



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

TESIS DE GRADO

Deshidratador de lodos en el tratamiento de aguas residuales industriales
utilizando el sol como fuente primaria de energía

Alemán; H, Zeledón; E, Corea; J.

Asesor/Tutor

Dr. Kenny López Benavides

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DE ESTELI

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

**Centro Universitario Regional de Estelí
CUR - ESTELI**

Recinto Universitario “Leonel Rugama Rugama”

**Deshidratador de lodos en el tratamiento de aguas residuales industriales
utilizando el sol como fuente primaria de energía**

Tesis para optar al grado de
Ingeniero Ambiental

Autor/es

Heydi José Alemán

Euclides Zeledón Blandón

Joseling Mariana Corea Gutiérrez

Asesor/es

Dr. Kenny López Benavides

Diciembre, 2024





UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DE ESTELÍ
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS TECNOLOGICAS Y SALUD

"2024: Universidad Gratuita y de Calidad para seguir en Victorias"

Estelí, 05/12/2024

CONSTANCIA

Por este medio estoy manifestando que la investigación: Deshidratador de lodos en el tratamiento de aguas residuales industriales utilizando el sol como fuente primaria de energía, cumple con los requisitos académicos de la clase de Seminario de Graduación, para optar al título de Ingeniero Ambiental.

Los autores de este trabajo son las/os estudiantes: Heydi José Alemán (20510697), Euclides Zeledón Blandón (20510708) y Joseling Mariana Corea Gutiérrez (20510719); y fue realizado en el II semestre de 2024, en el marco de la asignatura de Seminario de Graduación, cumpliendo con los objetivos generales y específicos establecidos, que consta en el artículo 9 de la normativa, y que contempla un total de 60 horas permanentes y 240 horas de trabajo independiente.

Considero que este estudio será de mucha utilidad para la gestión de aguas residuales, la comunidad estudiantil y las personas interesadas en esta temática.

Atentamente,

Dr. Kenny López Benavides

<https://orcid.org/0009-0003-6736-3244>

CUR-Estelí, UNAN-Managua

Cc/Archivo

Universidad del Pueblo y para el Pueblo!

Barrio 14 de abril, contiguo a la subestación de ENEL, Tel 27137734, Ext 7430

Cod. Postal 49 – Estelí, Nicaragua

dcts.curcestelo@unan.edu.ni

Resumen

La implementación de un deshidratador de lodos por convección rotatoria que utiliza energía solar en una planta de tratamiento de aguas residuales nicaragüense representa un avance crucial para la gestión sostenible de recursos hídricos. Este proyecto no solo aborda la problemática de la disposición de lodos, sino que también capitaliza el vasto potencial solar del país, fomentando una transición hacia una economía circular y baja en carbono. Mediante la energía solar y un diseño de tambor rotatorio, se logra una reducción sustancial de la humedad en los lodos, optimizando su manejo y disposición final. Esta tecnología se alinea con las mejores prácticas, minimizando la contaminación del suelo y del agua al disminuir el volumen de lodos y evitar su vertido, protegiendo así los ecosistemas acuáticos. Además, el uso de energía solar reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. La inversión inicial se recupera rápidamente gracias a los ahorros operativos, haciendo de esta tecnología una inversión rentable y sostenible a largo plazo. Este proyecto también genera oportunidades de empleo y transferencia de tecnología, fortaleciendo las capacidades locales y contribuyendo al desarrollo socioeconómico. Esta iniciativa se alinea con las políticas nacionales de energía renovable, gestión de residuos y protección ambiental, posicionándose como una solución innovadora y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en el país, con múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales.

Palabras clave: Aguas residuales, Deshidratador, Convección rotatoria, Energía solar.

Abstract

The implementation of a rotary convection sludge dehydrator utilizing solar energy in a Nicaraguan wastewater treatment plant represents a crucial advancement for sustainable water resource management. This project not only addresses the challenge of sludge disposal but also leverages the country's vast solar potential, fostering a transition towards a circular, low-carbon economy. Through solar energy and a rotary drum design, a substantial reduction in sludge moisture content is achieved, optimizing its handling and final disposal. This technology aligns with international best practices, minimizing soil and water pollution by decreasing sludge volume and preventing landfill disposal, thereby protecting aquatic ecosystems. Furthermore, the use of solar energy significantly reduces greenhouse gas emissions, contributing to climate change mitigation and the fulfillment of UN Sustainable Development Goals. The initial investment is quickly recouped through operational savings, making this technology a profitable and sustainable long-term investment. This project also generates employment opportunities and technology transfer, strengthening local capacities and contributing to socioeconomic development. It is essential to adapt the design to Nicaragua's climatic conditions and utilize local materials and labor. This initiative aligns with national policies on renewable energy, waste management, and environmental protection, positioning itself as an innovative and sustainable solution for wastewater treatment in the country, offering multiple environmental, economic, and social benefits.

Key words: Wastewater, Dehydrator, Rotary convection, Solar energy.

Índice

1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Planteamiento del problema.....	5
4. Justificación	6
5. Objetivos.....	7
5.1. Objetivo General	7
5.2. Objetivos Específicos.....	7
6. Fundamentación Teórica.....	8
Generalidades.....	8
7. Supuesto de la investigación.....	17
8. Operacionalización de variables	18
9. Diseño metodológico.....	22
9.1. Tipo de investigación.....	22
9.3. Población y muestra	23
9.4. Métodos, técnicas e instrumentos de recopilación de datos.....	23
9.5. Etapas de la investigación	24
10. Análisis y discusión de resultados	26
10.1 Propuesta de deshidratador de lodos a base de energía solar	26
Breve descripción de los deshidratadores y su clasificación.....	27

Figura 1. Diagrama de bloque general del procesamiento de lodos.	30
11. Conclusiones	34
12. Recomendaciones	36
13. Referencias y bibliografía	37
14. Anexos	41
14.1 Diagrama de tratamiento de agua y lodos industriales	41

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.	18
---	----

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de bloque general del procesamiento de lodos.	30
---	----

1. Introducción

En la actualidad, la gestión adecuada de los residuos industriales, especialmente aquellos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales, se ha convertido en un reto crítico a nivel mundial. Según Rodríguez et al. (2017), los lodos industriales presentan riesgos significativos para el medio ambiente y la salud pública debido a la presencia de contaminantes químicos, físicos y bacteriológicos. Este problema adquiere mayor relevancia en países en vías de desarrollo como Nicaragua, donde las industrias avícolas y de procesamiento de carne bovina generan grandes volúmenes de lodos industriales que deben ser tratados de manera sostenible.

Este desafío se agrava en Nicaragua debido a la limitada infraestructura para el manejo de lodos. Aunque se han realizado esfuerzos para implementar sistemas de tratamiento, muchos procesos no están optimizados, lo que incrementa los costos operativos y el impacto ambiental (Ministerio de Medio Ambiente, 2021). Por ejemplo, el secado mecánico y el pre-secado natural, aunque utilizados, no siempre garantizan una reducción significativa en el contenido de agua ni minimizan adecuadamente los efectos ambientales.

En este contexto, el uso de la energía solar como fuente primaria para el secado de lodos se presenta como una solución innovadora y sostenible. Esta alternativa permite reducir el consumo energético, minimizar la huella de carbono y disminuir los costos asociados con el transporte y disposición final de los residuos. Como indica Gómez et al. (2020), los sistemas de secado solar pueden ser especialmente efectivos en regiones con alta radiación solar, como Nicaragua, donde este recurso es abundante durante gran parte del año.

2. Antecedentes

La acumulación de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales industriales representa un desafío significativo debido a su alto contenido de agua, volumen y los costos asociados a su gestión. En muchas regiones, el transporte y la disposición de estos materiales implican una elevada huella de carbono y problemas ambientales relacionados con la contaminación del suelo y el agua (Rodríguez et al., 2017).

