

2025



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Escuela de Ingeniería Industriales y Civiles

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales  
Departamento de Ingeniería de Procesos

**TESIS DOCTORAL**

**Modalidad**

Por Compendio de Publicaciones

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Programa de Doctorado de Calidad Ambiental y Recursos Naturales

**Paulino Vasco Mariano Mugurrima**

Las Palmas de Gran Canaria, mayo 2025

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS  
DE GRAN CANARIA

PROGRAMA DE DOCTORADO  
CALIDAD AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RECURSOS NATURALES

TESIS DOCTORAL POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

**EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL  
(SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA  
EN MOZAMBIQUE**

Las Palmas de Gran Canaria, mayo de 2025

Fdo:

Fdo:

Fdo:

Fdo:

Autor: Paulino Vasco Mariano  
Mugurrima

Director: Carlos Alberto  
Mendieta Pino

Director: Federico Antonio León  
Zerpa

Tutor: Sebastián Ovidio  
Pérez Báez

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

**Director:**

Carlos Alberto Mendieta Pino

Departamento de Ingeniería de Procesos

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

**Director:**

Federico Antonio León Zerpa

Departamento de Ingeniería de Procesos

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

**Tutor:**

Sebastián Ovidio Pérez Báez

Departamento de Ingeniería de Procesos

Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS  
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## Agradecimientos

Fue después de una difícil disputa que fui seleccionado y comenzamos a hacer realidad las primeras formas de trabajo, este trabajo que con el programa DOCARNA se hizo realidad, primero seleccionado para el área de radiación y medio ambiente donde tendríamos que caracterizar la Radiación a Nivel del Municipio de Beira bajo la dirección de los Profesores Jesús García Rubiano y Pablo Martel Escobar, a quienes les envió mi agradecimiento de antemano, a pesar de no haber continuado en esta línea de investigación ya que no contábamos con el equipo para llevar terminar el trabajo, pero aun así no desistí del trabajo y si hay condiciones, llegaré a terminar este sueño.

Sin embargo, me recibió otro equipo muy técnico y objetivo del sector de industria y medio ambiente, entre ellos los profesores Carlos Alberto Mendieta Pino, con un típico y refinado acento castellano, que al principio me resultó un quebradero de cabeza porque no era el mío lenguaje común, y que admiro mucho su trayectoria investigadora y su flexibilidad en términos de articulación; al profesor Federico António León Zerpa, siempre acogedor, tranquilo y con una capacidad increíble, siempre motivado y alegre que nos contagió durante las clases, un hombre digno de elogio; al Profesor que consideramos nuestro Padre Sebastián Ovidio Pérez Báez por su magnífica sabiduría y cuidadosa organización del trabajo, a los demás dignos maestros que ayudaron directamente en la traducción y organización de nuestro trabajo, en el que a pesar de ser un área nueva para Para mí este equipo me ayudó a seguir adelante y hacer realidad las tareas que había plasmado.

Al programa de Doctorado en Calidad Ambiental y Recursos Naturales (DOCARNA), en el que gracias a sus cursos, programas y actividades pudo aprender y desarrollar todas aquellas habilidades que tienen que ver con la investigación científica. También quiero agradecer a mis compañeros, colegas, que a través de la participación en este y otros proyectos, han podido establecer procedimientos de trabajo colaborativo, aportando experiencias, habilidades y perspectivas diversas, permitiendo así una gran capacidad de reflexión y un aumento de las posibilidades de aprendizaje mutuo.

Por último quiero mostrar mi agradecimiento a mis hijos Shamsodin Muguirrima y Munayne Muguirrima quienes con mucho cariño me ayudaron con la satisfacción de ser padre y sus asesores y por acompañarme durante este largo período en todos los eventos físicos y emocionales y finalmente abrazo a mi tío Albino Mariano Muguirrima quien sin escatimar esfuerzos siempre me apoyó en la renovación de mis inscripciones y siempre me mantuvo regular en el programa, que es sin su Apoyo incondicional durante todo esto no hubiera sido posible, mi madre Matilde Albino João Manecas y mi padre Vasco Mariano Muguirrima quienes hicieron de mí un ser curioso y siempre creyó que todo en el mundo es posible con solo fuerza de voluntad. Muchas gracias, los quiero.

---

RESUMEN

---

Con el aumento de las actividades humanas, especialmente de la agroindustria, se ha producido un incremento del consumo de agua, ya que ésta se encuentra distribuida en el planeta tierra de la siguiente manera: el 97,5% del agua del mundo es salada y no es apta para nuestro consumo directo ni para regar cultivos, y sólo el 2,5% es agua dulce, la mayor parte de la cual (69%) es de difícil acceso por estar concentrada en los glaciares, el 30% es agua subterránea (almacenada en acuíferos) y el 1% está en los ríos, que es la parte útil. Por ello, cualquier proyecto que implique la reducción o la reutilización del agua reviste una importancia fundamental. La reutilización planificada ya es adoptada por muchas empresas en todo el mundo, favoreciendo la reducción del consumo de agua, además de reducir el grado de contaminación que puede causar al medio ambiente. Teniendo esto en cuenta, este estudio tuvo como objetivo caracterizar el efluente de una industria alimentaria en Mozambique (Açucareira de Moçambique-Mafambisse), una industria azucarera situada en el distrito de Dondo, al sur de la ciudad de Beira, a 1 km de la carretera nacional nº 6 (EN6). La azucarera está gestionada por la empresa Tongaat Hulett desde 1996. A Tongaat Hulett es una empresa sudafricana que opera en el sector azucarero en varios países del país: Mozambique, Botsuana, Sudáfrica, Suazilandia, Zimbabue y Namibia.

En Mozambique, Tongaat Hulett tiene fábricas en Xinavane, provincia de Maputo, y en el puesto administrativo de Mafambisse, distrito de Dondo, provincia de Sofala, con la misión de promover los servicios y productos derivados de la caña de azúcar, haciéndolos cada vez mejores, buscando la satisfacción del cliente y el desarrollo del país, cuidando y protegiendo siempre el medio ambiente. Normalmente, la industria azucarera se compone de dos sectores productivos: el sector agrícola, es decir, la plantación de caña de azúcar, y el sector de transformación (fábrica). El agua se extrae del río Púngue para enfriar máquinas, rodamientos, molinos, calderas y, en algunos casos, incluso en el área de proceso y otras actividades que utilizan agua. Sin embargo, esta empresa, que pertenece al sector Alimentos, específicamente al sector de producción de azúcar, no cuenta con un sistema de tratamiento y vierte sus efluentes, ya sea en los tres estados físicos del material, directamente al medio ambiente. Con este trabajo, el objetivo inicial fue analizar el efluente generado por la empresa, caracterizarlo, diseñar un sistema de tratamiento, con miras a su reutilización. Se realizaron análisis de los efluentes de todas las áreas de producción de la fábrica, es decir, calderas, talleres y bombas, y se diagnosticó su composición para evaluar el grado de contaminación.

Los parámetros elegidos para el análisis fisicoquímico fueron DBO, DQO, Cloruros, Fósforo total, Nitrógeno total, Sólidos en suspensión, Sólidos volátiles, Sólidos totales, Sólidos fijos, pH, Carbono orgánico total y turbidez. Para la caracterización microbiológica se analizaron

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Coliformes Totales y Coliformes Termotolerantes. Después de analizar las características de estos efluentes de acuerdo con la literatura, se han agrupado en la clase de efluentes considerados biodegradables, de ahí la búsqueda de técnicas apropiadas para su tratamiento adecuado, que comienza con la eliminación de la materia orgánica presente en estas aguas residuales, que puede llevarse a cabo mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Los efluentes biodegradables son aquellos que pueden ser fácilmente degradados por organismos vivos como hongos, bacterias presentes en el suelo, agua y aire.

Los principales objetivos de este trabajo fueron, en primer lugar, desarrollar un sistema de tratamiento de efluentes a pequeña escala utilizando un biofiltro sostenible, que permitiera, en principio, analizar la parte físico-química de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales, inculcar en las comunidades una ideología de cómo manejar los residuos sanitarios en el entorno inmediato y, a partir de ahí, se desarrollaron varios modelos de tratamiento para que los fenómenos biológicos y físico-químicos se produzcan simultáneamente en sistemas con un mayor flujo de efluentes, como los sistemas municipales y de la industria alimentaria.

En el segundo, se analizaron las aguas residuales de la industria azucarera y, considerando sistemas con mayores caudales de agua, con base en las características encontradas, se analizó el método ideal para el proceso de degradación, como lagunas, reactores aeróbicos y anaeróbicos, humedales, así como sistemas de lodos activados, y entre ellos, se encontró el método más económico y ambientalmente aceptable. También se analizó la eficacia de los sistemas de tratamiento en uso en las instalaciones industriales para determinar su mayor eficiencia y viabilidad económica. Para las industrias que no disponen de sistemas de tratamiento, como las azucareras, se dimensionó el sistema de tratamiento más adecuado para su implantación. Finalmente, dependiendo de las características del agua y su biodegradabilidad, se diseñaron sistemas para brindar un mejor modelo de tratamiento a estos efluentes. Como referencia, los sistemas de tratamiento que utilizan lagunas anaerobias/aeróbicas, o incluso un sistema asociado de éstas, son los que proporcionan una mayor eficiencia en la remoción de la carga contaminante, requiriendo únicamente la disponibilidad de espacio para su construcción.

Este documento se ha dividido en cuatro partes:

La primera incluye el consentimiento de los coautores de los artículos para su inclusión en la tesis.

La segunda parte está dedicada a la Introducción. Comienza con la historia y caracterización del objeto de estudio y destaca la importancia de los sistemas naturales de depuración (SEN) en la actualidad. La elección de este tipo de tecnología en las zonas rurales es cada vez mayor, tanto en la ciudad de Beira como en el país (Mozambique) y en todo el mundo.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Esta parte también describe los objetivos y presenta los manuscritos publicados, las razones de esta Tesis por Compendio tiene Publicaciones. Posteriormente, el capítulo que justifica la Unidad Temática de la Tesis muestra cómo se desarrolló la investigación a través de los diferentes artículos publicados. Finaliza con el Estado del Arte, donde se presenta el conocimiento sobre los modelos que se han desarrollado en torno a SDN y se plantea la necesidad de aportaciones en futuros trabajos.

La tercera parte de esta tesis comienza con una presentación de los artículos publicados, que se han organizado cronológicamente según su fecha de publicación.

Esta sección se completa con resúmenes en español de cada uno de estos manuscritos.

La cuarta y última parte describe las conclusiones, así como las posibles aportaciones que podrían desarrollar otros grupos de investigación en futuros trabajos.

