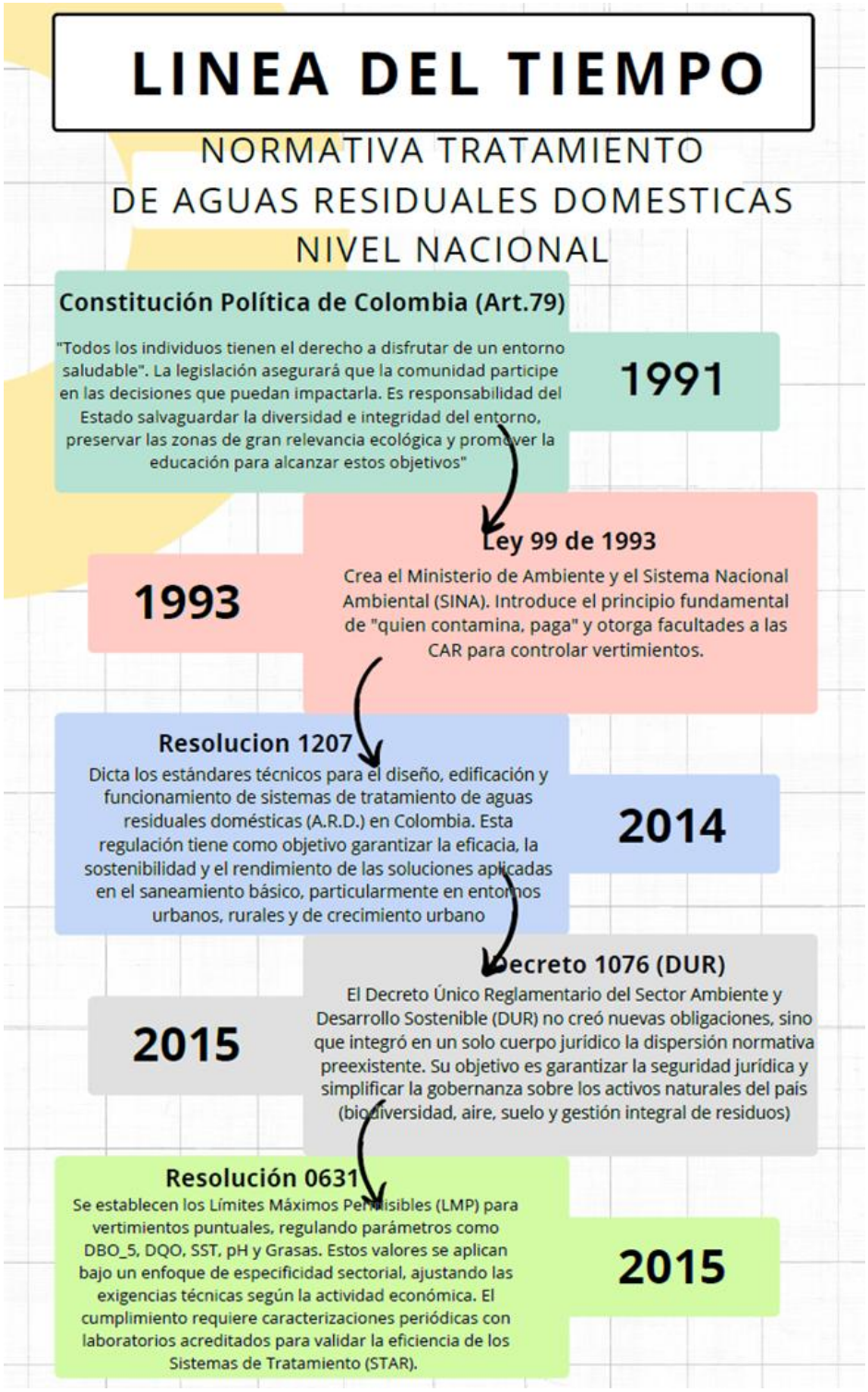
El tratamiento de aguas residuales domésticos es un elemento crucial en las políticas de administración ambiental, salud pública y preservación de los recursos hídricos. Estas aguas, producidas por tareas diarias como la higiene personal, la elaboración de alimentos y la limpieza de utensilios, poseen contaminantes físicos, químicos y biológicos que necesitan ser eliminados antes de ser liberadas al entorno.

La regulación del tratamiento de aguas residuales domesticas es primordial para evitar peligros sanitarios que puedan afectar la población civil, salvaguardar los cuerpos de agua existentes y garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. En Colombia, este procedimiento está sujeto a un marco regulatorio que define parámetros técnicos, límites tolerables de vertimiento y obligaciones de los participantes implicados. Además, se toman las normas y orientaciones internacionales como punto de referencia para robustecer el sistema de regulaciones nacional e a nivel internacional

1.1.1. Línea de tiempo legal en Colombia

Ilustración 1

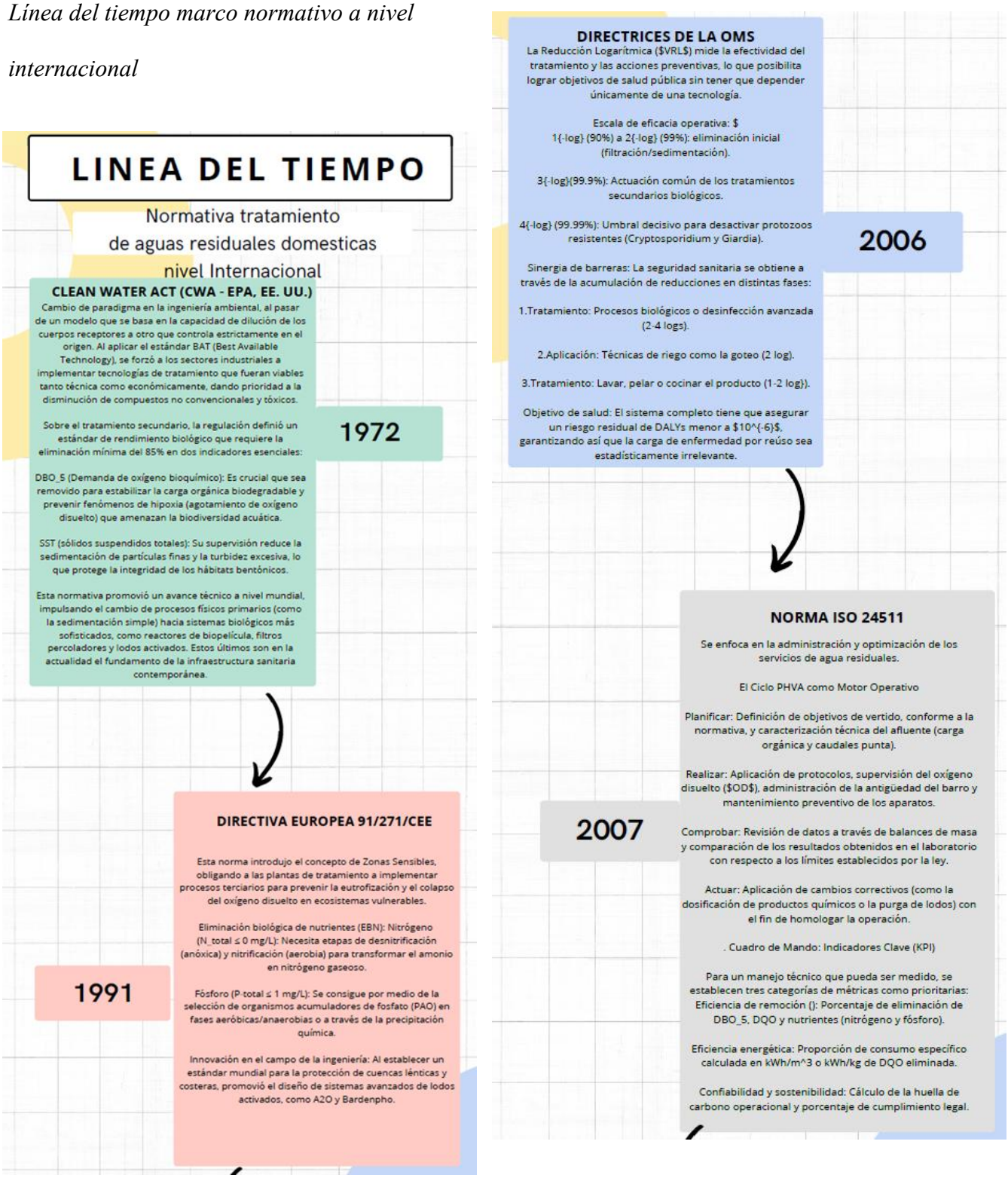
Línea del tiempo normativa nacional

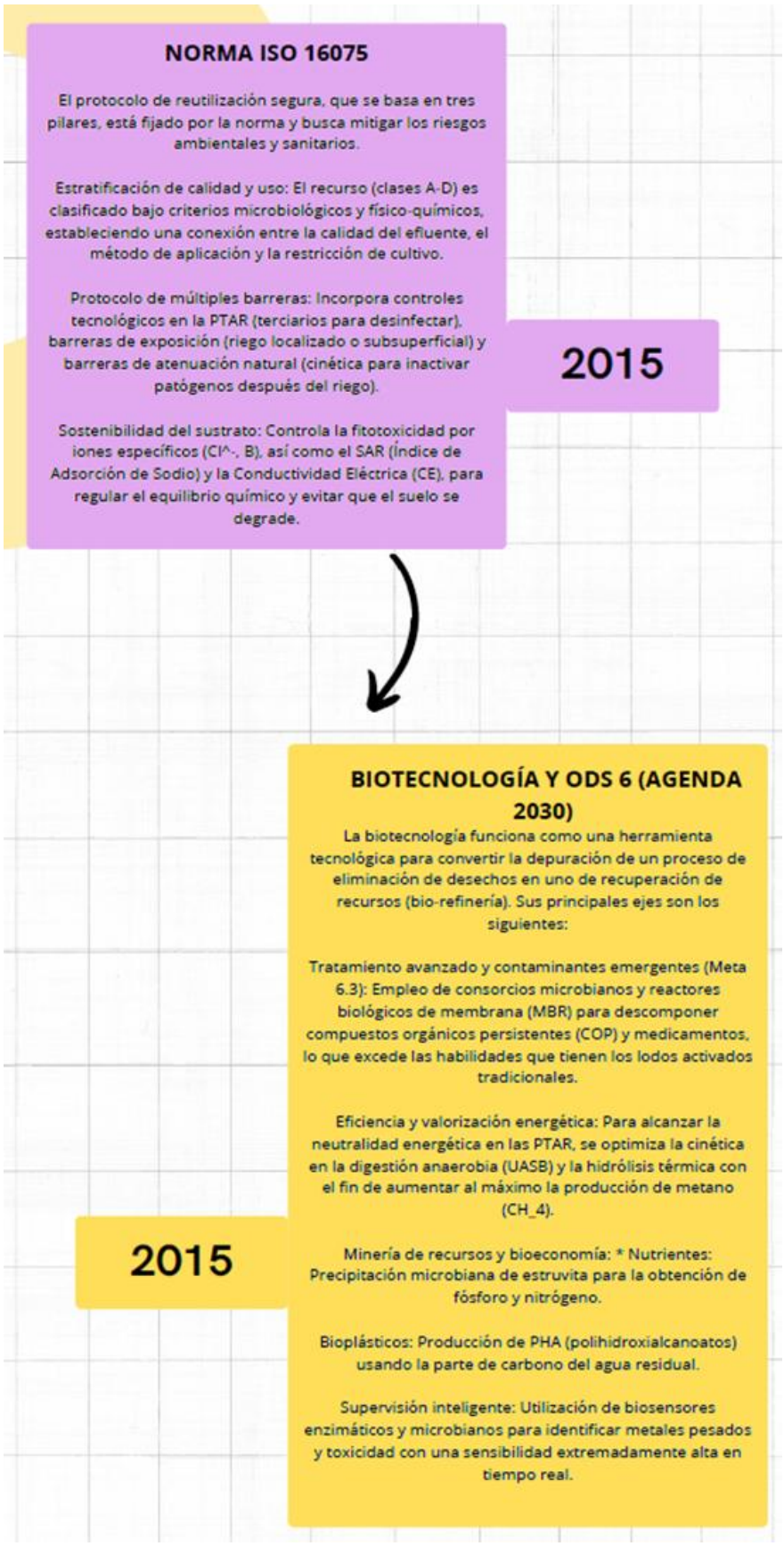


1.1.2. Normativa a nivel internacional

Ilustración 2

Línea del tiempo marco normativo a nivel internacional




NORMA ISO 16075
El protocolo de reutilización segura, que se basa en tres pilares, está fijado por la norma y busca mitigar los riesgos ambientales y sanitarios.
Estratificación de calidad y uso: El recurso (clases A-D) es clasificado bajo criterios microbiológicos y físico-químicos, estableciendo una conexión entre la calidad del efluente, el método de aplicación y la restricción de cultivo.
Protocolo de múltiples barreras: Incorpora controles tecnológicos en la PTAR (terciarios para desinfectar), barreras de exposición (riego localizado o subsuperficial) y barreras de atenuación natural (cinética para inactivar patógenos después del riego).
Sostenibilidad del sustrato: Controla la fitotoxicidad por iones específicos (Cl^-, B), así como el SAR (Índice de Adsorción de Sodio) y la Conductividad Eléctrica (CE), para regular el equilibrio químico y evitar que el suelo se degrade.
2015
BIOTECNOLOGÍA Y ODS 6 (AGENDA 2030)
La biotecnología funciona como una herramienta tecnológica para convertir la depuración de un proceso de eliminación de desechos en uno de recuperación de recursos (bio-refinería). Sus principales ejes son los siguientes:
Tratamiento avanzado y contaminantes emergentes (Meta 6.3): Empleo de consorcios microbianos y reactores biológicos de membrana (MBR) para descomponer compuestos orgánicos persistentes (COP) y medicamentos, lo que excede las habilidades que tienen los lodos activados tradicionales.
Eficiencia y valorización energética: Para alcanzar la neutralidad energética en las PTAR, se optimiza la cinética en la digestión anaerobia (UASB) y la hidrólisis térmica con el fin de aumentar al máximo la producción de metano (CH_4).
2015
Minería de recursos y bioeconomía: * Nutrientes: Precipitación microbiana de estruvita para la obtención de fósforo y nitrógeno.
Bioplásticos: Producción de PHA (polihidroxialcanoatos) usando la parte de carbono del agua residual.
Supervisión inteligente: Utilización de biosensores enzimáticos y microbianos para identificar metales pesados y toxicidad con una sensibilidad extremadamente alta en tiempo real.

1.3. Caracterización del sistema de aguas servidas y contexto socio ambiental de Ocaña

1.3.1. Descripción del sistema de aguas residuales

La prestación de los servicios de saneamiento básico en el municipio de Ocaña se encuentra bajo el modelo de concesión, delegando la responsabilidad operativa y administrativa a la Empresa de Servicios Públicos de Ocaña S.A. E.S.P. (ESPO S.A.). Según los lineamientos de la Ley 142 de 1994, esta entidad es la encargada de garantizar la eficiencia, continuidad y calidad del sistema en el casco urbano (ESPO S.A., 2024).

La gestión de ESPO S.A. es fundamental para el desarrollo territorial, ya que la compañía administra de manera integral el ciclo del agua, desde su captación en el sistema de acueducto hasta su disposición final en la red de alcantarillado.

El sistema de alcantarillado en Ocaña se ha concebido como una red mixta. Este modelo tecnológico supone que una sola infraestructura capta y transporta al mismo tiempo las aguas residuales de los hogares y las aguas de escorrentía pluvial.

Adicionalmente, según el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV, 2023), el municipio cuenta con múltiples puntos de vertimiento distribuidos en diferentes sectores urbanos, los cuales descargan directamente a los cuerpos hídricos receptores. En la tabla 17 se presenta la caracterización de algunos de estos puntos, incluyendo variables como caudal,

población aferente y concentraciones de DBO_5 y SST, evidenciando cargas contaminantes significativas asociadas a las aguas residuales domésticas.

1.3.2 Caracterización del Sistema de Alcantarillado

El acueducto y alcantarillado del municipio de Ocaña, opera bajo la concesión de E.S.P.O S. A, el servicio de alcantarillado es suministrado a un total de 31,068 usuarios entre todos los estratos, mediante un sistema de alcantarillado mixto.

De acuerdo con estudios técnicos locales, este tipo de sistema presenta desafíos operativos críticos, tales como el riesgo de presurización y rebose en pozos de inspección durante eventos de alta pluviosidad, debido a que el crecimiento de la mancha urbana ha incrementado la impermeabilización del suelo, superando la capacidad hidráulica original de los colectores (Universidad de La Salle, 2021).

Según el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV, 2023), el municipio cuenta con múltiples puntos de vertimiento distribuidos en diferentes sectores urbanos, los cuales descargan directamente a los cuerpos hídricos receptores. En la **Tabla 17** se presenta la caracterización de algunos de estos puntos, incluyendo variables como caudal, población aferente y concentraciones de DBO_5 y SST, evidenciando cargas contaminantes significativas asociadas a las aguas residuales domésticas.

Tabla 17

Localización y Caracterización de los vertimientos Zona urbana-Rio Tejo

Receptor	Numero de Vertimiento	Nombre del Punto de Vertimiento	Coordenada		Caudal Vertimiento	Población Aferente	Concentración		Año Eliminación
			Norte	Oeste			DBO5 mgDBO5/l	SST mg/l	
Rio Tejo	1	Sector Juan XXIII	1079130.79	1403193.54	6.75	6381	94.3	20	2027
	2	Sector La Torcoroma Sobre la carrera 5	1079231.06	1402978.23	4.69	1311	84.7	18	2027
	3	Puente Primero de Mayo	1079253.72	1404172.24	38.46	36558	119.9	25.5	2025
	4	Puente Col Fernández - El Lago	107901.63	1404731.83	3.91	5700	208	41	2025
	5	Puente Estadio Hermides Padilla	1079030.16	1405196.56	3.7	1141	81.5	17.3	2025
	6	Bomberos - Defensa Civil	1079026.76	1405386.73	18.75	3638	108.8	23.1	2025
	7	Puente La Gloria	1078995.83	1405569.79	4.69	667	112.4	23.9	2025

Receptor	Numero de Vertimiento	Nombre del Punto de Vertimiento	Coordenada		Caudal Vertimiento	Población Aferente	Concentración DBO5 mgDBO5/l	Concentración SST mg/l	Año Eliminación
			Norte	Oeste					
	8	La Feria	1079074.34	1405821.56	5.05	490	104.2	22.1	2029
	9	Torres del Cable - Puente Cantarana	1079084.11	1406000.7	11.38	4288	113.6	24.1	2030
	10	Los Cristales	1079080	1404727	2.85	720	219	50	2030
Rio Chiquito	11	Interceptor Izquierdo Rio Chiquito - Sector Seguro Social	1079368	1404030	105.15	1350 6	209	43	2024
	12	Interceptor Derecho Rio Chiquito - Sector Seguro Social	1079378	1404046	105.15	1570 4	209	43	2024

Receptor	Numero de Vertimiento	Nombre del Punto de Vertimiento	Coordenada		Caudal Vertimiento	Población Aferente	Concentración		Año Eliminación
			Norte	Oeste			DBO5 mgDBO5/l	SST mg/l	
	13	Cristo Rey - Circunvalar Simón Bolivar - Sector Seguro Social	1079378	1404046	105.15	3595	209	43	2024
	14	Los Olivos - Belén	1081892.1	1401756.41	11.27	476	212	49	2029
Rio de Oro	15	Transregional	1078325.27	1406592.62	12.21	7697	227	47	2030
	16	Colinas de la Esperanza	1078227.5	1407359.62	12.21	2093	227	47	2030
Quebrada El Hatillo	17	El Hatillo	1080809.17	1403093.05	11.27	12341	212	49	2026

Nota. Datos de vertimientos y calidad del agua (DBO_5 y SST) en cuerpos hídricos del municipio. Adaptado del PSMV y de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2015).