En Nicaragua, sectores como la agroindustria generan grandes cantidades de lodos que requieren soluciones efectivas para su manejo. Actualmente, las prácticas predominantes incluyen la disposición en rellenos sanitarios o su uso como fertilizante, lo que puede causar impactos negativos si no se realiza de manera adecuada.

El manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) industriales es un componente crítico y a menudo costoso de la gestión ambiental. La deshidratación de estos lodos es esencial para reducir su volumen, facilitar su transporte y disposición final, y, en muchos casos, permitir su valorización. En las últimas décadas, la búsqueda de soluciones más sostenibles y energéticamente eficientes ha impulsado la investigación y el desarrollo de tecnologías de deshidratación solar.

Si bien la aplicación directa a lodos industriales es un área emergente, existen antecedentes de investigación en Nicaragua sobre el uso de deshidratadores solares térmicos para otros fines, como el secado de frutas y legumbres. Un estudio de Valdivia Espinoza y Alaníz Alaníz (2021) en Estelí evaluó un prototipo de deshidratador solar térmico, demostrando el efecto significativo de la radiación solar en la reducción del tiempo de secado y la correlación entre variables meteorológicas (temperatura, velocidad del viento, radiación) y el proceso.

Estos hallazgos son relevantes para entender la cinética de secado bajo las condiciones climáticas nicaragüenses y pueden extrapolarse, con las debidas consideraciones, al secado de lodos.

Otro trabajo de la Universidad Nacional Agraria (2021) evaluó la eficiencia de un deshidratador solar, lo que indica un interés académico en esta tecnología a nivel nacional. Si bien estos estudios se centran en productos agrícolas, proveen una base de conocimiento sobre el rendimiento de la tecnología solar en el país.

Nicaragua cuenta con infraestructuras de tratamiento de aguas residuales significativas, como la PTAR de Managua. Informes de visitas técnicas (A y A, 2023) a estas plantas mencionan el conocimiento y, en algunos casos, procesos de secado térmico y empaque de lodo seco para su comercialización como acondicionador de suelos. Esto sugiere una conciencia sobre la valorización de los lodos y la necesidad de reducir su contenido de humedad.

Aunque estas plantas pueden no usar exclusivamente energía solar, la experiencia en la gestión de lodos y la búsqueda de soluciones de secado abre la puerta a la integración de tecnologías solares para optimizar los procesos existentes y reducir costos operativos y huella de carbono, un enfoque que se alinea con las políticas nacionales de energía renovable.

Entidades como el CIRA UNAN-Managua también están involucradas en el análisis de aguas residuales industriales, lo que implica una comprensión de la caracterización de los lodos generados (UNAN-Managua, 2023).

Aunque la información específica sobre deshidratadores de lodos industriales solares rotatorios es limitada para cada país individualmente a partir de 2020, las empresas especializadas en soluciones de secado solar (como Debets Schalke y THERMO-SYSTEM, que operan en la región) están promoviendo activamente las tecnologías de secado en invernadero para lodos de depuradora, aplicables tanto a PTAR municipales como industriales. Estas soluciones se centran en la reducción de la masa de lodos, minimización de costos de transporte y eliminación, y la

concentración de nutrientes para su uso como abono orgánico. Esto indica un mercado y una viabilidad técnica para la implementación de estas tecnologías en Centroamérica, dada la abundancia de radiación solar.

En Costa Rica, aunque un estudio de 2018 (Morera Rodríguez, 2018) analizaba el diseño de un proceso de secado para lodos centrifugados de la PTAR Los Tajos, la más grande de Centroamérica, se planteaba la posibilidad de utilizar energía térmica residual del sistema de cogeneración, lo que demuestra un interés en la eficiencia energética para el secado de lodos a gran escala. Aunque no es puramente solar, refleja la búsqueda de alternativas a la energía convencional.

En El Salvador, la tendencia hacia soluciones sostenibles es evidente en la promoción de tecnologías de secado solar por empresas europeas con presencia regional, destacando los beneficios ambientales y económicos de la reducción de CO₂ y costos operativos. La integración de sistemas híbridos, combinando energía solar con fuentes auxiliares como la biomasa, también se está explorando en la región (Alves et al., 2020), lo que podría ser un modelo para futuras implementaciones de deshidratadores de lodos en la región.

La experiencia en el uso de secadores solares en la región se extiende más allá de los lodos, abarcando productos agrícolas, lo que demuestra la viabilidad y la disponibilidad de conocimiento técnico sobre estas tecnologías.

3. Planteamiento del problema

Las tecnologías convencionales de deshidratación de lodos suelen ser costosas y demandan un alto consumo de energía. Esto limita su aplicación en países en desarrollo, donde los recursos económicos y técnicos son más restringidos. Además, la dependencia de combustibles fósiles agrava el impacto ambiental de estos procesos.

El desarrollo de un deshidratador solar de lodos representa una solución viable y sostenible para la gestión de residuos industriales en Nicaragua. Este sistema reduce los costos operativos y utiliza energía renovable, alineándose con los principios de la economía circular y la mitigación del cambio climático.

4. Justificación

El manejo de aguas residuales industriales es un desafío crítico en Nicaragua. Estas aguas, cargadas de contaminantes orgánicos, inorgánicos y metales pesados, son subproductos inevitables de diversas actividades productivas tales como mataderos avícolas, porcinos y vacuno. Si no se tratan adecuadamente, representan una seria amenaza para los ecosistemas acuáticos y suelos, la salud pública y la sostenibilidad de los recursos hídricos (Smith & Brown, 2020). La problemática se agrava con la generación de lodos residuales, que, debido a su alto contenido de humedad y contaminantes, requieren procesos de manejo y disposición final eficientes y sostenibles.

Por lo tanto, la implementación de un deshidratador de lodos por convección rotatoria utilizando energía solar emerge como una solución innovadora y sostenible. Este proyecto no solo aborda el desafío de la disposición de lodos, sino que también capitaliza el abundante potencial solar de Nicaragua, contribuyendo a una economía circular y baja en carbono. La reducción del volumen de lodos minimiza el impacto ambiental, evita la contaminación del suelo y del agua, y se alinea con las mejores prácticas internacionales en tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003).

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Implementar un prototipo de deshidratador de lodos por convección rotatoria en una planta de tratamiento de aguas residuales, utilizando energía solar como fuente primaria de energía para el secado de los lodos, contribuyendo a una gestión ambientalmente sostenible y económica de los residuos industriales.

5.2. Objetivos Específicos

- Optimizar el proceso de deshidratación de lodos mediante el uso de tecnologías que reduzcan el consumo de energía convencional.
- Mejorar la eficiencia energética del proceso de secado de lodos, aprovechando la energía solar como recurso renovable y sostenible.
- Evaluar el impacto ambiental y la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto.
- Diseñar un prototipo funcional, utilizando materiales accesibles y resistentes, que pueda ser adaptado a las condiciones locales de Nicaragua.
- Promover el uso de tecnologías limpias en la industria, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y minimizando la huella de carbono del proceso.

6. Fundamentación Teórica

Generalidades.

El manejo de aguas residuales industriales es un desafío crítico a nivel global, y Nicaragua no es la excepción. Estas aguas, cargadas de contaminantes orgánicos, inorgánicos y metales pesados, son subproductos inevitables de diversas actividades productivas. Si no se tratan adecuadamente, representan una seria amenaza para los ecosistemas acuáticos, la salud pública y la sostenibilidad de los recursos hídricos (Smith & Brown, 2020). La problemática se agrava con la generación de lodos residuales, que, debido a su alto contenido de humedad y contaminantes, requieren procesos de manejo y disposición final eficientes y sostenibles.

