

Management of Wastewater Reuse for Sustainable Building in Rural Areas

Jennyffer Baque Pozo¹ ; Lucrecia Moreno Alcívar² 

^{1,2} Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Avda. Principal La Libertad 240204, Santa Elena, Ecuador; jennyffer.baquepozo0034@upse.edu.ec; lmoreno@upse.edu.ec; Correspondence: jennyffer.baquepozo0034@upse.edu.ec; Tel.: +593 961919517

Abstract– This paper analyzes a proposed solution to the sanitation problem in rural areas through the design of a low-cost Wastewater Treatment System (WTS), adapted to the socio-environmental conditions of the Manglaralto parish, province of Santa Elena, Ecuador. The need for sustainable alternatives is justified by the lack of sanitation infrastructure, the semi-arid climate, and the limited availability of water resources in the area. The main objective was to design a functional, replicable, and economically viable system that allows for the treatment and reuse of domestic wastewater for irrigation activities. The methodology included a diagnosis of the area through surveys, the technical design of the system composed of a tubular biodigester, grease trap, infiltration trench, and a phytoremediation area with vetiver grass, as well as a SWOT analysis and a financial evaluation. The system was designed for a rural household of four inhabitants, with an estimated generation of 80 L/day of wastewater, intended for an irrigation area of approximately 20 m². The results show an annual saving of USD 195, with a positive Net Present Value (NPV), an Internal Rate of Return (IRR) of 13.8%, and a Return on Investment (ROI) of 60.27%, confirming its economic viability. It is concluded that the WTS system constitutes a viable, accessible, and replicable alternative for rural sanitation, contributing to the efficient use of water resources and sustainable development in communities with limited sanitation infrastructure.

Keywords– Blackwater, water quality, anaerobic digester, rural sanitation.

Gestión del aprovechamiento del agua residual para edificación sostenible en área rural

Jennyffer Baque Pozo¹; Lucrecia Moreno Alcívar²

^{1,2} Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Avda. Principal La Libertad 240204, Santa Elena, Ecuador; jennyffer.baquepozo0034@upse.edu.ec; lmoreno@upse.edu.ec; Correspondence: jennyffer.baquepozo0034@upse.edu.ec; Tel.: +593 961919517

Resumen— El presente trabajo analiza una propuesta de solución al problema del saneamiento en zonas rurales mediante el diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) de bajo costo, adaptado a las condiciones socioambientales de la parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena, Ecuador. La necesidad de alternativas sostenibles se justifica por el déficit de infraestructura sanitaria, el clima semiárido y la limitada disponibilidad de recursos hídricos en la zona. El objetivo principal fue diseñar un sistema funcional, replicable y económicamente viable que permita el tratamiento y reúso de aguas residuales domésticas en actividades de riego. La metodología incluyó el diagnóstico de la zona mediante encuestas, el diseño técnico del sistema compuesto por un biodigestor tubular, trampa de grasas, zanja de infiltración y área de fitorremediación con pasto vetiver, así como un análisis FODA y una evaluación financiera. El sistema fue dimensionado para una vivienda rural de cuatro habitantes, con una generación estimada de 80 L/día de aguas residuales, destinados a un área de riego de aproximadamente 20 m². Los resultados evidencian un ahorro anual de 195 USD, con un Valor Actual Neto (VAN) positivo, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 13,8% y un Retorno sobre la Inversión (ROI) de 60,27%, lo que confirma su viabilidad económica. Se concluye que el sistema STAR constituye una alternativa viable, accesible y replicable para el saneamiento rural, contribuyendo al uso eficiente del recurso hídrico y al desarrollo sostenible en comunidades con limitaciones de infraestructura sanitaria.

Palabras clave— Aguas Negras, calidad de agua, digestor anaeróbico, saneamiento rural.

I. INTRODUCCIÓN

El agua residual está conformada por un efluente líquido (99.9%) y sólido (lodo) [1], compuestos por desechos cotidianos y materia orgánica como proteínas, grasas y compuestos carbonáceos [2]. Para el tratamiento existen dos maneras: a) dejar reposar y asentar sólidos en el fondo y el líquido restante es tratado con productos químicos; b) utilizando bacterias que descomponen la materia orgánica con la ayuda de oxígeno [3].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), estima que al menos el 10 % de la población mundial consume alimentos que han sido irrigados con aguas residuales y solo el 57% tiene saneamiento seguro [4]. El Banco Mundial indica que 2.000 millones de personas carecen de agua potable segura y 3.600 millones no cuenta con servicios de saneamiento afectando el desarrollo económico [5]. Los biodigestores surgen como una solución sostenible, ya que depuran aguas residuales, generan biogás aprovechable para el beneficio

comunitario y permiten la reutilización del agua tratada en actividades agrícolas, como el riego de cultivos. [6].

América Latina enfrenta múltiples desafíos en la gestión de sus recursos y servicios hídricos [7], ya que, aunque el 93% de la población cuenta con acceso a agua potable, más del 70% de las aguas residuales se descargan sin tratamiento previo en cuerpos de agua o en el suelo [3], [8], [9].

En países como Chile, Colombia, Costa Rica, Bolivia y en el Caribe, se ha abordado la gestión del agua desde una perspectiva de economía circular [10], resaltando las particularidades socioambientales de la región en temas de saneamiento y uso eficiente del recurso hídrico [11], [12].

En países como Kenia, Uganda, Colombia y Cuba, los biodigestores rurales han demostrado ser una alternativa viable tanto para el tratamiento de residuos orgánicos como para la generación de energía [13]. En particular, el biodigestor tubular ha ganado relevancia en Colombia y Cuba debido a su bajo costo y alta adaptabilidad en contextos rurales [14]. Sin embargo, su adopción a gran escala aún enfrenta importantes barreras sociotécnicas, las cuales requieren ser abordadas mediante políticas públicas efectivas, financiamiento accesible y un acompañamiento técnico adecuado [15], [16].