1.3.2.1. **Clasificación del Sistema:** El modelo mixto: El alcantarillado del municipio de Ocaña está clasificado en su mayoría como un sistema mixto (o combinado). Esta configuración técnica está marcada por la presencia de una sola red de tuberías que tiene como propósito recoger y trasladar, a la vez, las aguas residuales generadas en el ámbito doméstico y las aguas pluviales que surgen de la escorrentía superficial de las lluvias.

De acuerdo con Pérez y Solano (2020), esta tipología es característica de los cascos urbanos con procesos de consolidación antigua, donde la infraestructura inicial no contemplaba la separación de flujos. Este sistema es particularmente predominante en Ocaña, específicamente en los barrios fundacionales y las áreas del centro histórico, donde la infraestructura ha crecido de forma orgánica al ritmo del aumento de población.

1.3.3. Comportamiento hidráulico y desafíos operativos.

El comportamiento hidráulico del sistema de alcantarillado mixto en Ocaña está estrechamente ligado a la variabilidad del ciclo hidrológico, lo que genera cambios significativos en los patrones de flujo según la estación del año.

Durante la época de estiaje, el sistema transporta principalmente aguas residuales domésticas, con caudales bajos que requieren mantener velocidades adecuadas para evitar la sedimentación de sólidos en las tuberías. En contraste, en la temporada de lluvias se presentan incrementos súbitos del caudal debido a la incorporación de aguas pluviales, lo que eleva la

presión hidráulica y diluye la carga contaminante. No obstante, estas condiciones pueden generar sobrecargas en el sistema.

De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2016), los sistemas mixtos presentan importantes limitaciones operativas. Entre ellas se destacan el riesgo de desbordamientos o descargas combinadas (CSO), que ocurren cuando la capacidad hidráulica es superada durante eventos de lluvia intensa, provocando vertimientos directos a cuerpos de agua como al rio Tejo o al canal del rio Chiquito. Asimismo, estos sistemas requieren mayores diámetros de conducción, lo que incrementa los costos de construcción y mantenimiento.

1.3.4. Infraestructura y estado de la red.

El comportamiento hidráulico del sistema de alcantarillado mixto en Ocaña está estrechamente ligado a la variabilidad del ciclo hidrológico, lo que genera cambios significativos en los patrones de flujo según la estación del año.

La red de alcantarillado de Ocaña presenta una infraestructura heterogénea, resultado de diferentes etapas de crecimiento urbano. Predominan dos materiales: el gres (cerámica vitrificada), presente en zonas antiguas y con más de 30–40 años de servicio, lo que implica un alto nivel de deterioro estructural; y el PVC, utilizado en expansiones recientes, que ofrece mayor flexibilidad y hermeticidad. La coexistencia de ambos materiales genera discontinuidades

estructurales e hidráulicas, favoreciendo problemas como infiltraciones, sobrecargas y fallas operativas.

En cuanto a los riesgos estructurales, se identifican varios puntos críticos. Los desbordamientos hidráulicos son frecuentes en sectores con alcantarillado mixto durante la temporada de lluvias, debido a la reducción de la capacidad hidráulica por acumulación de sedimentos, lo que ocasiona reboses en pozos de inspección y retorno de aguas residuales hacia las viviendas (Alcaldía de Ocaña, 2023). Asimismo, la inestabilidad geológica del terreno, especialmente en zonas de ladera, incrementa la probabilidad de fallas estructurales por deslizamientos y esfuerzos diferenciales en las tuberías. En las áreas de expansión periférica, las deficiencias constructivas, como una inadecuada compactación del suelo o errores en la instalación, agravan problemas de deformación, infiltración y pérdida de eficiencia hidráulica.

Por otro lado, la red presenta un rezago significativo en su renovación, ya que muchas tuberías, especialmente de gres, han superado su vida útil sin ser reemplazadas oportunamente. Esta situación genera una “deuda de infraestructura” que incrementa el riesgo de fallas y reduce el desempeño del sistema. Según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2023), la ausencia de programas de mantenimiento preventivo aumenta los costos operativos, siendo las intervenciones correctivas hasta un 40 % más costosas.

En este contexto, la gestión del sistema tiende a ser reactiva, lo que compromete su sostenibilidad técnica y financiera, evidenciando la necesidad de implementar estrategias de renovación progresiva y mantenimiento preventivo basadas en criterios de riesgo.

1.3.5 Tendencias de modernización del sistema

La ingeniería sanitaria moderna promueve la transición de sistemas de alcantarillado mixto hacia sistemas separados, en los cuales las aguas residuales domésticas y las aguas pluviales se conducen mediante redes independientes. En este modelo, las aguas pluviales se gestionan a través de sistemas de drenaje urbano sostenible o descargas controladas, mientras que las aguas residuales son transportadas a plantas de tratamiento (PTAR) para su depuración.

Este enfoque permite mejorar el rendimiento hidráulico, reducir la carga sobre las PTAR y disminuir los eventos de desbordamientos o alivios combinados, lo que contribuye a una mayor eficiencia del tratamiento y a la protección de los cuerpos de agua. Asimismo, favorece una mayor estabilidad operativa al reducir la variabilidad en el caudal y la carga contaminante.

No obstante, en ciudades consolidadas como Ocaña, la implementación de sistemas separativos implica altos costos de inversión, asociados a la construcción de nuevas redes, la interferencia con infraestructuras existentes y la afectación de la red vial. Además, requiere una planificación integral y una ejecución por fases, lo que limita su viabilidad a corto plazo desde el punto de vista técnico y financiero.

1.3.6 Inventario de puntos de vertimiento

1.3.6.1. Cuerpos receptores principales: La configuración de la red hídrica y las condiciones topográficas del municipio de Ocaña favorecen la concentración de los vertimientos en dos ejes fluviales principales, como se puede ver en la figura 18

Figura 18

Localización Puntos de vertimientos



Nota. Adaptado de Corponor, realización propia

Río Tejo: Constituye el principal receptor de aguas residuales provenientes del área urbana, especialmente de los sectores sur y occidente. Este cuerpo de agua presenta una alta presión antrópica debido a la presencia de múltiples descargas puntuales sin tratamiento, lo que genera elevadas cargas de materia orgánica (DBO_5 y DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y microorganismos patógenos. De acuerdo con Corponor (2022), se evidencia un deterioro progresivo en la calidad del agua, reflejado en la disminución del oxígeno disuelto, el incremento de la turbidez y la alteración de las condiciones ecológicas del ecosistema acuático.

Río Chiquito: Recibe las descargas provenientes de los sectores norte y oriental del municipio. Su dinámica hidráulica facilita el transporte de contaminantes hacia su confluencia con el río Tejo, generando un efecto acumulativo de cargas contaminantes. Esta interacción reduce la capacidad de autodepuración del sistema hídrico y contribuye al deterioro progresivo de la calidad del agua en la cuenca baja, con implicaciones sobre la cuenca del río Algodonal y luego en el rio Catatumbo.

1.3.7. Impactos ambientales en cuerpos hídricos

El sistema de drenaje urbano de Ocaña descarga principalmente hacia la subcuenca del río Algodonal, siendo los ríos Tejo y Chiquito los principales receptores. La interacción con el sistema de alcantarillado mixto ha generado alteraciones significativas en las características físicas, químicas y biológicas de estos cuerpos de agua (Pacheco & García, 2022).

1.3.7.1. Impacto sobre el río Tejo: El río Tejo es el principal receptor de las descargas urbanas, lo que lo convierte en el eje de mayor presión antrópica. La continua incorporación de materia orgánica incrementa la DBO_5, provocando una rápida disminución del oxígeno disuelto y generando condiciones de hipoxia e incluso anoxia en sectores urbanos. Esto afecta la fauna acuática y favorece procesos de degradación anaerobia, con generación de gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y metano (CH_4), que deterioran aún más la calidad del agua y producen olores ofensivos.

Durante eventos de lluvia, el arrastre de sólidos suspendidos y sedimentos genera procesos de colmatación del lecho, modificando la morfología del cauce y reduciendo su capacidad hidráulica. Esta acumulación también limita los procesos naturales de autodepuración, al afectar el intercambio de oxígeno y la actividad de los organismos bentónicos.

1.3.7.2. Impacto sobre el río Chiquito: El río Chiquito, aunque de menor caudal, desempeña un papel clave en la transferencia de contaminantes hacia el río Tejo. Actúa como un colector de descargas urbanas, generando un efecto acumulativo que incrementa la carga contaminante en el sistema hídrico.

La confluencia de contaminantes orgánicos, nutrientes y sólidos suspendidos produce un efecto sinérgico que aumenta el riesgo de eutrofización, reduce el oxígeno disuelto y afecta la biota acuática. Además, la presencia de tensoactivos provenientes de aguas domésticas altera la interfase aire–agua, dificultando el intercambio gaseoso y disminuyendo la capacidad de autodepuración.

Estos compuestos también pueden generar efectos tóxicos sobre los organismos acuáticos, afectando sus funciones fisiológicas y reduciendo la resiliencia ecológica del sistema fluvial (Sánchez & Quintero, 2023).

En conjunto, estos impactos evidencian un deterioro progresivo de los cuerpos hídricos del municipio, lo que refuerza la necesidad de implementar sistemas de tratamiento que reduzcan la carga contaminante y restauren la calidad del recurso hídrico.

1.3.7.3. Conflictos socioambientales y percepción comunitaria: La degradación de los ríos Tejo y Chiquito ha generado impactos sociales y ambientales relevantes. Los vertimientos sin tratamiento favorecen procesos anaerobios que producen gases como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), con efectos negativos sobre la salud, la infraestructura y el entorno urbano.

Además, los cuerpos de agua han perdido su valor recreativo y paisajístico, generando conflictos socioambientales y una percepción negativa por parte de la comunidad. La ausencia de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se identifica como una de las principales limitaciones para mejorar la calidad ambiental y el bienestar social.

1.3.8. Costos de implementación y operación

1.3.8.1. Costos de implementación: Los costos se dividen en inversión inicial (CAPEX) y costos operativos (OPEX), los cuales varían según la escala, la tecnología y las características del afluente.

Tabla 18

Costo y Mantenimiento

Escala / Sistema	CAPEX (Inversión inicial)	OPEX (Costo operativo)	Tecnología típica
Residencial / Pequeño	USD 2.000 – 4.000	USD 500 – 1.200/año	Sistemas compactos descentralizados
Industrial / Mediano	USD 25.000 – 250.000+	USD 2 – 10 / 1.000 galones	Lodos activados, SBR, MBR
Gran escala (PTAR)	USD 400.000 – 1.200.000 por cada 1.000 m³/día	Variable (energía 25–40 % del OPEX)	Plantas municipales

Nota. Elaboración propia a partir de datos de la literatura especializada (Garrido-Baserba et al., 2022; Kerstens et al., 2013; Supra International, 2026).

1.3.8.2 Operación y mantenimiento: Los sistemas biológicos requieren operación continua para mantener activa la biomasa microbiana, lo que implica consumo constante de energía en procesos como aireación, recirculación y bombeo, representando hasta el 40–50 % del OPEX.

Además, es fundamental implementar programas de monitoreo y mantenimiento que incluyan el control de variables como pH, temperatura, oxígeno disuelto y carga orgánica. Mientras que en sistemas pequeños el control puede ser periódico, en plantas de mayor escala se requiere monitoreo continuo para garantizar la estabilidad del proceso.

La gestión de la biomasa también es clave; en situaciones de sobrecarga o variabilidad del afluente, puede ser necesaria la bioaumentación, lo que implica costos adicionales asociados al uso de consorcios microbianos especializados.

1.3.9. Gestión de lodos y control de olores

El manejo de lodos y emisiones odorantes es un componente crítico del sistema. Los lodos generados requieren procesos de estabilización, deshidratación y disposición final, siendo la digestión anaerobia una alternativa eficiente para reducir volumen y generar biogás aprovechable.

En cuanto a los olores, estos se originan principalmente por compuestos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) en condiciones anaerobias. Su control se realiza mediante sistemas de

ventilación, biofiltros y, en algunos casos, procesos de tratamiento químico. La incorporación de estas medidas desde la fase de diseño permite minimizar impactos sociales y mejorar la operatividad del sistema.

Capítulo 2. Análisis bibliométrico

2.1. Introducción

Con el objetivo de realizar un análisis bibliográfico referente al tema de estudio se hizo una recolección de información teniendo la siguiente ecuación de búsqueda" biotechnology AND treatment AND wastewater" en la base de datos Scopus en donde se encontraron un total de 5107 documentos. Posteriormente se delimitó la búsqueda de estudios realizados en el área de ingeniería entre los años 1980 al 2026.

Después de aplicar los filtros, la búsqueda se redujo a 4459 resultados los cuales se tuvieron en cuenta para realizar el análisis en bibliometrix. Se encontraron diferentes documentos como artículos, libros y ponencias como se muestra en la tabla 19

Tabla 19

Cantidad de documentos

Tipo de documento	Resultados
Artículo	3,009
Reseña	747
Ponencia de conferencia	478
Capítulo de libro	193
Libro	67

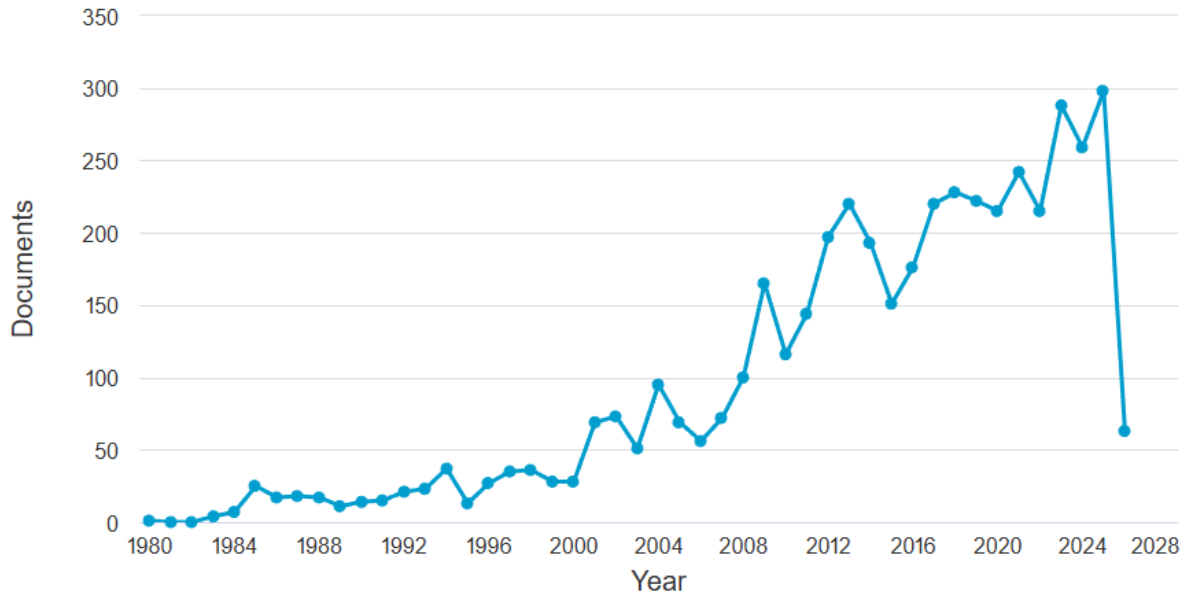
Breve encuesta	34
Reseña de la conferencia	18
Editorial	13

Nota. Datos obtenidos de Bibiliometrix

La producción científica anual que se ha realizado a través del tiempo nos indica que desde 1952 hasta el 2000 fue baja ya que solo se producían menos de 50 investigaciones al año pero a partir del 2009 se ha evidenciado un aumento significativo que se ha mantenido hasta la fecha como se muestra en la figura.

Figura 19

Autores Relevantes



Nota. Gráfico obtenido de Bibliometrix

2.2. Fuentes más relevantes

Tabla 2 muestra las fuentes más relevantes que han realizado aportes científicos significativos, destacando en primer lugar la Revista “Bioresource Technology” que cuenta con un total de 627 artículos publicados.

Figura 20

Fuentes más relevantes

	Fuentes	Articulos
1	BIORESOURCE TECHNOLOGY	627
2	WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY	230
3	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	133
4	WATER RESEARCH	131
5	JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY	125
6	APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY	112
7	ADVANCED MATERIALS RESEARCH	101
8	CHEMOSPHERE	92
9	JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS	86
10	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT	83

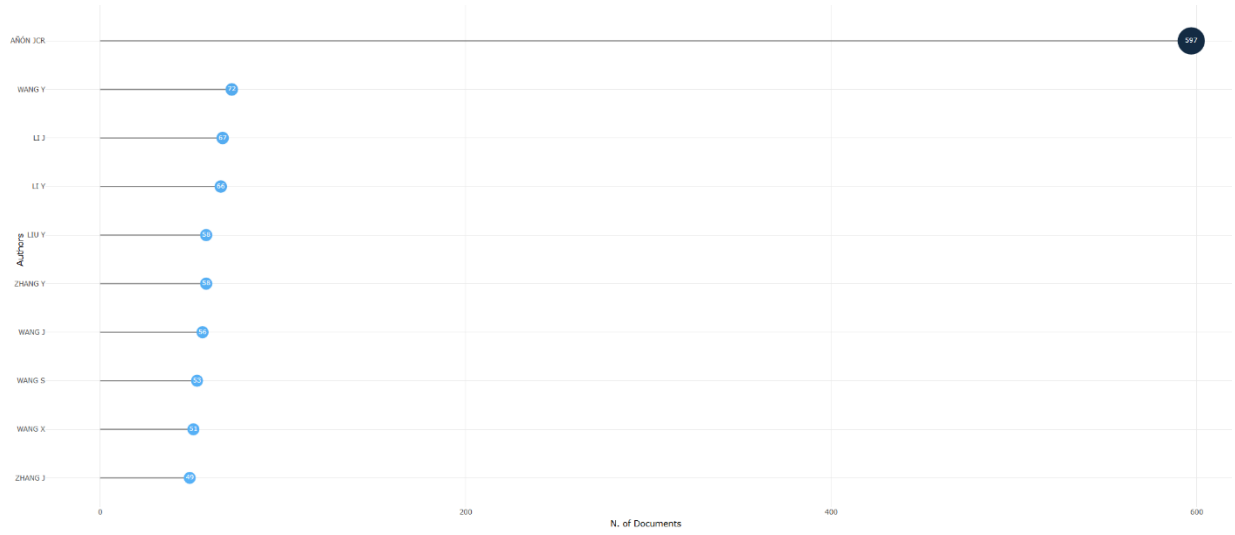
Nota. Datos obtenidos de Bibliometrix

2.3. Autores más relevantes

Añon JCR es el autor con más producción de artículos relacionados con el tema en estudio como se muestra en el gráfico 1. La mayoría de sus contribuciones científicas se han realizado en los últimos cinco años, lo que destaca su creciente influencia en el desarrollo y experiencia en el área

Figura 21

Autores más relevantes



Nota. Gráficos obtenidos de Bibliometrix.