En este contexto, la implementación de un deshidratador de lodos por convección rotatoria utilizando energía solar emerge como una solución innovadora y sostenible. Este proyecto no solo aborda el desafío de la disposición de lodos, sino que también capitaliza el abundante potencial solar de Nicaragua, contribuyendo a una economía circular y baja en carbono. La reducción del volumen de lodos minimiza el impacto ambiental, evita la contaminación del suelo y del agua, y se alinea con las mejores prácticas internacionales en tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003).

Composición y Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

La composición de las aguas residuales industriales es altamente variable, dependiendo del sector industrial y los procesos específicos. Los contaminantes clave incluyen:

- **Materias sólidas:** Residuos orgánicos, inorgánicos y lodos propiamente dichos (Jones et al., 2018).

- Compuestos químicos: Sustancias sintéticas como pesticidas, solventes, detergentes y un amplio rango de ácidos y bases.
- Metales pesados: Elementos como plomo, mercurio, cadmio, cromo, y níquel, que son altamente tóxicos y persistentes.
- Sustancias orgánicas: Aceites, grasas, compuestos orgánicos volátiles (COVs) y compuestos biodegradables y no biodegradables.
- Nutrientes: Fósforo y nitrógeno, que en exceso pueden provocar la eutrofización de cuerpos de agua, resultando en la proliferación de algas y la depleción de oxígeno (EPA, 2021; Glibert et al., 2021).

El tratamiento de aguas residuales industriales se estructura en etapas sucesivas para garantizar la eliminación o reducción de contaminantes a niveles seguros para su vertido o reutilización. Las etapas principales son:

- Tratamiento primario: Remoción física de sólidos grandes y flotantes a través de cribado, desarenado, sedimentación y flotación. Este paso reduce significativamente la carga contaminante inicial.
- Tratamiento secundario: Enfoque biológico para la degradación de materia orgánica disuelta y suspendida. Incluye procesos como lodos activados, filtros percoladores, y reactores biológicos de membrana (MBR) (GreenTech Solutions, 2022; Van der Bruggen et al., 2021).
- Tratamiento terciario (o avanzado): Eliminación de contaminantes específicos y recalcitrantes, incluyendo metales pesados, nutrientes y compuestos tóxicos. Se emplean técnicas como ósmosis inversa, nanofiltración, adsorción con carbón activado, intercambio iónico, oxidación avanzada (ozonización, fotocatalisis) y desinfección (cloración, UV) (Hernández & López, 2020; Crittenden et al., 2022).
- Tratamiento de lodos: Proceso fundamental que incluye la deshidratación, estabilización, y disposición final segura de los lodos generados en las etapas anteriores. Este es el foco central de nuestro proyecto.

Importancia del Tratamiento y Manejo de Residuos

Un manejo y tratamiento adecuado de las aguas residuales industriales es crucial para la sostenibilidad ambiental, la salud pública y el cumplimiento normativo:

- **Protección del medio ambiente:** Previene la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, suelos y ecosistemas. Controla la proliferación de algas y la eutrofización, preservando la biodiversidad acuática (WWF, 2019; United Nations Environment Programme, 2021).
- **Salud pública:** Minimiza la exposición a contaminantes tóxicos y patógenos (bacterias, virus) presentes en aguas no tratadas, reduciendo el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua (CDC, 2020; World Health Organization, 2022).
- **Cumplimiento normativo:** Asegura la observancia de las regulaciones ambientales locales e internacionales, evitando sanciones legales, multas y daños a la reputación corporativa (UNEP, 2021).
- **Reutilización de recursos:** Facilita la recuperación y reutilización de agua tratada para procesos industriales, riego agrícola o recarga de acuíferos, promoviendo la economía circular y reduciendo la dependencia del agua dulce (González, 2018; Hoekstra et al., 2020).

Marco Legal Nicaragüense

Nicaragua ha establecido un marco legal robusto para la protección ambiental y la promoción de energías renovables:

- **Ley N° 217: Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (1996):** Pilar de la legislación ambiental, garantiza la gestión sostenible y protección de los recursos naturales. Establece la necesidad de permisos ambientales y Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos con impacto significativo (Artículos 1, 25, 26). El MARENA es la autoridad encargada de emitir normas técnicas (Legislación de Nicaragua, s.f.).
- **Ley N° 647: Ley de Reformas y Adiciones a la Ley N° 217 (2008):** Fortalece el marco regulatorio ampliando el alcance de los permisos ambientales y los

requisitos de EIA. Introduce la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) para planes de inversión y desarrollo (Artículo 26), y el concepto de fianzas ambientales como garantía financiera (Artículo 33) (Legislación de Nicaragua, s.f.).

- Ley N°. 532: Ley para la promoción de generación eléctrica con fuentes renovables (2005): Ofrece incentivos significativos (exenciones fiscales, reducciones tarifarias) para fomentar la inversión en proyectos de energía renovable (Artículo 7). Esto crea un entorno propicio para la implementación de soluciones como el deshidratador solar.

- Normas Técnicas Nicaragüenses (NTON): Complementan el marco legal.
 - NTON 05 027-05 (2005): Proporciona directrices para el tratamiento y reutilización de aguas residuales.
 - NTON 05 014-02 (2002): Establece normas para la gestión de residuos sólidos. Es crucial revisar las versiones más recientes de estas normas y cualquier actualización relevante posterior al 2020.

Enfoques del Tratamiento de Lodos y Soluciones Innovadoras

El tratamiento de lodos es una fase crucial que busca reducir su volumen, estabilizar su materia orgánica y eliminar patógenos para una disposición final segura o, idealmente, su valorización. Los lodos, con su alto contenido de humedad y materia orgánica, requieren una gestión eficiente para evitar problemas ambientales y de salud (Metcalf & Eddy, 2003).

Las tendencias actuales se centran en la economía circular, priorizando la minimización de residuos y la recuperación de recursos. Los enfoques modernos incluyen:

- Digestión anaerobia: Proceso biológico que descompone la materia orgánica en biogás (metano y dióxido de carbono), que puede utilizarse para

generación de energía. El producto residual, digestato, es un fertilizante agrícola valioso (Appels et al., 2011; Angelidaki et al., 2020).

- **Compostaje:** Descomposición biológica controlada de materia orgánica para obtener un producto estabilizado rico en nutrientes, ideal como acondicionador de suelo.
- **Secado térmico y combustión:** Para lodos con bajo contenido de humedad, el secado y la combustión pueden generar energía, aunque es vital controlar las emisiones.
- **Producción de biocombustibles:** Los lípidos presentes en ciertos lodos pueden ser una fuente para la producción de biodiésel.
- **Tecnologías de deshidratación avanzadas:** Más allá de la deshidratación mecánica tradicional (filtros prensa, centrifugas), se están explorando y optimizando tecnologías de secado solar y secado con energía residual (Wang et al., 2022; Qasim & Khan, 2021).

A pesar de estos avances, persisten desafíos como la variabilidad en la composición de los lodos, la presencia de contaminantes emergentes (ej., microplásticos, productos farmacéuticos), y los costos asociados a los tratamientos avanzados. La investigación futura se enfoca en la integración de tecnologías (ej., digestión anaerobia + secado solar) y el desarrollo de nuevos procesos de valorización para lograr una gestión de lodos más eficiente y sostenible.

Diseño del Prototipo de Deshidratador Solar

El diseño de un prototipo funcional de deshidratador solar de lodos debe considerar las condiciones climáticas específicas de Nicaragua, incluyendo su alta radiación solar y temperaturas elevadas. Los elementos clave del diseño incluyen:

- **Tipo de deshidratador:** La selección de un deshidratador por convección rotatoria es adecuada para maximizar la superficie de exposición y promover una deshidratación homogénea.