---

ABSTRACT

---

With the increase in human activities, especially in the agro-industry, there has been an increase in water consumption, since it is distributed on planet Earth in the following way: 97.5% of the world's water is salty and is not suitable for our direct consumption or for irrigating crops, and only 2.5% is fresh water, most of which (69%) is difficult to access because it is concentrated in glaciers, 30% is groundwater (stored in aquifers) and 1% is in rivers, which is the useful part. Therefore, any project that involves the reduction or reuse of water is of fundamental importance. Planned reuse is already adopted by many companies around the world, favoring the reduction of water consumption, in addition to reducing the degree of pollution that it can cause to the environment. With this in mind, this study aimed to characterize the effluent from a food industry in Mozambique (Açucareira de Moçambique-Mafambisse), a sugar mill located in the district of Dondo, south of the city of Beira, 1 km from the national road no. 6 (EN6). The sugar mill is managed by the company Tongaat Hulett since 1996. Tongaat Hulett is a South African company operating in the sugar sector in several countries in the country: Mozambique, Botswana, South Africa, Swaziland, Zimbabwe and Namibia. In Mozambique, Tongaat Hulett has factories in Xinavane, Maputo province, and in the administrative post of Mafambisse, Dondo district, Sofala province, with the mission of promoting services and products derived from sugar cane, making them better and better, seeking customer satisfaction and the development of the country, always caring for and protecting the environment. Normally, the sugar industry is made up of two productive sectors: the agricultural sector, that is, the sugar cane plantation, and the transformation sector (factory). Water is extracted from the Púngue River to cool machines, bearings, mills, boilers and, in some cases, even in the process area and other activities that use water. However, this company, which belongs to the Food sector, specifically the sugar production sector, does not have a treatment system and discharges its effluents, whether in the three physical states of the material, directly into the environment. The initial objective of this work was to analyse the effluent generated by the company, characterise it and design a treatment system with a view to its reuse. Analysis was carried out on the effluent from all production areas of the factory, i.e. boilers, workshops and pumps, and their composition was diagnosed to assess the degree of contamination.

The parameters chosen for physical-chemical analysis were BOD, COD, Chlorides, Total Phosphorus, Total Nitrogen, Suspended Solids, Volatile Solids, Total Solids, Fixed Solids, pH, Total Organic Carbon and turbidity. For the microbiological characterization, Total Coliforms and Thermotolerant Coliforms were analyzed. After analyzing the characteristics of these effluents according to the literature, they have been grouped in the class of effluents considered biodegradable, hence appropriate techniques are sought for their adequate treatment, which begins with the removal of organic matter present in these wastewaters, which can be carried out by physical, chemical and biological processes.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Biodegradable effluents are those that can be easily degraded by living organisms such as fungi and bacteria present in soil, water and air.

The main objectives of this work were, firstly, to develop a small-scale effluent treatment system using a biodigester. This system initially analyzes the physical-chemical part of any wastewater treatment system, to raise awareness in communities about how to handle sanitary waste to the nearest environment and from there, several treatment models were developed so that biological and physical-chemical phenomena occur simultaneously in systems with a higher effluent flow, such as municipal and food industry systems.

Second, various water treatment processes were analyzed, whether potable, sanitary or industrial, such as lagoons, aerobic and anaerobic reactors. The effectiveness of the treatment systems in use in industrial facilities was also analyzed to determine their greater efficiency and economic viability. For industries that do not have treatment systems, such as sugar mills, the most appropriate treatment system was sized for their implementation. Finally, systems will be sized for a better effluent treatment model in these treatment systems, which due to their biological characteristics and their level of degradability, use anaerobic and aerobic lagoons, or even an associated system of these, in order to provide greater efficiency in the removal of the pollutant load.

This document was divided into four parts:

The first Part includes the consent of the co-authors of the articles for their inclusion in the thesis.

The second part is dedicated to the Introduction. It begins with the history and characterization of the object of study and highlights the importance that Natural Purification Systems (NSS) currently have. The choice of this type of Technology in rural areas is increasing, both in the city of Beira, in the country (Mozambique), and throughout the world.

This part also describes the objectives and presents the published manuscripts, reasons for this Thesis to have Publications. Later, in the chapter justifying the Thematic Unit of the Thesis, the development of the research was shown through the different articles published. It ends with the State of the Art, where knowledge about the models that were developed around SDN is presented and the need for contributions in future work is raised.

The third part of this Thesis begins with the presentation of the published articles, which were organized chronologically, according to the date of their publication.

This section is completed with the abstracts in Spanish of each of these manuscripts.

The fourth and last part describes the final conclusions, as well as the possible contributions that can be developed by other research groups in future work.

## Parte I

### Solicitud Presentación de la Tesis

## **Aceptación de coautores para que el doctorando presente el trabajo**

Se adjunta a continuación la lista completa de trabajos publicados que contiene el nombre y descripción del autor y todos los coautores, las referencias utilizadas, la revista de publicación, y a continuación se indica la aceptación por escrito con la firma original de los coautores dando su consentimiento. por ello estos artículos aparecen a modo de compendio en esta tesis doctoral.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## Índice

Parte I .....	11
Solicitud Presentación de la Tesis.....	11
Aceptación de coatores para que el doctorando presente el trabajo .....	12
Parte II.....	23
Introducción .....	23
2. Introducción .....	24
2.1. Antecedentes.....	24
2.2. Objetivos de la Tesis .....	26
2.3. Trabajos publicados .....	27
2.3.1. Como Autor Principal .....	28
2.3.2. Como Colaborador en Artículos Relacionados Directamente con este Trabajo .....	32
2.3.3. Como colaborador en otros artículos.....	38
2.4. Justificación de la unidad temática de la Tesis.....	39
3. Investigación Bibliografica.....	43
3.1. Agua residual .....	43
3.2. Sistemas de Depuración Natural Aplicados en el Tratamiento de Aguas Residuales.....	45
3.2.1. Lagunas de Estabilización .....	45
3.2.1.1. <i>Lagunas Anaeróbicas</i> .....	45
3.2.1.2. <i>Lagunas Facultativas</i> .....	45
3.2.1.3. <i>Lagunas de Maduración</i> .....	46
3.2.2. As wetlands construídas (AW), o humedales artificiales.....	46
3.3. Componentes de un humedal artificial .....	50
3.3.1 Agua Residual.....	50
3.3.2 Sustrato.....	50
3.3.3. Vegetación.....	50
3.3.4. Microorganismos.....	51
3.3.5. La vegetación en los humedales artificiales.....	51
3.4. Sistema de Lodos Activados.....	52
3.5. Filtro Biológico .....	53
3.6. Reactor de Manta de Lodo (UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket).....	53
4. Referencias .....	57

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Parte III.....	62
Publicaciones originales que conforma la Tesis Doctoral.....	62
5. Treatment Of Domestic Effluentes Using Sustainable Biofilter Methods.....	63
6. Evaluation of the physico-chemical properties of effluents from the Mozambique Sugar Company. a proposal for effluent treatment.....	71
7. Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique.....	77
8. Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company.....	78
9. Resúmenes de los Artículos.....	92
9.1. Treatment Of Domestic Effluentes Using Sustainable Biofilter Methods.....	92
9.2. Evaluation of the Physico-Chemical Properties of Efluentes from the Mozambique Sugar Company. a Proposal for Effluent Treatment.....	93
9.3. Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique.....	95
9.4. Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company.....	96
Parte IV.....	98
Conclusiones Finales.....	98
10. Consideraciones y conclusiones.....	99
10.1. Conclusiones.....	100
10.2. Recomendaciones.....	101
Simbología.....	102

## Lista de Figuras

Figura 1. Características das aguas residuales.....	44
Figura 2. Características das aguas residuales.....	46
Figura 3. Clasificación de los humedales artificiales. ....	47
Figura 4. Humedal de flujo superficial .....	48
Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial.).....	49
Figura 6. Sección longitudinal de un biofiltro de flujo horizontal.....	49
Figura 7. Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	50
Figura 8. Formas de crecimiento de la macrofita en los humedales artificiales .....	51
Figura 9. Plantas típicas utilizadas en humedales artificiales a) Espadaña (Typha latifolia); b) Juncos (Scirpus); c) Papiro (Cyperus payrus); d) Carrizo (Phragmites australis); e) Lenteja de agua (Lemma Sp); f) Jacinto de agua (Eichhornia crassipes). ....	52
Figura 10. Esquem del reactor UASB.....	54
Figura 11. Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración.....	55

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

AUTORES (P.O. DE FIRMA): PAULINO VASCO MARIANO MUGUIRRIMA<sup>1</sup>, NICOLAU PENICELA CHIRINZA<sup>1</sup>, FEDERICO LEÓN ZERPA<sup>2</sup>, CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO<sup>2</sup>.

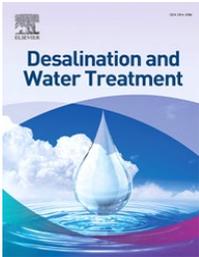
TITULO: *Treatment Of Domestic Effluentes Using Sustainable Biofilter Methods*

REFERENCIA: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100266>,

REVISTA: *Desalination and Water Treatment* [ISSN 1944-3994], v. 317, (Enero 2024)

EDITORIAL: ELSEVIER

AFILIACIONES:



- (1) University (UniZambeze), Av. Alfredo Lawley, nº 1018, Matacuane, Beira, Sofala, Mozambique
- (2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Campus de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain

LUGAR DE PUBLICACIÓN: MASSACHUSETTS, UNITED STATES

FECHA DE PUBLICACIÓN: ENERO 2024

FACTOR DE IMPACTO: 1,0

DESCRIPCIÓN CATEGORÍA	POSICIÓN:	Quartil
DESALINATION AND WATER TREATMENT	132/170 (2023)	Q4

Los coautores del trabajo titulado "*Treatment Of Domestic Effluentes Using Sustainable Biofilter Methods*" con DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100266>, hacen constar que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima con DNI: 15AM13411 es el autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima presente su tesis doctoral denominada "*Evaluación y Diseño de Sistemas de Depuración natural (SDN) aplicados en los efluentes de la industria azucarera en mozambique.* ", en el formato de compendio de artículos:

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS  
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

D. Nicolau Penicela Chirinza

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

**AUTORES (P.O. DE FIRMA):** PAULINO VASCO MARIANO MUGUIRRIMA<sup>1</sup>, NICOLAU PENICELA CHIRINZA<sup>1</sup>, FEDERICO LEÓN ZERPA<sup>2</sup>, CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO<sup>2</sup>.

**TITULO:** *Evaluation of the Physico-Chemical Properties of Effluents from the Mozambique Sugar Company. a Proposal for Effluent Treatment*

**REFERENCIA:** DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>,

**REVISTA:** DYNA Energía y Sostenibilidad vol. 13, n.1, ISSN: 2254-2833

**EDITORIAL:** DYNA

**AFILIACIONES:**



(1) University (UniZambeze), Av. Alfredo Lawley, nº 1018, Matacuane, Beira, Sofala, Mozambique

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Campus de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain

**LUGAR DE PUBLICACIÓN:** BILBAO-SPAIN

**FECHA DE PUBLICACIÓN:** Jan.-Dec. 2024

**FACTOR DE IMPACTO:** 0,8

---

Los coautores del trabajo titulado "*Evaluation of the physico-chemical properties of effluents from the Mozambique Sugar Company. a proposal for effluent treatment*" con DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>, hacen constar que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima con DNI: 15AM13411 es el autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima presente su tesis doctoral denominada "*Evaluación y Diseño de Sistemas de Depuración natural (SDN) aplicados en los efluentes de la industria azucarera en Mozambique.* ", en el formato de compendio de artículos:

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

D. Nicolau Penicela Chirinza

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

AUTORES (P.O. DE FIRMA): PAULINO VASCO MARIANO MUGUIRRIMA<sup>1</sup>, NICOLAU PENICELA CHIRINZA<sup>1</sup>, FEDERICO LEÓN ZERPA<sup>2</sup>, CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO<sup>2</sup>.

