

# Saneamiento ecológico en áreas urbanas:

Enfrentando el cambio climático con soluciones basadas en la naturaleza

## Ecological sanitation in urban areas:

Tackling climate change with nature-based solutions

## Saneamento ecológico em áreas urbanas:

Enfrentando as mudanças climáticas com soluções baseadas na natureza

## Assainissement écologique dans les zones urbaines :

Lutter contre le changement climatique avec des solutions fondées sur la nature

Fuente: Autoría propia

Autor

**Kimmel Chamat Garcés**

Universidad del Valle. Escuela de Arquitectura

kimmel.chamat@correounivalle.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0001-9393-6964>

Recibido: 29/2/2024  
Aprobado: 27/08/2024

### Cómo citar este artículo:

Chamat Garcés, Kimmel (2024). Saneamiento Ecológico en Áreas Urbanas: Enfrentando el Cambio Climático con Soluciones Basadas en la Naturaleza. *Bitácora Urbano Territorial*, 34(II): 113-124. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v34n2.113545>

## Resumen

---

El saneamiento es crucial para la salud pública, el desarrollo sostenible y la adaptación al cambio climático. Sin embargo, el 46% de la población mundial carece de acceso a un saneamiento seguro. Este artículo examina cómo los sistemas de saneamiento ecológico y las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) pueden contribuir a la adaptación y mitigación del cambio climático. Mediante una revisión sistemática de literatura reciente, se analizaron publicaciones sobre saneamiento ecológico, SBN y cambio climático. Los resultados revelan que los sistemas de saneamiento ecológico reducen eficazmente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al tratamiento convencional. Prácticas como la separación en origen, el tratamiento descentralizado y la recuperación de nutrientes contribuyen significativamente a reducir la huella de carbono. Se identificaron sinergias importantes entre el saneamiento ecológico y otras SBN, como la integración con infraestructura verde y agricultura urbana. Estas sinergias mejoran la gestión del agua, la eficiencia energética y la seguridad alimentaria, promoviendo sistemas urbanos más resilientes. La investigación futura debe cuantificar los beneficios combinados de estas sinergias en diversos contextos urbanos y desarrollar estrategias de implementación que consideren aspectos técnicos, sociales y económicos, contribuyendo así a múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Palabras clave:** saneamiento, cambio climático, resiliencia, vulnerabilidad

## Autor

---

### Kimmel Chamat Garcés

Profesor de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle. Arquitecto de la Universidad de San Buenaventura Cali. Doctor en Planificación Urbana y Regional de la Universidad de la Florida, Estados Unidos. Magister en Arquitectura y Diseño Sostenible de la Universidad de la Florida, Estados Unidos. Docente en las áreas de Diseño Arquitectónico, Urbanismo Sostenible y Ecología del Paisaje, en los programas de pregrado en Arquitectura, Maestría en Arquitectura y Urbanismo, y Doctorado en Gestión Urbana y del Territorio. Investigador del Grupo de Investigación Colectivo CITCE de la Universidad del Valle.

## Abstract

Sanitation is crucial for public health, sustainable development and adaptation to climate change. However, 46% of the world's population lacks access to safe sanitation. This article examines how ecological sanitation systems and nature-based solutions (NBS) can contribute to climate change adaptation and mitigation. Through a systematic review of recent literature, publications on ecological sanitation, NBS and climate change were analyzed. The results reveal that ecological sanitation systems effectively reduce greenhouse gas emissions associated with conventional treatment. Practices such as separation at source, decentralized treatment and nutrient recovery contribute significantly to reducing the carbon footprint. Important synergies were identified between ecological sanitation and other NBS, such as integration with urban green infrastructure and urban agriculture. These synergies improve water management, energy efficiency and food security, promoting more resilient urban systems. Future research should quantify the combined benefits of these synergies in various urban contexts and develop implementation strategies that consider technical, social and economic aspects, thus contributing to multiple Sustainable Development Goals.

**Keywords:** ecological sanitation, climate change, resilience, vulnerability

## Résumé

L'assainissement est crucial pour la santé publique, le développement durable et l'adaptation au changement climatique. Cependant, 46 % de la population mondiale n'a pas accès à des installations sanitaires sûres. Cet article examine comment les systèmes d'assainissement écologiques et les solutions fondées sur la nature (SNB) peuvent contribuer à l'adaptation et à l'atténuation du changement climatique. Grâce à une revue systématique de la littérature récente, les publications sur l'assainissement écologique, les NBS et le changement climatique ont été analysées. Les résultats révèlent que les systèmes d'assainissement écologiques réduisent efficacement les émissions de gaz à effet de serre associées au traitement conventionnel. Des pratiques telles que la séparation à la source, le traitement décentralisé et la récupération des nutriments contribuent de manière significative à réduire l'empreinte carbone. D'importantes synergies ont été identifiées entre l'assainissement écologique et d'autres SFN, telles que l'intégration avec les infrastructures vertes urbaines et l'agriculture urbaine. Ces synergies améliorent la gestion de l'eau, l'efficacité énergétique et la sécurité alimentaire, favorisant ainsi des systèmes urbains plus résilients. Les recherches futures devraient quantifier les avantages combinés de ces synergies dans divers contextes urbains et développer des stratégies de mise en œuvre qui prennent en compte les aspects techniques, sociaux et économiques, contribuant ainsi à plusieurs objectifs de développement durable.

## Resumo

O saneamento é crucial para a saúde pública, o desenvolvimento sustentável e a adaptação às alterações climáticas. No entanto, 46% da população mundial não tem acesso a saneamento seguro. Este artigo examina como os sistemas de saneamento ecológico e as soluções baseadas na natureza (SBN) podem contribuir para a adaptação e mitigação das alterações climáticas. Através de uma revisão sistemática da literatura recente, foram analisadas publicações sobre saneamento ecológico, SBN e alterações climáticas. Os resultados revelam que os sistemas de saneamento ecológico reduzem eficazmente as emissões de gases com efeito de estufa associadas ao tratamento convencional. Práticas como a separação na fonte, o tratamento descentralizado e a recuperação de nutrientes contribuem significativamente para a redução da pegada de carbono. Foram identificadas sinergias importantes entre o saneamento ecológico e outras SBN, como a integração com infraestruturas verdes urbanas e a agricultura urbana. Estas sinergias melhoram a gestão da água, a eficiência energética e a segurança alimentar, promovendo sistemas urbanos mais resilientes. A investigação futura deverá quantificar os benefícios combinados destas sinergias em vários contextos urbanos e desenvolver estratégias de implementação que considerem aspectos técnicos, sociais e económicos, contribuindo assim para múltiplos Objectivos de Desenvolvimento Sustentável.