La norma ISO 30500 [17], establece requisitos técnicos, de seguridad, eficiencia y sostenibilidad para garantizar el tratamiento seguro de excretas y aguas residuales in situ. Su uso en biodigestores garantiza eficiencia, seguridad sanitaria y aprovechamiento sostenible, siendo clave para su aplicación en zonas rurales o periurbanas. [18]. Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son infraestructuras convencionales de gran escala para el tratamiento urbano de aguas residuales, los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) comprenden soluciones más simples, descentralizadas y adaptables a contextos rurales. En Bolivia, un análisis de seis PTAR municipales evidenció altos costos operativos [19], fallas en el mantenimiento preventivo y correctivo [20], y limitaciones en la gestión técnica, lo que compromete su sostenibilidad a largo plazo [21]. Como alternativas en zonas rurales, se han evaluado tecnologías sostenibles como humedales artificiales y biodigestores, que permiten reutilizar el agua tratada para riego agrícola y reducen la carga contaminante, promoviendo modelos de gestión más resilientes [22], [23].

La sostenibilidad hídrica y agrícola en zonas rurales no solo depende de la implementación de tecnologías de

tratamiento, sino también de procesos de educación comunitaria que fortalezcan su uso y mantenimiento adecuado [24], [25]. Esta problemática puede abordarse mediante enfoques tradicionales basados en STAR y PTAR, como las lagunas de estabilización, que combinan bacterias y algas en simbiosis, o los sistemas de lodos activados, que utilizan bacterias para degradar materia orgánica en ambientes aeróbicos o anaeróbicos [20]. Sin embargo, muchas PTAR municipales presentan deficiencias en su planificación y gestión operativa, lo que compromete su sostenibilidad a largo plazo [26], [27].

Conforme el INEC 2024, el consumo mensual de agua potable por conexión en la provincia de Santa Elena es de 15,5 m³/mes; estando por debajo del promedio nacional (18.28 m³/mes). Este bajo consumo podría estar relacionado con un acceso limitado al recurso hídrico y deficiencias en la gestión del sistema, lo que también repercute en el funcionamiento de las lagunas de oxidación y el tratamiento adecuado de las aguas residuales [28]. Esta situación exige soluciones urgentes alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente aquellos relacionados con el agua (ODS 6), la sostenibilidad (ODS 11) y el cambio climático (ODS 13) [29], [30]. Se necesita una gestión holística e integral que incluya capacitación e innovación tecnológica en comunidades rurales, considerando que para el año 2050 se prevé que la crisis mundial del agua alcance otro nivel debido a los cambios acelerados en todo el mundo [31].

El tratamiento de aguas negras se presenta como una alternativa clave para la sostenibilidad ambiental y agrícola, pues convertir aguas residuales en recursos útiles optimiza su uso y respalda la agricultura sostenible [32]. Según la OMS, el riego con aguas tratadas no solo ahorra agua, sino que también aporta nutrientes esenciales a los cultivos, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos [33]. Los microorganismos juegan un rol importante en este proceso, ya que facilitan la depuración del agua y su reutilización segura [34], [35].

Este enfoque es especialmente beneficioso en la provincia de Santa Elena, una región semiárida con déficit hídrico anual de hasta 850 mm [36]. La reutilización del agua podría mejorar la productividad agrícola, especialmente en cultivos como la caña guadua (*Guadua angustifolia*), utilizada en construcción. Sin embargo, el tratamiento debe cumplir con estándares ambientales como los establecidos en el Acuerdo Ministerial 97-A del Ministerio del Ambiente de Ecuador [37].

La parroquia Manglaralto (Fig. 1), es un destino turístico clave en Ecuador [38], con una población de 37.167 habitantes según el Censo de Población y Vivienda 2022 del INEC [39], presentando además una dinámica estacional de población asociada a la actividad turística que asciende hasta 20.000 habitantes [40].

El consumo básico del agua según la Organización Mundial de la Salud fluctúa entre 50 y 100 (L/Hab-día) [41]. En Manglaralto la demanda de agua aumenta considerablemente durante feriados debido al turismo [42], por lo tanto, en este análisis se considera el consumo estipulado en la norma ABNT

NBR 7229 la cual sugiere implícitamente para viviendas rurales o de residencia de bajo estándar una dotación de 100 L/Hab-día. La parroquia cuenta con 16 pozos y una red de captación que bombea 139,5 l/s de agua a reservorios con capacidad de 1.440 m³, este suministro o caudal será insuficiente a partir de 2026 si no se amplía la fuente de agua o mejora la infraestructura [43]. En este contexto, el estudio se aplica en un sitio rural representativo de zonas semiáridas con limitaciones en saneamiento.

Dada esta situación, se propone el diseño de un prototipo de tratamiento de aguas en viviendas para comunidades aisladas, optimizando el riego agrícola y contribuyendo a la seguridad hídrica local.

A. Área de estudio

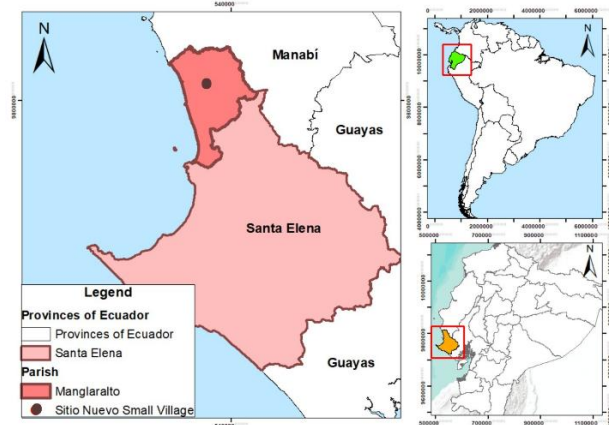


Fig 1. Área de estudio: Parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena (Ecuador).

La parroquia Manglaralto cuenta con una densidad de 88 hab/km², reflejando una población que combina residentes locales con comunidades orientadas al turismo y residentes en zonas agrícolas [44]. En las zonas rurales dispersas de Manglaralto, como la comuna Sitio Nuevo, la cual según su representante legal cuenta con una población estimada de 165 habitantes, distribuida en una superficie aproximada 8 km², con una densidad poblacional de 21 hab/km², lo que evidencia un patrón de asentamiento de bajo característico en comunidades rurales dispersas.