TITULO: *Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique*

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11360>,

REVISTA: DYNA Ingeniería e Industria. Vol. 100 n°2 | 30-37 | ISSN-L: 0012-7361 | 101

EDITORIAL: DYNA- Ingeniería y tecnología del medio ambiente

AFILIACIONES:



(1) University (UniZambeze), Av. Alfredo Lawley, n° 1018, Matacuane, Beira, Sofala, Mozambique

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Campus de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain

LUGAR DE PUBLICACIÓN: BILBAO-SPAIN

FECHA DE PUBLICACIÓN: Marzo-Abril 2025

FACTOR DE IMPACTO: 0,8

DESCRIPCIÓN CATEGORÍA	POSICIÓN:	Cuartil
DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD	122/181 (2023)	Q3

Los coautores del trabajo titulado “Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique” con DOI: <https://doi.org/10.52152/D11360>, hacen constar que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima con DNI: 15AM13411 es el autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima presente su tesis doctoral denominada “Evaluación y Diseño de Sistemas de Depuración natural (SDN) aplicados en los efluentes de la industria azucarera en Mozambique.”, en el formato de compendio de artículos:

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS  
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

D. Nicolau Penicela Chirinza

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

AUTORES (**P.O. DE FIRMA**): PAULINO VASCO MARIANO MUGUIRRIMA<sup>1</sup>, NICOLAU PENICELA CHIRINZA<sup>1</sup>, FEDERICO LEÓN ZERPA<sup>2</sup>, CARLOS ALBERTO MENDIETA PINO<sup>2</sup>, SEBASTIAN OVIDIO PÉREZ BÁEZ <sup>2</sup>

TITULO: *Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company*

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.3390/su16198334>,

REVISTA: SUSTAINABILITY 2024, 16, 8334), 8334

EDITORIAL: MDPI

AFILIACIONES:



*sustainability*

(1) University (UniZambeze), Av. Alfredo Lawley, nº 1018, Matacuane, Beira, Sofala, Mozambique

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Campus de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain

LUGAR DE PUBLICACIÓN: BASEL/SWITZERLAND

FECHA DE PUBLICACIÓN: 25 September 2024

FACTOR DE IMPACTO: 3.3

DESCRIPCIÓN CATEGORÍA	POSICIÓN:	Cuartil
SUSTAINABILITY	58/91 (2023)	Q2

---

Los coautores del trabajo titulado “*Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company*” con DOI: <https://doi.org/10.3390/su16198334>, hacen constar que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima con DNI: 15AM13411 es el autor principal de la investigación recogida en este artículo y que conocen y dan su consentimiento para que el artículo sea utilizado para que Don Paulino Vasco Mariano Muguirrima presente su tesis doctoral denominada “*Evaluación y Diseño de Sistemas de Depuración natural (SDN) aplicados en los efluentes de la industria azucarera en Mozambique.*”, en el formato de compendio de artículos

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS  
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Dr. Federico A. León Zerpa

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

Dr. Sebastian Ovidio Perez Baez

D. Nicolau Penicela Chirinza

## Parte II

### Introducción

## 2. Introducción

### 2.1. Antecedentes

La importancia del agua para el mantenimiento de la vida en el planeta es indiscutible. La mayoría de las actividades humanas requieren el uso del agua y como resultado contaminan el agua, ya sea parcial o totalmente, lo que puede afectar al propio ser humano y a otros seres vivos, trayendo consigo diversos impactos socioeconómicos. Mirando el porcentaje de agua dulce disponible en nuestro planeta ésta se encuentra distribuida de la siguiente manera: el 97,5% del agua del mundo es salada y no es apta para nuestro consumo directo ni para regar cultivos, y sólo el 2,5% es agua dulce, la mayor parte de la cual (69%) es de difícil acceso por estar concentrada en los glaciares, el 30% es agua subterránea (almacenada en acuíferos) y el 1% está en los ríos, que es la parte útil [1]. Por ello, cualquier proyecto que implique la reducción o la reutilización del agua reviste una importancia fundamental, un uso irracional podría tener no sólo impactos socioeconómicos sino también impactos en la vida en el planeta, los cambios climáticos que pueden generarlo. Por ejemplo, la toxicidad y carga de contaminantes industriales tienen impactos más significativos que el volumen de estas aguas, pudiendo incluso generar lluvia ácida [2]. Por ello, existen leyes nacionales e internacionales que establecen límites de vertido a cuerpos de agua de diversas sustancias.

En el caso de Mozambique, viene registrando un notable crecimiento económico desde el final de la guerra civil en 1992. Este notable crecimiento en la producción de aluminio, que se basa en la metalurgia (fundición de aluminio), las industrias con mayor crecimiento son las de alimentos, bebidas y tabaco (con tres productos dominantes: cerveza, azúcar y tabaco en hoja); la de minerales no metálicos (cemento); y química (gas natural y petróleo) [2]. Sin embargo, en todas estas actividades industriales y domésticas es necesario utilizar técnicas de tratamiento de efluentes para cumplir con la legislación pertinente [3]. No todos los sectores industriales de Mozambique cuentan con sistemas de tratamiento de agua que cumplan con estas leyes. Para cada tipo de actividad, la composición de un efluente depende del sector generado y de las sustancias que se utilizan en el proceso, y para cada composición existen procesos de tratamiento adecuados que se pueden clasificar en físicos, químicos y biológicos. Según los análisis, la mayoría de las plantas de tratamiento de efluentes utilizan procesos biológicos para eliminar los compuestos orgánicos de las aguas residuales [4].

Los métodos más avanzados para el tratamiento de aguas residuales urbanas, que todavía se aplican en los países desarrollados, los Sistemas de Depuración Convencionales (SDC), se basan en procesos mecánicos, biológicos y químicos. El uso de este tipo de tecnología requiere de una serie de recursos, como sistemas de aireación, tratamientos químicos y transporte [4-5]. Para lograrlo es necesario contar con una infraestructura considerable,

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

además de fuentes de energía, altos costos operativos, control de emisiones de gases de efecto invernadero y suministro de productos químicos [5].

En el caso de Açucareira de Moçambique, no cuenta con un sistema adecuado para el tratamiento de sus efluentes, vertiéndolos al medio ambiente sin tratamiento previo y con la misión de promover buenos servicios y productos utilizando un estándar internacional de calidad ambiental, teniendo en cuenta que utilizan un gran volumen de agua extraída del río Púngue para enfriar máquinas, cojinetes, molinos, calderas y en algunos casos incluso en el área de Procesos y otras actividades que utilizan agua, donde su descarte se considera perjudicial para el medio ambiente.

La cuenca hidrográfica del río Púnguè, donde su aguas abajo pasa por la provincia de Sofala hacia el Océano Índico, se caracteriza por una diversidad de formas de ocupación y usos del suelo (ocupación por viviendas, actividades agrícolas y pesqueras, tanto de subsistencia como mecanizadas, sistemas de captación de agua, pastos, minería artesanal, tala, etc.) [6], sin embargo, depositar estos efluentes sin tratamiento previo, además de afectar la fauna y la flora, causaría problemas hídricos a las comunidades que allí residen y se benefician de estas aguas. [7]. Como forma de dar respuesta a las exigencias impuestas a la calidad ambiental, las industrias [7-8] se ven obligadas a instalar una EDAR – Estación Depuradora de Aguas Residuales, como forma de minimizar la carga contaminante en las aguas residuales. En concreto, esta agua viene creando varios problemas ambientales, como la contaminación del suelo, la eliminación de la biodiversidad acuática y diversos microorganismos en la zona donde fluyen estos efluentes.

Los Sistemas de Depuración Convencionales (SDC) más avanzados para el tratamiento de aguas residuales urbanas, que aún se aplican en países desarrollados y subdesarrollados, se pueden distinguir según sus particularidades, pero todos cumplen con los requisitos legales para la seguridad de la población y la preservación del medio ambiente [9], especialmente ríos, lagos y océanos, a saber: en primer lugar, están las lagunas de estabilización, que son sistemas utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se realiza mediante procesos biológicos que consumen materia orgánica mediante oxidación bacteriológica, aeróbicos en las capas superiores y anaeróbicos en las capas más profundas de las lagunas y normalmente varían de 1,5 a 5 metros de profundidad y con tiempo de residencia en la laguna es superior a 20 días. Éstas, a su vez, dependiendo de su profundidad y de la penetración de los rayos solares (fotosíntesis), se pueden subdividir en lagunas facultativas y de maduración [9-10].

El segundo tipo serían las lagunas aireadas, que se diferencian de las primeras en que tienen una mayor mezcla debido al suministro continuo de oxígeno, lo que les permite alcanzar mayores profundidades y siendo el área ocupada hasta cinco veces menor. Se utiliza para tratar aguas residuales domésticas e industriales con un alto contenido de sustancias biodegradables. El tercer tipo serían los reactores UASB que pueden funcionar como unidades individuales o seguidos de otra técnica de postratamiento, como estanques de

maduración o lodos activados. Esto se resume en un flujo de aguas residuales a través de un denso lecho de lodos, tenemos la estabilidad de la mayor parte de la materia orgánica por la biomasa lo que provoca que exista una estructura trifásica que se encarga de la separación de líquidos, sólidos y gases [11] .

El cuarto sistema sería el de lodos activados, un método de tratamiento que se realiza mediante la oxidación de contaminantes orgánicos provocada por la presencia de bacterias aeróbicas. El proceso está controlado por el exceso de oxígeno en los tanques de aireación, que suministran oxígeno a los microorganismos. Luego, el efluente se envía a los clarificadores. Tras la decantación, los lodos se devuelven al tanque de aireación para reactivar la acción de las bacterias mezclando completamente los lodos con el efluente. El objetivo es aumentar la concentración de microorganismos para estabilizar la materia orgánica. Por tanto, aumenta la eficiencia del proceso de tratamiento. En este proceso existe un alto nivel de mecanización y, como consecuencia, un gran consumo de energía. Por otro lado, el tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados es muy utilizado en todo el mundo, ya que tiene una gran capacidad de eliminación de sólidos, materia orgánica y nutrientes. Además, es una de las mejores opciones para cuando no tienes mucho espacio disponible [11-12].

Durante esta investigación profundizamos en estos sistemas de tratamiento de efluentes, ya sean domésticos o industriales, también mencionamos otros trabajos puestos en práctica por la i-UNAT y el Departamento de Ingeniería de Procesos de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en la misma línea que fueron desarrollados durante la compilación de este compendio y sirvieron de base para una Tesis Doctoral y, posteriormente, para su publicación en una revista científica internacional.

## 2.2. Objetivos de la Tesis

Las tecnologías de depuración de aguas residuales desarrolladas en este trabajo se basan generalmente en sistemas convencionales (SC), que no requieren una elevada inversión económica, así como costes de mantenimiento y energéticos. Por otro lado, este trabajo tiene como objetivo analizar y evaluar las diferentes tecnologías de depuración natural (SDN) que pueden ser aplicables a estos efluentes residuales, aportando una alternativa a su gestión. Y con base en la legislación vigente en Mozambique y comparada con los estándares internacionales y como base la agenda ODS 2030[3-13].