2.3. Afiliaciones más importantes

La tabla 3 muestra las diez universidades con mayor producción académica en el mundo. La universidad RV College of Engineering (RVCE) ubicada en Bangalore, Karnataka, India lidera la lista con 62 artículos, luego la Universidad de Queensland de Brisbane, Australia con 45 artículos. Es importante destacar que seis instituciones que se encuentran en el Ranking son chinas lo que refleja el impacto de este país en la investigación científica a nivel mundial.

Tabla 20

Afiliaciones más importantes

Afiliacion	Articulos
COLLEGE OF ENGINEERING	62
THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND	54
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY	53
TSINGHUA UNIVERSITY	48
WAGENINGEN UNIVERSITY AND RESEARCH	48
BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	46
UNIVERSITEIT GENT	43
TONGJI UNIVERSITY	42
NATIONAL CHENG KUNG UNIVERSITY	41
SHANDONG UNIVERSITY	41

Nota. Datos obtenidos de Bibliometrix

2.4. Nube de palabras

La nube de palabras ilustra los términos más importantes que se encuentran en la bibliografía seleccionada, entre los cuales biotechnology(biotecnología), Wastewater treatment (tratamiento de agua) entre otros, se destacan como conceptos claves para la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Figura 22

Nube de palabras



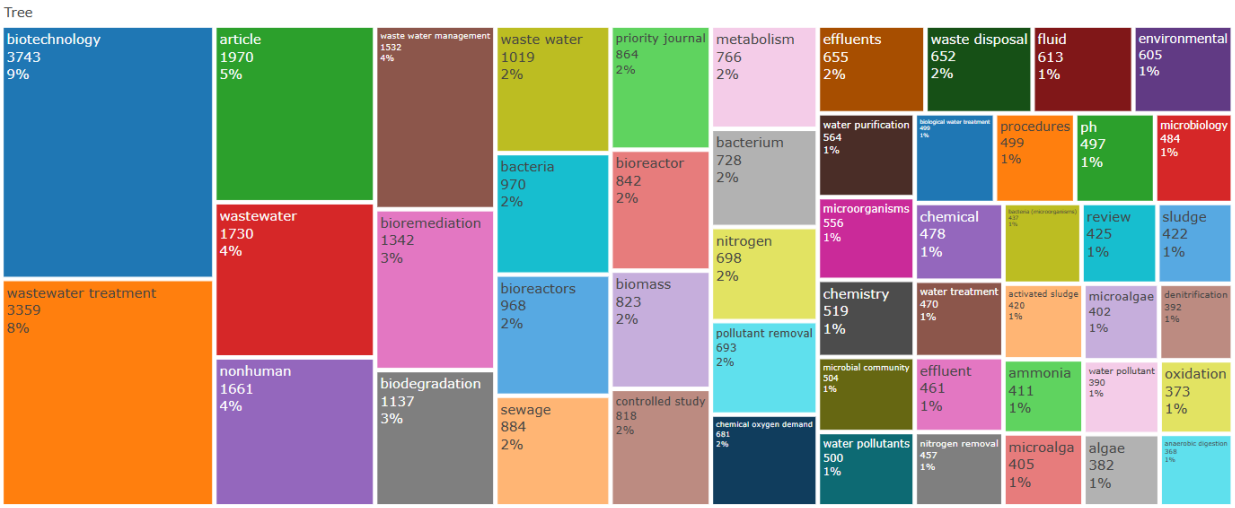
Nota. Gráfico obtenido de Bibliometrix

2.5. Mapa de arboles

El mapa de árboles de la figura es una representación visual que contiene los porcentajes de los términos más relevantes en la documentación seleccionada, donde la biotecnología y tratamiento de aguas son las áreas más discutidas y en base a esto podemos evidenciar la disponibilidad del recurso hídrico y su calidad; además de la presencia de la necesidad de adoptar nuevas soluciones entre ellas con algunas tecnologías como la desalinización, aspectos ambientales, y aspectos agrícolas como el tratamiento de agua y su conservación.

Figura 23

Mapa de arboles



Nota. Gráfico obtenido de Bibliometrix

2.6 Documentos Más Citados

El artículo más citado es "Intrinsic peroxidase-like activity of ferromagnetic nanoparticles. *Nature Nanotechnology* " con 6055 citas. Este estudio aborda la biotecnología desde varios frentes clave, al demostrar que las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) pueden reemplazar o complementar enzimas biológicas en aplicaciones analíticas y de diagnóstico

Tabla 21

Documentos más citados

Nombre, Año, Articulo	DOI	Citas totales
GAO L, 2007, NAT NANOTECHNOL	10.1038/nnano.2007.260	6650
AL-TOHAMY R, 2022, ECOTOXICOL ENVIRON SAF	10.1016/j.ecoenv.2021.113160	2609
WANG J, 2009, BIOTECHNOL ADV	10.1016/j.biotechadv.2008.11.002	2527
MOHAN D, 2014, BIORESOUR TECHNOL	10.1016/j.biortech.2014.01.120	2110
MOHAMMAD AW, 2015, DESALINATION	10.1016/j.desal.2014.10.043	1858
VIJAYARAGHAVAN K, 2008, BIOTECHNOL ADV	10.1016/j.biotechadv.2008.02.002	1715
PANT D, 2010, BIORESOUR TECHNOL	10.1016/j.biortech.2009.10.017	1687

PEARCE CI, 2003, DYES PIGM	10.1016/S0143-7208(03)00064-0	1501
DU Z, 2007, BIOTECHNOL ADV	10.1016/j.biotechadv.2007.05.004	1473
WANG J, 2006, BIOTECHNOL ADV	10.1016/j.biotechadv.2006.03.001	1330

Nota. Datos obtenidos de Bibliometrix

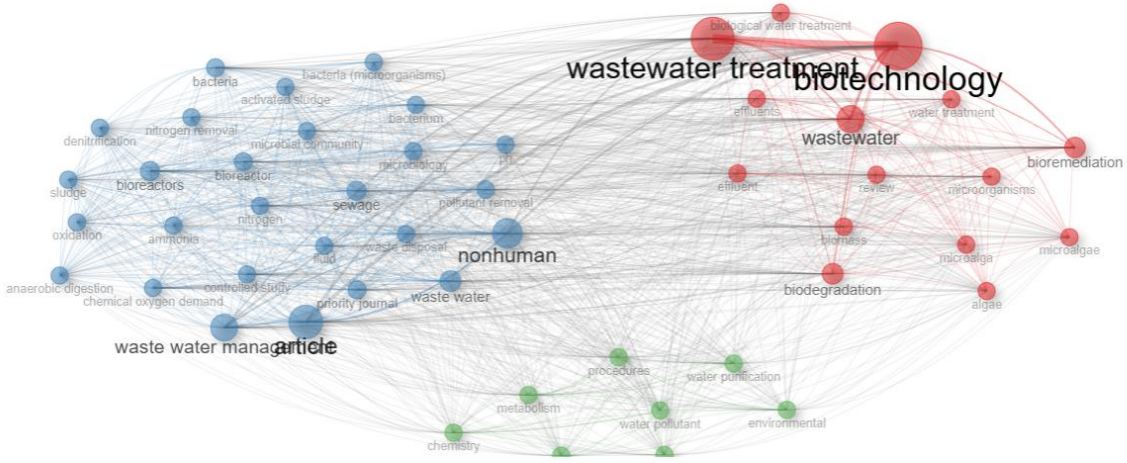
2.7 Red de Concurrencia

Una red de concurrencia visualiza la interrelación entre múltiples términos como se muestra en la imagen5, donde se vinculan conceptos de saneamiento y biotecnología, divididos en tres grandes grupos con diferentes enfoques, siendo el más importante el que se centra en la biotecnología y su aplicación al tratamiento de aguas residuales, que se encuentra enfocado a la biorremediación, el uso de microalgas y biodegradación mediante biomasa.

El segundo enfoque está dirigido a la gestión e ingeniera de infraestructura, prioriza la operatividad del sistema como biorreactores y lodos activados para la remoción de nutrientes y el control de la DQO. Al final un tercer enfoque esta dirigido a la parte ambiental que intrega la química y el metabolismo en la purificación y el estudio de contaminantes.

Figura 24

Red de Concurrencia



Nota. Gráfico obtenido de Bibliometrix

2.8 **Producción Científica por país**

La siguiente tabla nos muestra los diez países que más contribuyen en la investigación científica, siendo China el número uno en la lista con el 23,5 % de los artículos publicados, luego sigue India con un 11,1%, reflejando el papel crucial de estas naciones en la generación de conocimiento científico a nivel mundial. Además, el país Latinoamérica mas se encuentra cerca es Brazil con un 3,10%.

Tabla 22

Producción científica por país

Pais	Porcentaje
CHINA	23,50%
INDIA	11,10%
USA	7,43%
SPAIN	3,93%
BRAZIL	3,10%
SOUTH KOREA	2,77%
ITALY	2,67%
JAPAN	2,25%
CANADA	2,25%
UK	2,23%

Nota. Datos obtenidos de Bibliometrix

3. Experiencia autores y estudios del caso

3.1 Encuestas para identificar fortalezas en el tema en los profesionales de Ocaña

En la presente investigación, se empleó como técnica de recolección de información una encuesta, diseñada como un instrumento de corte cuantitativo. El propósito de esta es recabar la percepción, conocimiento y opinión de actores clave respecto a la factibilidad técnica y operativa de la implementación de tecnologías biotecnológicas en sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas (TARD) en el municipio de Ocaña, Norte de Santander.

El instrumento fue validado por la directora del proyecto , quien evaluaron su claridad y pertinencia, permitiendo eliminar preguntas redundantes y ajustar opciones de respuesta. Luego, se aplicó una prueba piloto a 2 profesionales del sector para verificar la comprensión y duración de la encuesta, confirmando su viabilidad antes de la aplicación definitiva.

El tamaño de muestra de 27 encuestados se justifica bajo un enfoque cualitativo-intensivo y no probabilístico, ya que el estudio no buscó representatividad estadística de toda la población, sino recabar la opinión de actores clave (profesionales, especialistas y tomadores de decisión) con experiencia directa en el sector de saneamiento local. Dado que el universo de profesionales calificados en Ocaña en áreas como ingeniería sanitaria, gestión de servicios públicos (ESPO S.A.) y autoridad ambiental (CORPONOR) es reducido, 27 encuestados constituyen una proporción significativa de ese universo técnico. A continuación, las preguntas realizadas en la encuesta.

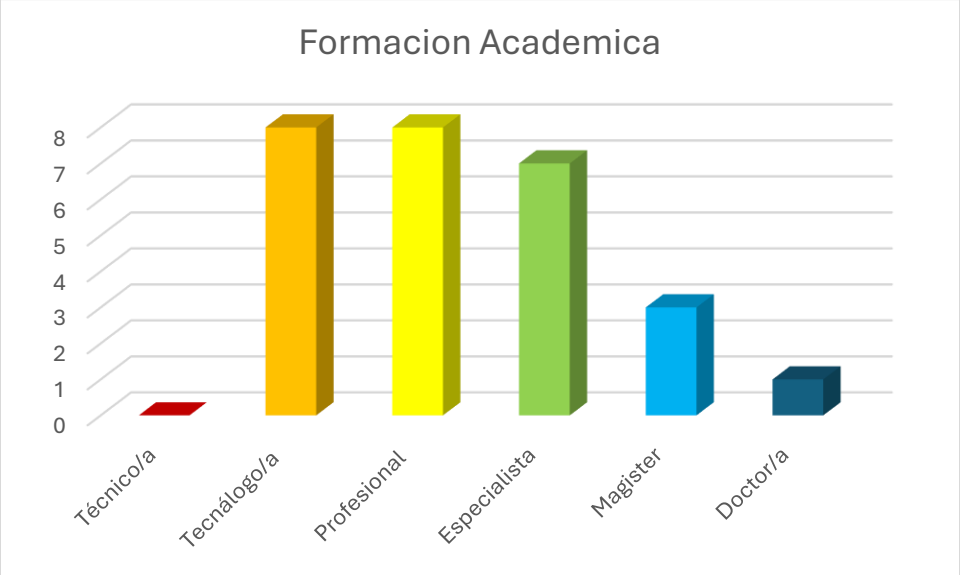
1. **Formación académica**

Estudios actuales de las personas a las que estuvo dirigida la encuesta: Técnico/a, tecnólogo/a, profesional, especialista, magister y doctor.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente grafica

Figura 25

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada primera pregunta



Nota. Grafica propia

De las 27 personas que fueron encuestadas se puede presenciar que la gran mayoría eran especialista y magister en total en ambos casos fueron 8, 7 fueron profesionales, 3 fueron técnicos una persona fue doctor.

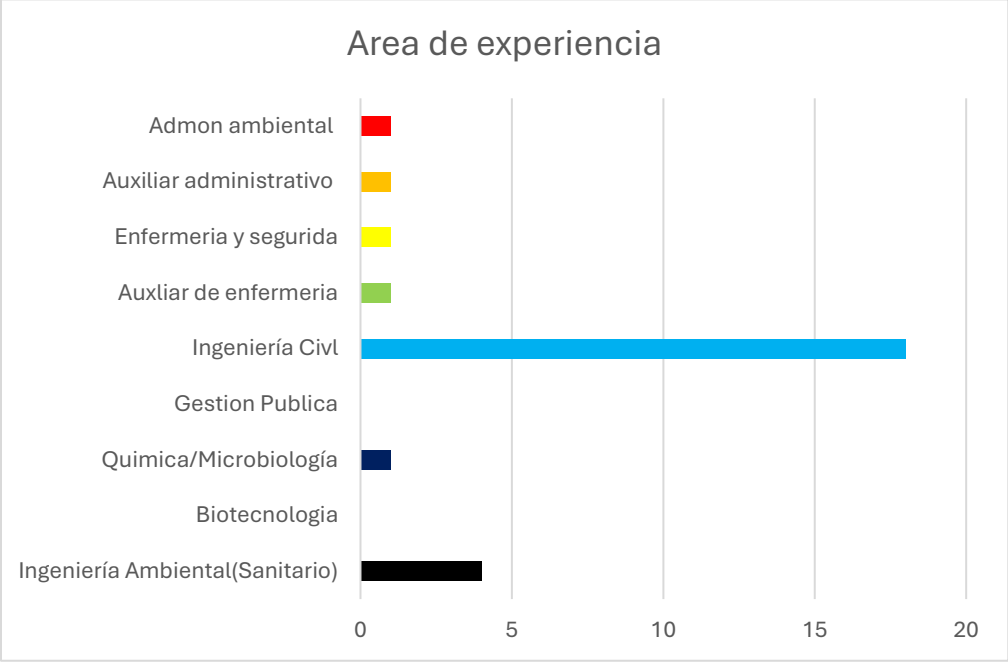
2.Area de experiencia

Ingeniería Ambiental (Sanitario), Biotecnología, Química/Microbiología, Gestión pública, Ingeniera civil, Auxiliar de enfermería, auxiliar administrativo, administrador ambiental.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente grafica

Figura 26

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada segunda pregunta



Nota. Grafica propia

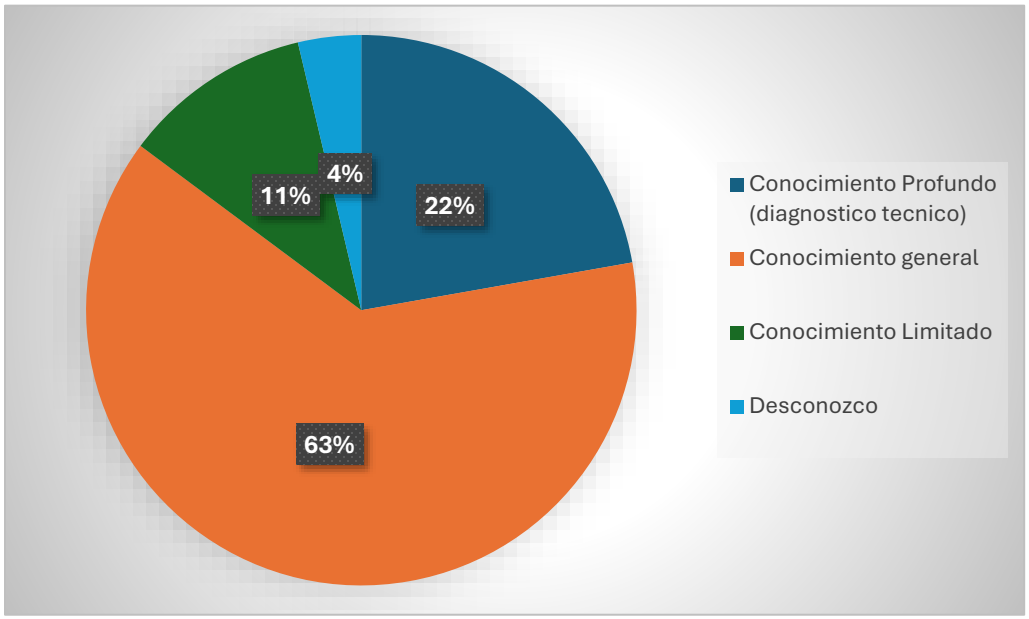
3. ¿Qué conocimiento posee sobre los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales en Ocaña?

Opciones de respuestas: Conocimiento profundo (diagnostico técnico), Conocimiento general, conocimiento limitado, desconozco.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura 27

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada tercera pregunta



Nota. Grafica propia

El gráfico circular muestra cómo se distribuye el grado de conocimiento acerca de los sistemas actuales para tratar aguas residuales en Ocaña, se observa que el 63% de los encuestados tiene un conocimiento general, lo cual sugiere que entienden a nivel básico cómo funcionan estos sistemas, pero no tienen un dominio técnico profundo.

Por otro lado, un 22%indica tener un conocimiento técnico profundo (diagnóstico técnico), lo que implica la presencia de un equipo con experiencia o formación especializada en la materia. Por otro lado, el 11% tiene un entendimiento limitado, lo cual muestra que su comprensión del tema es superficial.