Estas comunidades carecen de sistemas de alcantarillado sanitario públicos y utilizan letrinas o pozos sépticos sin tratamiento adecuado, generando impactos ambientales y de salud, siendo esta la problemática de la investigación.

Con estos antecedentes, se destaca la importancia de realizar un uso sostenible del agua en el área, donde este constituye un bien escaso. Con tal objeto, se plantea la siguiente interrogante: ¿Es viable que un sistema STAR basado en digestión anaeróbica satisfaga de forma simultánea las necesidades agrícolas en comunidades rurales dispersas? La presente investigación tiene como objetivo de diseñar un prototipo de biodigestor de bajo costo y construcción cuasi artesanal, complementado con un área de infiltración, destinado a aprovechar aguas residuales domésticas para el uso en riego

agrícola en zonas rurales sin acceso a sistemas de alcantarillado sanitario.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se planteó desde un enfoque de investigación aplicada a un sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR), con el fin de trasladar a la comunidad un diseño de bajo costo, para el tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales, orientado al riego de cultivos no comestibles. Para ello, estructuró el estudio por fases, conforme se presenta en la Fig. 2.

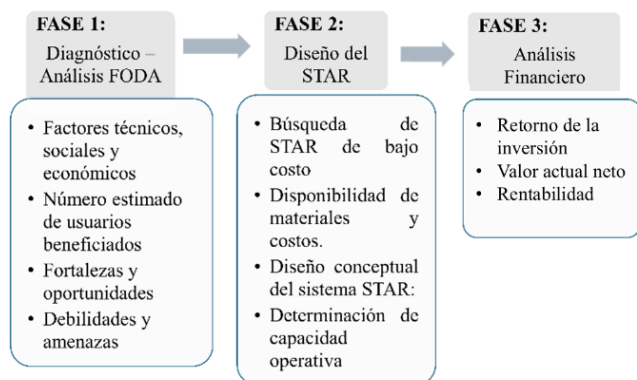


Fig 2. Fases metodológicas para el diseño y evaluación del STAR.

A. Fase I.- Diagnóstico - Análisis FODA.

La fase de diagnóstico tuvo como objetivo caracterizar las condiciones sanitarias, ambientales y sociales de la comuna Sitio Nuevo, ubicada en la parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena, con el fin de evaluar la viabilidad de implementación de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) de bajo costo. El área de estudio cuenta con una población aproximada de 165 habitantes, organizados en 41 familias, con un promedio de 4 personas por vivienda, lo que define la unidad de análisis para el levantamiento de información.

Para la recolección de datos se empleó un instrumento tipo encuesta estructurada, dirigido a los jefes de hogar de la comuna Sitio Nuevo. El cuestionario estuvo conformado por preguntas cerradas y semiabiertas, diseñadas para identificar: (i) acceso a servicios sanitarios y condiciones de saneamiento, (ii) problemas asociados al manejo de aguas negras, (iii) fuentes de abastecimiento hídrico, (iv) actividades económicas predominantes y (v) nivel de conocimiento y aceptación de tecnologías sostenibles, como los biodigestores para el tratamiento y reúso del agua.

Para la determinación del tamaño de muestra se utilizó la fórmula de población finita (1):

$$n = \frac{Nz^2pq}{e^2(N-1)Z^2pq} \quad (1)$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

N = tamaño de la población

Z = nivel de confianza

pq = probabilidad de ocurrencia

e = error máximo permitido.

Para el presente estudio se consideró una población de N= 41 familias, un nivel de confianza del 90% (Z=1.645), probabilidad de ocurrencia (pq = 0.5) y un error permitido de 13% (e = 0.13).

El muestreo aplicado fue de tipo no probabilístico por conveniencia, considerando como criterios de inclusión a familias residentes permanentes en la comuna y con disposición voluntaria de participación. Como criterios de exclusión se consideraron viviendas desocupadas, habitantes temporales y personas que no aceptaron participar en el levantamiento de información.

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) se realizó en orden de maximizar las fortalezas y oportunidades y planificar estrategias para mitigar las debilidades y amenazas del proyecto [45]. Se analizaron factores internos y externos que influyen en el proyecto. El análisis ayudó a tomar decisiones más efectivas, optimizar los recursos disponibles y minimizar los posibles riesgos.

B. Fase II.- Diseño y capacidad del STAR

Se planteó la estructuración, de un sistema que replique los pasos básicos de un sistema convencional, en una escala menor, con capacidad de digerir la materia orgánica del agua negra. Para ello, el modelo debía contar con: a) un elemento antirretorno, para evitar malos olores; b) un componente de sedimentación y clarificación inicial, donde se retenga la mayor cantidad de sólidos; c) una fase de clarificación, que retendrá sólidos remanentes y natas; d) un reactor digestor, conteniendo un sustrato conformado por partes de plástico, que permitan la conformación de un *biofilm* (película biológica); e) una estructura de observación, con cubierta para prevenir el escape de gases y malos olores, y que sirva para la toma de muestras; f) chimenea de escape de gases; y g) un campo de infiltración, que irrigue una zona de cultivo de caña guadúa u otro cultivo no comestible y que actúe, como la parte final del proceso de tratamiento, mediante fitorremediación.

Para el diseño del sistema de tratamiento se adoptó la norma ABNT NBR 7229 [46], correspondiente a la regulación brasileña para la construcción y operación de tanques sépticos, debido a la ausencia de normativa ecuatoriana que establezca criterios técnicos específicos para el diseño de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales. Si bien existen regulaciones generales relacionados con calidad de agua y reúso, estos no desarrollan las metodologías adecuadas de dimensionamiento hidráulico que sean aplicables a sistemas individuales.

En este sentido, investigaciones indican que, el diseño de sistemas de aguas residuales debe adaptarse a las condiciones del proyecto y a las regulaciones aplicables [47], [48]. Por lo tanto, es aceptable la adopción de estándares internacionales o

regionales técnicamente validados para el diseño de sistemas de tratamiento [49]. Organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud establecen la necesidad de aplicar criterios técnicos adaptables a las condiciones locales para garantizar la seguridad sanitaria y eficiencia del tratamiento en sistemas descentralizados [50]. Por estas razones, la ABNT NBR 7229 fue seleccionada por su amplio reconocimiento técnico, su enfoque en sistemas descentralizados y su aplicabilidad en condiciones climáticas y socioeconómicas similares a las del área de estudio.