**Palavras-chave:** saneamento ecológico, alterações climáticas, resiliência, vulnerabilidade



**Saneamiento ecológico en áreas urbanas:**  
Enfrentando el cambio climático con soluciones  
basadas en la naturaleza

**Mots-clés :** assainissement écologique, changement climatique, résilience, vulnérabilité

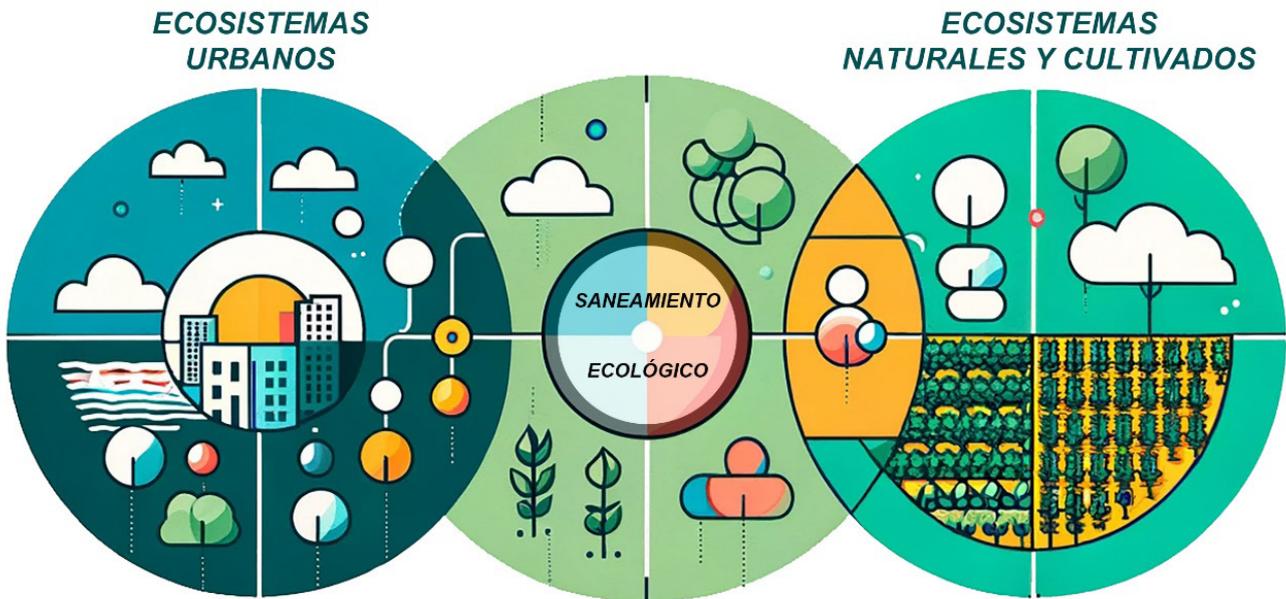
## Introducción

El cambio climático ejerce una influencia creciente en los sistemas urbanos de saneamiento, intensificando desafíos existentes y generando nuevas vulnerabilidades (Sherpa et al., 2014). La infraestructura de saneamiento, cuya concepción se basa en patrones climáticos históricos, se ha visto desbordada ante la magnitud de los eventos extremos y las alteraciones climáticas. Esta realidad compromete la eficacia operativa de dichos sistemas y su capacidad de resiliencia a largo plazo. A nivel mundial, el 46% de la población carece de acceso a servicios de saneamiento: 580 millones dependen de servicios limitados, 616 millones utilizan instalaciones deficientes y 494 millones practican la defecación al aire libre (UN-water, 2021). Al mismo tiempo, los sistemas de saneamiento tradicionales, caracterizados por tecnologías lineales y centralizadas, están siendo cuestionados debido a la caducidad de la infraestructura, la dificultad para recuperar nutrientes y su vulnerabilidad ante el cambio climático (Larsen et al., 2016). Estos sistemas, diseñados para transportar residuos fuera de las zonas urbanas, a menudo pasan por alto el potencial de recuperación y reutilización de recursos, lo que genera pérdidas importantes de energía y nutrientes (Maurer et al., 2003). El cambio climático exacerba estos desafíos, ya que los fenómenos meteorológicos extremos ejercen presión sobre la infraestructura y provocan una mayor contaminación y riesgos para la salud pública.

Un creciente conjunto de investigaciones enfatiza la necesidad de un cambio fundamental: de modelos de saneamiento lineales y centralizados hacia modelos circulares y distribuidos (Ddiba et al., 2020; Zarei, 2020; Zvimba et al., 2021). Esta transición es necesaria para crear sistemas que no solo gestionen eficientemente los recursos, sino que también sean más resilientes ante los impactos del cambio climático y contribuyan al desarrollo sostenible. Los enfoques ecológicos en saneamiento implican la recuperación y reutilización de agua, nutrientes y energía, transformando los residuos en insumos valiosos para diversas aplicaciones urbanas y rurales (Haq & Cambridge, 2012). Un elemento central de este nuevo paradigma es la adopción de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), que utilizan procesos naturales para el tratamiento de residuos y la recuperación de nutrientes. Técnicas como la biofiltración, los humedales artificiales y los reactores de biogás brindan soluciones eficientes de gestión de residuos, al tiempo que contribuyen al mejoramiento de espacios verdes urbanos, al aumento de la biodiversidad y la resiliencia climática.