Finalmente, un porcentaje reducido aproximadamente 4 indica desconocer completamente los Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

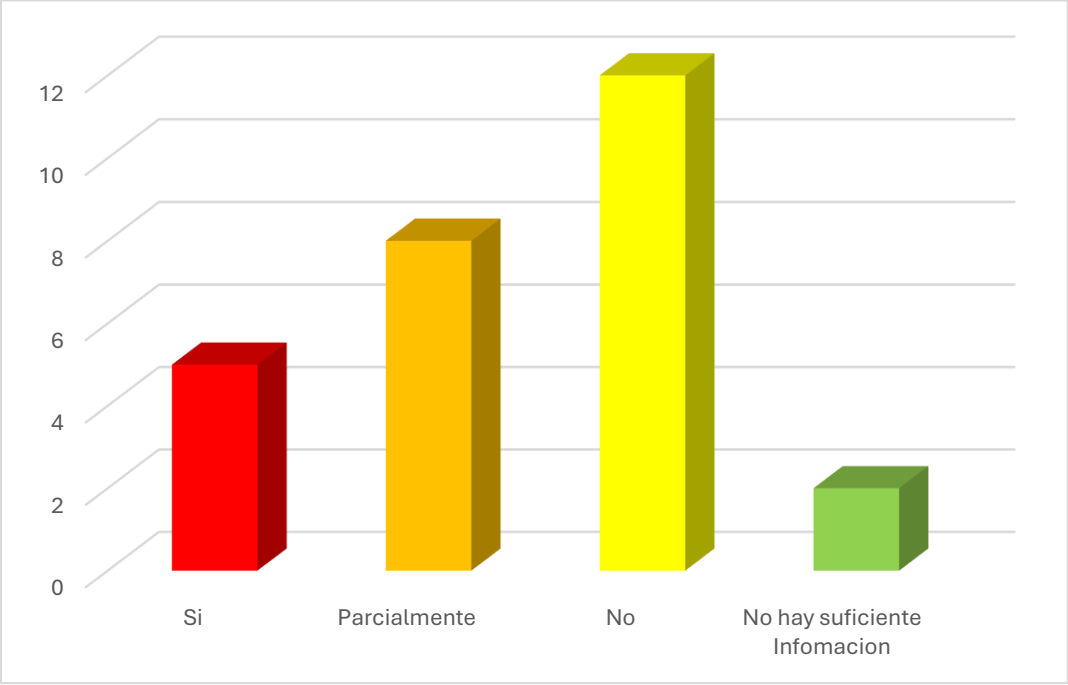
4. ¿Considera que los sistemas de tratamiento actuales en Ocaña cumplen con los estándares ambientales establecidos por la normativa colombiana (Resolución 0631 de 2015)?

Opciones de respuestas: Si, parcialmente, no, no hay suficiente información.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura 28

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada cuarta pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que el 12 de los encuestados opina que la normativa actual no se está cumpliendo, lo cual demuestra una percepción generalizada de ineficiencia en los procesos de tratamiento. Además, que 8 de los encuestados afirma que el cumplimiento es parcial; esto implica que, aunque hay ciertos grados de tratamiento, estos no son suficientes para lograr los límites permitidos en todos los parámetros requeridos.

Por otro lado, 5 de los encuestados sostiene que sí se cumplen los estándares ambientales, lo que indica una escasa confianza en la eficacia del sistema. Por último, 2 de los encuestados de los encuestados indica que no hay información suficiente para emitir un juicio al respecto.

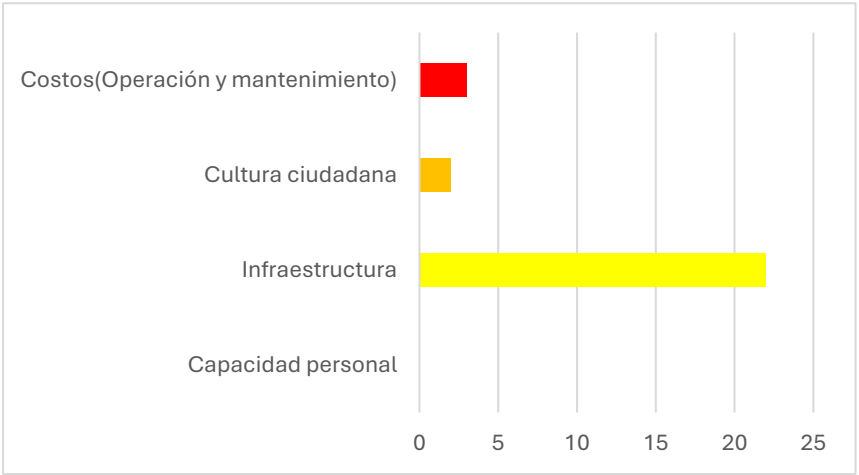
5. Desde si perspectiva técnica, ¿Cuáles son las principales deficiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la región?

Opciones de respuesta: Capacidad personal, Infraestructura, Cultura ciudadana, Costo (operaciones y mantenimiento.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica

Figura 29

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada quinta pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que 22 de los encuestados señaló la infraestructura como el principal obstáculo, reflejando deficiencias en capacidad instalada, estado de las plantas de tratamiento, cobertura del alcantarillado y obsolescencia tecnológica. 3 de los encuestados señalaron que el costos de operación y mantenimiento como factor crítico, asociada a la sostenibilidad económico y continuidad operativa de los sistemas.

Por otro lado 2 de los encuestados atribuyo las limitaciones a la cultura ciudadana, relacionada con prácticas

Inapropiadas de vertimiento y uso incorrecto del alcantarillado. No se registraron respuestas sobre restricciones en capacidad del personal, indicando que este aspecto no se percibe como un obstáculo relevante en el contexto local.

6. Tiene experiencia o conocimiento en el uso de biotecnología aplicada a la remoción de contaminantes en aguas residuales (por ejemplo, lodos activados, reactores anaerobios,

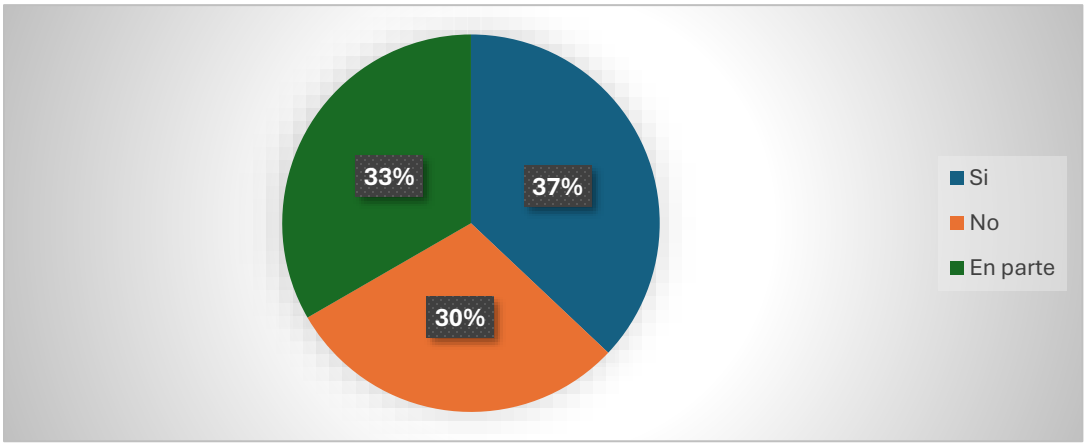
biorreactores, biofilm, enzimas, microorganismos, etc.)?

Opciones de respuesta: Si, no, en parte.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura30

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada sexta pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que un 37% de los encuestados sostiene que tiene experiencia o conocimiento en cuanto a la utilización de instrumentos biotecnológicos como son las enzimas, los biofilms o los microorganismos; esto señala la existencia de un colectivo con formación o familiaridad en procesos biológicos destinados al tratamiento del agua.

Por otro lado, el 33,3% afirma tener un conocimiento parcial; esto sugiere que tienen un entendimiento intermedio de estas tecnologías, que puede estar restringido a conceptos generales o aplicaciones elementales. Por otro lado, el 29,6% señala que no tiene conocimiento ni experiencia en este ámbito.

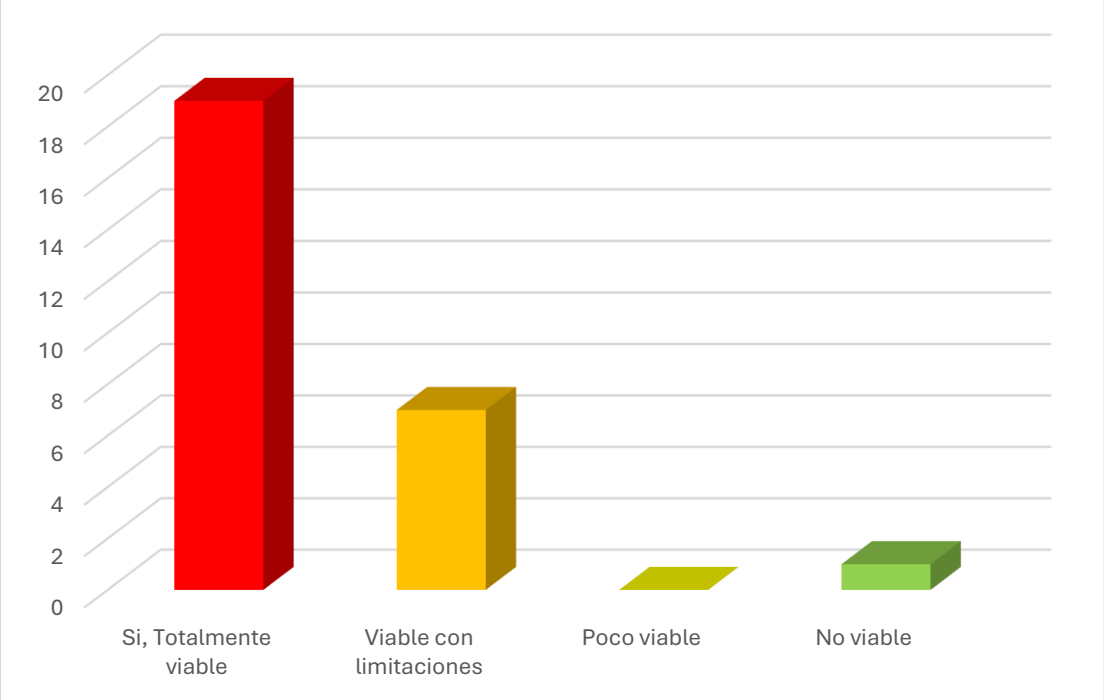
7. ¿Le considera viable la implementación de tecnologías biotecnológicas para el **tratamiento de aguas residuales domésticas en municipios intermedios como Ocaña?**

Opciones de respuesta: Si, totalmente viable; Viable con limitaciones, Poco viable, No viable.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura31

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada séptima pregunta



Nota. Grafica propia

Se Observa que el 19 de los encuestados cree que estas tecnologías son completamente viables, lo cual demuestra una gran aceptación y confianza en la posibilidad de aplicar soluciones biotecnológicas en el ámbito local.

Además, 7 de los encuestados cree que son viables con limitaciones, lo que indica que, aunque se reconoce su potencial, hay factores limitantes como costos, requisitos técnicos, condiciones de operación o capacidades institucionales que podrían obstaculizar su implementación.

Sin embargo, una persona de los encuestados las considera inviables; no hay respuestas que las cataloguen como poco viables, lo que da más fuerza a la percepción positiva general.

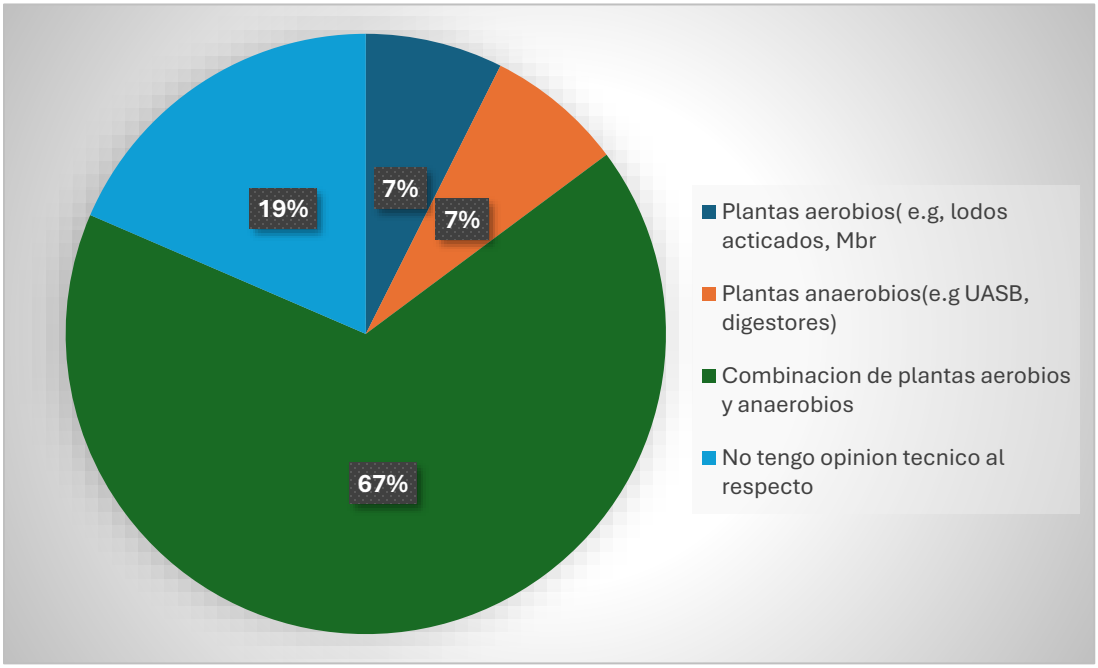
8. ¿Qué tipo de tecnologías biotecnológicas considera más adecuadas para el contexto de Ocaña?

Opciones de respuesta: Plantas aerobios (e.g, lodos activados, Mbr), Plantas anaerobios (e.g UASB, digestores), Combinación de plantas aerobios y anaerobios, No tengo opinión técnica al respecto

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura32

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada octava pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que 67 % de los encuestados creen que lo más adecuado es combinar plantas anaerobias y aerobias, lo cual muestra una clara inclinación hacia soluciones híbridas que incluyan ambos procedimientos para el tratamiento.

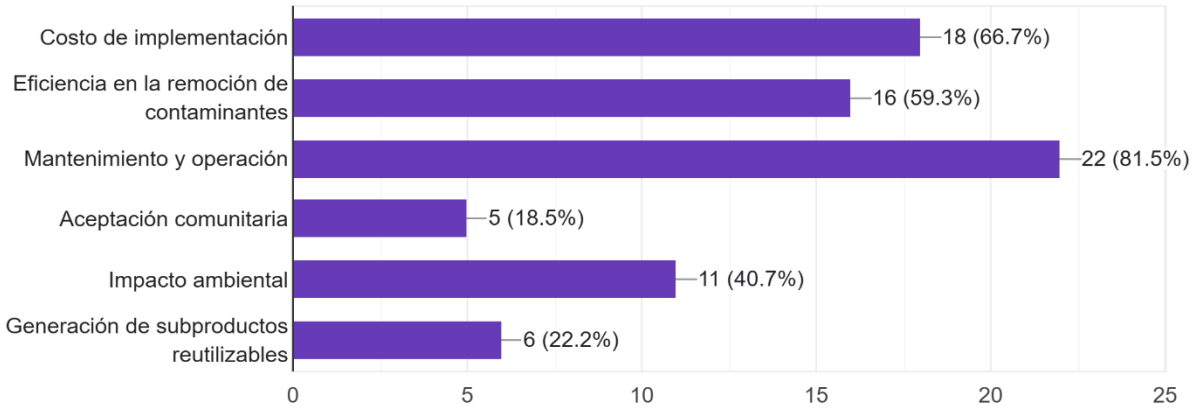
El 19%, señaló no tener una opinión técnica sobre el asunto, lo que indica que todavía persiste un grado significativo de ignorancia acerca del tema. Por otro lado, el 7.4% eligió las plantas aerobias, y las plantas anaerobias constituyen la proporción más baja.

9. ¿Le considera viable la implementación de tecnologías biotecnológicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas en municipios intermedios como Ocaña?

Opciones de respuesta: Costo de implementación, eficiencia en la remoción de contaminantes, mantenimiento y operación, aceptación comunitaria, impacto ambiental y generación de subproductos reutilizables

Figura 33

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada novena pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa Se observa que el criterio de mantenimiento y operación es el que se escoge con más frecuencia, con un 81.5% lo cual demuestra que la viabilidad operativa, la disponibilidad de recursos técnicos y la sencillez en la gestión son elementos cruciales al tomar decisiones.

El costo de implementación con un 66.7% y la eficiencia en la eliminación de contaminantes con un 59.3%. Se puede observar que se muestran que se valora mucho la relación costo-eficacia, al dar prioridad a las tecnologías que mejoren el rendimiento técnico sin poner en riesgo la inversión inicial.

El impacto ambiental con 40.7%, lo cual indica que se toma en cuenta de manera intermedia el efecto sobre el medio ambiente en el proceso de selección, aunque no es la consideración más importante.

La generación de subproductos reutilizables con 22.2% y la aceptación comunitaria con 18.5%, en cambio, tienen una menor incidencia; esto se podría entender como un aprovechamiento más limitado de los principios de economía circular y participación social en la evaluación tecnológica.

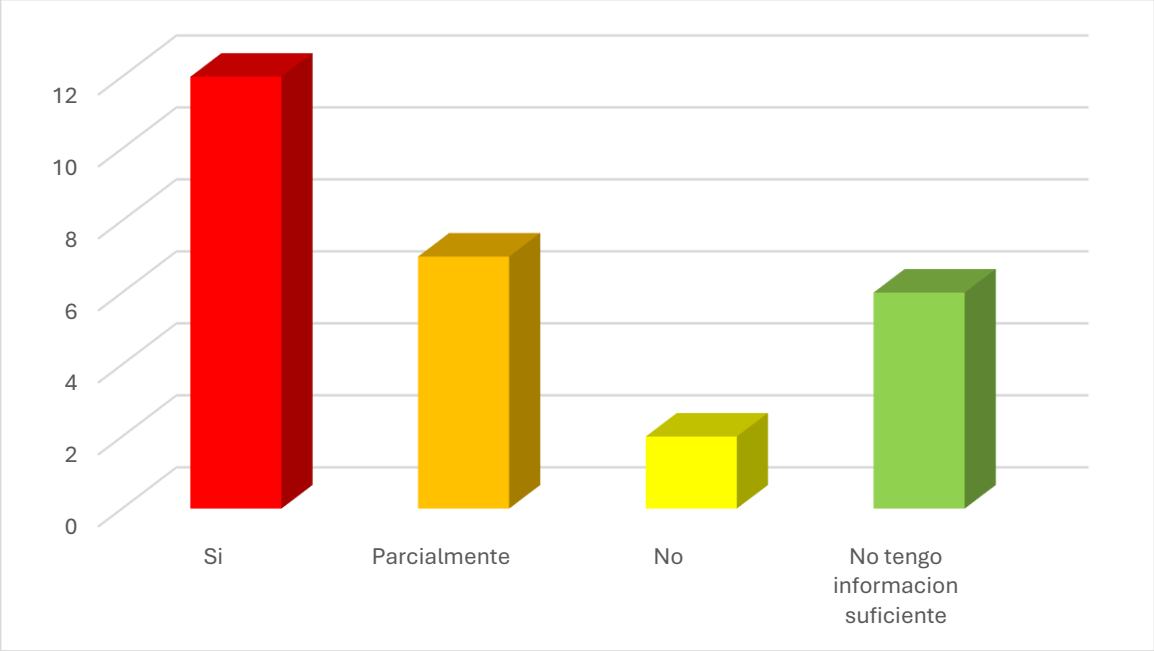
10. ¿Le considera viable la implementación de tecnologías biotecnológicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas en municipios intermedios como Ocaña?

Opciones de respuesta: Si, Parcialmente, No, No tengo información

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura34

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada decima pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que 12 de los encuestados sostiene que hay personal preparado en la zona para manejar y conservar sistemas biotecnológicos de tratamiento de aguas, lo que indica una percepción predominantemente positiva sobre la existencia de capital humano especializado. 7 de los encuestados indica un cumplimiento parcial, lo que significa que, si bien se reconocen algunas habilidades técnicas, estas no son suficientes para satisfacer de manera completa las necesidades operativas.