Considerando las condiciones locales del área de estudio y los lineamientos de diseño establecidos, se analizaron los tipos de sistemas de tratamiento aplicables en contextos rurales. En este contexto, se consideraron criterios técnicos para el diseño del prototipo STAR de bajo costo, los cuales se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1.
CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO DEL PROTOTIPO
STAR DE BAJO COSTO

Criterio	Comentario	Referencia
STAR para aguas negras y grises	Separa las aguas grises con las residuales. Las aguas grises se las conduce a una trampa de grasa, y las residuales se las dirige al sistema de tratamiento de aguas residuales.	[51], [52]
Proceso de biodigestión bacteriana en STAR	Uso de procesos físicos y biológicos; bacterias como agente purificador, contaminantes sirven como fuente de carbono y energía. Sistema con sustrato para biofilm bacteriano.	[53]
Sistema anaeróbico	No requiere aireación eléctrica; microorganismos a 35 °C. Limpieza más rápida en aeróbicos, pero más costosa por electricidad. Anaeróbicos se adaptan bien en climas cálidos.	[54], [55]
Fitorremediación	Implementación de vegetación, específicamente Vetiver, como mecanismo de tratamiento para la remoción de contaminantes en aguas residuales mediante procesos naturales de absorción, degradación y filtración.	[56]
Emisión de gases en el sistema anaeróbico	Produce gas por descomposición anaeróbica; requiere chimenea para gases.	[57]
Porcentaje de agua usada en inodoros	En cantón Jipijapa, retorno de agua de dotación del 60%-85%, se usará 75% para diseño debido a condiciones similares con cantón Santa Elena.	[58]

Una vez establecida la estructura para implementar el STAR, se especificaron los materiales a utilizar y se realizó una estimación de costos en el mercado local. El diseño de este

sistema de tratamiento fue modelado mediante el software AutoCAD.

Adicionalmente el diseño del sistema STAR se basó en normativas de la OMS, FAO y lineamientos nacionales, que orientan el uso seguro de aguas residuales tratadas en agricultura rural, garantizando la eficiencia en la remoción de carga orgánica y la inocuidad del agua para el riego de cultivos no comestibles.

Para el dimensionamiento del sistema, se definieron las principales variables de diseño asociadas al caudal de entrada, la contribución de aguas residuales y los volúmenes requeridos para cada unidad de tratamiento.

El caudal de entrada (Q), corresponde al volumen diario de agua residual doméstica generada por la vivienda rural (2).

$$Q = N \times C \quad (2)$$

Donde:

N = número de personas equivalente

C = Contribución de aguas residuales (lts/per/día)

La contribución de aguas residuales (C) se determina en función de la dotación de agua y las relaciones entre aguas servidas, aguas negras y aguas grises, mediante la ecuación (3):

$$C = D * \left(\frac{AS}{Ap}\right) * \left(\frac{AN}{AG}\right) \quad (3)$$

Donde:

D = Dotación, cantidad total de agua en litros que consume una persona por día.

AS/AP= relación aguas servidas y agua potable, indica qué porcentaje del agua potable consumida se transforma en aguas residuales.

AN/AG= relación aguas negras y aguas grises, representa la fracción de las aguas servidas que son realmente aguas negras.

El volumen requerido del tanque (Vu), se calcula considerando el tiempo de retención hidráulica y la producción de lodos, de acuerdo con la ecuación (4):

$$V_u = 1.3 * N (C * T + K * L_f) \quad (4)$$

Donde:

N = número de personas equivalente

C = Contribución de aguas residuales (lts/per/día)

T = tiempo de retención hidráulica (días), tiempo que el agua permanece dentro del biodigestor

K = coeficiente de producción de lodos

L_f = periodo de limpieza del sistema (días o años)

El Volumen requerido del filtro (V_f), el cual es necesario para retener sólidos remanentes, mejorar la calidad del efluente, proteger el sistema de disposición final, se lo obtiene mediante

la ecuación (5), considerando un coeficiente de sobredimensionamiento de 1.60, para garantizar una mayor eficiencia de filtración y menor riesgo de colmatación.

$$V_f = 1.60 + N * C * T \quad (5)$$

C. Fase III.-Análisis Financiero.

En esta fase se realizó una evaluación financiera del sistema propuesto, con el propósito de estimar su viabilidad económica y nivel de rentabilidad. Para ello, se calcularon indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y rentabilidad, considerando los costos de instalación, operación y mantenimiento, así como los procesos de capacitación en las comunidades rurales aisladas de Manglaralto.

III. RESULTADOS

El presente apartado expone los hallazgos obtenidos a partir de la encuesta realizada en la comuna Sitio Nuevo, ubicada en la parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena, como base para el diseño de un sistema de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales y su aprovechamiento en riego agrícola.

A. Resultado de Diagnostico - análisis FODA

La población objetivo del estudio estuvo conformada por 41 familias, mientras que el levantamiento de información se realizó sobre una muestra de 20 jefes de hogar, seleccionados conforme a lo descrito en la metodología. Los resultados evidencian que la mayoría de las familias encuestadas (90 %) presenta limitaciones en el acceso a servicios sanitarios formales. De este grupo, aproximadamente el 75 % utiliza pozos sépticos y el 20 % letrinas, mientras que el 5 % restante carece de un sistema adecuado. Asimismo, cerca del 72 % de los hogares reporta problemas frecuentes relacionados con aguas negras, lo que refleja deficiencias en el manejo de aguas residuales.

En relación con las fuentes de abastecimiento hídrico, el 58 % de los hogares utiliza pozos, el 27 % combina el uso de pozos y captación de agua de lluvia, y el 15 % depende principalmente de la captación pluvial. Desde el punto de vista socioeconómico, la población presenta una vinculación significativa con actividades productivas locales, donde el 85 % se dedica a la agricultura, el 5 % al turismo y el 10 % a la ganadería.