Los SDN son biorreactores con alta carga orgánica, periodos de retención hidráulica relativamente cortos, de 1 a 7 días, y muy bajo o nulo contenido de oxígeno durante todo el año. La remoción de contaminantes se debe principalmente a la combinación de una serie de procesos Físicoquímicos y bioquímicos, siendo este último realizado por una serie de bacterias y plantas típicas que forman parte del Proceso de Digestión Anaeróbica (DA) [12-

14]. El biofiltro es un sistema que imita los humedales naturales (pantanos), donde se depuran las aguas residuales mediante procesos naturales. Los biofiltros son humedales artificiales de flujo de efluentes, diseñados para maximizar la remoción de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales a pequeña escala, se rellenan a poca profundidad con un material que sirve como lecho filtrante, como arena, grava con diferentes granulómetros en los cuales los materiales pretratados de las aguas residuales fluyen de manera horizontal. o verticalmente [14].

Así, el principal objetivo de esta investigación fue analizar diversos tipos y características de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y, utilizando estas analogías, diseñar un sistema de tratamiento para la empresa azucarera de Mozambique y, con base en este sistema, evaluar su eficiencia en la eliminación de los efluentes generados por la fábrica.

### **2.3. Trabajos publicados**

Esta sección presenta una lista de trabajos publicados que incluye autores, título, fecha de publicación y referencia, así como datos relevantes sobre la revista; nombre, editorial, Posición y su Cuartil.

En esta secuencia enumeramos aquellos artículos en los que el doctorando aparece como investigador principal, otros relacionados con la misma línea de investigación donde se registra su participación como coautor. Y finalmente aparecen publicaciones que tienen que ver con aquellas colaboraciones científicas con otras líneas de investigación donde se produjeron sinergias en el trabajo cooperativo. Considerando todo ello como un aspecto esencial dentro de la actividad de cualquier investigador.

### 2.3.1. Como Autor Principal

TÍTULO: *Treatment of domestic effluents using sustainable biofilter methods.*

AUTORES (P.O. de firma): Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Nicolau Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Federico León Zerpa<sup>2</sup>; Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>; Sebastian Ovidio Perez Baez<sup>2</sup>

AFILIACIONES:

(1) Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), (Paulino.V.M.Muguirrima), [nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es](mailto:nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es), (Nicolau P.Chirinza)

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria; [federico.leon@ulpgc.es](mailto:federico.leon@ulpgc.es), (Federico Le\_on Zerpa), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es), (C.A. Mendieta-Pino), ; [sebastianovidio.perez@ulpgc.es](mailto:sebastianovidio.perez@ulpgc.es), (Sebastian Ovidio Perez Baez)

REVISTA: Desalination and Water Treatment

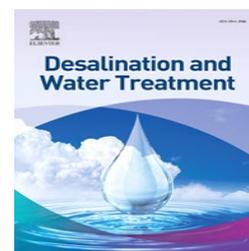
EDITORIAL: ELSEVIER BV

REFERENCIA: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100266>

LUGAR DE PUBLICACION: Tokio Marine Centre

FECHA DE PUBLICACION: ENERO 2024

FACTOR DE IMPACTO: 1.08



DESCRIPCIÓN	PUESTO	CUARTILE
WATER RESOURCES	132/170 (2023)	Q4

REVISADO POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

**TITULO:** *Evaluation of the Physico-Chemical Properties of Effluents from the Mozambique Sugar Company. a Proposal for Effluent Treatment*

**AUTORES (P.O. de firma):** Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Nicolau Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Federico León Zerpa<sup>2</sup>; Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>; Sebastian Ovidio Perez Baez<sup>2</sup>

**AFILIACIONES:**

(1) Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), (Paulino.V.M.Muguirrima), [nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es](mailto:nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es), (Nicolau P.Chirinza)

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria; [federico.leon@ulpgc.es](mailto:federico.leon@ulpgc.es), (Federico Leon Zerpa), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es), (C.A. Mendieta-Pino), ; [sebastianovidio.perez@ulpgc.es](mailto:sebastianovidio.perez@ulpgc.es), (Sebastian Ovidio Perez Baez)

**REFERENCIA:** DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>

**LUGAR DE PUBLICACION:** Mazarredo nº69 - 2º -- 48009-BILBAO (SPAIN)

**FECHA DE PUBLICACION:** Jan.-Dec. 2024

**FACTOR DE IMPACTO:** 1.08

**REVISADO POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES**



EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

TÍTULO: *Evaluación de las Propiedades Fisicoquímicas de los Efluentes de la Industria Azucarera de Mozambique.*

AUTORES: Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup>, Alejandro Ramos Martins<sup>2</sup>, Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11360>

REVISTA: DYNA Ingeniería e Industria. Vol. 100 n°2 | 30-37 | ISSN-L:

AFILIACIONES:

(1) Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), (Paulino.V.M.Muguirrima), [nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es](mailto:nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es), (Nicolau P.Chirinza)

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria; [federico.leon@ulpgc.es](mailto:federico.leon@ulpgc.es), (Federico Leon Zerpa), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es), (C.A. Mendieta-Pino), ; [sebastianovidio.perez@ulpgc.es](mailto:sebastianovidio.perez@ulpgc.es), (Sebastian Ovidio Perez Baez)



REVISTA: DYNA INGENIERÍA Y INDUSTRIA

EDITORIAL: DYNA- Ingeniería y tecnología del medio ambiente

REFERENCIA DOI: <https://doi.org/10.52152/D11360>

FACTOR DE IMPACTO: 1.352

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo n°69 - 2º -- 48009- BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: Marzo-Abril 2025

CATEGORIA	POSICION	QUARTIL
Dyna	128/181 (2023)	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

**TÍTULO: *Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company***

AUTORES (P.O.de firma): *Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup> , Nicolau Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Federico León Zerpa<sup>2</sup>; Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>; Sebastian Ovidio Perez Baez<sup>2</sup>*

AFILIACIONES:

(1) *Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es, (Paulino.V.M.Muguirrima), nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, (Nicolau P.Chirinza)*

(2) *Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria; federico.leon@ulpgc.es, (Federico Le\_on Zerpa), carlos.mendieta@ulpgc.es, (C.A. Mendieta-Pino), ; sebastianovidio.perez@ulpgc.es, (Sebastian Ovidio Perez Baez)*

REVISTA: *Sustainability*

EDITORIAL: *MDPI*

REFERENCIA: DOI:

<https://doi.org/10.3390/su16198334>

LUGAR DE PUBLICACION: *Basel-Switzerland*

FECHA DE PUBLICACION: *25 September 2024*

FACTOR DE IMPACTO: *3.3*



DESCRIPCIÓN CATEGORÍA	POSICIÓN:	Cuartil
SUSTAINABILITY	58/91 (2023)	Q2

REVISADO POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## 2.3.2. Como Colaborador en Artículos Relacionados Directamente con este Trabajo

TÍTULO: *Life-Cycle Analysis of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) Applied to Municipal Effluents.*

AUTORES: Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup>, Tania del Pino García<sup>2</sup>, Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>, Gilberto Martel<sup>3</sup> and Camila Gutierrez<sup>3</sup>

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.3390/w16182653>

REVISTA: WATER



### AFILIACIONES:

(1) Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; [nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es](mailto:nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es), (Nicolau P.Chirinza) [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), (Paulino.V.M.Muguirrima),

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria; [federico.leon@ulpgc.es](mailto:federico.leon@ulpgc.es), (Federico Le\_on Zerpa), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es), (C.A. Mendieta-Pino), ; ), Alejandro Ramos Martin [alejandro.ramos@ulpgc.es](mailto:alejandro.ramos@ulpgc.es), Tania García, [tania.garcia@ulpgc.es](mailto:tania.garcia@ulpgc.es),

(3) Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), Gobierno de Canarias, 35001 Canarias, España; [gmartel@itccanarias.org](mailto:gmartel@itccanarias.org), [camila\\_armellini@hotmail.com](mailto:camila_armellini@hotmail.com).

LUGAR DE PUBLICACIÓN: Water 2024, 16 (18), 2653.

FECHA DE PUBLICACIÓN: SEPTIEMBRE DE 2024

CATEGORIA	POSICION	QUARTIL
WATER RESOURCES	40/128	Q2

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

TÍTULO: *A Comparative Analysis of Brewery Effluents in Africa.*

AUTORES: Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup> and Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11361>

REVISTA: DYNA. INGENIERÍA Y INDUSTRIA. VOL.101, N.1.



AFILIACIONES:

(1) Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; [nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es](mailto:nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es), (Nicolau P.Chirinza) [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), (Paulino.V.M.Muguirrima),

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria(ULPGC).; [federico.leon@ulpgc.es](mailto:federico.leon@ulpgc.es), (Federico Le\_on Zerpa), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es), (C.A. Mendieta-Pino), Alejandro Ramos Martin [alejandro.ramos@ulpgc.es](mailto:alejandro.ramos@ulpgc.es),

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009- Bilbao (España)

FECHA DE PUBLICACIÓN: MAYO DE 2025

CATEGORIA	POSICION	QUARTIL
Ingeniería Multidisciplinar	128/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

**TÍTULO: *Caracterización de las Aguas Residuales de la Cervecería Mozambiqueña: Comparación de Características con Efluentes de Cervecerías de otros Países.***

AUTORES: *Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup> and Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>*

Referencia: DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11189>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. VOL.13, N.1.



AFILIACIONES:

(1) *Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, (Nicolau P.Chirinza) paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es, (Paulino.V.M.Muguirrima),*

(2) *Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria(ULPGC).; federico.leon@ulpgc.es, ( Federico Le\_on Zerpa), carlos.mendieta@ulpgc.es, (C.A. Mendieta-Pino), [alejandroramos@ulpgc.es](mailto:alejandroramos@ulpgc.es), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es) ; ), Alejandro Ramos Martin [alejandroramos@ulpgc.es](mailto:alejandroramos@ulpgc.es),*

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL- Mazarredo nº69 - 2º, 48009-BILBAO (España)

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

**TÍTULO: Extracto de Semilla de Moringa Oleifera como Coagulante en el Tratamiento del Agua Potable.**

AUTORES: Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup> and Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/D11359>

REVISTA: DYNA. INGENIERÍA Y INDUSTRIA. VOL.100, N.1.



AFILIACIONES:

(1) Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, (Nicolau P.Chirinza) paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es, (Paulino.V.M.Muguirrima),

(2) Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria(ULPGC).; federico.leon@ulpgc.es, ( Federico Le\_on Zerpa), carlos.mendieta@ulpgc.es, (C.A. Mendieta-Pino), [alejandroramos@ulpgc.es](mailto:alejandroramos@ulpgc.es), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es) ; ), Alejandro Ramos Martin [alejandroramos@ulpgc.es](mailto:alejandroramos@ulpgc.es),

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009- BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: ENERO DE 2025

CATEGORIA	POSICION	QUARTIL
Ingeniería Multidisciplinar	128/181	Q3

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

**TÍTULO: Proposal for the use of Moringa Oleifera Seed Extract as a Coagulant in the Treatment of Drinking Water.**

AUTORES: *Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Paulino Mariano Vasco Muguirrima<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup>, Alejandro Ramos Martin<sup>2</sup>, Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>*

REFERENCIA: DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11244>

REVISTA: DYNA ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. VOL.13, N.1.