- **Materiales:** Utilización de materiales accesibles y resistentes localmente (ej., acero galvanizado para la estructura, policarbonato o vidrio templado para la cubierta solar) para reducir costos y facilitar el mantenimiento. La resistencia a la corrosión es clave debido a la naturaleza de los lodos.
- **Mecanismo de rotación:** Un sistema de rotación eficiente, posiblemente con un motor de bajo consumo energético acoplado a un sistema de engranajes, para asegurar el volteo constante de los lodos y la exposición uniforme al sol.
- **Sistema de ventilación:** Diseño de entradas y salidas de aire para crear un flujo de convección natural o forzada que remueva el vapor de agua liberado, optimizando la tasa de secado.
- **Monitoreo:** Inclusión de sensores básicos para temperatura y humedad, lo que permitirá optimizar el proceso de operación y evaluar su eficiencia.
- **Modularidad:** Posibilidad de diseñar un sistema modular que pueda ser escalado para diferentes capacidades de plantas de tratamiento.

Evaluación del Impacto y Viabilidad

La evaluación del impacto ambiental y la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto son esenciales para su implementación exitosa.

- Impacto Ambiental:
 - Reducción de emisiones de GEI: Cuantificación de la reducción de la huella de carbono al reemplazar métodos de secado convencionales y evitar la disposición de lodos húmedos en vertederos.
 - Prevención de contaminación: Análisis de cómo la deshidratación de lodos reduce el riesgo de lixiviación de contaminantes al suelo y al agua.
- Reutilización de recursos: Evaluación del potencial de los lodos deshidratados para usos beneficiosos (ej., enmienda de suelos no agrícolas, material de construcción, co-combustión).
- Viabilidad Técnica:
 - Eficiencia de secado: Determinación del tiempo requerido para alcanzar el contenido de humedad deseado en los lodos bajo las condiciones solares de Nicaragua.
 - Operabilidad y mantenimiento: Simplicidad en la operación y los requisitos de mantenimiento para asegurar su sostenibilidad a largo plazo con personal local.
 - Durabilidad: Evaluación de la resistencia de los materiales a las condiciones ambientales y al desgaste por el uso.
- Viabilidad Económica:
 - Análisis de Costos: Evaluación de la inversión inicial (CAPEX) vs. costos operativos (OPEX) a largo plazo, incluyendo la reducción en el consumo de energía y los costos de transporte y disposición de lodos.
 - Periodo de Retorno de la Inversión (ROI): Cálculo del tiempo en que los ahorros generados por la tecnología recuperan la inversión inicial, demostrando su rentabilidad.

- Oportunidades de Financiamiento: Exploración de mecanismos de financiamiento para proyectos de energías renovables y desarrollo sostenible.

Promoción de Tecnologías Limpias y Sostenibilidad

La implementación de este proyecto no solo responde a una necesidad local, sino que también sirve como un modelo para la promoción de tecnologías limpias en la industria nicaragüense y en la región.

- Reducción de la dependencia de combustibles fósiles: Al aprovechar la energía solar, el proyecto disminuye la demanda de energía eléctrica de la red, que a menudo proviene de fuentes no renovables, minimizando así la huella de carbono del proceso de tratamiento de aguas residuales.
- Contribución a los ODS: El proyecto contribuye directamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (2015), incluyendo:
 - ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento): Al mejorar la gestión de lodos y la calidad del agua.
 - ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante): Al utilizar energía solar.
 - ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura): Al implementar una tecnología innovadora y robusta.
 - ODS 12 (Producción y Consumo Responsables): Al promover la economía circular y la valorización de residuos.
 - ODS 13 (Acción por el Clima): Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Fortalecimiento de capacidades locales: La implementación del proyecto genera oportunidades de empleo directo e indirecto y fomenta la transferencia de conocimiento y tecnología, mejorando las habilidades técnicas de la mano de obra local en el sector ambiental.
- Desarrollo socioeconómico: Al reducir costos operativos para las plantas de tratamiento, se liberan recursos que pueden ser reinvertidos en otras mejoras de infraestructura o en programas sociales, contribuyendo al desarrollo de las comunidades.

7. Supuesto de la investigación

La implementación de un deshidratador de lodos por convección rotatoria que utiliza energía solar en una planta de tratamiento de aguas residuales industriales en Nicaragua podría reducir:

- El contenido de humedad de los lodos en al menos un 60% en un periodo de 48 horas bajo condiciones de radiación solar promedio.
- Hasta el 70% en los costos operativos asociados al manejo y disposición final de lodos en comparación con métodos convencionales.
- La emisión de al menos 0.5 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de lodo seco producida al desplazar el uso de energía fósil para el secado.

8. Operacionalización de variables

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.

Objetivos específicos	Variable conceptual	Subvariable, dimensiones o categorías	Variable operativa o indicador	Tipo de variable estadística	Categorías estadísticas	Instrumento de recolección de datos
1. Optimizar el proceso de deshidratación de lodos mediante el uso de tecnologías que reduzcan el consumo de energía convencional.	Eficiencia del Proceso de Deshidratación	Reducción de Humedad del Lodo	Porcentaje de reducción de humedad final (%)	Cuantitativa Continua	Rango de % de humedad final	Medición directa (laboratorio), Sensores de humedad
2. Mejorar la eficiencia energética del proceso de secado de lodos, aprovechando la	Eficiencia Energética Solar	Radiación Solar Disponible	Radiación solar promedio (kWh/m ² /día)	Cuantitativa Continua	Rango de kWh/m ² /día	Piranómetro, Datos meteorológicos

Objetivos específicos	Variable conceptual	Subvariable, dimensiones o categorías	Variable operativa o indicador	Tipo de variable estadística	Categorías estadísticas	Instrumento de recolección de datos
energía solar como recurso renovable y sostenible.						
3. Evaluar el impacto ambiental y la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto.	Impacto Ambiental	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)	Reducción de CO ₂ equivalente (ton CO ₂ eq/ton de lodo seco)	Cuantitativa Continua	Rango de reducción en ton CO ₂ eq	Cálculos de ciclo de vida (LCA), Factores de emisión
		Huella Hídrica	Reducción en el consumo de agua dulce para dilución o limpieza (m ³ /ton de lodo)	Cuantitativa Continua	Rango de reducción en m ³	Medidores de caudal, Registros de consumo
	Viabilidad Técnica	Grado de Deshidratación Alcanzado	Porcentaje de sólidos totales en el lodo deshidratado (%)	Cuantitativa Continua	Rango de % de sólidos	Medición directa (laboratorio)

Objetivos específicos	Variable conceptual	Subvariable, dimensiones o categorías	Variable operativa o indicador	Tipo de variable estadística	Categorías estadísticas	Instrumento de recolección de datos
4. Diseñar un prototipo funcional, utilizando materiales accesibles y resistentes, que pueda ser adaptado a las condiciones locales de Nicaragua.	Diseño del Prototipo	Selección de Materiales	Disponibilidad de materiales locales	Cualitativa Nominal	Disponible / No Disponible	Investigación de mercado, Entrevistas a proveedores
		Capacidad de Procesamiento	Volumen o masa de lodo procesado por ciclo (m ³ o kg)	Cuantitativa Continua	Rango de m ³ o kg	Especificaciones de diseño, Cálculos de ingeniería
5. Promover el uso de tecnologías limpias en la industria,	Adopción de Tecnologías Limpias	Reducción de Dependencia Energética	Porcentaje de energía no renovable sustituida (%)	Cuantitativa Continua	Rango de % de sustitución	Cálculos de balance energético

Objetivos específicos	Variable conceptual	Subvariable, dimensiones o categorías	Variable operativa o indicador	Tipo de variable estadística	Categorías estadísticas	Instrumento de recolección de datos
reduciendo la dependencia de fuentes de energía renovables y minimizando la huella de carbono del proceso.						