En cuanto al nivel de conocimiento de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas, el 68 % de los encuestados manifestó no conocer sistemas de biodigestión. No obstante, se evidenció una alta disposición social (85 %) para reutilizar el agua tratada en actividades de riego y participar en la implementación de tecnologías sostenibles, lo que indica un contexto favorable para la adopción del sistema propuesto, pese a la presencia de barreras culturales.

El análisis FODA, la encuesta confirma que los sistemas económicos para tratar aguas negras y reutilizar el agua son técnicamente viables, ambientalmente beneficiosos y socialmente aceptables, siempre que se acompañen de estrategias de capacitación y financiamiento que garanticen su funcionamiento y adopción comunitaria. Sin embargo, tienen retos técnicos, culturales y de financiamiento. Aun así, son una oportunidad para mejorar la vida en la comunidad y fomentar el desarrollo sostenible, siempre que se apliquen estrategias que aseguren su funcionamiento y aceptación como se presenta en la tabla 2.

TABLA 2.
ANÁLISIS FODA DEL PROYECTO STAR

Análisis interno		Análisis externo
Debilidades		Amenazas
Negativos	- Limitada capacidad técnica.	- Variabilidad climática (la estacionalidad afecta la eficiencia del sistema).
	- Resistencia cultural.	- Limitaciones en financiamiento.
	- Eficiencia limitada en tratamiento de contaminantes de bajo costo.	- Riesgo ambiental por falta de mantenimiento.
	- Riesgo por mala gestión.	- Problemas sanitarios asociados al mal manejo.
	- Dependencia de recursos locales.	
	- Disponibilidad de espacio y materiales variable.	
Fortalezas		Oportunidades
Positivos	- Generación de subproductos (biogás, fertilizantes).	- Reducción de riesgos sanitarios y mejora en calidad de vida.
	- Costos accesibles para comunidades rurales.	- Apoyo de ONG's y programas gubernamentales.
	- Fácil mantenimiento.	- Aceptación comunitaria por conciencia ambiental.
	- Menor infraestructura y equipamiento técnico.	- Mejora de fertilidad del suelo e incremento de productividad agrícola.
	- Adaptación a necesidades locales y condiciones geográficas.	- Optimización del uso del agua.

Del análisis FODA se puede establecer que la tecnología es asequible, de fácil mantenimiento y puede recuperar agua, y que por su interés creciente en prácticas sostenibles en las comunidades rurales, puede conseguir el respaldo de programas gubernamentales y ONGs. Sin embargo, la falta de experiencia técnica en las comunidades puede dificultar la operación del sistema, para lo cual se requiere implementar un proceso de capacitación. Asi mismo se deben considerar las condiciones

climáticas extremas como lluvias intensas las cuales pueden afectar el sistema, para lo cual el sistema se debe implementar en las condiciones orográficas apropiadas y la zanja de infiltración.

B. Diseño y capacidad del STAR
El sistema que mejor se adapta es el biodigestor tubular con campo de infiltración complementado con un sistema adicional para el manejo y tratamiento del efluente, que permita el tratamiento de aguas residuales de una vivienda para el riego de pasto vetiver y caña guadúa, como se observa en la Fig. 3.



Figura 3. Esquema de distribución del sistema de biodigestión y reutilización agrícola del efluente.

Este sistema está diseñado para el tratamiento de aguas residuales previamente separadas de las aguas grises en una vivienda rural de cuatro habitantes con el propósito de generar agua tratada para la reutilización en cultivos no alimentarios.

Se calculó la capacidad del sistema STAR considerando el consumo diario para cuatro personas con un ajuste del 80% y tiempo de retención de 1 día. La capacidad volumétrica del sistema fue ajustada a la estimación del volumen real a ser ocupado por agua negra, en consideración al espacio ocupado por el gas que se genera entre el líquido y la tapa de cada tanque, así como el declive generado al conectar las tuberías entre tanques, con el fin de garantizar la dirección del flujo; considerando también una reducción del 25 % (AN/AG), como se muestra en el esquema de la figura 4.

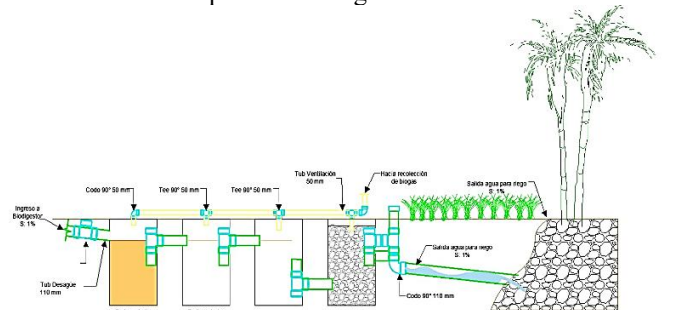


Figura 4. Prototipo de tratamiento de aguas negras mediante digestión anaeróbica en biodigestor tubular.

La Tabla 3 se presenta los parámetros de diseño y condiciones operativas del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizando un tratamiento combinado con el diseño de tratamiento biológico anaerobio (biodigestor tubular), previo a la implementación de un tratamiento físico (trampa de grasas) para las aguas grises, cuyos caudales se interceptan en una caja de registro antes de ingresar a la zanja de infiltración, área de cultivo para el pasto vetiver y caña guadua (fitorremediación).

TABLA 3.
CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS Y PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA PARA UNA VIVIENDA RURAL

Componente	Descripción
Normativa de Diseño	ABNT NBR 7229
Vivienda	1 casa
Conformación familiar	4 Habitantes
Caudal de aguas residuales	80 L /día
Dotación	100 L/día
Relación sólidos/agua (AS/AP)	80%
Relación AN/AG	25%
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	1 día
Tasa de acumulación de lodos	57 L/persona/año
Contribución de lodos frescos	1 L/persona/día
Volumen requerido del sistema	Tanque: 0,40 m³ Filtro: 0,13 m³
Configuración del sistema	3 tanques sépticos + 1 filtro anaeróbico
Volumen útil por tanque	192 L
Volumen útil del filtro	0,19 m³
Longitud total del sistema	3,14 m
Área total requerida	0,88 m²
Área de riego disponible	20,0 m²
Consumo de agua del cultivo	5 L/m²/día
Frecuencia de mantenimiento	1 año

El sistema se configura mediante unidades en serie que incluyen procesos de sedimentación, clarificación y filtración anaeróbica, permitiendo un tratamiento progresivo del efluente. La cantidad y disposición de estas unidades se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4.
CONFIGURACIÓN DE TANQUES Y FILTROS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO

Aguas	Tanque	Cantidad
Grises	Trampa de grasa	1
	Sedimentador	2
Residuales	Clarificador	1
	Filtros	1

El biodigestor rural compuesto por los cuatro tanques en serie permite mejorar los procesos de sedimentación, digestión anaerobia y retención de sólidos, mientras que el filtro final contribuye al pulimiento del efluente, incrementando su calidad antes de la descarga o reutilización. La figura 5 evidencia el funcionamiento hidráulico e indica los volúmenes de cada tanque y sus longitudes de separación.