El objetivo de este artículo es explorar la contribución del saneamiento ecológico y las SBN en los procesos de adaptación y mitigación del cambio climático en áreas urbanas. A través de una revisión sistemática de la literatura académica, este estudio pretende comprender los mecanismos a través de los cuales el saneamiento ecológico puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la resiliencia de las ciudades ante los impactos del cambio climático. El artículo está organizado de la siguiente forma. La primera parte examina los fundamentos teóricos del saneamiento ecológico, sentando las bases para comprender su relevancia en las estrategias de cambio climático. A esto le sigue una serie de secciones, cada una dedicada a un tipo específico de flujo residual: orina, heces, aguas grises y aguas residuales. Para cada categoría, la narrativa se desarrolla en tres capas: una visión general inicial que pre-

*Un elemento central de este nuevo paradigma es la adopción de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), que utilizan procesos naturales para el tratamiento de residuos y la recuperación de nutrientes. Técnicas como la biofiltración, los humedales artificiales y los reactores de biogás brindan soluciones eficientes de gestión de residuos, al tiempo que contribuyen al mejoramiento de espacios verdes urbanos, al aumento de la biodiversidad y la resiliencia climática.*



**Figura 1.** Saneamiento ecológico como vínculo entre ecosistemas urbanos y ecosistemas naturales y cultivados

**Fuente:** Elaboración propia.

senta las características y el potencial del flujo de residuos como recurso, una revisión de las tecnologías existentes y emergentes para su tratamiento y recuperación de recursos, y un análisis de cómo estas tecnologías contribuyen a los esfuerzos de adaptación y mitigación del cambio climático. A través de este análisis, el presente artículo aspira a contribuir en la identificación de estrategias efectivas para la implementación de políticas y prácticas de saneamiento en entornos urbanos. Su enfoque está dirigido no solo a reducir la vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos y disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), sino también a identificar sinergias con otras SBN, para lograr múltiples beneficios dentro del marco más amplio del desarrollo urbano sostenible.

La relevancia de este esfuerzo radica en la creciente comprensión de que las estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático no pueden operar de forma fragmentada. Por el contrario, deben integrarse dentro de un enfoque holístico que abarque la gestión del agua, la recuperación de recursos, la biodiversidad y la infraestructura verde, entre otros elementos clave del urbanismo sostenible. Este enfoque integrado no solo maximiza los beneficios ambientales y sociales, sino que también optimiza los recursos económicos, promoviendo ciudades más resilientes y habitables. Consecuentemente, este artículo intenta mapear el terreno para futuras investigaciones y prácticas, sugiriendo que la adopción e integración del saneamiento ecológico y las SBN en la planificación

urbana representan pasos críticos hacia la resiliencia climática. Al hacerlo, apunta a desencadenar un diálogo entre investigadores, planificadores urbanos, responsables de políticas y la sociedad en general, motivando un cambio hacia prácticas más sostenibles y resilientes frente al cambio climático en el contexto urbano.

Saneamiento Ecológico y Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) El saneamiento ecológico (ecosan) representa un nuevo paradigma del saneamiento que reconoce los desechos humanos como un recurso valioso (Haq & Cambridge, 2012). Los fundamentos teóricos del saneamiento ecológico, entendido como Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), se sustentan en la premisa de aprovechar los procesos naturales para el tratamiento y gestión de residuos, orientados hacia la conservación, restauración y uso sostenible de los ecosistemas. Estos enfoques no solo buscan mitigar los impactos negativos del saneamiento convencional en el medio ambiente, como la contaminación del agua y del suelo, sino que también promueven la recuperación de recursos, la biodiversidad, y la resiliencia frente al cambio climático.

El concepto de saneamiento ecológico se basa en el principio de ‘cerrar el ciclo’ de los nutrientes y el agua, transformando los residuos en recursos. Esto implica la separación en la fuente de diferentes flujos (orina, heces y aguas grises) y su tratamiento a través de procesos naturales o tecnologías de bajo impacto que requieren menos

energía eléctrica y minimizan el uso de químicos. Como se indica en la Figura 1, el ciclo ecosan abarca los procesos de recolección, tratamiento y recuperación de recursos a partir de la separación en el origen, para su posterior uso en la agricultura, la jardinería o la restauración ecológica, cerrando de esta forma el ciclo de nutrientes al devolver estos elementos vitales a la Tierra. Las tecnologías ecosan suelen ser modulares, descentralizadas y adaptables, lo cual permite su adaptación a diversas condiciones locales y contextos culturales (Hu et al., 2016). Esta flexibilidad permite su adecuación a diversos entornos, desde urbanos hasta rurales y desde áreas de alta densidad hasta áreas remotas. Las soluciones ecosan utilizan procesos naturales, son de baja tecnología y requieren insumos externos mínimos. Además, pueden construirse y mantenerse utilizando materiales y conocimientos disponibles localmente, haciéndolos accesibles para diferentes comunidades.

Las SBN son intervenciones que utilizan procesos y ecosistemas naturales para abordar diversos desafíos ambientales de las ciudades contemporáneas. Estas soluciones están diseñadas para ofrecer resultados más sostenibles, rentables, y resilientes ante la variabilidad climática. Las SBN implican la conservación, restauración y creación de ecosistemas naturales o seminaturales, la gestión sostenible de los recursos y la incorporación de infraestructura verde en los entornos urbanos. Su objetivo no solo es proteger la biodiversidad y los ecosistemas, sino también mejorar el bienestar humano, además de proporcionar beneficios ambientales, sociales y económicos de forma simultánea.

La integración del saneamiento ecológico con las SBN emerge como un enfoque integral y multifacético destinado a enfrentar los complejos desafíos urbanos de la actualidad. Esta sinergia se plantea como una respuesta holística a problemas interconectados como el cambio climático, la seguridad hídrica, la soberanía alimentaria y la equidad social. Al abordar estos temas de manera integrada, se potencia la capacidad de las ciudades para adaptarse a las adversidades climáticas, al tiempo que avanzan hacia un desarrollo urbano sostenible. Además, esta estrategia fortalece los sistemas de producción y distribución de alimentos urbanos y mejora el acceso al agua, contribuyendo a la construcción de comunidades más justas y equitativas.