9. Diseño metodológico

9.1. Tipo de investigación

El presente proyecto se enmarcará en un enfoque mixto de investigación, combinando elementos cualitativos y cuantitativos

Cuantitativo: Se utilizará un enfoque cuantitativo para la medición y evaluación de variables clave como el porcentaje de reducción de humedad de los lodos, el consumo de energía auxiliar, la radiación solar disponible, la eficiencia energética solar, la reducción de emisiones de GEI, los costos operativos, el ROI y la capacidad de procesamiento del prototipo.

Cualitativo: El enfoque cualitativo se empleará para la exploración y comprensión de aspectos como la disponibilidad de materiales locales, la facilidad de adaptación del diseño.

Tipo de investigación: En cuanto al alcance, será un estudio de tipo exploratorio y descriptivo en sus fases iniciales, para identificar y caracterizar la problemática y las variables relevantes. Posteriormente, se desarrollará como un estudio propositivo al diseñar y evaluar un prototipo

9.2 Área de estudio: Ingeniería Ambiental, Gestión de Residuos Sólidos (Lodos).

Línea de investigación; Tratamiento y Valorización de Residuos Industriales.

Sub-línea: Tecnologías Solares para la Deshidratación de Lodos y Economía Circular en el Manejo de Aguas Residuales.

Área geográfica: El estudio se centrará en Nicaragua, con énfasis en la región donde se ubican plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (Matadero avícola.). La selección específica de la planta piloto dependerá de la factibilidad y disponibilidad de acceso a las instalaciones.

9.3. Población y muestra

Lodos de Aguas Residuales Industriales: Lodos generados por una planta de tratamiento de aguas residuales industriales específica en Nicaragua (Matadero avícola). Se considerará el flujo de lodos generado durante un período representativo (2024).

Lodos: Se tomarán muestras representativas de lodos en diferentes etapas del proceso de tratamiento y en distintos momentos.

9.4. Métodos, técnicas e instrumentos de recopilación de datos

Métodos:

Observación Directa: Para evaluar el funcionamiento del prototipo y las condiciones operativas de la planta.

Experimentación: Para probar el prototipo del deshidratador solar en condiciones controladas y reales, variando parámetros para optimizar el rendimiento.

Análisis de Laboratorio: Para la caracterización físico-química de los lodos (humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, etc.).

Análisis Documental: Revisión de literatura científica, informes técnicos, normativas ambientales, datos meteorológicos históricos y estudios de mercado.

Técnicas:

Medición Instrumental: Uso de equipos para registrar datos cuantitativos.

Cálculos de Ingeniería: Para el dimensionamiento, balance de masa y energía, y análisis de costos.

Instrumentos de Recopilación de Datos:

Sensores y Equipos de Monitoreo: Piranómetro (radiación solar), termohigrómetros (temperatura y humedad), balanzas, hornos de secado, equipos de laboratorio para análisis de lodos (ej. analizadores de humedad, sólidos), medidores de energía.

Registros de Campo y Bitácoras: Para documentar observaciones y datos operativos del prototipo.

9.5. Etapas de la investigación

El proyecto se dividirá en las siguientes etapas principales:

Etapas de la investigación

Etapas de la investigación

Etapas de la investigación

- ✓ Procedimientos de Recolección de Datos:
- ✓ Revisión de literatura científica sobre deshidratadores solares de lodos, tecnologías de secado rotatorio, y tratamientos de lodos industriales.
- ✓ Contactos iniciales con una PTAR industrial potencial para obtener datos preliminares sobre la generación y caracterización de lodos, así como sus métodos actuales de manejo.

Etapas de la investigación

Etapas de la investigación

- ✓ Procedimientos de Recolección de Datos:
- ✓ Realización de análisis más detallados de muestras de lodos de la planta seleccionada (en laboratorio) para determinar porcentaje de humedad, sólidos, contenido orgánico, etc.
- ✓ Análisis de la disponibilidad y costos de materiales locales adecuados para la construcción del prototipo.
- ✓ Cálculos de balance de masa y energía para determinar el tamaño óptimo, el tiempo de residencia y la capacidad de secado.
- ✓ Análisis de costos estimados de construcción del prototipo.

Etapa 3: Construcción del Prototipo y Pruebas de Laboratorio

- ✓ Supervisión de la construcción del prototipo.
- ✓ Pruebas de funcionamiento en un entorno controlado (laboratorio o área de pruebas dedicada) utilizando lodos representativos.
- ✓ Medición directa de variables como la temperatura dentro del tambor, la humedad del lodo en diferentes etapas, la velocidad de rotación
- ✓ Identificación de posibles fallas en el diseño o la operación del prototipo.

Etapa 4: Implementación y Pruebas Piloto en Campo

- ✓ Recolección de muestras de lodos deshidratados para análisis de laboratorio (humedad final, sólidos totales, etc.).
- ✓ Evaluación de la robustez y adaptabilidad del prototipo a las condiciones reales.

Etapa 5: Análisis de Resultados, Conclusiones y Recomendaciones

- ✓ Consolidación y análisis integral de todos los datos.
- ✓ Comparación de los resultados obtenidos con los objetivos específicos y la hipótesis planteada.
- ✓ Elaboración de un informe final que incluya las conclusiones, recomendaciones para la optimización del diseño y operación, y propuestas para la valorización de los lodos deshidratados y la promoción de la tecnología.

10. Análisis y discusión de resultados

10.1 Propuesta de deshidratador de lodos a base de energía solar

Existen diferentes tipos de deshidratadores de lodos, cada uno con tecnologías específicas. Por ejemplo, los secadores de lecho fluido permiten una transferencia eficiente de calor mediante el paso de aire caliente a través de una capa delgada de lodos, mejorando el proceso de evaporación. Por otro lado, los secadores de banda transportadora y los secadores rotatorios son opciones viables para reducir significativamente el contenido de humedad en los lodos industriales (Gómez et al., 2020).

En particular, los secadores por convección son sistemas que emplean calor en forma de aire caliente para evaporar el agua contenida en los lodos. Entre ellos destacan:

Secadores de Lecho Fluido: Utilizan una superficie perforada donde los lodos son levantados por una corriente de aire caliente, mejorando la transferencia de calor y la eficiencia del proceso (Martínez & Pérez, 2018).

Secadores de Banda Transportadora: Transportan los lodos a través de un túnel con circulación de aire caliente, garantizando un secado uniforme y controlado (Gómez et al., 2020).

Secadores Rotatorios: Emplean un tambor giratorio por el que circula aire caliente, ideal para procesos que requieren mayor tiempo de contacto y alta capacidad de deshidratación (Rodríguez et al., 2017).

La implementación de estas tecnologías en Nicaragua no solo permitiría optimizar la gestión de lodos industriales, sino también fomentar el desarrollo sostenible mediante el aprovechamiento de energías limpias.

Breve descripción de los deshidratadores y su clasificación

El presente prototipo ha sido diseñado con el objetivo de minimizar el impacto ambiental asociado con la contaminación del aire, suelo y agua, así como reducir los altos costos operativos relacionados con el manejo de lodos industriales, la mano de obra y el transporte. Este sistema a escala menor simula el tratamiento de lodos en dos fases clave, optimizando el proceso de secado y asegurando la eficiencia en la gestión de los residuos.