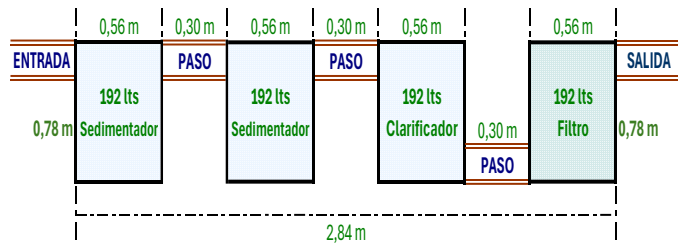


Figura 5. Configuración hidráulica del sistema anaeróbico propuesto para el tratamiento de aguas residuales domésticas

C. Análisis de Financiero

El presupuesto estimado para la implementación del sistema STAR (Saneamiento, Tratamiento y Aprovechamiento de Recursos) a nivel de vivienda rural asciende a \$851,69 USD, que corresponde al suministro e instalación del sistema biodigestor con trampa de grasas para cultivo de pasto vetiver y caña guadua (Tabla 5).

Tabla 5. RESUMEN DEL SISTEMA STAR PARA TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Resumen del STAR	Valor	Unidad
Instalación de sistema de Biodigestor	461,61	USD
Construcción de trampa de grasas	190,66	USD
Conformación del suelo de fundación del sistema de depuración	199,42	USD
Costo de Mantenimiento Anual en sistema con remoción de sólidos (hidrosuccionador)	220,00	USD/año
Costo de Mantenimiento Anual con STAR	70,00	USD/año

Para la evaluación económica, se consideró como situación base el gasto anual asociado a un servicio de mantenimiento con remoción de sólidos (hidrosuccionador) estimado en \$220 USD. Con la implementación del sistema STAR, este gasto se reemplaza por un mantenimiento anual estimado de \$70 USD.

De esta manera, se obtiene un ahorro anual de \$150 USD por reducción de costos de mantenimiento. Adicionalmente, la reutilización del agua tratada para riego representa un ahorro estimado de \$45 USD /año, alcanzando un flujo neto anual total de \$195 USD.

El análisis del flujo de caja, considerando un horizonte de evaluación de 7 años y una tasa de descuento del 10%, arroja un Valor Actual Neto (VAN) de aproximadamente \$97,65

USD, lo que evidencia la viabilidad económica del sistema en el mediano plazo.

Asimismo, el Retorno sobre la Inversión (ROI) alcanza un valor aproximado de 60,27%, indicando una adecuada recuperación del capital invertido. Por su parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) se estimó en aproximadamente 13,8%, superando la tasa de descuento considerada, lo que confirma la rentabilidad del proyecto (Tabla 6).

Tabla 6. RESUMEN DEL ANÁLISIS FINANCIERO DEL SISTEMA STAR PARA TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Resumen Análisis Financiero STAR	Valor	Unidad
Flujo Neto Anual	195,00	USD
VAN (7 años, 10 %)	Año 0: -851,69	USD
	Año 1: -674,42	
	Año 2: -513,26	
	Año 3: -366,75	
	Año 4: -233,56	
	Año 5: -112,48	
	Año 6: -2,41	
	Año 7: 97,65	
TIR (año 7)	13,8	%
ROI (año 7)	60,27	%

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la viabilidad técnica, social y económica de la implementación de un sistema STAR de bajo costo para el tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales domésticas en la comuna Sitio Nuevo, parroquia Manglaralto. A partir del diagnóstico inicial, se evidenció una limitada disponibilidad de sistemas de saneamiento adecuados, así como una alta disposición comunitaria para adoptar soluciones sostenibles orientadas al reúso del agua en actividades agrícolas.

En el componente técnico, el diseño del sistema basado en un tratamiento combinado con un biodigestor anaerobio tubular con unidades en serie, previo a la separación de las aguas grises con tratamiento físico (trampa de grasas) y un campo de infiltración complementado con fitorremediación mediante pasto vetiver.

Desde el punto de vista económico, el sistema presenta una inversión inicial accesible y un ahorro anual en mantenimiento y volumen de agua para riego. Bajo un horizonte de evaluación de 7 años y una tasa de descuento del 10%, se obtuvo un Valor Actual Neto (VAN) de \$97,65 USD, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 13,8% y un Retorno sobre la Inversión (ROI) favorable del 60,27%, lo que confirma la viabilidad financiera del sistema en el mediano plazo.

En comparación con el modelo del biodigestor propuesto por Menéndez Meza [59], cuyo diseño contempla una inversión aproximada de USD 9.000 para una población de 20 personas

(equivalente a 450 USD por habitante), el sistema STAR propuesto presenta una reducción significativa en el costo de implementación por unidad familiar de \$213 USD por habitante, al ser diseñado para una vivienda de cuatro habitantes con una inversión total de \$851,69 USD. Además, el presente estudio incorpora la integración de un sistema de fitorremediación mediante pasto vetiver para el aprovechamiento del efluente tratado en riego agrícola, lo que amplía su funcionalidad más allá del tratamiento convencional.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el sistema STAR constituye una alternativa viable y sostenible para el tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas, contribuyendo a la mejora de las condiciones sanitarias, al uso eficiente del recurso hídrico y al fortalecimiento de prácticas de desarrollo sostenible en zonas rurales.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer al Centro de Investigación CIGEO de la Universidad UPSE. También agradecemos el apoyo al proyecto académico “Prototipo de una vivienda sostenible aplicada a regiones semiáridas” con código 91870000.0000.388946 de la Universidad UPSE (Universidad Estatal Península de Santa Elena).