Este enfoque holístico encuentra su justificación en la necesidad de alinear las prácticas de saneamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, se enfoca en aquellos objetivos que apuntan a garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible (ODS 6), promover ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11), tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos (ODS 13), y proteger, restaurar y

promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres (ODS 15). La intersección de estas metas dentro del marco del saneamiento ecológico y las SBN refleja una comprensión profunda de cómo los sistemas urbanos de manejo de residuos y recursos pueden y deben evolucionar. La filosofía detrás del saneamiento ecológico y las SBN propone un cambio paradigmático en la gestión urbana, enfatizando la necesidad de reconectar los ciclos de nutrientes y agua urbanos con los ciclos naturales. Esta reconexión no solo reduce los impactos negativos en el medio ambiente, derivados de prácticas insostenibles, sino que también facilita la regeneración de los ecosistemas y la creación de un futuro urbano más sostenible y resiliente.

## Metodología

Esta investigación emplea un enfoque cualitativo basado en una revisión sistemática de la literatura científica reciente y seminal sobre saneamiento ecológico y su relación con la adaptación y mitigación del cambio climático en áreas urbanas. El proceso de recolección de datos se centró en dos categorías principales de fuentes: libros y artículos en idioma inglés publicados en los últimos diez años, así como artículos científicos publicados en fechas anteriores que son considerados de gran relevancia para el campo de estudio. Se utilizaron las bases de datos académicas Google Scholar, Scopus y Web of Science para identificar las publicaciones más pertinentes.

Para cada publicación seleccionada, se creó un resumen conciso que captura las tres capas de análisis descritas anteriormente: características y potencial del flujo de residuos como recurso; tecnologías existentes y emergentes para su tratamiento y recuperación de recursos, y contribución de la tecnología a los esfuerzos de adaptación y mitigación del cambio climático. A partir de esta categorización, se desarrolló un análisis narrativo que conecta los temas identificados, destacando las tendencias y patrones observados en la literatura reciente y establecida. La síntesis final de los hallazgos se centró en resumir las ideas principales y los enfoques más prometedores encontrados en la revisión. Esta síntesis se contextualizó al considerar las implicaciones del saneamiento ecológico en entornos urbanos. Se examinó su potencial para contribuir a las estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático, así como las posibles sinergias con otras Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) que apoyen el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

## Resultados

### SBN para el Tratamiento y Recuperación de Nutrientes de la Orina

La separación en origen, el tratamiento y la recuperación de nutrientes de la orina humana representa un área de investigación emergente. En el saneamiento ecológico, la orina y las heces se recogen por separado a través de sanitarios con desviación de orina u orinales independientes. Esta separación es crucial, ya que evita la mezcla de estos flujos de recursos, facilitando una recuperación más efectiva de nutrientes de cada componente (Niwagaba et al., 2009). Uno de los beneficios clave de esta separación en el origen es la gestión de volúmenes más reducidos y muestras altamente concentradas, en contraste con los volúmenes más grandes y los rangos de concentración más amplios que se encuentran en los sistemas de tratamiento centralizados.

Cada individuo suele generar una media de 1.4 litros de orina al día. La orina representa el 81% del contenido de nitrógeno (N) y aproximadamente el 50% del contenido de fósforo (P) de las aguas residuales domésticas (Larsen et al., 2009). Esto significa que, desde una perspectiva de nutrientes, la orina constituye una parte sustancial de los recursos presentes en las aguas residuales domésticas. Por lo tanto, recuperar los nutrientes de la orina puede contribuir significativamente a la sostenibilidad de la agricultura urbana y periurbana, al proporcionar fertilizantes y abonos orgánicos con baja huella de carbono (Nagy et al., 2019). Sin embargo, la orina también puede albergar residuos farmacéuticos preocupantes (Özel Duygan et al., 2021). Con todo, la investigación sobre la detección de medicamentos en la orina separada en origen sigue siendo relativamente escasa (Imwene et al., 2022).

Udert & Wächter (2012) desarrollaron un método que combina la nitrificación biológica con la destilación para una recuperación completa de nutrientes de la orina. Este proceso implica primero la conversión biológica del amoníaco de la orina en nitrato (nitrificación), seguida de la destilación de la solución resultante para recuperar los nutrientes. Este método es particularmente eficaz para separar y recuperar nitrógeno y fósforo, nutrientes clave para uso agrícola (Udert et al., 2016; Udert & Wächter, 2012). Los sistemas bioelectroquímicos, como las celdas de combustible microbianas (MFC) y las celdas de electrólisis microbiana (MEC), se han explorado como soluciones innovadoras para la recuperación de nutrientes de la orina (Ledezma et al., 2015; Nazari et al., 2020). Estas tecnologías ofrecen un doble beneficio de producción de energía y recuperación de nutrientes, lo que las convierte en una

opción atractiva para contribuir a la resiliencia energética. Adicionalmente, la fertirrigación se ha identificado como un enfoque prometedor para la aplicación a gran escala de la orina separada en fuente (Richert et al., 2010).

La separación en origen, el tratamiento, y la recuperación de nutrientes de la orina humana representan estrategias innovadoras que contribuyen a la adaptación y mitigación del cambio climático a través de varios mecanismos. La separación y tratamiento de orina en el punto de origen disminuyen la carga orgánica y de nutrientes en las aguas residuales, lo cual reduce la energía requerida para el tratamiento de aguas residuales en plantas centralizadas y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas (Shaw et al., 2021). Además, la separación de orina facilita la reutilización de aguas residuales tratadas para fines no potables, contribuyendo a la conservación del agua. En contextos donde el agua es un recurso escaso, este enfoque puede aliviar la presión sobre los suministros de agua dulce y aumentar la resiliencia de las comunidades al cambio climático (Boyer & Saetta, 2019).

### SBN para el Tratamiento y Recuperación de Nutrientes de las Heces

El compostaje es el método más utilizado para tratar las heces humanas separadas en origen en los sistemas de saneamiento ecológico (Niwagaba et al., 2009). Este proceso biológico implica la descomposición aeróbica de la materia orgánica, facilitada por microorganismos en condiciones controladas. El proceso de compostaje transforma eficazmente las heces en abonos y enmiendas para el suelo, reduciendo los patógenos y convirtiendo los desechos en un material estable y rico en nutrientes (Yadav et al., 2011). El producto final, el compost, sirve como excelente fertilizante o acondicionador del suelo. El compostaje aeróbico de heces reduce la generación de metano, el cual se produce cuando los residuos orgánicos se descomponen en condiciones anaeróbicas. Al compostar las heces, se facilita la descomposición aeróbica, produciendo dióxido de carbono en lugar de metano, que tiene un potencial de calentamiento global mucho menor (Jiang et al., 2011). El compost resultante del proceso de compostaje puede ser utilizado como un fertilizante orgánico rico en nutrientes, lo cual disminuye la dependencia de los fertilizantes químicos, cuya producción es intensiva en emisiones de GEI. Adicionalmente, el uso de compost mejora la calidad del suelo, incrementando su contenido de materia orgánica y, por ende, su capacidad para secuestrar carbono. Los suelos ricos en materia orgánica pueden almacenar carbono durante largos períodos, actuando como sumideros y ayudando a mitigar el cambio climático (Kutos et al., 2023).