Por otro lado, 6 de los encuestados expresan que no tiene suficiente información, lo cual genera un margen de incertidumbre relacionado con un conocimiento técnico restringido acerca de los requerimientos particulares de estos sistemas. Finalmente, 2 de los encuestados sostiene que no hay personal capacitado; esta es la opinión de la minoría.

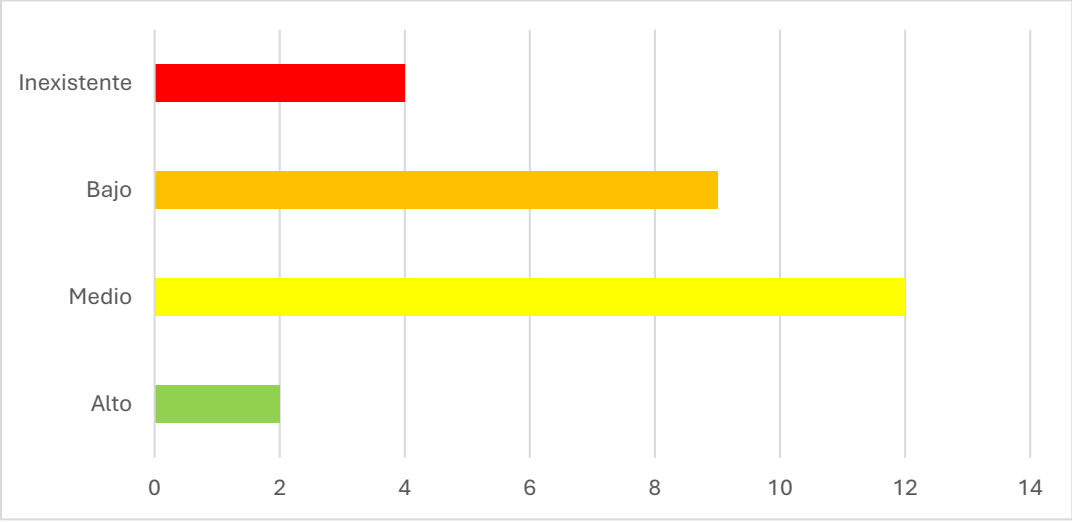
11. ¿Qué nivel de articulación percibe entre las universidades locales, el sector público y el sector privado para el desarrollo de soluciones tecnológicas en aguas residuales?

Opciones de respuesta: Alto, Medio, Bajo, Inexistente

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura35

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada undecima pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que 12 de los encuestados considera que no hay ningún nivel de articulación, lo que representa la actitud predominante y pone de manifiesto una falta estructural en los métodos para colaborar entre instituciones con el fin de desarrollar soluciones tecnológicas en el sector. 9 de los encuestados considera que el nivel de articulación es bajo. Esto muestra que aunque se identifican ciertos esfuerzos de vinculación, no son suficientes para tener un efecto relevante en la creación o aplicación de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

Por otra parte, 4 de los encuestados indica un nivel de articulación medio, lo que sugiere que hay experiencias específicas de cooperación, pero no llegan a ser sistemáticas o consolidadas. 2 de encuestados sostiene que el nivel de articulación es alto.

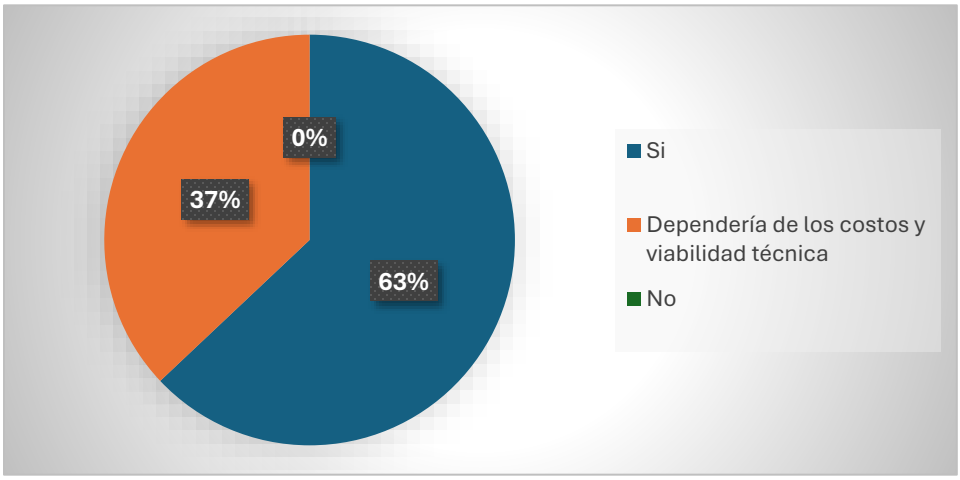
12. ¿Apoyaría proyectos piloto que evalúen la eficiencia de tecnologías biotecnológicas en el tratamiento de aguas residuales en la región?

Opciones de respuesta: Si, Dependería de los costos y viabilidad técnica, No

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura 36

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada duodécima pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que el 63,0% de los encuestados ha declarado que apoyaría la puesta en marcha de proyectos piloto con el fin de examinar la eficacia de las tecnologías biotecnológicas para el tratamiento de aguas residuales. Esta mayoría absoluta demuestra una actitud positiva hacia la investigación y validación de innovadoras opciones tecnológicas en el contexto regional.

Por otro lado el 37,0% de los encuestados indica que su apoyo dependería de la factibilidad técnica y a los costos, lo cual demuestra que, pese a que están dispuestos a este tipo de proyectos, la aceptación definitiva se encuentra condicionada al cumplimiento de requisitos técnicos y económicos.

No se registraron respuestas en la opción "No", lo cual indica que no hay oposición explícita a la implementación de este tipo de proyectos en Ocaña.

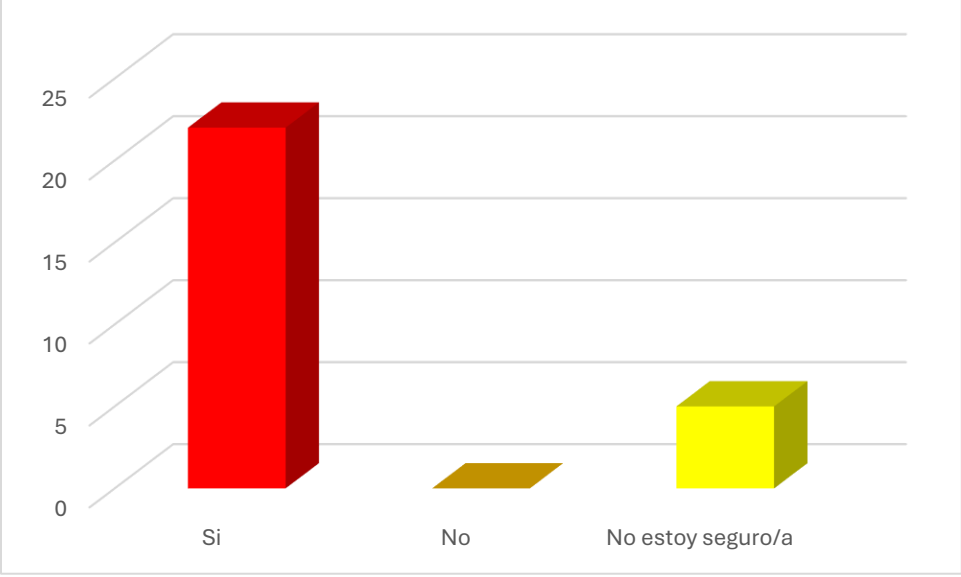
13. ¿Cree que la implementación de biotecnología en esta área puede generar oportunidades económicas, sociales o de innovación en Ocaña?

Opciones de respuesta: Si, No, No estoy seguro

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica

Figura 37

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada decimotercera pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que 22 de los encuestados sostiene que la introducción de biotecnología para tratar aguas residuales tiene el potencial de crear oportunidades sociales, económicas o innovadoras en la localidad. Esta mayoría absoluta refleja una percepción muy positiva sobre el potencial transformador que tienen estas tecnologías, más allá de su función medioambiental concreta.

Por otro lado, 5 de los encuestados indica que no está seguro/a sobre la generación de estas oportunidades. Esto puede indicar un margen de incertidumbre relacionado con la falta de información acerca del impacto colateral en territorios parecidos a Ocaña o con el desconocimiento de experiencias anteriores en situaciones semejantes.

No se registraron respuestas en la opción “No"; esto indica que no hubo participantes de la encuesta que negaran de manera explícita la capacidad de la biotecnología para producir valor añadido a nivel local.

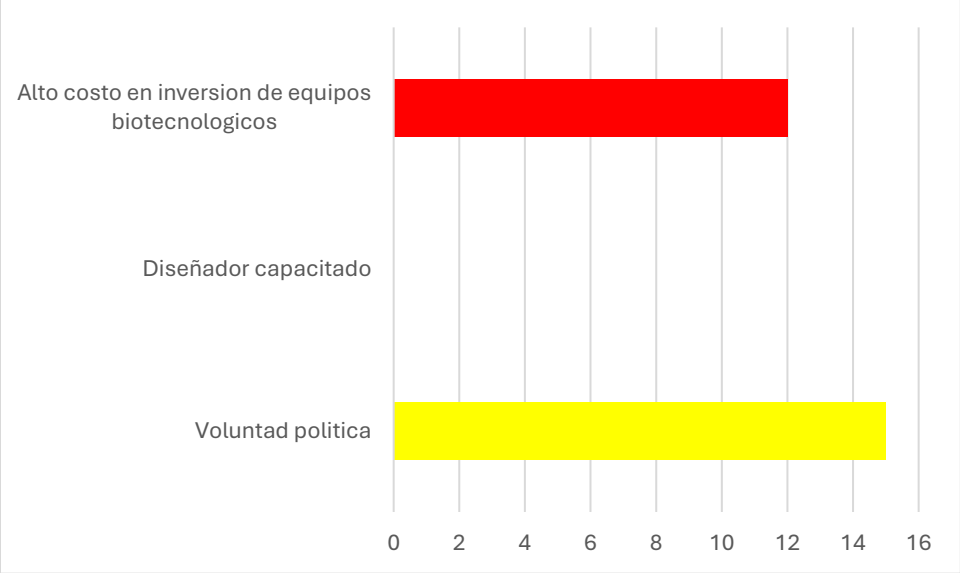
14. Desde su criterio técnico, ¿cuáles serían los principales retos para implementar biotecnología en el tratamiento de aguas en Ocaña?

Opciones de respuesta: Voluntad Política, Diseñador capacitado, Alto costos en inversión de equipos biotecnológicos.

Estas fueron las respuestas representadas en la siguiente gráfica:

Figura 38

Nivel de conocimiento sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en la población encuestada decimocuarta pregunta



Nota. Grafica propia

Se observa que 15 de los encuestados sostiene que uno de los mayores desafíos para la implementación de tecnologías biotecnológicas en dicha localidad es el alto precio de inversión en equipos biotecnológicos. Esta percepción mayoritaria revela una inquietud principal con respecto a las dificultades económicas vinculadas a la compra, instalación y funcionamiento de infraestructuras biotecnológicas

Por otro lado, 12 de los encuestados consideran que la voluntad política es un elemento crucial. Esto sugiere que, más allá de las condiciones técnicas y financieras, la factibilidad de estos

proyectos depende en gran parte del compromiso y la persistencia de las decisiones políticas a nivel local.

Además, no se reportaron respuestas que reconocieran la escasez de diseñadores capacitados como un desafío en el universo de respuesta, lo cual indica que, según la perspectiva de los encuestados, la disponibilidad de personal humano especializado en el diseño de este tipo de soluciones no es un obstáculo importante en comparación con los temas financieros e institucionales.

Análisis de resultados

La encuesta permitió evidenciar que en el municipio de Ocaña existe un buen nivel de formación y conocimiento general sobre el tratamiento de aguas residuales, aunque con limitaciones acerca del dominio técnico especializado. Se identifico que la mayoría de los encuestados percibió una deficiencia en los sistemas vigentes, especialmente relacionado con el cumplimiento normativo y con problema de infraestructura.

Sin embargo, los profesionales muestran una gran aceptación hacia la implementación de tecnologías biotecnológicas, destacando su viabilidad, particularmente a sistemas combinados. Sin embargo, factores como los costos de inversión, la operación y la limitada articulación institucional representan los desafíos más importantes.

En términos generales, los resultados muestran un panorama favorable para la innovación, ya que se manifiesta la disposición de desarrollar proyectos pilotó y reconocimiento de las posibilidades que ofrece la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Ocaña.

3.2. Revisión de estudios de casos internacionales y su aplicabilidad

El estudio de experiencias internacionales en la gestión de aguas residuales posibilita la identificación de tecnologías que han mostrado ser eficaces bajo variadas condiciones operativas, ambientales y socioeconómicas. Esta revisión es esencial para elegir opciones tecnológicas en el contexto de municipios intermedios como Ocaña, con el fin de que no solo sean efectivas para eliminar contaminantes, sino que se puedan implementar desde la perspectiva de los costos, la operación y la adaptación al medio local.

La evaluación se enfoca en tecnologías biotecnológicas y sistemas de complejidad baja a media, dando prioridad a su sostenibilidad y fortaleza operativa, ya que Ocaña tiene un sistema de alcantarillado mixto, variabilidad hidráulica, limitaciones técnicas y restricciones financieras.

3.2.1. Caso de Chile: Sistema Tohá y Humedales artificiales

La implementación del Sistema Tohá y su incorporación con humedales construidos se ha ejecutado en Chile como una solución eficaz y económica para el tratamiento de aguas residuales en neighborhoods de tamaño pequeño y mediano.

Este sistema, desde la perspectiva técnica, se fundamenta en procesos biológicos naturales aerobios. En estos procesos, los macroinvertebrados y microorganismos (por ejemplo, oligoquetos) se encargan de descomponer la materia orgánica, a lo que se añaden procedimientos de fitodepuración en zonas húmedas. Estas tecnologías, al no depender de aireación mecánica intensiva, requieren poca energía y son muy eficientes a la hora de eliminar sólidos suspendidos, DBO_5 y DQO.

Respecto a Ocaña, su aplicabilidad es elevada debido al clima tropical (20–28 °C), que favorece tanto la actividad de los microorganismos como la cinética de degradación. Adicionalmente, su simplicidad operacional y sus costos bajos los convierten en apropiados para situaciones con restricciones técnicas.

Sin embargo, su principal limitación es la sensibilidad a los cambios hidráulicos y los requisitos de área, lo que limita su aplicación en áreas urbanas densamente pobladas. En zonas periurbanas o rurales, su implementación es más factible.

Nivel de aplicabilidad en Ocaña: Alto.

3.2.2. Caso China: Sistemas descentralizados (FBBR y humedales artificiales)

Particularmente en áreas rurales o de crecimiento urbano, en China se han instaurado sistemas descentralizados de tratamiento, como son los humedales artificiales y los reactores de biopelícula (FBBR por sus siglas en inglés).

Estos sistemas se distinguen por la creación de biopelículas microbianas que están adheridas a un medio soporte, lo cual posibilita una eficacia elevada en la eliminación de nutrientes y materia orgánica, incluso cuando las condiciones de carga son variables. Su simplicidad operativa y su bajo consumo de energía los hacen opciones sostenibles en situaciones con escasez de recursos.

Estas tecnologías podrían utilizarse en Ocaña en áreas sin alcantarillado o con un desarrollo urbano disperso. No obstante, su puesta en marcha a gran escala necesita de una inversión sostenida, un diseño técnico apropiado y un control operativo, lo que puede suponer una limitación a nivel institucional.

Asimismo, los humedales artificiales asociados facilitan la eliminación de metales pesados y contaminantes emergentes, lo que mejora la calidad del efluente final.

Nivel de aplicabilidad en Ocaña: Medio.

3.2.3. Caso Europa (Países Bajos y Alemania): Tecnologías avanzadas y Biofactorías

En naciones europeas como Alemania y Países Bajos, se han creado tecnologías de punta enfocadas en la economía circular y la eficiencia energética. Entre estas tecnologías están la recuperación de nutrientes (estruvita), los sistemas de lodos granulares aerobios (por ejemplo, tecnología Nereda®) y la digestión anaerobia de lodos.

Estas tecnologías posibilitan la eliminación simultánea de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en sistemas compactos, lo que mejora el aprovechamiento del espacio y disminuye la producción de desechos. Asimismo, la digestión anaeróbica posibilita la producción de biogás como fuente de energía renovable.}

No obstante, su implementación necesita de un personal muy capacitado, de una supervisión avanzada en términos operativos y de niveles elevados de inversión (CAPEX). Estas tecnologías tienen una viabilidad baja en contextos como Ocaña, donde hay restricciones financieras y técnicas, sobre todo a nivel municipal intermedio.

Además, la eficacia económica de estos sistemas está supeditada a las economías de escala, las cuales no se logran siempre en los municipios medianos.

Nivel aplicabilidad en Ocaña: bajo

3.2.4. Cuadro Comparativo

Tabla 23

Comparación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicada en Chile, China y Europa, con análisis de aplicabilidad en Ocaña, Norte de Santander

Pais	Tecn. aplicada	Principio Técnico	Ventajas Principales	Limitaciones	Aplicabilidad en Ocaña
Chile	Sistema Tohá + Humedales artificiales	Procesos biológicos aerobios con oligoquetos y fitodepuración	Bajo costo (CAPEX y OPEX), baja demanda energética, alta remoción de DBO_5, DQO y SST, operación sencilla	Sensible a variaciones hidráulicas, requiere grandes áreas	**Alta**: Compatible con clima tropical, adecuada para zonas periurbanas y rurales

China	Sistemas descentralizados (FBBR + humedales)	Formación de biopelículas microbianas adheridas a soporte + procesos naturales en humedales	Alta eficiencia en remoción de materia orgánica y nutrientes, bajo consumo energético, adaptable a cargas variables	Requiere diseño técnico adecuado, inversión sostenida y control operativo	**Media**: Viable en zonas dispersas sin alcantarillado, pero limitada institucionalmente
Europa (Alemania y Países Bajos)	Tecnologías avanzadas (Nereda®, recuperación de nutrientes, digestión anaerobia)	Lodos granulares aerobios, recuperación de fósforo (estruvita) y producción de biogás	Alta eficiencia, sistemas compactos, enfoque en economía circular y generación de energía	Alto CAPEX, alta complejidad operativa, necesidad de personal altamente capacitado	**Baja**: Limitada por restricciones técnicas, financieras y falta de economías de escala

Nota: Elaboración propia a partir de datos técnicos de sistemas de tratamiento en Chile (MINVU, 2021), China (Wu et al., 2018) y Europa (van Loosdrecht, 2020).

La comparación pone en evidencia o que las tecnologías que se fundamentan en procesos naturales son más viables en el ámbito de Ocaña, por su bajo coste, su fácil manejo y su capacidad para adaptarse a condiciones locales. En cambio, las tecnologías de avanzada, a pesar de ser muy eficientes, tienen notables restricciones en cuanto a capacidad técnica e inversión, lo cual limita su implementación.