REFERENCES

- [1] R. Sette Ramalho, *Tratamiento de aguas residuales*. 2016.
- [2] R. Rojas, “Conferencia sistemas de tratamiento de aguas residuales.” [Online]. Available: https://www.academia.edu/20296056/Sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales
- [3] K. A. Reynolds, “Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica Identificación del Problema.” *Agua Latinoamérica*. [Online]. Available: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/10/Tratamiento-aguas-residuales-Latinoamerica.pdf>
- [4] OMS, “Saneamiento,” 2024.
- [5] Grupo Banco Mundial, “Agua: Panorama general [Text/HTML].” World Bank. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- [6] J. N. Meegoda, C. Chande, and I. Bakshi, “Biodigesters for Sustainable Food Waste Management,” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2025, Vol. 22, Page 382, vol. 22, no. 3, p. 382, Mar. 2025, doi: 10.3390/IJERPH22030382.
- [7] OECD, *La Economía Circular del Agua en América Latina*. OECD Publishing, 2026. doi: 10.1787/07d63b10-es.
- [8] DoingGlobal, “Aguas residuales en Latinoamérica. Make the world a better place.” [Online]. Available: <https://doingglobal.com/aguas-residuales-latinoamerica/>
- [9] J. José *et al.*, “Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la Provincia de Santa Elena,” *Manglar*, vol. 19, no. 2, pp. 177–187, Oct. 2022, doi: 10.17268/MANGLAR.2022.022.
- [10] V. Abello-Pasteni, E. Muñoz Alvear, S. Lira, and E. Garrido-Ramírez, “Evaluación de eco-eficiencia de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas en Chile,” vol. 11, no. 2, 2020, doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-05>.
- [11] A. K. N. Vargas, J. Calderon, D. Velasquez, M. Castro, and D. A. Núñez, “Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia.” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 28, no. 2, pp. 315–322, 2020, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>.
- [12] G. A. Cubero Madriz, “Evaluación de un sistema de digestión anaerobia para la estabilización de los lodos provenientes de las aguas residuales, Corporación PIPASA, San Rafael de Alajuela,” Instituto Tecnológico de Costa Rica. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/60989812.pdf>
- [13] J. Chaney, E. H. Owens, B. L. Robinson, and M. J. Clifford, “Digesting data: Improving the understanding of biogas use through remote sensing,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 86, p. 101668, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.ESD.2025.101668.
- [14] M. Del, P. C. Celis, A. : Liseth, M. Á. Salas, and J. S. Marin, “Biodigestores como alternativa para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en zonas rurales,” Dec. 2020.
- [15] E. L. Barrera Cardoso, L. Odales Bernal, A. Caraser Pérez, Y. Alba Reyes, and F. Hermida García, “Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural,” *Tecnología Química*. Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342735879_Recopilacion_de_aspectos_teoricos_sobre_las_tecnologias_de_produccion_de_biogas_a_escal_a_rural
- [16] E. A. Zelaya Benavidez and D. Peredo Mancilla, “Factores que influyen en la adopción de biodigestores de pequeña escala en zonas rurales: una revisión,” *RedBioLAC*, vol. 7, pp. 20–27, 2023.
- [17] ISO 30500:2018, “Non-sewered sanitation systems-Prefabricated integrated treatment units-General safety and performance requirements for design and testing. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.” Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72523/eb86ef017b94465e8754cd5e0f4b038c/ISO-30500-2018.pdf>
- [18] F. H. Gomez, N. J. Vasquez, K. C. Torres, C. M. Meza, and M. Vaccari, “Sustainability Assessment of Rural Biogas Production and Use Through a Multi-Criteria Approach: A Case Study in Colombia,” *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 6806, vol. 17, no. 15, p. 6806, Jul. 2025, doi: 10.3390/SU17156806.