**AFILIACIONES:**

(1) *Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique; nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es, (Nicolau P.Chirinza) paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es, (Paulino.V.M.Muguirrima),*

(2) *Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria(ULPGC).; federico.leon@ulpgc.es, (Federico Le\_on Zerpa), carlos.mendieta@ulpgc.es, (C.A. Mendieta-Pino), [alejandro.ramos@ulpgc.es](mailto:alejandro.ramos@ulpgc.es), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es);*

LUGAR DE PUBLICACIÓN: DYNA SL -- c) Mazarredo nº69 - 2º -- 48009- BILBAO (ESPAÑA)

FECHA DE PUBLICACIÓN: Jan.-Dec. 2024

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

**TÍTULO: *Optimización de Recursos Mediante Análisis de Pareto para Plantas Desalinizadoras de Agua de Mar.***

AUTORES: Nicolau Rafael Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Paulino Mariano Vasco Muguirrima<sup>1</sup>, Federico Leon Zerpa<sup>2</sup>, Alejandro Ramos Martin<sup>2</sup>, Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>

REFERENCIA: DOI: //doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100054

REVISTA: CLEANER WATER, vol. 2, 100054.



**AFILIACIONES:**

(1) *Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Zambeze (UniZambeze), Sofala, Mozambique;* [nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es](mailto:nicolau.chirinza101@alu.ulpgc.es), (Nicolau P.Chirinza) [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), (Paulino.V.M.Muguirrima),

(2) *Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria(ULPGC).;* [federico.leon@ulpgc.es](mailto:federico.leon@ulpgc.es), (Federico Le\_on Zerpa), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es), (C.A. Mendieta-Pino), [alejandroramos@ulpgc.es](mailto:alejandroramos@ulpgc.es), [carlos.mendieta@ulpgc.es](mailto:carlos.mendieta@ulpgc.es) ;

LUGAR DE PUBLICACIÓN: ELSEVIER Ltd

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2024

CATEGORÍA	POSICIÓN	QUARTIL
CLEANER WATER	128/181	Q2

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

### 2.3.3. Como colaborador en otros artículos

TÍTULO: *Solar dryer Technologies for Agricultural Products in Mozambique: An overview*

AUTORES: Fernando Chichango<sup>1</sup>, Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Luís Cristóvão<sup>2</sup>, Salvador Grande<sup>1</sup>,

REFERENCIA: DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i4.39850>,

REVISTA: Research, Society and Development



#### AFILIACIONES:

Fernando Chichango ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0613-921X>, E-mail: [chichango@gmail.com](mailto:chichango@gmail.com), Paulino Vasco Mariano Muguirrima [paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es](mailto:paulino.muguirrima101@alu.ulpgc.es), Luís Cristóvão ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-8102>, E-mail: [lumecristovao@gmail.com](mailto:lumecristovao@gmail.com), Salvador Grande ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5814-6545>

(1) Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique;

LUGAR DE PUBLICACIÓN: Campus Itabira, no Brasil

FECHA DE PUBLICACIÓN: 27/03/2023

CATEGORIA	POSICION	QUARTIL
RESEACH SOCIETY AND DEVELOPMENT	40/181	Q1

REVISIÓN POR AL MENOS DOS EXPERTOS INDEPENDIENTES

## 2.4. Justificación de la unidad temática de la Tesis

La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) permite la presentación de tesis doctorales en formato de compendio de publicaciones. Este formato consiste en la recopilación de varios artículos científicos relacionados y publicados por el doctorando durante su periodo de investigación. Según el REGLAMENTO 1/2023, DE ESTUDIOS DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, para la presentación de tesis por compendio de publicaciones será necesario:

1.- Un mínimo de tres publicaciones, con unidad temática, indexadas en el Journal Citations Reports, Arts and Humanities Citation Index o equivalentes, de las que el doctorando sea el primer autor o autor principal. Al menos una de ellas deberá haber sido publicada en una revista cuyo índice de impacto la sitúe dentro de la primera mitad en orden decreciente de índice de impacto entre las revistas del área. Se considerarán publicaciones equivalentes aquellas que se recojan en los procedimientos de la última convocatoria de obtención de sexenios de investigación en cada campo.

2.- Para acreditar la condición de autor principal, esta deberá ser reconocida por el resto de los autores de las publicaciones presentadas como núcleo de la tesis doctoral, al mismo tiempo que estos deberán renunciar a utilizar estas publicaciones como núcleo principal de otras tesis doctorales, sin perjuicio de que dichas publicaciones puedan ser presentadas como méritos complementarios en las tesis doctorales que pudieran presentar los otros autores de dichas publicaciones. El documento de Autoría Principal Tesis de Compendio de Publicaciones se encuentra disponible en dos versiones (inglés y español).

3.- En áreas de especial incidencia tecnológica dos de estas publicaciones podrán ser sustituidas por patentes en explotación o publicaciones en congresos reconocidos por la CNEAI en sus baremos para la obtención de sexenios.

4.- Que en las publicaciones o patentes conste la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria a través de la afiliación del doctorando y del director en su caso. Las tesis doctorales presentadas como compendio de publicaciones deberán ajustarse, en todo caso, al formato establecido en los artículos 21 a 23 del REGLAMENTO 1/2023, DE ESTUDIOS DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA y contener los apartados siguientes:

- Una introducción en la que se presenten los objetivos de la tesis, los trabajos publicados y la justificación de la unidad temática de la tesis;
- Una copia de los trabajos publicados;
- las conclusiones finales.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

- La Comisión Académica es el órgano encargado de verificar que el contenido de la tesis reúne los requisitos previstos por la norma para ser defendida bajo esta modalidad.

A continuación, mencionaremos los artículos que sirven como hitos para estas tesis doctorales

### **Artículo 21. Contenido de la tesis doctoral**

1. *La tese doctoral consistirá en un trabajo Original de Investigación elaborado por el doctorando sobre un tema relacionado con el campo Científico, técnico o artístico, propio del del Programa de Doctorando en que se encuentre matriculado.*
2. *El trabajo Contendrá, al menos, una introducción, o estado de la cuestión, los objetivos planteados, la metodología desarrollada, los resultados y la discusión sobre los mismos, así como las conclusiones más relevantes y la bibliografía utilizada. No será necesario que tales contenidos figuren en epígrafes específicos en el documento final que se presente.*

### **Artículo 22. Lengua de la tesis doctoral**

1. *La tesis podrá ser desarrollada y, en su caso, defendida, en los idiomas habituales para la comunicación científica en su campo de conocimiento.*
2. *En el caso de tesis doctorales escritas en una lengua distinta a la da española se deberá apartar un resumen en español sobre el contenido de esta, de una extensión de entre 3 y 15 páginas, en el que se incluyan los objetivos y las conclusiones.*

### **Artículo 23. Formato de la memoria de tesis**

1. *Em la cubierta de todas las tesis deberá figurar el logotipo, conforme a lo establecido en el manual de identidad visual corporativa, el nombre de la universidad de Las Palmas de gran Canarias, y el nombre del Programa de Doctorado, titulo de la tesi, autor, fecha y lugar.*
2. *El ejemplar de la tesis para el depósito contendrá una pagina inicial, en blanco, en la que los servicios administrativos de la universidad harán constar, en su momento, el tribunal, calificación global otorgada, fecha y firmas.*
3. *La siguiente página a la dejada en blanco contendrá los siguientes datos: el mencionado logotipo,el nome de la Universidad de Las Palmas de Gran Canarias, el nombre del programa doctoral, el titulo de esta, nombre y firmas del autor y director o directores, asi como el luaar y fecha de finalización de la teses.*

Cumplimiento de requisitos: Esta tesis por compendio cumple con todos los requisitos establecidos por la ULPGC y reglamentos para su presentación y validación.

La unidad temática de esta Tesis Doctoral por compendio se basa en que el trabajo realizado constituye una línea de investigación propuesta en el plan de investigación presentado y aprobado por el programa DOCARNA, y a través de los artículos la correspondencia entre el enfoque de investigación, el método seguido y los resultados obtenidos fueron publicados en varias revistas. Aunque en cada uno de los artículos se seleccionó un modelo SDN típico para presentar el problema, todos coinciden en los siguientes aspectos; (1) Se

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

trata de tecnologías de mecanización libre. (2) También se basan en sistemas de flujo libre. Copian los procesos que ocurren en lagos y ríos donde el movimiento del contaminante se debe a la existencia de un gradiente de concentración, temperatura y la presencia de un campo de velocidades en el fluido. eso dependerá de los caudales establecidos al cargar y descargar el sistema. (3) La biodegradación del contaminante se debe fundamentalmente al metabolismo de microorganismos anaeróbicos en los que la radiación solar ha sido fundamental en estos procesos (Upwelling).

Es por eso que cada una de estas publicaciones mantiene una conexión con el resto a través de una secuencia que tiene que ver con la evolución del trabajo donde comenzamos con sistemas SDN de pequeño flujo para biofiltros, aquellos de mayor caudal, estanques naturales de purificación y una interconexión con manuscritos publicados a través de un modelo y una metodología básica. Por lo tanto, estos artículos fueron elaborados a través de un trabajo de investigación bien definido y planificado, orientado al desarrollo del diseño y manejo de sistemas de depuración natural (SDN) donde ocurren procesos anaeróbicos, en su totalidad o en parte. Uno de los aspectos innovadores presentados en estos trabajos y, por tanto, aparece como nuestro más importante, es que por primera vez se analizaron las características físico-químicas de los efluentes industriales, en base a estos resultados se realizó una investigación para diseñar el método más innovador, eficaz sistema adecuado para el sistema de tratamiento de aguas residuales de las fábricas de azúcar de Mozambique que, por su naturaleza y características comunes, puede ser replicado con mayores investigaciones para todas las fábricas de azúcar existentes en el País, sistema que funciona desde la época colonial pero sin un sistema de tratamiento adecuado, ocasionando así varios problemas al ecosistema en dichas regiones, todas las empresas azucareras no cuentan con un sistema de tratamiento para sus efluentes, este sería el modelo más adecuado para este fin y además sería económicamente viable.

En total, Mozambique cuenta con 4 fábricas de azúcar, a saber: Chinavane y Marragra en el sur, Mafambisse y Marromeu en el centro, pero ninguna de ellas cuenta con sistemas de pretratamiento asociados a la alta temperatura a la que estas aguas salen de los condensadores, mezclas con azúcar y son vertidos directamente a cuerpos líquidos (grandes ríos que pasan por estas regiones donde se ubican estas fábricas, como Limpopo(zona sur), Pungue y Zambezi en la zona Central, que cada año llevan varios caudales de agua a cuencas hidrográficas más grandes de El banco de Sofala, El banco de Sofala es donde se produce la mayor captura de peces del país[15], asociado a esto se encuentran varias áreas donde se practica la agricultura, así como organismos acuáticos y marinos que son una de las mayores bases de supervivencia de las comunidades mozambiqueñas[15].

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

A continuación, describiremos cómo desarrollamos la investigación desde sistemas que utilizan menores caudales hasta sistemas con mayores caudales, pero con el mismo sistema que se aplica en la depuración de aguas residuales.