3.3. Estudios previos en Colombia sobre biotecnologías aplicadas al tratamiento de aguas domesticas

En Colombia, la investigación en biotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales domésticas ha cobrado relevancia durante las últimas dos décadas, impulsada por la necesidad de mejorar la cobertura, eficiencia y sostenibilidad del saneamiento básico (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [MVCT], 2014; Romero Rojas, 2013).La investigación de tecnologías biológicas para contextos tropicales, centrada en soluciones que sean económicas, fáciles de implementar y altamente eficientes, ha sido objeto del estudio por parte de diversas universidades, instituciones territoriales y centros de investigación. A continuación, se presentan los principales enfoques tecnológicos estudiados en el país y sus aportes más relevantes.

3.3.1. Sistemas Anaerobios para el Tratamiento Descentralizado

Los biodigestores anaerobios son una opción eficaz para procesar desechos orgánicos en áreas periurbanas y rurales, ya que resaltan por su bajo precio y porque se pueden implementar con facilidad. Su funcionamiento se fundamenta en procesos microbiológicos sucesivos: acidogénesis, a cetogénesis, hidrólisis y metanogénesis, a través de los cuales la materia orgánica se convierte en biogás que puede utilizarse energéticamente.

Estos sistemas, además de producir biogás, disminuyen de manera considerable los sólidos suspendidos totales (SST), la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO). Así se mejora la calidad del efluente y se hace más fácil su manejo ambiental.

3.3.2. Uso de microorganismos autóctonos y biorremediación

La eliminación de contaminantes complejos, como los metales pesados, mediante el uso de microorganismos nativos ha sido muy efectiva, particularmente en áreas que han sufrido las consecuencias de la minería. La efectividad de estos microorganismos radica en su metabolismo específico, que posibilita la precipitación, biotransformación y bioacumulación de metales tal como zinc, mercurio, plomo o cadmio. Esto disminuye su toxicidad y movilidad en el entorno natural.

Entre los microorganismos más importantes están las bacterias sulfato-reductoras, que emplean sulfatos como aceptores de electrones en su metabolismo anaerobio. Estas producen

sulfuro de hidrógeno, el cual precipita los metales pesados como sulfuros insolubles. Estas bacterias son las más sobresalientes: Desulfovibrio, Desulfotomaculum y Desulfobacter.

Simultáneamente, la fitorremediación constituye una estrategia adicional que emplea especies vegetales con la capacidad de absorber, acumular y estabilizar contaminantes en sus tejidos. Se utilizan plantas acuáticas como Eichhornia crassipes, Typha domingensis y Pistia stratiotes en cuerpos de agua contaminados y sistemas de humedales construidos, lo que permite la eliminación de metales pesados y compuestos orgánicos persistentes por medio de procesos de bioadsorción, fitoextracción y rizo filtración.

La unión de especies vegetales y microorganismos autóctonos en las estrategias de biorremediación brinda un método eficaz y sustentable para restaurar ecosistemas que han sido dañados por la minería, al fusionar la degradación microbiana con la habilidad de absorción y retención de las plantas.

3.3.3. Humedales artificiales híbridos

Los humedales híbridos son sistemas de tratamiento de aguas residuales que fusionan procesos anaerobios y aerobios, incorporando fases subsuperficiales y de flujo superficial con el fin de maximizar la eliminación de contaminantes. Esta mezcla posibilita que los humedales híbridos logren eficiencias de eliminación de nutrientes (fósforo y nitrógeno), materia orgánica y sólidos suspendidos superiores al 80–90 %, sobrepasando el rendimiento de los sistemas convencionales.

La secuencia de unidades con condiciones controladas es la base del diseño de estos sistemas: el primer tramo anaerobio promueve la descomposición de compuestos orgánicos complejos y la precipitación de metales; las fases facultativa y aerobia que le siguen mejoran la nitrificación y degradación de compuestos residuales, mientras que las plantas acuáticas ayudan a absorber, filtrar y estabilizar los contaminantes.

Los humedales híbridos satisfacen los estándares de calidad que se definen en la Resolución 0631 de 2015, lo cual asegura que los efluentes tratados sean adecuados para ser vertidos o reutilizados en cuerpos acuáticos receptores. Su adaptabilidad y fortaleza los hacen particularmente apropiados para municipios de tamaño intermedio, donde la infraestructura convencional es escasa, brindando un tratamiento eficaz, sostenible y con un costo operativo reducido.

3.3.4. Tecnologías combinadas y Tecnologías emergentes en plantas urbanas

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en áreas urbanas han progresado hacia configuraciones mixtas que combinan reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) con procedimientos de lodos activados. Esta combinación facilita el uso de los beneficios del tratamiento anaerobio, como son la producción de biogás y la disminución importante de materia orgánica, además de la habilidad del tratamiento aeróbico para suprimir nutrientes y compuestos residuales. Así se obtiene una eficacia global más alta en cuanto a la eliminación de DBO_5, DQO y sólidos suspendidos. Además, la integración de estas fases ayuda a disminuir la carga orgánica

en los efluentes previos a su vertido, lo que mejora la calidad medioambiental de los cuerpos receptores.

Por otro lado, los reactores de membrana biológica (MBR), que son tecnologías avanzadas, constituyen una opción alentadora para el tratamiento urbano de aguas residuales porque fusionan la filtración por membranas y la biodegradación. Esto permite eliminar casi todos los sólidos, nutrientes y patógenos. Los MBR representan una alternativa futura para optimizar la eficiencia del tratamiento en urbes con alta densidad poblacional y regulaciones de vertimiento más rigurosas, a pesar de que su aplicación todavía es restringida en el país por motivos de costos y exigencias operativas.

3.3.5. Cuadro comparativo

Tabla 24

Síntesis de estudios en Colombia sobre biotecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales domesticas

Línea de Investigación	Tecnología / Enfoque	Principio Técnico	Ventajas Principales	Limitaciones	Aplicabilidad en Ocaña
Sistemas anaerobios descentralizados	Biodigestores anaerobios	Procesos microbiológicos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y	Bajo costo, fácil implementación, generación de energía	Requiere postratamiento para cumplir normativa, control	**Alta**: Ideal para zonas rurales y sin alcantarillado

		metanogénesis que transforman materia orgánica en biogás	(biogás), reducción significativa de DBO_5, DQO y SST	básico del sistema	**Alta**: Ideal para zonas rurales y sin alcantarillado
Bioremediation con microorganismos autóctonos	Bacterias sulfato-reductoras (Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Desulfobacter)	Precipitación, biotransformación y bioacumulación de metales pesados mediante metabolismo anaerobio	Alta eficiencia en remoción de metales (Pb, Cd, Hg), adaptación a condiciones locales, bajo costo	Sensible a condiciones ambientales, requiere control de procesos biológicos	**Media**: Útil en zonas con contaminación específica (ej. descargas o minería)
Fitorremediación	Macrófitas (Eichhornia crassipes, Typha domingensis, Pistia stratiotes)	Procesos de fitoextracción, bioadsorción y rizo filtración de contaminantes	Bajo costo, integración ecológica, remoción de metales y compuestos orgánicos	Requiere manejo y disposición de biomasa, menor control del proceso	**Alta**: Aplicable en ríos y humedales urbanos/periurbanos

Humedales artificiales híbridos	Sistemas combinados (flujo subsuperficial y superficial)	Integración de procesos anaerobios, facultativos y aerobios en serie	Alta eficiencia (>80–90%) en remoción de nutrientes, DBO_5, DQO y SST; bajo costo operativo; cumplimiento normativo	Requiere área disponible, diseño técnico adecuado	**Alta**: Muy viable para municipios intermedios como Ocaña
Tecnologías combinadas urbanas	UASB + lodos activados	Tratamiento anaerobio seguido de tratamiento aerobio para pulimiento	Alta eficiencia global, reducción de carga orgánica, generación de biogás	Mayor complejidad operativa, inversión moderada-alta	**Media**: Viable a mediano plazo para PTAR urbana
Tecnologías emergentes	Reactores de membrana biológica (MBR)	Combinación de biodegradación y filtración por membranas	Alta calidad del efluente, remoción casi total de sólidos y patógenos	Alto costo (CAPEX y OPEX), alta exigencia técnica	**Baja**

Nota. Adaptado de Metcalf & Eddy (2014), Vymazal (2010), Judd (2011), y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015).

La tabla anterior facilita la visualización conjunta de las cuatro tecnologías biotecnológicas que se han estudiado para el manejo de aguas residuales domésticas en Colombia. Se puede ver que:

Las zonas rurales y periurbanas de Ocaña tienen mayor viabilidad con los sistemas anaerobios descentralizados porque son más baratos y sencillos de implementar, y también porque producen biogás como beneficio extra.

La biorremediación que emplea microorganismos autóctonos y vegetación nativa es sumamente eficaz a la hora de eliminar metales pesados, algo que resulta importante en cuerpos acuáticos como el río Chiquito y el río Tejo, los cuales son expuestos a contaminantes de procedencia doméstica e incluso industrial.

Los humedales artificiales híbridos proporcionan la mejor proporción entre el costo operativo y la eficacia de eliminación, lo que los hace particularmente apropiados para municipios medianos como Ocaña, siempre y cuando haya suficiente terreno disponible.

Las tecnologías emergentes, como MBR y UASB + lodos activados, tienen la eficiencia más elevada; sin embargo, su viabilidad a corto plazo en Ocaña es escasa debido a los obstáculos económicos y técnicos detectados en encuestas hechas a expertos locales.

Por lo tanto, se aconseja que los sistemas híbridos (humedales artificiales) y las soluciones descentralizadas (biodigestores) sean implementados con preferencia en el corto y

medio plazo, dejando para etapas posteriores las tecnologías más sofisticadas, que dependerán del refuerzo institucional y de la disponibilidad de recursos.

3.4. Contextualización en el marco normativo

La Resolución 0631 de 2015 y el Decreto 1076 de 2015 son los que dirigen la normativa colombiana para el manejo de aguas residuales domésticas. Ambas establecen las guías técnicas y legales que todas las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del país deben seguir. Para entender cómo esta normativa se aplica en la práctica, es útil examinar el caso de la PTAR Salitre en Bogotá, que es una de las instalaciones de saneamiento más relevantes del país.

3.4.1. La PTAR Salitre como caso de referencia

La planta de tratamiento a gran escala PTAR Salitre, que presta servicios a la parte norte de Bogotá, Colombia. Su diseño y funcionamiento se encuentran dentro de los requerimientos de la Resolución 0631 de 2015, que determina los límites máximos permitidos de contaminantes en los vertidos a cuerpos de agua superficiales; para este caso, el río Bogotá.

El método de operación de la PTAR Salitre se fundamenta en un proceso avanzado de tratamiento que comprende, a grandes rasgos, las siguientes fases y que tiene que respetar la normativa en cada una de ellas:

- Pretratamiento: Remoción de sólidos gruesos, arenas y grasas. Esta etapa es obligatoria según el Decreto 1076 de 2015 para proteger los equipos aguas abajo (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

- Tratamiento primario: Sedimentación de sólidos suspendidos. La eficiencia de remoción de SST en esta fase debe ser monitoreada para cumplir con la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

- Tratamiento secundario (biológico): Proceso de lodos activados, similar a los descritos en el capítulo 1, donde microorganismos degradan la materia orgánica. Aquí se controlan parámetros como DBO_5 y DQO.

- Tratamiento terciario (opcional): En algunas configuraciones, incluye filtración y desinfección (ej. con rayos UV o cloro) para eliminar patógenos y nutrientes residuales

3.4.2. Cumplimiento normativo y desafíos

La operación de la PTAR Salitre depende de un permiso que concede la autoridad ambiental competente, en este caso, la Secretaría Distrital de Ambiente. Este permiso establece las restricciones concretas para cada uno de los contaminantes que la planta tiene permitido verter en el río Bogotá.

Tabla 25

Cumplimiento normativo

Instrumento Normativo	Exigencia específica para una PTAR como Salitre
Decreto 1076 de 2015	Obtener y renovar el Permiso de Vertimiento. Cumplir con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) de Bogotá.
Resolución 0631 de 2015	Monitorear y reportar periódicamente la calidad del efluente, garantizando que los valores de DBO_5, DQO, SST, nutrientes y otros no superen los límites establecidos para vertimientos a cuerpos de agua.
Tasa Retributiva	Pagar anualmente un valor económico calculado con base en la carga contaminante (DBO_5 y SST) que efectivamente descarga al río Bogotá.

Nota. La tabla resume las obligaciones legales vigentes para sistemas de tratamiento de aguas residuales en el contexto colombiano. Elaboración propia a partir de la normativa ambiental nacional.

3.4.3. Desafíos identificados en el caso de la PTAR Salitre

El cumplimiento de la normativa ambiental colombiana (Resolución 0631 de 2015 y Decreto 774 de 2025) exige a las plantas de tratamiento implementar costosos procesos terciarios para controlar nutrientes (fósforo y nitrógeno) y gestionar adecuadamente los lodos. Esto, sumado a los altos costos operativos (OPEX) por energía y mantenimiento, representa un desafío financiero significativo. Para cumplir con regulaciones actuales o futuras más estrictas, se hace necesaria la inversión en tecnologías más avanzadas como MBR o sistemas de filtración.

3.4.4. Tabla de aplicabilidad normativa para Ocaña

A partir del análisis de la normativa y del caso de la PTAR Salitre, se presenta la siguiente tabla de aplicabilidad para las tecnologías biotecnológicas evaluadas:

Tabla 26

Evaluación de tecnologías para Ocaña considerando normativa, carga y eficiencia

Tecnología	Tipo de planta	Rango de carga	Eficiencia esperada	Cumplimiento Res. 0631 de 2015	Complejidad operativa	CAPEX	OPEX	Viabilidad en Ocaña
Biodigestores anaerobios	Descentralizada (rural/periurbana)	Baja–media	DBO_5: 60–80 % DQO:	Parcial (requiere postratamiento)	Baja	Bajo	Muy bajo	Alta

			50–70 % SST: 60–80 % Metales: 70–90 % Orgánica: variable DBO_5: 80–95 % DQO: 75–90 % SST: 80–95 % N: 40–80 %					
Biorremediación (fitorremediación)	Complementaria	Baja (contaminantes específicos)		Parcial	Baja	Bajo	Bajo	Media
Humedales artificiales híbridos	Descentralizada/semi-centralizada	Baja–media		Alto	Media	Medio	Bajo	Alta

			DBO_5: >95 %					
Reactores MBR	Centralizada (urbana)	Media–alta	DQO: >90 %	Muy alto	Muy alta	Muy alto	Alto	Baja
			SST: ~100 %					

Nota. Elaboración propia a partir de Metcalf & Eddy (2014), Vymazal (2010), Judd (2011) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Los rangos de eficiencia y condiciones de operación corresponden a valores típicos reportados en la literatura técnica para sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

El análisis normativo evidencia, que a pesar de que Colombia tiene un sólido marco regulatorio robusto, su complimiento depende en gran parte de la selección adecuada de tecnologías según el contexto local. Para Ocaña, las soluciones descentralizadas y de baja complejidad, como los biodigestores y humedales híbridos, constituyen alternativas más viables para cumplir con la normativa, mientras que las tecnologías avanzadas como los MBR están limitadas por factores operativos y económicos.

3.5. Aportes de autores clave en el campo del tratamiento biotecnológico

Las contribuciones de varios investigadores que han establecido las bases teóricas, experimentales y aplicadas de esta disciplina son la base del progreso en el tratamiento biotecnológico de aguas residuales. Sus aportes han hecho posible el diseño, la modelación y la optimización de tecnologías que se usan hoy en día en sistemas de tratamiento a nivel global.

3.5.1. Bruce E. Rittmann (EE.UU.)

Es una de las principales autoridades en biotecnología ambiental y fue galardonado con el Premio Estocolmo del Agua en 2018. Sus aportes se centran en el estudio de biopelículas y procesos de biodegradación de contaminantes. Su obra Environmental Biotechnology: Principles and Applications es un texto fundamental en la formación de ingenieros ambientales (Rittmann & McCarty, 2001).

3.5.2. Mark C. M. van Loosdrecht (Países Bajos)

Es reconocido por el desarrollo de la tecnología de lodos granulares aeróbicos NEREDA®, la cual mejora la eficiencia del tratamiento y reduce el consumo energético al eliminar la necesidad de clarificadores secundarios. Además, ha contribuido significativamente al modelamiento de procesos biológicos en aguas residuales (van Loosdrecht et al., 2016).

3.5.3. Damien J. Batstone (Australia)

Lideró el desarrollo del Modelo de Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1), considerado un estándar internacional para la simulación de procesos anaerobios. Sus investigaciones han sido clave para optimizar la producción de biogás y la recuperación de recursos en sistemas anaerobios (Batstone et al., 2002).

3.5.4. Mogens Henze (Dinamarca)

Fue pionero en la caracterización de aguas residuales y codesarrollador del modelo de lodos activados ASM (Activated Sludge Model), ampliamente utilizado en el diseño y simulación de plantas de tratamiento. Sus contribuciones han permitido estandarizar el análisis de procesos biológicos en sistemas aerobios (Henze et al., 2000).

3.5.5. George A. Ekama (Sudáfrica)

Ha realizado importantes aportes en el diseño y operación de sistemas de lodos activados, especialmente en la eliminación biológica de nutrientes (BNR). Sus metodologías han sido aplicadas en el dimensionamiento de reactores en diversas PTAR a nivel internacional (Ekama et al., 2008).

3.5.6. Peter Wilderer (Alemania)

Fue pionero en el desarrollo de reactores biológicos secuenciales (SBR) y en la promoción de sistemas descentralizados de tratamiento. Su enfoque ha sido clave para la implementación de soluciones adaptadas a comunidades pequeñas y medianas (Wilderer & Schreff, 2000).

3.5.7. Thomas P. Curtis (Reino Unido)

Ha investigado la ecología microbiana en sistemas de tratamiento, destacando la importancia de la diversidad microbiana en la eficiencia de los procesos biológicos. Sus estudios incluyen aplicaciones en contextos latinoamericanos, incluyendo Colombia (Curtis & Sloan, 2004).

3.5.8. Perry L. McCarty (EE.UU.)

es considerado uno de los pioneros del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas. Sus investigaciones sentaron las bases de la bioenergética microbiana aplicada al tratamiento, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles como los biodigestores (McCarty, 2001).

Los aportes de estos autores han sido fundamentales para el avance de tecnologías biotecnológicas que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales. En el marco de municipios intermedios como Ocaña, sus estudios apoyan la factibilidad de sistemas como los biodigestores

anaerobios, humedales artificiales y tratamientos descentralizados. Esto se demuestra al mostrar que se pueden lograr eficiencias importantes con soluciones adaptadas a las condiciones locales, maximizando recursos e inversiones.

Capítulo 4: Criterios y Propuesta de Implementación para Ocaña

4.1. Aportes de la Biotecnología al Contexto Específico de Ocaña

El municipio de Ocaña, Norte de Santander, tiene condiciones específicas en términos de infraestructura sanitaria, características geográficas y dinámica socioeconómica. Estos factores deben ser tomados en cuenta al elegir opciones tecnológicas para procesar las aguas residuales domésticas. En este escenario, la biotecnología brinda soluciones adaptativas que se adecuan a las restricciones y oportunidades del territorio, de acuerdo con el marco regulatorio colombiano en vigor.

A continuación, se sintetizan las principales condiciones del municipio y sus implicaciones para el tratamiento:

Tabla 27

Condición del sistema de alcantarillados Ocaña

Aspecto	Condición Actual	Implicación para el Tratamiento
Sistema de Alcantarillado	Mixto (aguas residuales + pluviales).	Alta variabilidad hidráulica, dilución de contaminantes en épocas de lluvia, riesgo de desbordamientos (CSO).