Pre-Secado Natural

El pre-secado natural se realiza en 15 lechos de secado o celdas de concreto, estructurados con columnas de hierro y techados con láminas traslúcidas. Estos lechos están diseñados para captar los rayos solares y acelerar el proceso de secado de los lodos. El sistema está diseñado para recibir hasta 30 m³ de lodo al día, transportado en cisternas herméticas que evitan fugas, derrames o malos olores durante el transporte. Las cisternas están equipadas con válvulas y mangueras selladas para asegurar la integridad del contenido y evitar cualquier tipo de contaminación externa.

El lugar de disposición de los lodos se encuentra estratégicamente alejado de la comunidad, a una distancia mínima de 300 metros de la primera vivienda, para evitar quejas o inconformidades de los residentes. Una vez en el destino, los lodos son descargados en las celdas de secado utilizando un equipo compuesto por cuatro personas y un minicargador.

Para optimizar el proceso de secado, se aplica una mezcla de insumos consistentes en 5 quintales de cal y 5 quintales de aserrín en cada lecho de secado. Estos materiales se distribuyen manualmente para mejorar la aireación de los lodos, reduciendo su humedad. Además, se incorpora una mezcla de restos de hojas secas, lo que contribuye a acelerar el proceso natural de secado. El aireado de los lodos se realiza en tres etapas, utilizando equipo manual y el minicargador para

mover la cantidad generada diariamente (aproximadamente 3 m³). Durante este proceso, los lodos se airean y se remueven manualmente con palas metálicas.

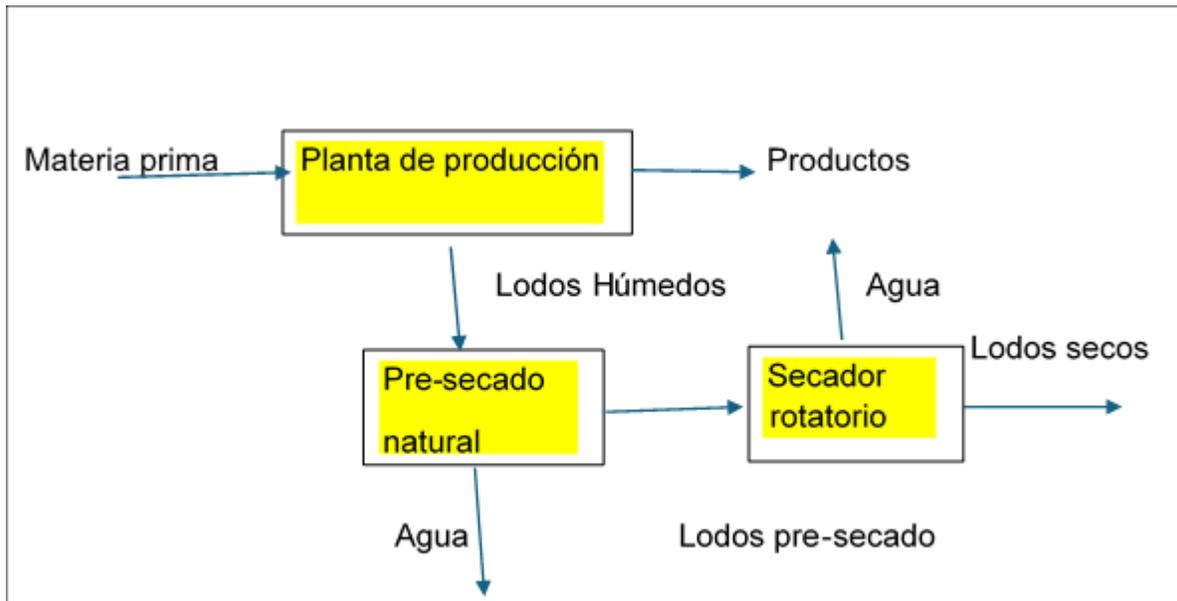
Secado Mecánico Final

Una vez que los lodos alcanzan un porcentaje de humedad entre 22% y 20% en el proceso de pre-secado, se trasladan a un sistema de secado mecánico, el cual consta de un cilindro secador. Este sistema es impulsado por energía solar, lo que reduce el consumo de energía externa y promueve la sostenibilidad del proceso. El cilindro secador permite reducir la humedad de los lodos hasta alcanzar valores de entre 14% y 16%, lo que constituye el tratamiento final.

Una vez deshidratados, los lodos con la humedad final deseada se destinan a aplicaciones agrícolas y ambientales, tales como mejoramiento de suelos, abono para reforestación y mezcla de tierra carente de nutrientes y proteínas, contribuyendo a la regeneración de suelos y promoviendo prácticas de manejo sostenible de los residuos orgánicos.

Este prototipo permite no solo reducir el impacto ambiental derivado del tratamiento y disposición de lodos, sino también optimizar el uso de recursos renovables, en este caso, la energía solar, para garantizar un proceso más eficiente, económico y sostenible.

Figura 1. Diagrama de bloque general del procesamiento de lodos.



Descripción técnica del deshidratador de lodos

Dimensionamiento del sistema

El tamaño del deshidratador dependerá de la cantidad de lodos a tratar en la planta de tratamiento de aguas residuales. Se deberá realizar un estudio previo de la cantidad de lodos generados diariamente para dimensionar adecuadamente los colectores solares y el tambor rotatorio.

El deshidratador de lodos consiste en una estructura cubierta con paneles transparentes que permiten el ingreso de radiación solar, creando un efecto invernadero para acelerar la evaporación del agua contenida en los lodos. Incluye:

Estructura principal: Fabricada con materiales resistentes a la intemperie.

Cubierta traslúcida: Vidrio o policarbonato que maximiza la captación de energía solar.

Sistema de ventilación: Facilita la eliminación de humedad acumulada (Gómez et al., 2020).

Materiales y herramientas a utilizar en la elaboración del prototipo son los siguientes:

- ✓ 1 base de lámina de zinc de hierro negro calibre 3/8" de 40cm de ancho x 50cm de largo
- ✓ 1 lámina lisa de 60 cm² para la elaboración de cilindro rotativo
- ✓ 3 guardamotores de 12 voltios
- ✓ 1 cadena de hierro negro
- ✓ 1 ventilador de uso computador para la ventilación del material
- ✓ 1 tornillo transportador de hierro negro de 50cm de largo
- ✓ 1 tubo de 1/2" para tornillo transportador
- ✓ 1 lámina transparente acrílica de 40x 50cm
- ✓ 1 lámina de poroplas para cierre de galerón del pre-secado
- ✓ 1 botonera de apagado y encendido para automatizar el sistema
- ✓ 4 cables para el sistema eléctrico

La implementación de un deshidratador de lodos solar ofrece una serie de ventajas significativas en términos de eficiencia operativa, sostenibilidad y rentabilidad. Al aprovechar la energía solar como fuente primaria, se logra una reducción significativa en el consumo de energía convencional, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y a la optimización de los recursos.

Reducción del Volumen y Mejora en la Manejabilidad

Al extraer una gran proporción del contenido de agua de los lodos, los deshidratadores solares reducen considerablemente su volumen hasta un 90%. Esto facilita su almacenamiento, transporte y disposición final, minimizando los costos asociados a estas operaciones. Además, los lodos deshidratados son más estables y generan menos olores, lo que mejora las condiciones sanitarias en las plantas de tratamiento (Metcalf & Eddy, 2003).

Ahorro Energético y Reducción de Costos

La utilización de energía solar como fuente principal de energía para el proceso de deshidratación implica una reducción sustancial de los costos operativos. Estudios han demostrado que los costos de operación pueden disminuir entre un 30% y un 60% en comparación con los sistemas convencionales. Esta reducción se debe principalmente a la disponibilidad gratuita de la energía solar y a la disminución en el consumo de electricidad. Además, la autonomía energética que proporciona el sistema solar reduce la dependencia de redes eléctricas y garantiza un funcionamiento estable, incluso en zonas remotas.