Un desafío clave de los sistemas de compostaje es la reducción de patógenos a niveles seguros. El compostaje adecuado implica mantener condiciones específicas de temperatura y humedad para garantizar la eliminación de patógenos y hacerse seguro para el uso agrícola (Flores et al., 2012). La implementación de sistemas de compostaje eficaces requiere abordar desafíos como la gestión de olores, la garantía de una aireación adecuada y el mantenimiento de niveles adecuados de temperatura y humedad (Zhu et al., 2021). Sumado a esto, las percepciones culturales de que los desechos humanos son 'sucios' o 'indeseables' pueden ser una barrera importante. Cambiar estas percepciones requiere una comunicación efectiva y la participación de la comunidad (Uddin et al., 2014). La adaptación al uso de sanitarios de compostaje a menudo requiere un cambio en el comportamiento de los usuarios, lo que puede ser difícil de implementar, especialmente en comunidades acostumbradas a los sanitarios convencionales.

### SBN para el Tratamiento de Aguas Grises

La producción de aguas grises representa entre el 50 y el 80 % del volumen total del agua residual (Van de Walle et al., 2023). Las aguas grises provienen de diversas fuentes domésticas, como duchas, lavaderos, cocinas y lavanderías. Una de sus características es la baja concentración de materia orgánica. A diferencia de las aguas residuales, que requieren un tratamiento más extenso y complejo, las aguas grises se pueden tratar utilizando métodos más simples y rentables. El tratamiento implica procesos como filtración, sedimentación y conversión biológica. Estos procesos consumen menos energía que los sistemas de saneamiento lineales/centralizados y son más factibles para sistemas circulares/distribuidos (Kobayashi et al., 2020).

El tratamiento descentralizado de aguas grises mediante sistemas naturales aporta significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A diferencia de los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, que suelen ser intensivos en energía y productos químicos, los sistemas naturales requieren poca o ninguna energía para operar y operan con base en energía solar. La depuración del agua se logra a través de procesos biológicos y físicos, lo cual reduce el consumo energético y las emisiones de GEI asociadas con la generación de energía (Besson et al., 2021). Los sistemas de tratamiento natural, especialmente los humedales construidos, pueden actuar como sumideros de carbono. Las plantas utilizadas en estos sistemas absorben dióxido de carbono durante la fotosíntesis, contribuyendo también a la reducción de emisiones. Al tratar las aguas grises de manera eficiente en el punto de generación, se evita que estos efluentes ingresen a sistemas de saneamiento inadecuados o a cuerpos de agua, donde la descomposición anaeróbica de

materia orgánica puede producir metano y óxido nitroso, gases de efecto invernadero mucho más potentes que el dióxido de carbono (Mitsch & Mander, 2018).

El tratamiento descentralizado se puede gestionar eficazmente a través de una variedad de SBN. Los humedales artificiales imitan los humedales naturales para tratar las aguas grises, utilizando una combinación de plantas acuáticas, microorganismos y sustratos mejorados para filtrar y degradar los contaminantes (Maiga et al., 2024). Estos sistemas se pueden diseñar en varias configuraciones, incluido el flujo horizontal o vertical, para adaptarse a las condiciones específicas del sitio y los requisitos de tratamiento. Los humedales artificiales pueden integrarse en la arquitectura y el diseño paisajístico, mejorando los espacios verdes y apoyando la biodiversidad en entornos urbanos (Well & Ludwig, 2022).

Los techos y muros verdes representan otra forma de SBN para el tratamiento de aguas grises *in situ* (Masi et al., 2016; Petousi et al., 2023). Se pueden utilizar para el tratamiento de aguas grises permitiendo que las plantas y sus sistemas de raíces absorban y filtren el agua. Además de tratar las aguas grises, los techos y muros verdes ofrecen múltiples servicios ecosistémicos, como aislamiento térmico de edificios, mitigación de islas de calor urbanas y hábitat para la vida silvestre urbana. Una barrera importante para la implementación de estos sistemas es la limitada capacidad de carga de los edificios existentes y los costos de impermeabilización (Pradhan et al., 2019).

### SBN para el Tratamiento de Aguas Residuales

Las aguas residuales, que combinan orina, heces y aguas grises, se pueden gestionar eficazmente como un flujo único utilizando varias SBN adecuadas para el saneamiento ecológico descentralizado (Zhang et al., 2023). La recuperación de nutrientes es una consideración clave en el tratamiento de aguas residuales, ya que contiene elementos valiosos como nitrógeno y fósforo. El desafío radica en extraer estos nutrientes en una forma utilizable y al mismo tiempo eliminar o desactivar los patógenos dañinos (Hube & Wu, 2021). Para lograr estos objetivos se pueden emplear diversas SBN, como digestores de biogás o máquinas vivas. Estas SBN aprovechan los procesos naturales de actividad microbiana, absorción de plantas y filtración física para descomponer contaminantes y recuperar nutrientes valiosos.

Los digestores de biogás representan una SBN bien establecida para el tratamiento de aguas residuales en entornos urbanos (Mkhize et al., 2023). Estos sistemas funcionan según el principio de digestión anaeróbica, un proceso en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. El proceso de

digestión anaeróbica da como resultado la producción de biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono. Este biogás es una valiosa fuente de energía renovable que puede utilizarse para cocinar, calentar o generar electricidad (Wasajja et al., 2021). La utilización de biogás como fuente de energía puede reducir significativamente la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los entornos urbanos (Ignatowicz et al., 2023).