Con el artículo **Tratamiento de efluentes domésticos mediante métodos de biofiltración sostenibles**, se acerca un enfoque educativo a nivel de la comunidad universitaria (docentes y estudiantes de ingeniería a nivel de pregrado y posgrado) a los procedimientos técnicos para la construcción de un sistema de tratamiento de efluentes domésticos. desde baños o cocinas, a través de un biofiltro casero que ha sido compuesto por arena y grava y su serie de diseños entre medios filtrantes con diferentes granulometrías, diseñados según las características de los efluentes y aplicados en procesos de depuración física y biológica. Estas tecnologías benefician a poblaciones de bajos ingresos que no cuentan con sistemas de saneamiento convencionales, o a cualquier persona interesada en instalar sistemas de saneamiento descentralizados en comunidades periurbanas o rurales. Para esta propuesta, el trabajo consistió en tratar las aguas negras provenientes de la cocina de uno de los comedores y del WC de UNIZAMBEZE-FCT (Universidad de Zambeze - Facultad de Ciencia y Tecnología). Los parámetros físicos y químicos de los efluentes fueron analizados en los laboratorios de análisis de agua disponibles en los campos universitarios de Unizambeze-FCT, luego sometidos a procesos de tratamiento físico y biológico por biofiltros, donde a la salida de cada filtro fueron analizados según variaban los parámetros.

A continuación, analizamos su eficiencia en la reducción de la carga contaminante y evaluamos situaciones en las que tendríamos mayores rendimientos para procesos biológicos y químicos dependiendo del tiempo de residencia en cada medio filtrante.

**En el segundo artículo lo subdividimos en dos: *Evaluation of the Physico-Chemical Properties of Effluents from the Mozambique Sugar Company. a Proposal for Effluent Treatment*, y *Evaluación de las Propiedades Fisicoquímicas de los Efluentes de la Industria Azucarera de Mozambique*:** nos centramos en el foco principal de nuestro objeto de estudio, que serían las aguas residuales de las empresas azucareras, que era la Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de los efluentes de la empresa azucarera de Mozambique. Para una Propuesta de Tratamiento de Efluentes, primero analizamos las diferentes fuentes de efluentes y luego elegimos 3 puntos principales donde se generaban estos efluentes, en el área de bombas, calderas y en los talleres. Luego los separamos en porta muestras de plástico tipo PET bien identificados para analizar su constitución, los datos se proyectaron en tablas donde se describieron los valores de Temperaturas, pH, DBO, DQO, Dureza, Alcalinidad, Cloroformos, Turbidez, Conductividad, TDS, TSS, Fósforos y Nitrógeno. Con estos parámetros del agua (físicos y químicos), los más importantes para definir los sistemas de depuración son la temperatura y la relación DQO/DBO (su carga contaminante), dependiendo de esta relación se elige el mejor método de tratamiento de los efluentes de nuestra industria azucarera.

**En el tercer artículo** nos centramos en la secuencia del segundo, conociendo las características de los efluentes, donde verificamos altos niveles de sustancias disueltas o suspendidas, sólidos, materia orgánica, lodos prensados, bagazo y contaminantes atmosféricos. La relación DBO/DQO es baja ( $<2,5$ ), lo que indica la necesidad de un tratamiento secundario o, más específicamente, un tratamiento biológico, esto se puede lograr mediante sistemas húmedos contruidos a partir de lagunas de estabilización aeróbicas y anaeróbicas, humedales o una combinación de estos, con. el agua a tratar, abriendo escenarios para su reutilización en procesos fabriles o riego agrícola, así definimos el alcance del estudio como el Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento de Efluentes de una Empresa de la caña de azúcar en Mozambique. También se desarrolló una propuesta educativa para estudiantes de ingeniería donde aprenden a calcular y optimizar, entre otros parámetros, el tratamiento natural de aguas residuales y compararlo con el tratamiento convencional aplicado. Con un caudal de entrada de  $900\text{m}^3$  estimamos tiempos de residencia de 20 días, calculamos el área requerida y evaluamos la concentración de DBO y DQO degradables por día, con esto podemos estimar para toda la campaña que normalmente es de 6 meses. También hicimos una estimación para cada tipo de laguna, así como la combinación entre ellas y finalmente proyectamos cuántas lagunas se necesitarían para cada tipo de escenario.

### 3. Investigación Bibliográfica

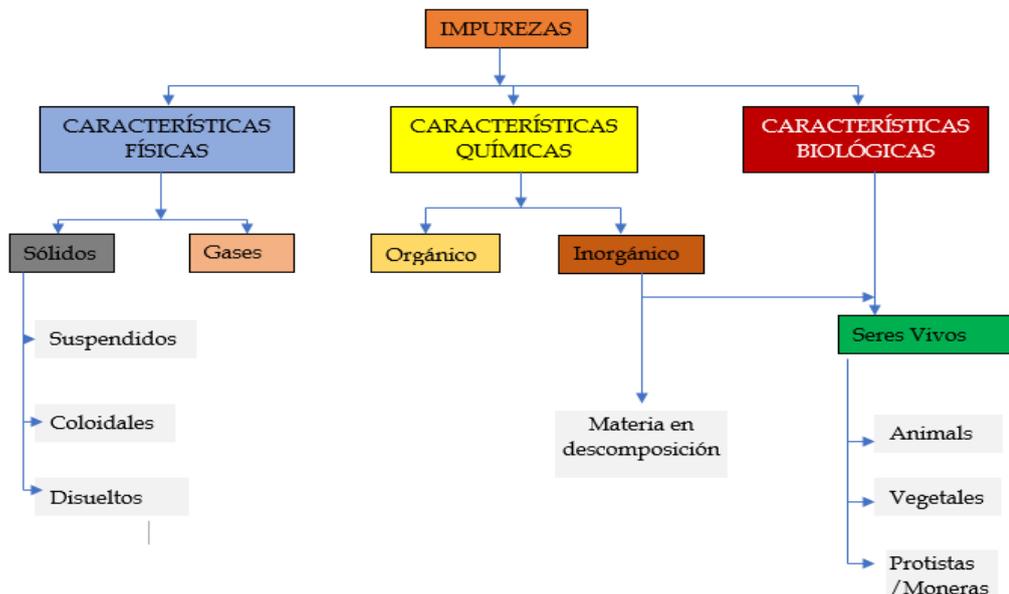
#### 3.1. Agua residual

Las aguas residuales son aguas que han sido utilizadas en procesos humanos y han resultado contaminadas o alteradas en su composición natural, haciéndolas no aptas para el consumo y para ser liberadas directamente al medio ambiente sin tratamiento previo. Esta agua puede contener sustancias químicas, materia orgánica e inorgánica, sólidos en suspensión, patógenos y otros contaminantes. Generalmente, las aguas residuales provienen de actividades domésticas, comerciales, industriales y agrícolas [15]. El agua

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

tiene varios componentes o impurezas que se pueden dividir en características físicas, químicas y biológicas, como se muestra en la Figura 1

Figura 1. Características das aguas residuales



Fonte: el autor

Las aguas residuales de la industria azucarera se generan principalmente durante el procesamiento de la caña de azúcar para producir azúcar, etanol y otros subproductos. Este tipo de efluente contiene altos niveles de materia orgánica e inorgánica, así como compuestos específicos resultantes del procesamiento de la caña de azúcar. Las principales características incluyen: DBO alta que indica la cantidad de materia orgánica que puede ser biodegradada; alta DQO Representa la cantidad total de compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden oxidarse; Sólidos Suspendidos Totales (SST); Conductividad y TDS (Sólidos Disueltos Totales): A veces asociados con la presencia de sales disueltas y sustancias iónicas; Debido al calentamiento y a los compuestos utilizados, los efluentes de la industria azucarera generalmente presentan altas temperaturas y variaciones de pH, Fósforo y Nitrógeno que provienen del uso de fertilizantes y otros aditivos químicos, que aumentan la carga de nutrientes en las aguas residuales[16]. Estas características hacen que los efluentes de la industria azucarera sean un desafío para el tratamiento convencional, requiriendo métodos específicos, como sistemas de depuración naturales.

## **3.2. Sistemas de Depuración Natural Aplicados en el Tratamiento de Aguas Residuales**

Los sistemas de purificación natural, también conocidos como sistemas de tratamiento biológico, utilizan procesos naturales para eliminar los contaminantes de las aguas residuales. Son especialmente útiles en regiones con acceso limitado a recursos tecnológicos y financieros para construir y mantener instalaciones de tratamiento convencionales. Estos sistemas comunes incluyen:

### **3.2.1. Lagunas de Estabilización**

Las Lagunas de estabilización son sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan procesos naturales para degradar la materia orgánica y eliminar contaminantes. Estos sistemas consisten en grandes tanques o reservorios excavados en el suelo, donde se mantienen las aguas residuales durante un período de tiempo para que los contaminantes puedan ser depurados mediante procesos biológicos y físicos. Se utilizan ampliamente porque son de bajo costo, fáciles de operar y mantener, y porque dependen de procesos naturales para su tratamiento y pueden subdividirse en:

#### **3.2.1.1. Lagunas Anaeróbicas**

Son un tipo de unidad para el tratamiento de efluentes de fácil construcción, que consiste básicamente en movimiento de tierras, excavación y preparación de taludes (entre 3 y 5 metros) donde se produce la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, Recomendado para efluentes con una alta carga orgánica, como las de la industria de alimentos y bebidas, la materia orgánica es digerida por microorganismos anaeróbicos, lo que resulta en la producción de biogás (metano y dióxido de carbono), el efluente fluye lentamente aguas arriba y aguas abajo a lo largo de la laguna donde ocurre el proceso de tratamiento de forma natural;

#### **3.2.1.2. Lagunas Facultativas**

Generalmente tienen una profundidad media (entre 1 y 2,5 metros) y combinan zonas aeróbicas (con oxígeno) en la superficie y zonas anaeróbicas en el fondo, aquí los microorganismos aeróbicos en la superficie descomponen la materia orgánica, mientras que los microorganismos anaeróbicos actúan en el fondo de la laguna. Y son recomendados para tratamiento secundario, posterior a la laguna anaeróbica, y son eficientes en la remoción de materia orgánica y patógenos. Sin embargo, a diferencia de una laguna aeróbica facultativa, las bacterias anaeróbicas trabajan más lentamente, requiriendo un período de residencia más largo, que oscila entre 3 y 5 días en la laguna anaeróbica. La remoción de DBO es sólo parcial, variando del orden del 50% al 60%, al no llegar a la cantidad mínima de remoción requerida, se utilizan lagunas anaeróbicas en conjunto con el sistema de lagos facultativos, también conocido como sistema australiano, que termina hasta aliviar la carga orgánica dispuesta

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

opcionalmente, reduciendo sus dimensiones, ahorrando espacio, reduciendo la superficie utilizada alrededor de 1/3, reduciendo consecuentemente costes en adquisición de suelo. Otro hecho es que las lagunas anaeróbicas a diferencia de la laguna facultativa, la laguna anaeróbica tiene dimensiones más pequeñas, donde en muchos lugares cada vez escasea una gran superficie para la construcción, tiene una mayor profundidad, provocando que la fotosíntesis sea casi nula, reduciendo la superficie del área. contacto, haciendo que el consumo de oxígeno sea mayor que la producción de  $O_2$ , creando una condición favorable para los microorganismos anaeróbicos;

### 3.2.1.3. *Lagunas de Maduración.*

Tiene forma de lagunas poco profundas (0,5 a 1,5 metros), enfocadas a eliminar patógenos y pulido final del agua. Su proceso de purificación depende de la luz solar y de la presencia de oxígeno en la superficie para eliminar organismos patógenos mediante radiación ultravioleta y oxidación. Generalmente son la última etapa del sistema de lagunas de estabilización, mejorando la calidad microbiológica del efluente [5-17]. La figura muestra una representación de un estanque de estabilización aeróbica.