Topografía	Relieve montañoso (Cordillera Oriental, altitud media 1.160 msnm).	Dificultad para redes extensivas por gravedad, necesidad de soluciones descentralizadas en laderas.
Clima	Tropical (20-28 °C).	**Favorable** para procesos biológicos (alta tasa metabólica microbiana en humedales, biodigestores, etc.).
Cobertura	31.068 usuarios, pero un 12,7% de viviendas sin conexión formal al alcantarillado (DANE, 2018).	Existencia de puntos de vertimiento directo a fuentes hídricas (Ríos Tejo y Chiquito).
Cuerpos Receptores	Río Tejo y Río Chiquito (subcuenca del río Algodonal).	Alta carga de DBO_5, DQO, SST, metales pesados, patógenos y tensoactivos. Procesos de hipoxia y eutrofización.
Articulación Institucional	Baja o inexistente entre universidades, sector público (ESPO S.A., CORPONOR) y privado (12 de 27 encuestados la consideran inexistente).	Principal obstáculo estructural para implementar soluciones integrales y sostenibles.

Percepción de Costos	Alto costo de inversión inicial (CAPEX) percibido como el principal reto (15 de 27 encuestados).	Limitante para tecnologías avanzadas (MBR) y centralizadas (UASB + Lodos Activados).

Nota: Elaboración propia con base en DANE (2018) y datos del diagnóstico situacional del sistema de alcantarillado de Ocaña, Norte de Santander.

4.1.1. Aportes de la biotecnología según problemáticas específicas

- **Zonas sin alcantarillado (12,7 %):** Los biodigestores anaerobios son una alternativa económica y descentralizada para áreas periurbanas y rurales, reduciendo la carga orgánica y generando biogás y biofertilizantes. No obstante, requieren tratamiento complementario (humedales o filtros) para cumplir normativas ambientales.

- **Descontaminación de ríos (Tejo y Chiquito)**: Los humedales híbridos alcanzan eficiencias del 80–90 % en contaminantes y, junto con la fitorremediación con Macrófitas, ofrecen una solución económica para restaurar cuerpos de agua, aunque demandan área disponible y gestión de biomasa.

- **Sistema urbano y alcantarillado mixto:** En la ciudad con alcantarillado mixto, los humedales artificiales son viables, mientras que tecnologías como los MBR tienen poca aplicación en Ocaña por su alto costo y necesidad de personal especializado.

- **Gestión institucional y sostenibilidad:** La biotecnología aporta modelos de gestión sostenibles mediante proyectos piloto que validan tecnologías locales, fortalecen capacidades técnicas y articulan actores clave (academia, empresas, autoridad ambiental y gobierno local).

4.1.2. Síntesis

El análisis evidencia que las tecnologías biotecnológicas de baja y media complejidad, como los biodigestores anaerobios, los humedales artificiales híbridos y la fitorremediación, presentan una alta compatibilidad con las condiciones climáticas, topográficas y socioeconómicas del municipio de Ocaña.

4.2. Criterios Técnicos para la Selección de Tecnologías Biotecnológicas Prioritarias

Para el municipio de Ocaña, la elección de tecnologías biotecnológicas no puede depender solamente de la eficacia en eliminar contaminantes. Es necesario incorporar un enfoque de múltiples criterios que se ajuste a las circunstancias locales identificadas, como la alta variabilidad hidráulica, una topografía montañosa y un 12.7% de casas que no están conectadas a la red; así como también a restricciones económicas (un CAPEX elevado) y una escasa articulación institucional.

En este contexto, se definen criterios técnicos que permiten evaluar de manera integral las tecnologías disponibles, orientando la priorización de aquellas más adecuadas para el municipio.

4.2.1. Definición de Criterios de Selección

Los criterios se han agrupado en cuatro categorías fundamentales, priorizando aquellos que abordan las debilidades y amenazas del contexto local:

- Eficiencia de remoción (25 %): Capacidad de la tecnología para reducir contaminantes clave como DBO_5, DQO, SST y nutrientes, en cumplimiento de la normativa ambiental.

- Resiliencia hidráulica (30 %): Capacidad del sistema para soportar variaciones en el caudal y la carga contaminante, especialmente en condiciones de alcantarillado mixto.

- Viabilidad económica CAPEX/OPEX (25 %): Relación entre costos de inversión, operación y mantenimiento frente a la capacidad financiera del municipio.

- Adaptabilidad local (20 %): Compatibilidad de la tecnología con las condiciones climáticas, topográficas, sociales e institucionales del territorio.

Tabla 28

Conversión de calificación cualitativas a valor de porcentajes

Calificación	Conversion a %
Muy Alta	90%
Alta	85%
Media-Alta	75%

Media	65%
Baja	40%

Se debe tener encuentra los siguientes parámetros para el cálculo detallado por puntación ponderada:

- Eficiencia (Alta = 85%) × 25% = 21.25% (la tabla muestra 25% - revisar)
- Resiliencia (Media-Alta = 75%) × 30% = 22.5%
- Viabilidad CAPEX/OPEX (Óptima = 90%) × 25% = 22.5%
- Adaptabilidad (Alta = 85%) × 20% = 17% (la tabla muestra 18%)

4.2.2. Evaluación multicriterio de tecnologías

A partir de los criterios definidos, se realiza la evaluación comparativa de las principales tecnologías biotecnológicas aplicables al contexto de Ocaña:

Tabla 29

Evaluación de las multicriterio tecnologías en Ocaña

Tecnología	Eficiencia de Remoción (25%)	Resiliencia Hidráulica (30%)	Viabilidad CAPEX/OPEX (25%)	Adaptabilidad Local (20%)	Puntuación Ponderada	Viabilidad para Ocaña

Humedales Artificiales Híbridos	Alta (85-95% para DBO_5, DQO, SST; 80-90% para N total)	Media-Alta. Toleran variaciones, pero requieren área y pueden colmatarse con exceso de sólidos.	Óptima. CAPEX medio, OPEX bajo. Bajo consumo energético. Complejidad operativa media.	Alta. Ideal para periferias. Usa vegetación nativa (Typha, Cyperus). Alta aceptación.	25% + 22.5% + 22.5% + 18% = 88%	Muy Alta
Biodigestores Anaerobios Descentralizados	Media (requiere postratamiento). Eficiente en DBO_5/DQO (hasta 95%), bajo en patógenos/nutrientes.	Alta. Extremadamente robustos frente a variaciones de carga y caudal en viviendas individuales.	Muy Alta. CAPEX bajo, OPEX muy bajo. Genera biogás (valor añadido). Operación simple.	Muy Alta. Ideal para viviendas sin alcantarillado (12.7%). Usa microorganismos autóctonos.	15% + 27% + 24% + 18% = 84%	Muy Alta
Sistemas Combinados UASB + Humedal	Muy Alta (90-97% para DBO_5/DQO; 80-90% para N total con humedal).	Media. El UASB puede perder gránulos con altas cargas hidráulicas. Requiere control.	Media-Alta. CAPEX alto, OPEX medio. Produce biogás. Requiere personalalificado.	Media. Requiere espacio y centralización. Apropiada para una futura PTAR urbana.	23% + 15% + 20% + 12% = 70%	Media

Lodos Activados Convencional / MBR	Muy Alta a Excepcional (>95% para todos los parámetros).	Baja. Muy sensible a variaciones de caudal y carga (característico del sistema mixto).	Baja. CAPEX y OPEX muy altos (energía). Requiere personal altamente calificado.	Baja. No apto para zonas sin red. Complejidad técnica incompatible con diagnóstico local.	24% + 9% + 10% + 8% = 51%	Baja

Nota. Elaboración propia a partir del diagnóstico situacional de Ocaña y criterios de evaluación multicriterio adaptados de Metcalf & Eddy (2014) y von Sperling (2007).

4.2.3. Análisis de resultados

Los resultados de la evaluación multicriterio evidencia diferencias significativas entre las tecnologías analizadas. Los humedales artificiales híbridos obtienen la mayor puntuación debido a su equilibrio entre eficiencia, bajo costo operativo y alta adaptabilidad al entorno local. Por su parte, los biodigestores anaerobios destacan por su bajo costo y alta resiliencia hidráulica, lo que los convierte en una solución ideal para zonas sin cobertura de alcantarillado.

Por otro lado, las tecnologías avanzadas como los reactores de membrana biológico (MBR), aunque presentan una eficiencia superior, obtiene una baja puntación en global debido a su alta complejidad operativa y elevados costos, lo que limita su implementación en el corto plazo en municipios intermedios como Ocaña.

4.3. Criterios Normativos y de Sostenibilidad para la Implementación

La implementación de tecnologías biotecnológicas en el municipio de Ocaña debe evaluarse no solo desde su desempeño técnico, sino también en función de su cumplimiento normativo y su capacidad de generar beneficios sostenibles a largo plazo. En este sentido, el marco regulatorio colombiano y las condiciones locales definen criterios clave para garantizar la viabilidad integral de las soluciones propuestas.

4.3.1. Criterios Normativos Fundamentales

Las tecnologías seleccionadas tienen que ser coherentes con las principales herramientas normativas del sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia, que definen exigencias técnicas, ambientales y administrativas.

Tabla 30

Criterios normativos aplicables en Ocaña

Normativa	Exigencia Clave	Implicación para Ocaña
Res. 0330 de 2017 (RAS)	Establece requisitos técnicos obligatorios para planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura de acueducto, alcantarillado y aseo.	Cualquier tecnología implementada debe cumplir con los criterios de calidad, seguridad, durabilidad y sostenibilidad definidos en el RAS.

	Introduce disposiciones clave: • **Art. 6:** Articulación con POT, POMCAS, PSMV y planes de cambio climático. • **Art. 153:** Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)	• Los proyectos deben coordinarse con herramientas de planificación territorial. • Los humedales híbridos tienen la posibilidad de ser considerados SUDS, lo que hace más fácil su implementación.
Res. 799 de 2021 (modifica RAS)	• **Art. 206A:** Gestión de subproductos en STAR. • **Art. 208-210:** Aprovechamiento de biogás en PTAR. • **Art. 212:** Aprovechamiento de subproductos (economía circular)	• Los biodigestores y los sistemas UASB tienen que incluir la captación y gestión del biogás, el cual tiene la capacidad de ser utilizado energéticamente. • Los lodos deben ser tratados como subproductos útiles, es decir, biosólidos.

	• **Art. 248:** Incorporación de nuevas tetecnologías. Los proyectos deben articularse con instrumentos de planeación existentes. • Los humedales híbridos califican como SUDS, facilitando su aprobación. • Los biodigestores y UASB deben incluir captación y uso de biogás. • Los lodos deben gestionarse como subproducto aprovechable (ej. biosólidos).	
Res. 699 de 2021 (MADS)	Establece parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos de Aguas Residuales	Los biodigestores domiciliarios para el 12.7% de viviendas sin alcantarillado deben diseñarse bajo RAS para no requerir

	Domésticas Tratadas (ARD-T) al suelo	permiso de vertimiento al suelo. El efluente tratado en humedales que se infiltre al suelo debe cumplir los límites de la Res. 699/2021.
Res. 0631 de 2015	Límites de vertimiento a cuerpos de agua superficiales (ríos).	El efluente de cualquier sistema que descargue a los ríos Tejo o Chiquito debe de cumplir estos límites.

Nota. La Resolución 0631 de 2015 es la norma marco nacional para vertimientos a cuerpos de agua superficiales. Si bien Ocaña debe cumplir sus límites generales, se recomienda consultar si la autoridad ambiental competente (Corponor) ha establecido límites más estrictos mediante normativa departamental o resolución específica para la cuenca de los ríos Tejo y Chiquito

Las tecnologías seleccionadas deben: Cumplir la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos a cuerpos de agua superficiales; cumplir la Resolución 699 de 2021 en caso de

infiltración al suelo, incorporar gestión de subproductos (biogás, biosólidos) según la Resolución 799 de 2021.articularse con instrumentos de planificación territorial (POT, PSMV, POMCA).

4.3.2. Criterios de Sostenibilidad

La sostenibilidad de las tecnologías se evalúa en tres dimensiones: económica, social y ambiental, considerando las condiciones específicas del municipio.

Tabla 31

Criterios de sostenibilidad en Ocaña

	Aplicación a Tecnologías Priorizadas
Sostenibilidad Económica	**Biodigestores:** CAPEX bajo, OPEX muy bajo; generan biogás (ahorro energético) y biofertilizante. • **Humedales híbridos:** CAPEX medio, OPEX bajo; requieren terreno disponible (costo de oportunidad bajo en periferia). • **Fitorremediación:** CAPEX mínimo; requiere plan de cosecha (costo de mantenimiento bajo).

	Aplicación a Tecnologías Priorizadas
Sostenibilidad Social	**Encuesta (sección 3.1):** 63% apoya proyectos piloto; 81.5% prioriza mantenimiento/operación como criterio clave. • Las tecnologías de baja complejidad pueden ser operadas por personal local capacitado. • La reducción de vertimientos sin tratar disminuye riesgos sanitarios (olores, enfermedades).
Sostenibilidad Ambiental	**Humedales híbridos:** Remoción >85% de DBO_5, DQO, SST y nutrientes; integración paisajística; restauración ecológica. • **Biodigestores:** Reducción de metano por disposición inadecuada; producción de biogás como energía renovable. • **Fitorremediación:** Absorción de metales pesados (Eichhornia crassipes, Typha) sin químicos agresivos.

Nota. La tabla integra los resultados de la encuesta de percepción ciudadana (Sección 3.1) y los parámetros técnicos de eficiencia para las tecnologías propuestas en el contexto de Ocaña. Elaboración propia.

4.3.3. Tabla de Verificación Normativa y de Sostenibilidad para Ocaña

A partir de los criterios definidos, se evalúa el desempeño de las tecnologías frente al cumplimiento normativo y su sostenibilidad integral.

Tabla 32

Verificación normativo y de sostenibilidad

Tecnología	Cumple Res. 0631/2015 (agua superficial)	Cumple Res. 699/2021 (vertimiento	Cumple Res. 799/2021 (subproductos.	Sostenibilidad (Económica, Social, Ambiental)	Viabilidad Integrada
Humedales Artificiales Híbridos	Sí (≥85% remoción DBO_5/DQO/SST; 80-90% N total)	Sí (con diseño adecuado para infiltración)	Sí (califican como SUDS - Art. 153; generan biomasa aprovechable - Art. 212)	**Económica:** Media/Alta; **Social:** Alta; **Ambiental:** Muy Alta	**Muy Alta**

Tecnología	Cumple Res. 0631/2015 (agua superficial)	Cumple Res. 699/2021 (vertimiento	Cumple Res. 799/2021 (subproductos.	Sostenibilidad (Económica, Social, Ambiental)	Viabilidad Integrada
Biodigestoes Anaerobios	Parcial (requiere postratamiento para patógenos/ nutrientes)	Sí (si se diseñan bajo RAS - Art. 279 Ley 1955; no requieren permiso para vivienda rural} d	Sí (producción de biogás - Arts. 208-210; gestión de subproductos - Art. 206A)	**Económica:** Muy Alta; **Social:** Alta; **Ambiental:** Alta	**Muy Alta**
Fitorremediación con Macrófitas	Parcial (complementaria; alta eficiencia en metales pesados)	N/A (generalmente no implica vertimiento	Parcial (aprovechamiento de biomasa - Art. 212; compatib	**Económica:** Alta; **Social:** Media; **Ambiental:** Muy Alta (restauración)	**Alta (complementaria)**

Tecnología	Cumple Res. 0631/2015 (agua superficial)	Cumple Res. 699/2021 (vertimiento	Cumple Res. 799/2021 (subproductos.	Sostenibilidad (Económica, Social, Ambiental)	Viabilidad Integrada
		directo al suelo)	e con SUDS)		
Sistema UASB + Humedal	Sí (≥90% remoción con postratamiento)	Sí (con humedal como pulimento)	Sí (producción de biogás en UASB; humedal como SUDS)	**Económica:** Media; **Social:** Media; **Ambiental:** Alta	**Media (mediano plazo)**
Lodos Activados Convencional / MBR	Sí (≥95%)	Sí (con tratamiento terciario)	Parcial (alta eficiencia, pero alto consumo energético; menos alineado con economía circular)	**Económica:** Baja (alto CAPEX/OPEX); **Social:** Baja (requiere personal especializado); **Ambiental:** Media (alta huella energética)	**Baja (corto plazo)**

4.3.4. Análisis Técnico integrado

La implementación de biotecnologías en Ocaña es viable siempre que se cumpla con el marco de la Res. 0330/2017 (RAS) modificada por la Res. 799/2021 (SUDS, gestión de subproductos, articulación) y la Res. 699/2021 (vertimientos al suelo). Las tecnologías prioritarias (humedales híbridos, biodigestores, fitorremediación) no solo satisfacen estos requisitos normativos, sino que generan beneficios económicos (biogás, biofertilizantes, bajo OPEX), sociales (empleo local, mejora sanitaria, aceptación comunitaria) y ambientales (restauración de ríos Tejo y Chiquito, bajas emisiones, integración paisajística). El principal habilitador no es la tecnología, sino la voluntad política y la articulación institucional para adoptar un modelo de saneamiento sostenible, gradual y basado en soluciones biotecnológicas de baja complejidad.

4.4. Evaluación Multicriterio y Selección de Alternativas Priorizadas para Ocaña

La selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Ocaña se realizó mediante un enfoque de análisis multicriterio (AMC), integrando variables técnicas, ambientales, económicas, sociales y normativas. Este análisis se fundamenta tanto en los criterios previamente establecidos en el diagnóstico situacional como en los lineamientos de la Resolución 0799 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, siendo realizados por los autores de esta monografía, la cual promueve el aprovechamiento de subproductos y la sostenibilidad en sistemas de saneamiento básico.

4.4.1. Alternativa priorizada para Ocaña

Con base en la evaluación multicriterio y el análisis de sensibilidad de los resultados, se selecciona como alternativa prioritaria para el municipio de Ocaña.

Tabla 33

Alternativa de selección

Criterio	Indicadores asociados
Eficiencia de remoción	Capacidad de eliminación de DBO_5, DQO, SST, NTK, fósforo total y organismos patógenos (coliformes fecales, huevos de helmintos)
Cumplimiento normativo	Ajuste a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y disposiciones sobre reúso o infiltración
Gestión de subproductos	Potencial de aprovechamiento de lodos estabilizados, biogás (metano ≥ 50%) o biomasa vegetal, conforme a la Res. 0799 de 2021
Costo (CAPEX y OPEX)	Inversión inicial (USD/m^3) y costos operativos (USD/m^3/año), incluyendo energía, insumos, mantenimiento y disposición final

Facilidad operativa	Nivel de complejidad técnica, requerimientos de personal calificado, frecuencia de mantenimiento y disponibilidad local de repuestos
Adaptabilidad local	Compatibilidad con condiciones específicas de Ocaña: topografía montañosa, clima tropical (20-28 °C), sistema de alcantarillado mixto y patrones de variabilidad hidráulica estacional
Impacto ambiental	Reducción de cargas contaminantes vertidas a los cuerpos receptores (Ríos Tejo y Chiquito) y potencial de recuperación ecológica de la subcuenca del río Algodonal
Aceptación social	Nivel de apropiación comunitaria, percepción de riesgos, viabilidad institucional y articulación entre actores (ESPO S.A., CORPONOR, municipio, universidades)

4.4.2. Matriz de evaluación multicriterio

La siguiente matriz presenta la calificación cualitativa de cada tecnología evaluada, según los criterios definidos. La puntuación global se expresa en una escala de 0 a 10, donde 10 representa el desempeño óptimo

Figura 39

Tabla calificativa

Valor	Calificación cualitativa
5	Muy alta / Óptimo
4	Alta / Bueno
3	Media / Regular
2	Baja / Deficiente
1	Muy baja / Nula

Criterios que serán evaluados:

- **Eficiencia:** capacidad de remoción de DBO_5, DQO, SST, nutrientes (N, P) y patógenos.
- **Costo:** inversión inicial (CAPEX) y costos operativos (OPEX) en USD/m^3.
- **Operación:** nivel de complejidad técnica, requerimiento de personal calificado y frecuencia de mantenimiento.
- **Subproductos:** potencial de aprovechamiento de biogás, biosólidos estabilizados o biomasa vegetal (Res. 0799 de 2021).
- **Adaptabilidad:** compatibilidad con condiciones locales (topografía montañosa, clima tropical, sistema de alcantarillado mixto, variabilidad hidráulica).
- **Cumplimiento normativo:** ajuste a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

- **Impacto ambiental:** reducción de cargas contaminantes vertidas a cuerpos receptores (Ríos Tejo y Chiquito) y potencial de recuperación ecológica.