- [19] A. Mercado, C. Cossio, and M. Mitma, "Eficiencia vinculada a la operación y mantenimiento de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en Cochabamba, Bolivia.," vol. 9, 2020, pp. 524–542.
- [20] J. N. Isaza Buitrago and S. I. Salgado Ortiz, "Formulación de una metodología de dimensionamiento de lagunas de estabilización para el tratamiento de agua residual doméstica en Latinoamérica," *Ingeniería Ambiental*. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/27612>
- [21] V. Escalante, I. Echeverría, G. Aliaga, G. Heredia, R. Escalera, and O. Saavedra, "Evaluación comparativa de la gestión y costos en sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas," *Revista Investigación & Desarrollo*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: <https://doi.org/10.23881/idupbo.023.1-3i>.
- [22] F. P. M. Mamani and Vargas F.T.C, "Uso de bofedales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en poblaciones del medio rural Puno—Evaluación del impacto ambiental.," *Revista Científica Investigación Andina*, vol. 22, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.35306/rev>.
- [23] M. Salgot and M. Folch, "Wastewater treatment and water reuse," *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, vol. 2, pp. 64–74, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2018.03.005>.
- [24] E. Centeno Mora and A. M. Murillo Marín, "Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en pequeñas comunidades de Costa Rica: Demanda de área, costo constructivo y costo de operación y mantenimiento.," *Ingeniería*, vol. 30, no. 1, 2020, doi: <https://doi.org/10.15517/ri.v30i1.38898>.
- [25] M. A. M. Méndez, M. P. Ricardo, J. Pérez, G. Hernández, and O. Campos, "Uso de las aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas, en la agricultura urbana.," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 15, no. 3, pp. 17–21, 2006, doi: [93215304](https://doi.org/10.15517/ri.v30i1.38898).
- [26] Metcalf and I. Eddy, "No Title Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th Edition)." [Online]. Available: <https://www.mheducation.com/highered/product/waste-water-engineering-treatment-resource-recovery-metcalf-eddy-inc-burton/M9780073401188.html>
- [27] R. Ramalho, *Tratamiento de aguas residuales*. 2021.
- [28] M. D. Mawyin Peña, "La gestión administrativa y la responsabilidad ambiental de Aguapen EP, año 2022.," 2024.
- [29] United Nations Department of Economic and Social Affairs, "Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial.," 2023, doi: <https://doi.org/10.18356/9789210024938>.
- [30] United Nations., "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development; 2015.," La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [31] Naciones Unidas, "Agua y saneamiento," Desarrollo sostenible. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [32] M. Qadir *et al.*, "The challenges of wastewater irrigation in developing countries.," *Agric. Water Manag.*, vol. 97, no. 4, pp. 561–568, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>.
- [33] Who, "Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater Volume 2 Wastewater use in agriculture," World Health Organization. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9241546832>
- [34] D. D. Mara and N. J. Horan, "Handbook of water and wastewater microbiology.," Academic Press. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124701007/handbook-of-water-and-wastewater-microbiology>
- [35] J. J. Humanante Cabrera, C. A. Deza Navarrete, L. C. Moreno Alcivar, and A. M. Grijalva Endara, "Biorrecuperación de aguas residuales con microorganismos. Manglar.," *Revista de investigación científica*, vol. 18, no. 4, pp. 345–356, 2021, doi: <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.044>.
- [36] J. X. Chavarria Viteri, "Macro y microzonificación del mar ecuatoriano para el desarrollo de la maricultura de pargo (*Lutjanus guttatus*) y huayaípe (*Seriola rivoliana*) usando criterios de sostenibilidad.," Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [37] Ministerio de energía y ambiente del Ecuador, "Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, REFORMA LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE." Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.ec/regulaciones/acuerdo-ministerial-097-anexos-normativa-reforma-libro-vi-texto-unificado-legislacion-secundaria-ministerio-ambiente>
- [38] M. Carvache Franco, L. Bagarić, O. Crvahce Franco, and W. Carvache Franco, "Tourist Motivations and Segmentation in Coastal Tourism: A Study in Montañita, Ecuador.," *Sustainability*, vol. 17, no. 11, p. 4899, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/su17114899>.
- [39] INEC, "Densidad poblacional según parroquia de residencia." Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/>
- [40] P. Carrión-Mero *et al.*, "Community-University Partnership in Water Education and Linkage Process. Study Case: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador.," *Water 2021, Vol. 13*, vol. 13, no. 15, Jul. 2021, doi: [10.3390/W13151998](https://doi.org/10.3390/W13151998).

- [41] G. Howard, J. Bartram, A. Williams, A. Overbo, D. Fuente, and J.-A. Geere, "Domestic Water Quantity, Service Level and Health, Second edition," *World Health Organization*, p. 102, 2020.
- [42] El Universo, "La euforia carnavalera de Montañita atrajo a unas 50.000 personas; autoridades revisan acciones tras excesos.," *El Universo*, 2022.
- [43] A. S. Pacheco Peñafiel, "Acciones para la optimización del sistema de agua potable en Manglaralto, Ecuador.," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382024000100045&lng=es&nrm=iso
- [44] Inec, "VIII Censo de Población y VII de Vivienda—Densidad poblacional por parroquias." [Online]. Available: https://www.censoecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2023/10/2022_CPV_NACIONAL_DENSIDAD_POBLACIONAL.xlsx
- [45] D. Sánchez Huerta, "Análisis FODA o DAFO," *Bubok*, 2020, doi: <https://doi.org/10.4324/9780203907924>.
- [46] ABNT, *NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos*. 1933, pp. 1–15.
- [47] E. Centeno Mora, A. Murillo Marín, E. Centeno Mora, and A. Murillo Marín, "Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica," *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 53, no. 2, pp. 97–110, Jul. 2019, doi: 10.15359/RCA.53-2.5.
- [48] I. Growns, "Differences in bioregional classifications among four aquatic biotic groups: Implications for conservation reserve design and monitoring programs," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 8, pp. 2652–2658, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2009.02.002.
- [49] A. Bonfante, A. Impagliazzo, N. Fiorentino, G. Langella, M. Mori, and M. Fagnano, "Supporting local farming communities and crop production resilience to climate change through giant reed (*Arundo donax* L.) cultivation: An Italian case study," *Science of The Total Environment*, vol. 601–602, pp. 603–613, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.05.214.
- [50] J. A. Peeples, "Overview of greywater management Health considerations," *Wastewater Use in Agriculture*, vol. II, pp. 119–131, 2006.
- [51] P. L. Paulo, C. Azevedo, L. Begosso, A. F. Galbiati, and M. A. Boncz, "Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping," *Ecol. Eng.*, vol. 50, pp. 95–100, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2012.03.022.
- [52] P. S. G. Subramanian *et al.*, "Decentralized treatment and recycling of greywater from a school in rural India," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, p. 101695, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101695.
- [53] T. de J. Romero López and D. Vargas Mato, "Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas contaminadas.," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXXVIII, no. 3, pp. 88–100, 2017, doi: ISBN: 1680-0338.
- [54] Permacultura Holística, *Biodigestor Casero [Video recording]*. (2021).
- [55] A. Troconis, *Tratamiento de Aguas Residuales (1.a ed.)*. 2010.
- [56] G. Tesfa and A. Terefe, "Evaluating the efficiency of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) for municipal wastewater treatment in Bahir Dar City, Ethiopia," *Scientific Reports 2025 15:1*, vol. 15, no. 1, pp. 38700–, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-22576-0.
- [57] J. C. DelaVega-Quintero, J. Nuñez-Pérez, M. Lara-Fiallos, P. Barba, J. L. Burbano-García, and R. Espín-Valladares, "Advances and Challenges in Anaerobic Digestion for Biogas Production: Policy, Technological, and Microbial Perspectives," *Processes 2025, Vol. 13*, vol. 13, no. 11, Nov. 2025, doi: 10.3390/PR13113648.
- [58] A. Menéndez Meza, "Diseño de un modelo genérico para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias a través de tanques biodigestores, sitio Chade, Cantón Jipijapa," 2020.
- [59] A. Menéndez Meza, "Diseño de un modelo genérico para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias a través de tanques biodigestores, sitio Chade, Cantón Jipijapa," 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2414>