Las máquinas vivas representan una categoría innovadora de SBN, diseñadas específicamente para el tratamiento de aguas residuales (J. Todd & Josephson, 1996). Las máquinas vivas dependen de ecosistemas complejos de microorganismos, plantas y otros organismos beneficiosos que facilitan la descomposición de los contaminantes (Hung et al., 2014). En estos sistemas biomiméticos, una variedad de formas de vida vegetales y microbianas facilita la descomposición y absorción de contaminantes en las aguas residuales. Una característica importante de las máquinas vivas es el uso de ecosistemas complejos, que incluyen plantas, bacterias, hongos e incluso pequeños animales acuáticos. Esta biodiversidad no es solo para la riqueza ecológica, sino que cumple funciones en el proceso de tratamiento, con diferentes organismos especializados en la degradación de diversos tipos de residuos. Tratan eficazmente flujos complejos de aguas residuales y al mismo tiempo generan subproductos valiosos, como peces ornamentales, plantas medicinales o biomasa para compostaje (Fan et al., 2022). Estos sistemas se pueden adaptar a varias escalas, desde instalaciones pequeñas y descentralizadas que sirven a edificios individuales o comunidades hasta instalaciones centralizadas a nivel urbano y regional. Esta flexibilidad los hace adecuados para diversos contextos urbanos y rurales (N. J. Todd & Todd, 1994).

## Discusión. Sinergias urbanas: Saneamiento Ecológico y SBN como Soporte de los ODS

Los sistemas de saneamiento ecológico, cuando se integran estratégicamente con otras SBN en áreas urbanas, tienen el potencial de amplificar significativamente los beneficios en términos de adaptación y mitigación del cambio climático. Una de las sinergias más prometedoras es la integración de estos sistemas con la agricultura urbana y los espacios verdes. Al utilizar estos nutrientes recuperados en la agricultura urbana y en el mantenimiento de espacios verdes, se reduce la dependencia de insumos externos y se disminuye la huella de carbono asociada al transporte de fertilizantes. Además, esta práctica mejora la calidad del suelo urbano, aumentando su capacidad de retención de agua y secuestro de carbono, lo que contribuye tanto a la adaptación como a la mitigación del cambio climático.

La integración adicional de los sistemas de tratamiento de aguas grises potencia aún más estos beneficios. En el contexto de la agricultura urbana, el riego con aguas grises tratadas proporciona tanto agua como nutrientes adicionales, complementando los nutrientes recuperados de la orina y mejorando la productividad. Cuando se aplica en techos verdes y muros vegetales, este enfoque mejora la eficiencia energética de los edificios al proporcionar aislamiento natural y reducir el efecto isla de calor urbano. Esta sinergia entre el tratamiento de aguas grises, la agricultura urbana y la infraestructura verde contribuye significativamente a la adaptación al cambio climático, mejorando la seguridad alimentaria y el confort térmico en las ciudades, y a la mitigación, reduciendo la demanda energética para climatización y la huella hídrica de la producción de alimentos. Así, la combinación de estos elementos no solo optimiza el uso de recursos hídricos y nutrientes, sino que también contribuye a establecer una economía circular más robusta en el entorno urbano, aumentando la resiliencia de las ciudades frente al cambio climático.

El compostaje de heces, cuando se combina con la gestión de otros residuos orgánicos urbanos, presenta otra sinergia significativa. Este enfoque integrado mejora la calidad del compost resultante, lo cual aumenta la capacidad de secuestro de carbono en los suelos urbanos. La aplicación de este compost en la silvicultura urbana y en la restauración de espacios verdes degradados puede mejorar significativamente la salud de los ecosistemas urbanos, aumentando su biodiversidad y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos como la regulación del microclima y la filtración del aire. Estos beneficios son cruciales para la adaptación al cambio climático en las ciudades, especialmente en el contexto de las islas de calor urbanas y la calidad del aire.

La implementación efectiva de estas sinergias requiere un enfoque integrado de planificación urbana que considere las interconexiones entre los diferentes sistemas y que involucre a múltiples actores en el proceso de diseño e implementación. Sin embargo, aún existen brechas significativas en nuestro conocimiento que necesitan ser abordadas a través de investigación adicional. Se requieren estudios para cuantificar los beneficios combinados de estas sinergias en diferentes contextos urbanos, considerando variables como el clima local, la densidad poblacional y las características socioeconómicas. Es crucial desarrollar modelos predictivos que puedan ayudar a los planificadores urbanos a optimizar la integración de sistemas de saneamiento ecológico con otras SBN para maximizar los beneficios en términos de cambio climático y sostenibilidad urbana. Además, se debe investigar más a fondo los aspectos técnicos de la integración de estos sistemas, como la optimización de los procesos de tratamiento de aguas grises para diferentes usos en agricultura urbana y

el desarrollo de tecnologías de recuperación de nutrientes más eficientes y escalables. También es importante desarrollar investigación sobre los impactos a largo plazo del uso de aguas grises tratadas y fertilizantes derivados de la orina en la salud del suelo y la calidad de los cultivos.

La exploración de cómo las sinergias entre los sistemas de saneamiento ecológico y otras SBN contribuyen a la consecución de múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es fundamental para comprender su impacto integral en el desarrollo urbano. Estas interacciones no solo abordan la acción climática (ODS 13), sino que también tienen el potencial de impactar positivamente en otros objetivos cruciales como el agua limpia y saneamiento (ODS 6), ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11), hambre cero (ODS 2), salud y bienestar (ODS 3), y reducción de la pobreza (ODS 1). La integración efectiva de sistemas de saneamiento ecológico con otras SBN tiene el potencial de transformar radicalmente los entornos urbanos. Este enfoque sinérgico no solo aborda múltiples ODS de manera simultánea, sino que también sienta las bases para un nuevo paradigma de desarrollo urbano que armoniza las necesidades humanas con los procesos ecológicos.