Figura 2. Características das aguas residuales



Fonte (conagua.2015b)

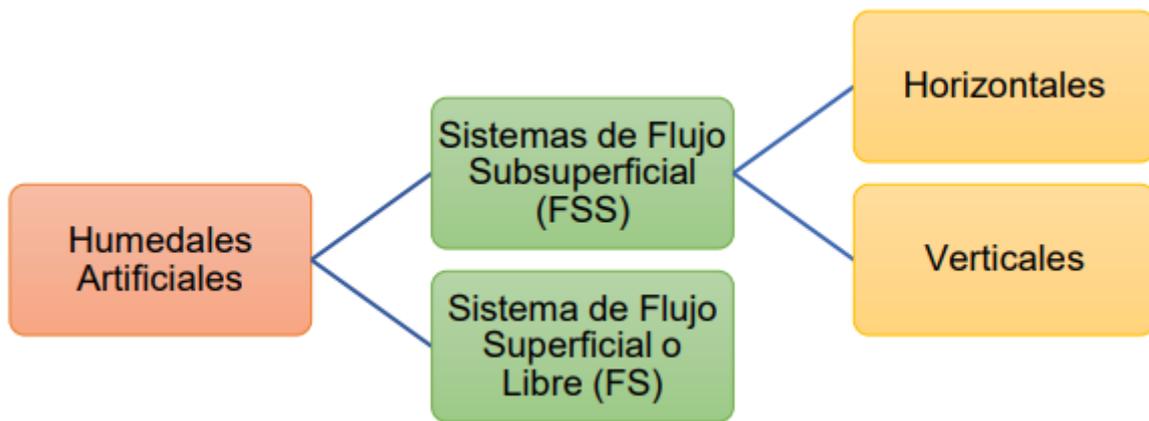
### 3.2.2. **As wetlands construídas (AW), o humedales artificiales**

Los humedales artificiales (AW) son sistemas de tratamiento de aguas residuales que simulan las condiciones naturales de áreas inundadas, como pantanos o humedales, donde las plantas acuáticas, los microorganismos y los sustratos trabajan para eliminar los contaminantes. Estas áreas están diseñadas para promover la depuración de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas, aprovechando procesos naturales para tratar el agua de forma eficiente, sostenible y con menor consumo energético. Los humedales artificiales ocupan un

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

lugar importante ya que el objetivo con ellos es aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren cuando el agua interactúa entre sí, el medio filtrante, las plantas, los microorganismos y la atmósfera. Implica la remoción de sólidos en suspensión por sedimentación y filtración, hasta la biodegradación de la materia orgánica por microorganismos aeróbicos y anaeróbicos y la eliminación de microorganismos patógenos por sedimentación, filtración y acción depredadora de otros organismos, además de lograr la remoción de metales pesados por precipitación y absorción, y por reducción de hidróxidos y sulfuros [18]. Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: los de flujo superficial (FWS - Free Water Surface) y los de flujo subsuperficial (SFS - Sub Surface Flow)[5-18].

Figura 3. Clasificación de los humedales artificiales.



Fuente: Lara Acosta, Marimar et al

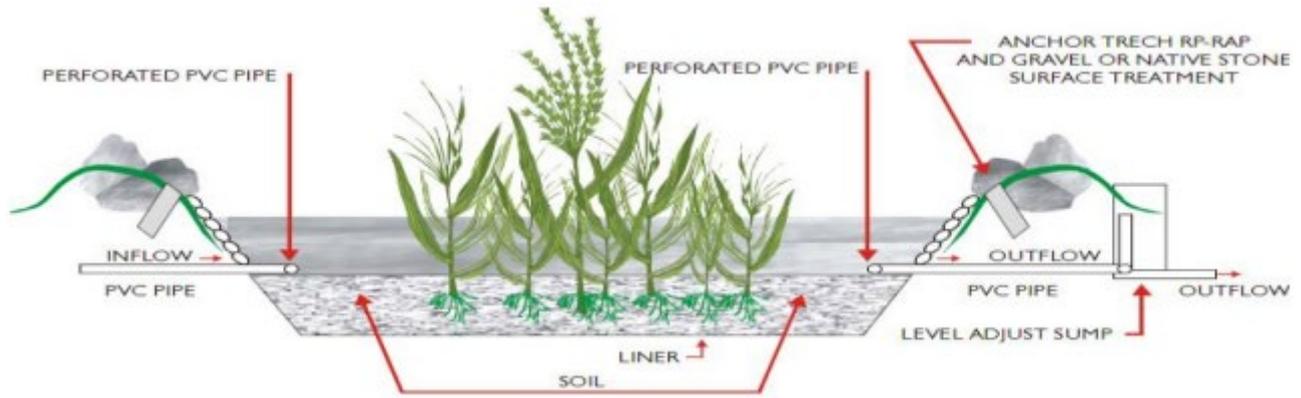
### 3.2.2.1. Humedal artificial de flujo superficial

Consiste en canales con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable, o con una cubierta impermeable, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros [19]. El tratamiento se produce durante la circulación lenta del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación. Este sistema se puede dividir, de acuerdo con el tipo de macrófitos, en:

- **Sistemas con Macrófitas flotantes:** formados por grandes lagunas con bajos niveles de agua y provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie. Sus raíces sumergidas tienen un buen desarrollo[20] (Figura 4).

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Figura 4. Humedal de flujo superficial



Fuente: Lara Acosta, Marimar et al. (2021)

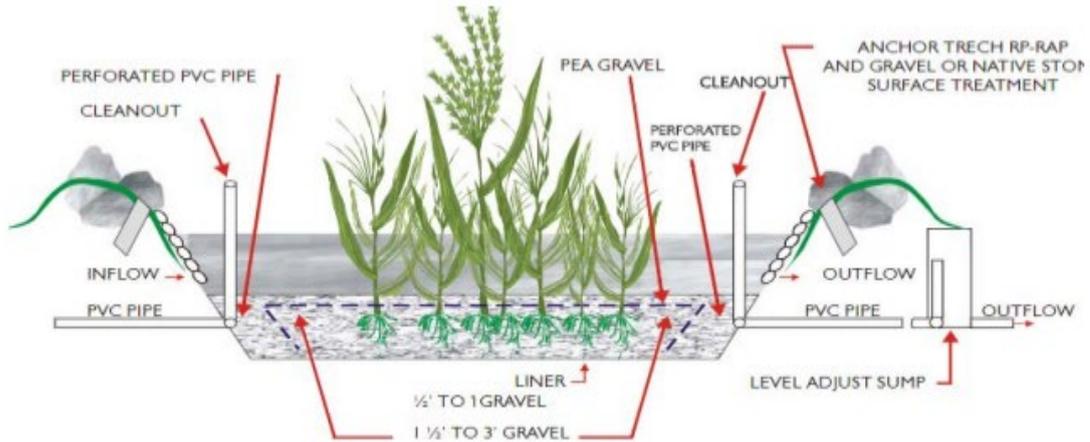
- **Sistemas con macrófitas sumergidas:** compuestos por lagunas con bajo nivel de agua y plantadas con plantas macrófitas cuyo tejido fotosintético está totalmente sumergido. Estas plantas solo crecen bien en aguas que contienen oxígeno disuelto, por lo cual no se utilizan para aguas residuales con alto contenido de materia orgánica biodegradable ya que la descomposición microbiana provoca condiciones anóxicas[20,21].

### 3.2.2.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes que consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular. Estos humedales se clasifican a su vez en humedales artificiales de flujo horizontal y humedales artificiales de flujo vertical, según la manera como las aguas residuales pretratadas atraviesen el lecho filtrante[21,22].

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

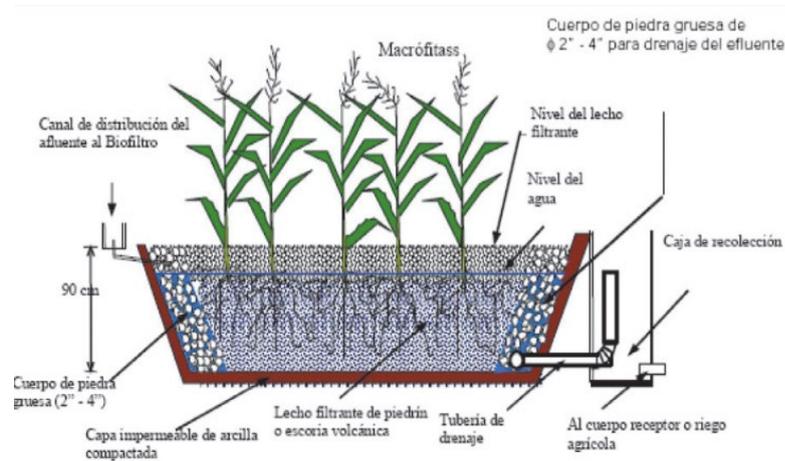
Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial.)



Fuente: Lara Acosta, Marimar et al. (2021)

- **Humedales de flujo horizontal:** En este tipo de humedal las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta la superficie de recolección del efluente (Figura 3)[23,24].

Figura 6. Sección longitudinal de un biofiltro de flujo horizontal

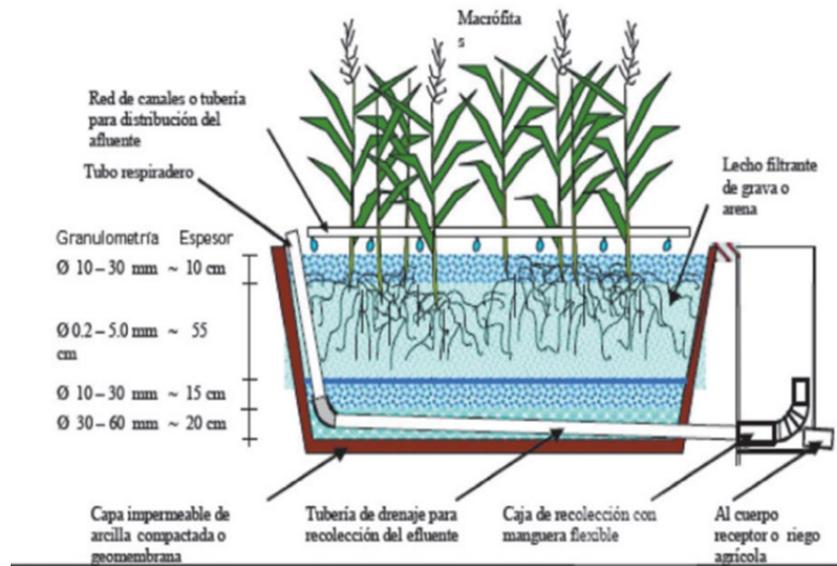


Fonte (WSP, 2010)

- **Humedal artificial de flujo vertical:** Aquí las aguas pretratadas se distribuyen de manera uniforme e intermitente sobre la superficie del lecho filtrante y luego percolan hacia la zona de recolección.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Figura 7. Humedal subsuperficial de flujo vertical



Fuente (CIEMA, 2010)

## 3.3. Componentes de un humedal artificial

### 3.3.1 Agua Residual

Las aguas residuales municipales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal [25].