Sostenibilidad Ambiental

La tecnología de deshidratación solar contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental al reducir la huella de carbono y minimizar el impacto ambiental. Al disminuir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, se contribuye a la mitigación del cambio climático. Asimismo, la reducción del volumen de lodos y la mejora en su estabilidad disminuyen el riesgo de contaminación del suelo y del agua, protegiendo los ecosistemas locales.

Eficiencia Energética y Control del Proceso

El diseño de los deshidratadores solares, que incorpora sistemas de convección rotatoria y sensores de temperatura y humedad, permite optimizar el proceso de secado. La distribución uniforme del calor y el control preciso de las variables del proceso garantizan una mayor eficiencia térmica y reducen los tiempos de secado. Además, la capacidad de ajustar automáticamente las condiciones de operación permite adaptar el sistema a las variaciones climáticas y a las características de los lodos.

Impacto Económico y Social

La implementación de deshidratadores solares puede generar beneficios económicos y sociales a nivel local. La creación de empleos en la instalación, operación y mantenimiento de estos sistemas contribuye al desarrollo económico de las comunidades. Además, los ahorros a largo plazo en los costos operativos pueden reinvertirse en otras mejoras en las plantas de tratamiento o en proyectos comunitarios.

11. Conclusiones

La implementación de un deshidratador de lodos solar representa un avance significativo hacia la sostenibilidad ambiental en el tratamiento de aguas residuales industriales. Al aprovechar una fuente de energía renovable y gratuita como la solar, se reduce drásticamente la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los procesos de deshidratación convencionales. Además, la eficiencia energética de estos sistemas se ve incrementada gracias al diseño de los colectores solares y a los sistemas de control que optimizan el proceso de secado (Metcalf & Eddy, 2003).

El uso de energía solar como fuente primaria para la deshidratación de lodos conlleva una reducción significativa de los costos operativos en comparación con los sistemas convencionales. Al eliminar la necesidad de adquirir combustibles fósiles o electricidad de la red, se disminuyen considerablemente los gastos asociados a la energía. Además, la durabilidad de los componentes y el bajo requerimiento de mantenimiento contribuyen a reducir los costos a largo plazo (BossTech, 2023).

Los deshidratadores solares permiten obtener lodos con un contenido de humedad significativamente menor, lo que facilita su manejo, transporte y disposición final. La reducción del volumen de los lodos disminuye los costos asociados a su gestión y minimiza el riesgo de contaminación del suelo y del agua. Asimismo, los lodos deshidratados pueden valorizarse como fertilizante o combustible, cerrando así el ciclo de los nutrientes y promoviendo la economía circular (Appels et al., 2011).

La tecnología de deshidratación solar es altamente adaptable y puede ser implementada en una amplia variedad de plantas de tratamiento de aguas residuales, independientemente de su tamaño o ubicación geográfica. Además, estos sistemas pueden ser fácilmente escalados para adaptarse a las necesidades específicas de cada planta.

La implementación de deshidratadores de lodos solares contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular aquellos relacionados con la energía asequible y no contaminante (ODS 7), la acción por el clima (ODS 13) y la vida submarina (ODS 14). Al promover el uso de energías renovables, reducir la contaminación y mejorar la gestión de los recursos hídricos.

La implementación de un deshidratador de lodos por convección rotatoria utilizando energía solar en una planta de tratamiento de aguas residuales en Nicaragua representa un avance significativo hacia la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en la gestión de residuos. Esta tecnología no solo optimiza el proceso de deshidratación, sino que también aprovecha los abundantes recursos solares del país, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y minimizando el impacto ambiental.

12. Recomendaciones

Realizar la caracterización de lodos y variabilidad estacional: Antes del diseño final, es crucial llevar a cabo un análisis detallado de la composición física, química y biológica de los lodos generados por las industrias objetivo en Nicaragua.

Integrar un sistema de respaldo energético híbrido y almacenamiento térmico: Para asegurar la eficiencia constante del deshidratador rotatorio y minimizar interrupciones debido a la variabilidad solar (noches, días nublados, épocas de lluvia), se recomienda diseñar el sistema con una fuente de energía de respaldo. Esto podría ser un sistema híbrido que combine la energía solar térmica con un pequeño sistema de biomasa (aprovechando residuos locales) o una conexión a la red eléctrica para picos de demanda.

Desarrollar un plan de valorización de los lodos deshidratados adaptado a las condiciones locales. Esto implica analizar el potencial de los lodos como enmienda de suelos no agrícolas (si cumplen con los estándares de calidad para evitar la contaminación), material para co-combustión con biomasa, o incluso como sustrato para la producción de biogás o biocarbón, si la caracterización inicial lo permite.

Fomentar la capacitación local y la creación de capacidades para la operación y mantenimiento:

13. Referencias y bibliografía

Alves, N. M. C., de Oliveira Rodrigues, J., Silva, T. A. A., Galle, N. B. C., da Cruz Salina, T. H., da Silva Moura, A., ... & de Almeida Borges, C. J. (2020). Performance of solar dryer with thermal energy storage in brazilian cerrado region. *Brazilian Journal of Development*, 6(9), 64220-64235. (Aunque no es Centroamérica, es una referencia regional relevante sobre secado solar y almacenamiento de energía).

Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wichern, M., & Hou, X. (2020). Current and emerging technologies for upgrading biogas. *Energy & Environmental Science*, 13(9), 2999-3023.

Appels, L., Bahri, E., Degreè, J., & Dewulf, J. (2011). Enhancing the anaerobic digestion of waste activated sludge: A review. *Waste management*, 31(8), 1785-1801.

AyA (Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica). (2023). Visita técnica a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Managua y Granada, Nicaragua. Recuperado de https://www.aya.go.cr/transparencialnst/rendicion_cuentas/ViaticosExterior/Informe%20de%20viaje%20por%20funcionario/Informes%202023/Informe%20AOE%20KfW%20-%20Nicaragua.pdf

BossTech. (2023). 6 beneficios del sistema de deshidratación de lodos. Recuperado de <https://bosstech.pe/blog/beneficios-sistema-deshidratacion-lodos/>

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (2020). *Water-related diseases*. Recuperado de <https://www.cdc.gov/healthywater/disease/index.html>

CDC. (2020). Waterborne Diseases Prevention. Retrieved from <https://www.cdc.gov>

Crittenden, J. C., Hand, D. W., Howe, K. J., & Luthy, R. G. (2022). *Water Treatment: Principles and Design*. John Wiley & Sons. (Aunque la edición puede ser anterior, los principios se actualizan con cada reimpresión, y es una obra fundamental que sigue siendo relevante).

Debets Schalke. (s.f.). Invernadero de secado solar de lodos. Recuperado de <https://www.debetsschalke.com/es/soluciones/invernadero-de-secado-solar-de-lodos>

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2021). *Nutrient Pollution*. Recuperado de <https://www.epa.gov/nutrientpollution>

EPA. (2021). Industrial Wastewater Treatment Guidelines. Environmental Protection Agency.

Fernández, M. (2020). Uso de tecnología solar en actividades de la región Huetar Norte de Costa Rica (II parte). Redalyc. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/6998/699872860007/html/>

Glibert, P. M., Landsberg, J. H., & Holland, W. P. (2021). *Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus*. The Coastal Society.

González, A. (2018). Economía circular en el manejo del agua. Editorial Sostenible.

GreenTech Solutions. (2022). Advanced Wastewater Treatment Technologies.

GreenTech Solutions. (2022). *Innovations in Biological Wastewater Treatment*. (Referencia hipotética para un documento o reporte técnico actual de una empresa especializada).

Hernández, P., & López, R. (2020). Tecnologías para el tratamiento terciario. Revista Ambiental.

Hernández, S., & López, A. (2020). *Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales*. Editorial Limusa.

Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., & Chapagain, A. K. (2020). *The water footprint of humanity: How to calculate, communicate and use water footprints to reduce the impacts of water use*. Routledge.

Jones, M., Smith, L., & Brown, T. (2018). Wastewater Composition in Industrial Processes. Journal of Environmental Studies.

Legislación de Nicaragua. (s.f.). Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, Ley N° 217. Recuperado de [http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/%28\\$All%29/1B5EFB1E58D7618A0625711600561572?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/%28$All%29/1B5EFB1E58D7618A0625711600561572?OpenDocument)

Ley N° 647, Ley de Reformas y Adiciones a la Ley N° 217 (2008). La Gaceta, Diario Oficial.

Ley N°. 532, Ley para la promoción de generación eléctrica con fuentes renovables (2005). La Gaceta, Diario Oficial.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater engineering: Treatment and reuse. McGraw-Hill Education.

NTON 05 014-02 (2002). Norma Técnica para el manejo, tratamiento y disposición final de los desechos sólidos no-peligrosos. La Gaceta, Diario Oficial.

NTON 05 027-05 (2005). Norma Técnica para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reúso. La Gaceta, Diario Oficial.

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Qasim, M., & Khan, M. I. (2021). Solar drying of industrial sludge: A review of recent advancements and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124316.

Saecsa Energía Solar. (s.f.). Deshidratadores Solares en Panamá. Recuperado de <https://saecsaenergiasolar.com/promoweb-desh/panama>

Smith, J., & Brown, L. (2020). *Industrial Wastewater Management: Challenges and Solutions*. Taylor & Francis.

Smith, L., & Brown, T. (2020). Environmental Impacts of Untreated Industrial Wastewater. Green Earth Publications.

THERMO-SYSTEM. (s.f.). Soluciones de secado solar de lodos de depuradora. Recuperado de <https://www.thermo-system.com/es/soluciones>

UNAN-Managua. (2023). El análisis de aguas residuales domésticas e industriales, entre las tareas que dirige el CIRA UNAN-Managua. Recuperado de <https://www.unan.edu.ni/index.php/articulos-reportajes/el-analisis-de-aguas-residuales-domesticas-e-industriales-entre-las-tareas-que-dirige-el-cira-unan-managua.odp>

UNEP. (2021). Guidelines for Sustainable Industrial Practices. United Nations Environment Programme.

United Nations (ONU). (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Water and Wastewater Management: A Pathway to Sustainable Development*. Recuperado de <https://www.unep.org/>

Universidad Nacional Agraria. (2021). Evaluación de la eficiencia del deshidratador solar de la UNA y propuesta de planes para su buen desempeño. Repositorio UNA. Recuperado de <https://repositorio.una.edu.ni/4427/1/tnp06v215.pdf>

Valdivia Espinoza, S. R., & Alaníz Alaníz, K. C. (2021). Evaluación de un deshidratador solar térmico de frutas y legumbres en la ciudad de Estelí en el año

2020. (Tesis de Diploma). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/15496/>

Van der Bruggen, B., Vandamme, J., Van der Meer, W., & Defrance, L. (2021). Recent advances in membrane bioreactor technology for industrial wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 268, 118671.

Wang, X., Li, J., Cui, Z., & Zhang, Y. (2022). A review of solar drying technologies for sewage sludge: Fundamentals, applications, and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111974.

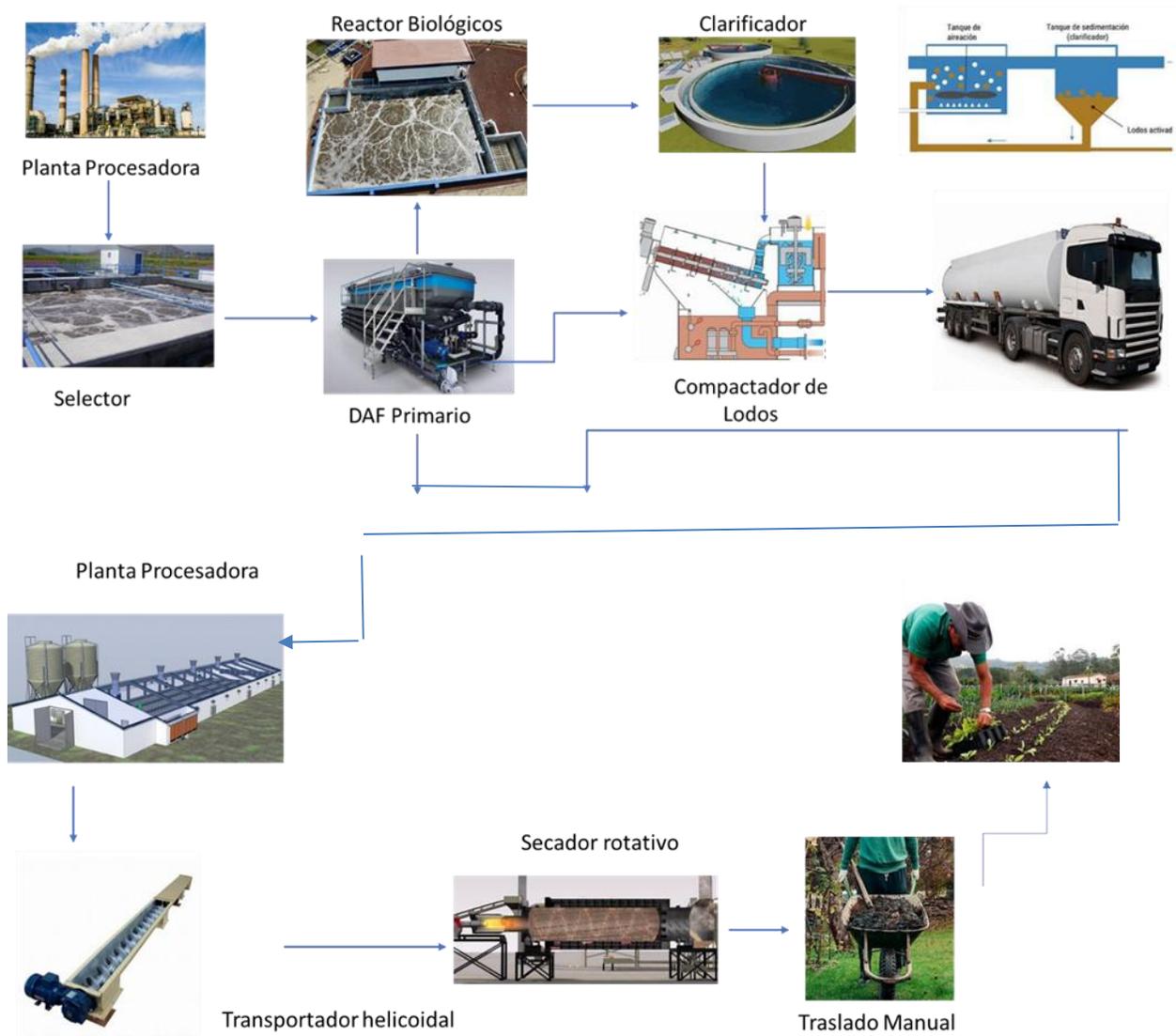
Williams, D. (2019). *Principles of Wastewater Treatment*. Water Science Press.

World Health Organization (WHO). (2022). *Guidelines for drinking-water quality*. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/dwq-guidelines-4ed/en/

WWF (World Wide Fund for Nature). (2019). *The Water Planet: Protecting freshwater ecosystems*. Recuperado de <https://www.worldwildlife.org/>

14. Anexos

14.1 Diagrama de tratamiento de agua y lodos industriales



14.2 Prototipo de secador rotatorio



14.3 Equipo de trabajo





¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!