## Conclusión

---

El saneamiento ecológico y las SBN representan enfoques prometedores para abordar los desafíos asociados con el tratamiento y la recuperación de recursos en los flujos de residuos orgánicos humanos. Estas soluciones ofrecen múltiples beneficios que van más allá de la simple gestión de residuos, contribuyendo significativamente a la mitigación y adaptación al cambio climático. Además de los beneficios en el cierre de los ciclos ecológicos y la gestión eficiente de recursos, los sistemas de saneamiento ecológico ofrecen múltiples oportunidades económicas y sociales para las comunidades locales. Estos sistemas pueden transformarse en infraestructuras urbanas clave para impulsar el desarrollo local auto-sostenible, al actuar como catalizadores para el desarrollo de prácticas que contribuyen a la reducción de emisiones y la adaptación al cambio climático.

La agricultura urbana y periurbana puede beneficiarse directamente de los recursos recuperados de los sistemas de saneamiento ecológico, como fertilizantes, abonos orgánicos y el agua tratada, lo cual promueve la producción local de alimentos y reduce la necesidad de transporte, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas. Además, la restauración ecológica de áreas degradadas puede integrarse con los sistemas de saneamiento ecológico para crear paisajes multifuncio-

nales que proporcionen hábitat para la biodiversidad, así como servicios ecosistémicos como la captura de carbono y la regulación del ciclo del agua. Estas sinergias entre diferentes estrategias de desarrollo sostenible pueden generar beneficios ambientales, sociales y económicos significativos a corto, mediano y largo plazo. Por lo tanto, es fundamental reconocer que los sistemas de saneamiento ecológico forman parte de sistemas complejos más amplios y deben articularse con otras estrategias para maximizar sus beneficios y crear soluciones holísticas y resilientes frente a los desafíos del cambio climático y la sostenibilidad.

## Referencias

- BESSON, M., BERGER, S., TIRUTA-BARNA, L., PAUL, E., & SPÉRANDIO, M. (2021). Environmental assessment of urine, black and grey water separation for resource recovery in a new district compared to centralized wastewater resources recovery plant. *Journal of Cleaner Production*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126868>
- BOYER, T. H., & SAETTA, D. (2019). Opportunities for Building-Scale Urine Diversion and Challenges for Implementation. *Accounts of Chemical Research*, 52(4), 886-895. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00614>
- DDIBA, D., ANDERSSON, K., KOOP, S. H. A., EKENER, E., FINNVEDEN, G., & DICKIN, S. (2020). Governing the circular economy: Assessing the capacity to implement resource-oriented sanitation and waste management systems in low- and middle-income countries. *Earth System Governance*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2020.100063>
- FAN, C., LV, C., WANG, Z., WU, S., JIN, Z., BEI, K., HE, S., KONG, H., ZHAO, J., ZHAO, M., & ZHENG, X. (2022). Influence of regular addition of ore on treatment efficiency and aquatic organisms in living machine system for black water treatment. *Journal of Cleaner Production*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130928>
- FLORES, A., ROSEMARIN, A., & FENNER, R. (2012). Evaluating the Sustainability of an Innovative Dry Sanitation (Ecosan) System in China as Compared to a Conventional Waterborne Sanitation System. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2009(8). <https://doi.org/10.2175/193864709793957760>
- HAQ, G., & CAMBRIDGE, H. (2012). Exploiting the co-benefits of ecological sanitation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(4), 431-435. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.002>
- HU, M., FAN, B., WANG, H., QU, B., & ZHU, S. (2016). Constructing the ecological sanitation: A review on technology and methods. *Journal of Cleaner Production*, (125), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.012>
- HUBE, S., & WU, B. (2021). Mitigation of emerging pollutants and pathogens in decentralized wastewater treatment processes: A review. *Science of the Total Environment*, (779). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146545>
- HUNG, Y. T., HAWUMBA, J. F., & WANG, L. K. (2014). Living machines for bioremediation, wastewater treatment, and water conservation. In: *Modern Water Resources Engineering* (pp. 681-713). [https://doi.org/10.1007/978-1-62703-595-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-62703-595-8_14)
- IGNATOWICZ, K., FILIPCZAK, G., DYBEK, B., & WAŁOWSKI, G. (2023). Biogas Production Depending on the Substrate Used: A Review and Evaluation Study—European Examples. *Energies*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/en16020798>
- IMWENE, K. O., NGUMBA, E., & KAIRIGO, P. K. (2022). Emerging technologies for enhanced removal of residual antibiotics from source-separated urine and wastewaters: A review. In *Journal of Environmental Management*, (322). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116065>
- JIANG, T., SCHUCHARDT, F., LI, G., GUO, R., & ZHAO, Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1754-1760. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60591-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60591-8)
- KOBAYASHI, Y., ASHBOLT, N. J., DAVIES, E. G. R., & LIU, Y. (2020). Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions. *Environment International*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105215>
- KUTOS, S., STRICKER, E., COOPER, A., RYALS, R., CREQUE, J., MACHMULLER, M., KROEGAR, M., & SILVER, W. L. (2023). Compost amendment to enhance carbon sequestration in rangelands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 78(2), 163-177. <https://doi.org/10.2489/jswc.2023.00072>
- LARSEN, T. A., ALDER, A. C., EGGEN, R. I. L., MAURER, M., & LIENERT, J. (2009). Source separation: Will we see a paradigm shift in wastewater handling? In *Environmental Science and Technology*, 16(43). <https://doi.org/10.1021/es803001r>
- LARSEN, T. A., HOFFMANN, S., LÜTHI, C., TRUFFER, B., & MAURER, M. (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 352(6288), 928-933. <https://doi.org/10.1126/science.aad8641>
- LEDEZMA, P., KUNTKE, P., BUISMAN, C. J. N., KELLER, J., & FREGUIA, S. (2015). Source-separated urine opens golden opportunities for microbial electrochemical technologies. In *Trends in Biotechnology*, 33(4), 214-220. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.01.007>
- MAIGA, Y., COMPAORÉ, C. O. T., DIALLO/KONÉ, M., SOSSOU, S. K., YEMPALASOMÉ, H., SAWADOGO, M., NAGALO, I., MIHELICIC, J. R., & OUATTARA, A. S. (2024). Development of a Constructed Wetland for Greywater Treatment for Reuse in Arid Regions: Case Study in Rural Burkina Faso. *Water*, 16(13), 1927. <https://doi.org/10.3390/w16131927>
- MASI, F., BRESCIANI, R., RIZZO, A., EDATHOOT, A., PATWARDHAN, N., PANSE, D., & LANGERGRABER, G. (2016). Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: A case-study in Pune. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 6(2), 342-347. <https://doi.org/10.2166/washdev.2016.019>
- MAURER, M., SCHWEGLER, P., & LARSEN, T. A. (2003). Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology*, 48(1), 37-46. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0011>
- MITSCH, W. J., & MANDER, Ü. (2018). Wetlands and carbon revisited. *Ecological Engineering*, 114, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.027>
- MKHIZE, N., MJOLI, N. S., KHUMALO, S. M., TETTEH, E. K., MAHLANGU, T. P., & RATHILAL, S. (2023). Enhanced Biogas Production through Anaerobic Co-Digestion of Agricultural Wastes and Wastewater: A Case Study in South Africa. *International Journal of Energy Production and Management*, 8(2), 123-131. <https://doi.org/10.18280/ijepm.080209>
- NAGY, J., MIKOLA, A., PRADHAN, S. K., & ZSENI, A. (2019). The utilization of struvite produced from human urine in agriculture as a natural fertilizer: A review. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 63(3), 478-484. <https://doi.org/10.3311/PPch.12689>
- Nazari, S., Zinatizadeh, A. A., Mirghorayshi, M., & van Loosdrecht, M. C. M. (2020). Waste or Gold? Bioelectrochemical Resource Recovery in Source-Separated Urine. *Trends in Biotechnology*, 38(9), 990-1006. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.03.007>
- NIWAGABA, C., NALUBEGA, M., VINNERÅS, B., SUNDBERG, C., & JÖNSSON, H. (2009). Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. *Waste Management*, 29(2), 585-589. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.022>
- ÖZEL DUYGAN, B. D., UDERT, K. M., REMMELE, A., & MCARDELL, C. S. (2021). Removal of pharmaceuticals from human urine during storage, aerobic biological treatment, and activated carbon adsorption to produce a safe fertilizer. *Resources, Conservation and Recycling*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105341>
- PETOUSI, I., THOMAIDI, V., KALOGERAKIS, N., & FOUNTOLAKIS, M. S. (2023). Removal of pathogens from greywater using green roofs combined with chlorination. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9) 22560-22569. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23755-6>
- PRADHAN, S., AL-GHAMDI, S. G., & MACKEY, H. R. (2019). Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. In *Science of the Total Environment*, 652, 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.226>
- RICHERT, A., GENSCHE, R., JÖNSSON, H., STENSTRÖM, T.-A., & DAGERSKOG, L. (2010). Practical Guidance on the Use of Urine in Crop Production. In *Stockholm Environment Institute (SEI)*.
- SHAW, K., KENNEDY, C., & DOREA, C. C. (2021). Non-sewered sanitation systems' global greenhouse gas emissions: Balancing sustainable development goal tradeoffs to end open defecation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111884>
- SHERPA, A. M., KOOTTATEP, T., ZURBRÜGG, C., & CISSÉ, G. (2014). Vulnerability and adaptability of sanitation systems to climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 5(4), 487-495. <https://doi.org/10.2166/wcc.2014.003>
- TODD, J., & JOSEPHSON, B. (1996). The design of living technologies for waste treatment. *Ecological Engineering*, 6, (1-3). [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00054-2](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00054-2)