Tabla 34

Matriz evaluativa multicriterio

Tecnología	Eficiencia	Costo	Operación	Subproductos	Adaptabilidad	Cumplimiento normativo	Impacto ambiental	Puntaje total (máx. 35)
Lodos activados convencionales	4	2	2	3	3	5	4	**23**
Biorreactor de membrana (MBR)	5	1	2	2	2	5	4	**21**
Lagunas de estabilización (anaerobias + facultativas + maduración)	3	5	5	2	5	3	4	**27**
Biofiltros percoladores (filtros biológicos)	4	3	3	2	5	4	4	**25**

Fitorremediación (macrófitas flotantes/emergentes)	3	5	5	4	5	3	5	**30**
Humedales artificiales convencionales (flujo subsuperficial horizontal)	4	4	5	4	5	4	5	**31**
Humedales artificiales híbridos (flujo subsuperficial + superficial)	5	4	4	5	5	5	5	**33**
Sistemas anaerobios (biodigestores domiciliarios/comunitarios)	4	5	4	5	5	4	5	**32**
Sistema anaerobio + humedal híbrido	5	5	4	5	5	5	5	34

UASB + sistema aerobio (lodos activados/biofiltro)	5	3	3	5	4	5	4	**29**
Biorreactor de lecho fijo (FBBR)	4	3	3	3	4	4	4	**25**
Tecnología Nereda® (lodo granular aerobio)	5	2	3	3	3	5	4	**25**
Lumbrifiltro (vermi-filtración con oligoquetos)	4	4	5	5	5	4	5	**32**

4.4.3. Análisis cuantitativo de resultados

Los resultados cuantitativos permitieron establecer las siguientes jerarquías tecnológicas en tres opciones, tecnologías con puntaje muy alto (≥ 30 puntos), Tecnologías con puntaje medio (25-29 puntos), Tecnología con puntaje bajo

Tabla 35

Tecnologías con alto puntaje

Tecnología	Puntaje	Observaciones
Sistema anaerobio + humedal híbrido	34/35	Óptimo desempeño integral. Máxima calificación en 6 de 7 criterios
Humedales artificiales híbridos	33/35	Excelente balance entre eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad ambiental
Sistemas anaerobios (biodigestores)	32/35	Destaca en costo, subproductos y adaptabilidad; requiere postratamiento
Lumbrifiltro (vermi-filtración)	32/35	Alta operación y subproductos; tecnología emergente con buenos resultados
Humedales artificiales convencionales	31/35	Buen desempeño, aunque inferior a los híbridos en eficiencia y normativa
Fitorremediación	30/35	Limitada en eficiencia para altas cargas; útil como pulimento o pretratamiento

Tabla 36

Tecnologías con puntaje medio

Tecnología	Puntaje	Limitaciones principales
UASB + Sistema aerobio	29/35	Costo medio-alto; complejidad operativa
Lagunas de estabilización	27/35	Baja eficiencia en patógenos; requiere grandes áreas
Biofiltros percoladores	25/35	Limitada producción de subproductos
FBBR (lecho fijo)	25/35	Requiere control operativo y personal calificado
Nereda®	25/35	Alta inversión; personal especializado

Tabla 37

Tecnología con puntaje bajo

Tecnología	Puntaje	Limitaciones principals
Lodos activados	23/35	Alto OPEX energético; complejidad operativa
MBR	21/35	CAPEX y OPEX extremadamente altos; baja adaptabilidad

4.4.4. Análisis de sensibilidad y consistencia

Los resultados evidencian una tendencia clara: las tecnologías naturales, descentralizadas y de bajo consumo energético obtienen sistemáticamente puntuaciones superiores en el contexto de Ocaña. Este comportamiento se explica por:

Los criterios locales de adaptabilidad, operación sencilla y generación de subproductos recibieron una alta ponderación implícita, favoreciendo tecnologías de baja complejidad. En contraste, las tecnologías intensivas en energía presentan una desventaja estructural debido al alcantarillado mixto y la topografía montañosa, que penalizan soluciones centralizadas con bombeo y control continuo. Adicionalmente, se identificó una sinergia entre criterios: las tecnologías que combinan fases anaerobia y aerobia (anaerobio + humedal híbrido) maximizan las puntuaciones al integrar aprovechamiento de subproductos con alta eficiencia de remoción.

4.4.5. Validación de resultados con diagnóstico situacional

La consistencia de los resultados se valida al contrastarlos con el diagnóstico situacional presentado en la Tabla:

Tabla 38

Validación del diagnostico

Condición diagnosticada	Tecnología priorizada (anaerobio + humedal híbrido)	Coherencia
Alcantarillado mixto (variabilidad hidráulica)	Fase anaerobia amortigua variaciones; humedal pulimenta	Alta
Topografía montañosa	Solución descentralizada en laderas; operación por gravedad	Alta
Clima tropical (20-28 °C)	Temperaturas óptimas para digestión anaerobia y humedales	Alta
12,7% viviendas sin conexión formal	Biodigestores domiciliarios para puntos de vertimiento directo	Alta
Cuerpos receptores con hipoxia/eutrofización	Remoción de DBO_5, DQO, SST, N, P	Alta
Baja articulación institucional	Tecnología de baja complejidad operativa	Media-Alta
Percepción de alto CAPEX	Bajo costo de inversión (biodigestores y humedales)	Alta

4.4.6. Alternativa priorizada

Con base en los resultados de la matriz de evaluación multicriterio, el análisis de sensibilidad de los criterios y la coherencia con el diagnóstico situacional del municipio de Ocaña, se confirma de manera consistente como alternativa prioritaria el sistema combinado anaerobio (biodigestor o reactor UASB a escala comunitaria o domiciliaria) acoplado a un humedal artificial híbrido (flujo subsuperficial horizontal complementado con flujo superficial libre).

Desde un punto de vista técnico, esta configuración es la mejor opción porque incorpora procesos muy eficaces para eliminar sólidos suspendidos y materia orgánica a través del tratamiento anaerobio. Además, incluye una fase de pulido natural que posibilita disminuir más los nutrientes, los compuestos remanentes y los patógenos. Esta sinergia de procesos asegura un rendimiento constante ante fluctuaciones de carga orgánica e hidráulica, que es una característica del sistema de alcantarillado mixto en Ocaña.

El sustento cuantitativo de esta selección se evidencia en el puntaje total obtenido (34/35), que equivale al 97,1% del ideal teórico y la coloca como la opción con el mejor rendimiento general dentro del grupo evaluado. Además, en la mayoría de los estándares examinados, esta tecnología alcanzó la calificación más alta (5/5), sobre todo en términos de costo y eficiencia.

Cabe resaltar que esta opción es la única que consigue, al mismo tiempo y en variables fundamentales del sistema, los valores más altos. Estas variables son: la eficacia del tratamiento;

la reducción de costes operativos; el aprovechamiento de subproductos (biogás y biosólidos); y la adaptabilidad a circunstancias climáticas, geográficas e institucionales. Esta ejecución integral está en línea directa con los fundamentos de sostenibilidad y economía circular que la normativa actual fomenta, particularmente en lo que respecta a la utilización de residuos generados por el tratamiento.

En lo que respecta a su aplicabilidad, el sistema sugerido ofrece beneficios importantes para ser implementado en esquemas descentralizados y modulares, lo que posibilita que se adapte tanto a áreas rurales como periurbanas y urbanas. Además, su escasa dependencia energética y su simpleza operativa lo hacen una solución factible en entornos con restricciones económicas y técnicas.

Por lo tanto, se deduce que la implementación de sistemas combinados anaerobio-humedal híbrido es el enfoque más apropiado para mejorar el tratamiento de las aguas residuales domésticas en Ocaña, ya que proporciona un equilibrio ideal entre sostenibilidad medioambiental, factibilidad económica, cumplimiento de la normativa vigente y rendimiento técnico.

5. Conclusiones

La presente monografía investigativa concluye que, para el municipio de Ocaña, las tecnologías biotecnológicas representan la alternativa más adecuada frente a los sistemas de saneamiento convencionales, tanto para el casco urbano como para los centros poblados descentralizados que no pueden ser cubiertos eficientemente por un sistema único centralizado. En este sentido, el análisis reconoce que existen limitaciones territoriales, hidráulicas y operativas que impiden la implementación de soluciones homogéneas, lo cual hace necesario un enfoque diferencial y adaptado al contexto local.

Desde el punto de vista técnico, la evaluación comparativa evidenció que los sistemas combinados presentan los mayores niveles de eficiencia en la remoción de contaminantes, logrando reducciones significativas en parámetros como DBO_5, DQO y SST. Tecnologías como los humedales artificiales híbridos, biodigestores y configuraciones combinadas demuestran que el rendimiento no depende únicamente de la capacidad de depuración, sino también de la estabilidad operativa y su adaptación a condiciones variables propias del territorio, como fluctuaciones de caudal y carga contaminante.

En cuanto al análisis de viabilidad, se determinó que las tecnologías descentralizadas de base biotecnológica son especialmente apropiadas para Ocaña. Esto se debe a su bajo consumo energético, facilidad de operación y mantenimiento, y la posibilidad de generar subproductos útiles como biogás y biosólidos. Estas características permiten no solo reducir costos operativos, sino también promover esquemas de sostenibilidad mediante el aprovechamiento de recursos dentro del mismo sistema.

El análisis muestra que el casco urbano de Ocaña puede usar sistemas de tratamiento más grandes y combinados, ya que cuenta con mayor infraestructura. En cambio, los centros poblados, por estar dispersos y tener menos recursos, necesitan soluciones más pequeñas y fáciles de implementar. Esta diferencia es importante para asegurar que todo el municipio tenga un tratamiento adecuado, eficiente y sostenible.

La aplicación de la metodología de evaluación multicriterio permitió identificar de manera objetiva y sistemática la alternativa tecnológica más adecuada, destacando el sistema combinado anaerobio + humedal artificial híbrido como la mejor opción. Este resultado se fundamenta en su alto desempeño integral (34/35 puntos equivalente al 97,1% del óptimo teórico), evidenciando superioridad en criterios de eficiencia, costo, adaptabilidad, sostenibilidad y cumplimiento normativo. En consecuencia, la biotecnología aplicada bajo un esquema descentralizado representa una solución técnicamente eficiente, ambientalmente sostenible y socialmente viable para el tratamiento de aguas servidas domésticas en Ocaña.

6. Recomendaciones

Crear una mesa técnica interinstitucional entre ESPO S.A., CORPONOR, Alcaldía y UFPSO para articular esfuerzos.

Capacitar al personal de ESPO S.A. en operación y mantenimiento de tecnologías biotecnológicas.

Actualizar el PSMV de Ocaña (2023) incorporando las tecnologías biotecnológicas priorizadas.

Cumplir gradualmente la Resolución 0631 de 2015, priorizando la reducción de DBO_5 y SST en los vertimientos.

Aplicar la Resolución 699 de 2021 para viviendas rurales dispersas, evitando permisos innecesarios.

Monitorear trimestralmente la calidad del agua de los ríos Tejo y Chiquito con enfoque participativo.

Realizar campañas de sensibilización comunitaria sobre el uso adecuado del alcantarillado y beneficios de la biotecnología.

7. Referencias

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780073401188

Mara, D. D. (2004). Domestic wastewater treatment in developing countries. Earthscan Publications. https://www.routledge.com/Domestic-Wastewater-Treatment-in-Developing-Countries/Mara/p/book/9781844070206

Von Sperling, M. (2007). Wastewater characteristics, treatment and disposal. IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780402086

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment wetlands (2nd ed.). CRC Press. https://www.routledge.com/Treatment-Wetlands-Second-Edition/Kadlec-Wallace/p/book/9781566705264

Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment: A review. Water, 2(3), 530–549. https://doi.org/10.3390/w2030530

Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology, 56(1), 15–39. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214

Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 49(1), 643–668. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643

de Kreuk, M. K., & van Loosdrecht, M. C. M. (2006). Formation of aerobic granules with domestic sewage. *Journal of Environmental Engineering*, *132(6)*, 694–697. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:6(694)

Pronk, M., de Kreuk, M. K., de Bruin, B., Kamminga, P., Kleerebezem, R., & van Loosdrecht, M. C. M. (2015). Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. *Water Research, 84*, 207–217. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.011

Ødegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process. *Water Science & Technology, 53*(9), 17–33. https://doi.org/10.2166/wst.2006.284

Sinha, R. K., Bharambe, G., & Chaudhari, U. (2008). Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: A low-cost sustainable technology. *The Environmentalist, 28*(4), 409–420. https://doi.org/10.1007/s10669-008-9162-8

Arora, S., Rajpal, A., & Kazmi, A. A. (2016). Performance evaluation of vermifilter for domestic wastewater treatment. *Ecological Engineering, 97*, 416–423. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.047

Lens, P. N. L., Visser, A., Janssen, A. J. H., Hulshoff Pol, L. W., & Lettinga, G. (1998). Biotechnological treatment of sulfate-rich wastewaters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 28*(1), 41–88. https://doi.org/10.1080/10643389891254170

Muyzer, G., & Stams, A. J. M. (2008). The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology, 6*(6), 441–454. https://doi.org/10.1038/nrmicro1892

Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU). (2021). *Guía para el diseño de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas servidas*. Santiago, Chile: MINVU. https://www.minvu.gob.cl/

Wu, H., Zhang, J., Guo, W., Liang, S., & Fan, J. (2018). Secondary effluent purification by a large-scale multi-stage surface-flow constructed wetland: A case study in northern China. *Bioresource Technology, 268*, 1092–1096. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.018

van Loosdrecht, M. C. M. (2020). Nereda® technology: Aerobic granular sludge for wastewater treatment. En *IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies*. London, UK: IWA Publishing. https://www.iwa-network.org/

Judd, S. (2011). *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment* (2nd ed.). Elsevier. https://www.elsevier.com/books/the-mbr-book/judd/978-0-08-096682-3

iAgua. (2020, 23 de marzo). *¿Qué es un proceso de lodos activados y cómo funciona?* iAgua. https://www.iagua.es/respuestas/que-es-proceso-lodos-activados

Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia, 674*(1), 133–156. https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9

UNESCO. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua*. París, Francia: UNESCO. https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/es

Rajasulochana, P., & Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies, 2*(4), 175–184. https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.001

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución A/RES/70/1. Nueva York: Naciones Unidas.https://sdgs.un.org/2030agenda

WHO & UN-Habitat. (2021). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs*. Geneva: World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240030848

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall). (2018). *German wastewater treatment plants: Energy efficiency and biogas utilization*. Hennef, Germany: DWA. https://dwa.de/

van Loosdrecht, M. C. M., & Pronk, M. (2017). Nereda® technology for sustainable wastewater treatment. *Water Practice & Technology, 12*(3), 562–569. https://doi.org/10.2166/wpt.2017.062

Zhang, Y., Shen, Y., & Wang, L. (2020). Application of constructed wetlands combined with bioremediation for wastewater treatment in rural China. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 26789–26802. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09062-4

Gómez-Muñoz, C. A., Rodríguez, D. C., & Álvarez, J. A. (2020). Sulfate-reducing bacteria for heavy metal removal in constructed wetlands: A Colombian case study. *Revista de Ingeniería Ambiental, 15*(2), 45–58.

Pérez, J. C., & Solano, J. D. (2020). *Diagnóstico del sistema de alcantarillado en municipios de la provincia de Ocaña*. Trabajo de grado. Universidad de La Salle, Bogotá.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) – Título D: Sistemas de alcantarillado*. Resolución 0330 de 2017. Bogotá, Colombia: MVCT. https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017

Alcaldía de Ocaña. (2023). *Plan de Desarrollo Municipal "Ocaña para la Gente" 2024-2027*. Ocaña, Norte de Santander: Alcaldía Municipal. https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Informe de vigilancia especial al servicio de alcantarillado en municipios de categoría 6*. Bogotá, Colombia: SSPD. https://www.superservicios.gov.co/

Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). (2022). *Informe de calidad del agua de los ríos Tejo y Chiquito, Ocaña*. Cúcuta, Colombia: CORPONOR. https://corponor.gov.co/

Pacheco, L. F., & García, M. A. (2022). Impactos ambientales del vertimiento de aguas residuales domésticas en cuerpos hídricos de Ocaña. *Revista de Ingeniería y Sostenibilidad Ambiental, 8*(1), 34–49.

Sánchez, R. A., & Quintero, J. D. (2023). Efectos de tensoactivos en la autodepuración de cuerpos de agua urbanos. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental, 12*(2), 78–92.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Bogotá, Colombia: DANE. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018

Bancolombia. (2024). *Sector de agua y saneamiento en Colombia: Radiografía y oportunidades*. Medellín, Colombia: Bancolombia Grupo Financiero. https://www.grupobancolombia.com/

Universidad de Antioquia (UdeA). (2023). Estudio nacional de cobertura y eficiencia de PTAR en Colombia. Medellín, Colombia: Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Saneamiento Ambiental.

El Espectador. (2024). Contaminantes emergentes en aguas residuales: un riesgo invisible. *El Espectador*, sección Ciencia y Ambiente. https://www.elespectador.com/

Empresa de Servicios Públicos de Ocaña S.A. E.S.P. (ESPO S.A.). (2024). *Informe de gestión anual 2023-2024*. Ocaña, Norte de Santander: ESPO S.A. https://www.espo.com.co/

ESPO S.A. & Alcaldía de Ocaña. (2023). *Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) del municipio de Ocaña*. Ocaña, Norte de Santander: ESPO S.A. https://www.espo.com.co/transparencia/planes

Congreso de la República de Colombia. (1994). *Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, Colombia. https://www.suin-juriscol.gov.co/

Universidad de La Salle. (2021). Evaluación hidráulica del sistema de alcantarillado de Ocaña. Trabajo de grado o informe de investigación. Bogotá: Universidad de La Salle.

Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá, Colombia. https://www.suin-juriscol.gov.co/

Presidencia de la República de Colombia. (2025). *Decreto 774 de 2025: Por el cual se reglamenta el aprovechamiento de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Bogotá, Colombia. https://www.suin-juriscol.gov.co/