- TODD, N. J., & TODD, J. (1994). Eco-cities to living machines. *Principles of Ecological Design*. North Atlantic Books.
- UDDIN, S. M. N., MUHANDIKI, V. S., SAKAI, A., AL MAMUN, A., & HRIDI, S. M. (2014). Socio-cultural acceptance of appropriate technology: Identifying and prioritizing barriers for widespread use of the urine diversion toilets in rural Muslim communities of Bangladesh. *Technology in Society*, 38, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2014.02.002>
- UDERT, K. M., ETTER, B., & GOUNDEN, T. (2016). Promoting sanitation in South Africa through nutrient recovery from urine. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 25(3), 194-196. <https://doi.org/10.14512/gaia.25.3.12>
- UDERT, K. M., & WÄCHTER, M. (2012). Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research*, 46(2), 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.020>
- UN-WATER. (2021). The United Nations World Water Development Report 2023 Partnerships and cooperation for water. *Handbook of Water Purity and Quality*.
- VAN DE WALLE, A., KIM, M., ALAM, M. K., WANG, X., WU, D., DASH, S. R., RABAIEY, K., & KIM, J. (2023). Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. In *Environmental Science and Ecotechnology*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100277>
- WASAJJA, H., AL-MURAISSY, S. A. A., PIAGGIO, A. L., CERON-CHAFLA, P., ARAVIND, P. V., SPANJERS, H., VAN LIER, J. B., & LINDEBOOM, R. E. F. (2021). Improvement of biogas quality and quantity for small-scale biogas-electricity generation application in off-grid settings: A field-based study. *Energies*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/en14113088>
- WELL, F., & LUDWIG, F. (2022). Integrated Planning and Implementation of a Blue-Green Architecture Project by Applying a Design-Build Teaching Approach. *Land*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/land11050762>
- YADAV, K. D., TARE, V., & AHAMMED, M. M. (2011). Vermicomposting of source-separated human faeces by *Eisenia fetida*: Effect of stocking density on feed consumption rate, growth characteristics and vermicompost production. *Waste Management*, 31(6), 1162-1168. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.02.008>
- ZAREI, M. (2020). Wastewater resources management for energy recovery from circular economy perspective. *Water-Energy Nexus*, 3, 170-185. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.11.001>
- ZHANG, W., CHU, H., YANG, L., YOU, X., YU, Z., ZHANG, Y., & ZHOU, X. (2023). Technologies for pollutant removal and resource recovery from blackwater: a review. In *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 17(7). <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1683-3>
- ZHU, P., SHEN, Y., PAN, X., DONG, B., ZHOU, J., ZHANG, W., & LI, X. (2021). Reducing odor emissions from feces aerobic composting: Additives. In *RSC Advances*, 11, (26). <https://doi.org/10.1039/d1ra00355k>
- ZVIMBA, J. N., MUSVOTO, E. V., NHAMO, L., MABHAUDHI, T., NYAMBIYA, I., CHAPUNGU, L., & SAWUNYAMA, L. (2021). Energy pathway for transitioning to a circular economy within wastewater services. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100144>