### 3.3.2 Sustrato

El sustrato es el parámetro de diseño crítico en HA, en particular, ya que puede proporcionar un medio de cultivo adecuado para la planta y también permitir el movimiento exitoso de las aguas residuales. Por otra parte, la sorción sustrato puede jugar el papel más importante en la absorción de diversos contaminantes, tales como fósforo [26].

### 3.3.3. Vegetación

El mayor beneficio de la vegetación es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración de la tierra o medio de soporte y transporta el oxígeno de manera más profunda de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Lo más importante en los humedales artificiales es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de microorganismo [27].

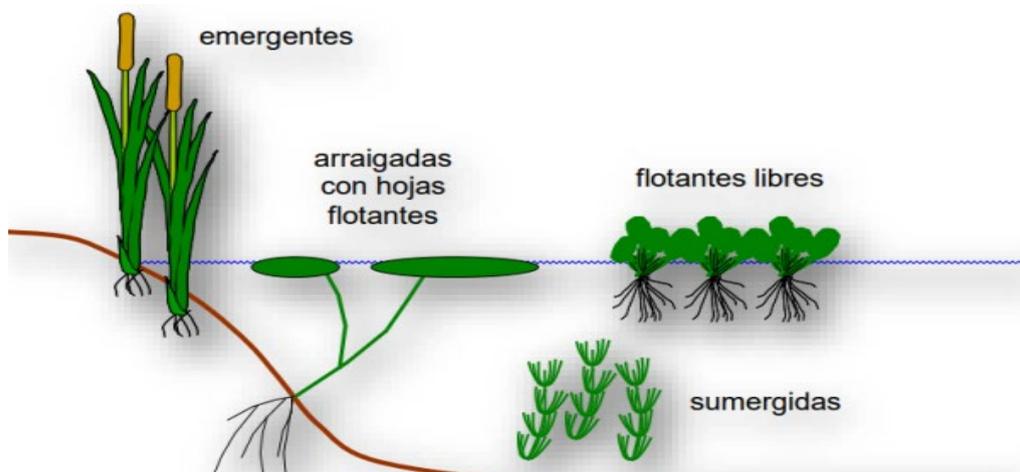
### 3.3.4. Microorganismos

Los microorganismos son los encargados de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera se desarrollan colonias de microorganismos aerobios; en el resto del lecho granular predominan los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato, afectando la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera [28].

### 3.3.5. La vegetación en los humedales artificiales

Una característica que distingue los humedales artificiales de otro tipo de tratamiento final de efluentes, es la presencia de vegetación. La vegetación en los HA presenta un efecto termorregulador que promueve una variedad de procesos biológicos y químicos, aumentando el efecto de filtrado y la porosidad en toda la distribución de las raíces, captando y almacenando algunos nutrientes esenciales en sus tejidos y actuando como reacción de purificación al mejorar la diversidad del proceso en la rizosfera. Por lo tanto, conocer el tipo de plantas y el papel que desempeñan es clave en el proceso de selección de especies para los HA [29].

Figura 8. Formas de crecimiento de la macrofitas en los humedales artificiales



Fuente: Lara Acosta, Marimar et al. (2021)

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Actualmente, existen reportes de más de 150 especies de macrófitos que han sido utilizados en AW. Entre las especies emergentes comúnmente utilizadas se encuentran *Phragmites* spp. (Poaceae), *Typha* spp. (Typhaceae), *Scirpus* spp. (Cyperaceae), *Iris* spp. (Iridáceas), *Juncus* spp. (Juncaceae) y *Eleocharis* spp. (Cyperáceas). Mientras tanto, las plantas sumergidas de uso frecuente incluyen: tomillo (*Hydrilla verticillata*), cola de caballo (*Ceratophyllum demersum*), milenrama de agua de hoja espiral (*Myriophyllum verticillatum*), hierba de cinta (*Vallisneria natans*) y alga rizada (*Potamo-geton crispus* [11]; también otras plantas flotantes plantas, tales como: nenúfares (*Nymphaea tetragona*), franja acuática (*Nymphoides peltata*), abrojo acuático (*Trapa bispinosa*), trébol acuático europeo (*Marsilea quadrifolia*), jacinto acuático común (*Eichhornia crassipes*), helecho flotante (*Sal-vinia*). El sapo rana (*Hydrocharis dubia*) y la lenteja de agua común (*Lemna minor*) también se han utilizado en AW [27,28,29].

Figura 9. Plantas típicas utilizadas en humedales artificiales a) Espadaña (*Typha latifolia*); b) Juncos (*Scirpus*); c) Papiro (*Cyperus payrus*); d) Carrizo (*Phragmites australis*); e) Lenteja de agua (*Lemna Sp*); f) Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).



Fuente: Fuente: Lara., 2020

### 3.4. Sistema de Lodos Activados

El sistema de lodos activados es un proceso biológico que se produce mediante agitación y aireación del efluente de aguas residuales en el reactor de aireación para separar los lodos activados de las aguas residuales mediante sedimentación en decantadores. En el reactor aireado se producen reacciones bioquímicas para eliminar la materia orgánica, en algunos casos nitrógeno y fósforo.

En el decantador se sedimentan los sólidos (biomasa), permitiendo tratar el efluente final. Parte de los sólidos depositados en el fondo del decantador se recircula al reactor, para mantener allí la concentración deseada de biomasa, lo que es responsable de la alta eficiencia del sistema. Otra porción de los lodos, en menores cantidades, se retira para tratamiento específico o disposición final, los llamados lodos sobrantes. Este sistema está muy extendido, esto se debe principalmente a la alta calidad del efluente y a que ocupa una superficie pequeña. Sin embargo, el sistema de lodos activados incluye un mayor nivel de mecanización que otros sistemas de tratamiento, lo que implica una operación más sofisticada y costosa. Otros factores que se presentan como desventajas respecto al uso de lodos activados son el consumo de energía eléctrica para la aireación y la mayor producción de lodos [30,31].

### 3.5. Filtro Biológico

Los filtros biológicos son simples y tienen bajos costos operativos [32]. A pesar de lo que su nombre indica, la función de los filtros biológicos no es filtrar, sino dar soporte a los microorganismos que forman una película sobre el material. Estos microorganismos degradan la materia orgánica del efluente sanitario que es sometido al filtro. Sólo en el caso de los biofiltros aireados sumergidos, que utilizan medios de soporte granulares con diámetros del orden de milímetros, se produce la filtración propiamente dicha. Constituyen sistemas aeróbicos donde el aire, de forma natural o forzada, circula en los espacios vacíos entre el medio de soporte, proporcionando oxígeno para que los microorganismos respiren. El material utilizado como medio de soporte depende principalmente de la disponibilidad local de material adecuado y de sus costos de transporte y montaje. En general se utilizan cantos rodados, gravas, escorias de hornos de fundición y otros materiales inertes [32]. Sin embargo, actualmente se ha dado preferencia a los soportes sintéticos, como el plástico (PVC), por ser más ligeros y tener una superficie de exposición mucho mayor que los soportes tradicionales.

Los filtros biológicos tienen variantes según la carga a aplicar y el tipo de recirculación a adoptar. Entre estas variantes, la NBR 12.209 menciona: filtro biológico percolador, filtro aireado sumergido, biofiltro aireado sumergido y biodisco o rotor biológico de contacto y sus variantes. Según [32,33], todos estos sistemas pueden utilizarse como postratamiento de efluentes de reactores anaeróbicos [33].

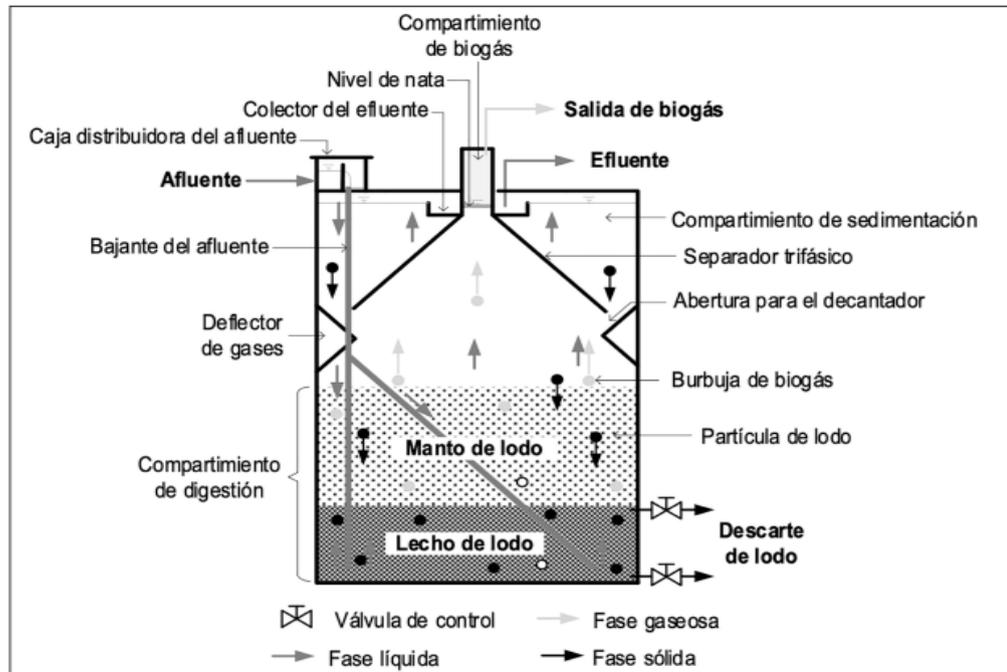
### 3.6. Reactor de Manta de Lodo (UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA) y manto de lodo (*reactores UASB por sus siglas en inglés para Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) fueron desarrollados en la década de los años 1970 en la Universidad de Wageningen (Holanda), gracias al notable trabajo del profesor Gatze Lettinga y sus colaboradores. En su etapa inicial esta tecnología fue conceptualizada para el tratamiento anaeróbico de aguas industriales con elevadas cargas orgánicas y alta biodegradabilidad (industrias de azúcar de remolacha, almidón de papa,

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

cervecerías, entre otros) [33,34]. La estabilización de la materia orgánica ocurre en el lecho de lodos y en la manta debido al flujo ascendente de aguas residuales. Debido a la digestión anaeróbica se forman gases, principalmente metano y dióxido de carbono, los cuales son separados y acumulados en una estructura denominada separador trifásico ubicada en la parte superior del reactor. Esta estructura también se encarga de separar el efluente tratado y retenerlo. la biomasa en el sistema[35,36]. El tiempo de retención hidráulica es del orden de 6 a 10 horas[36]. Por lo general, disminuir la tasa de carga orgánica (OLR) que reduce la concentración del influente o prolongando el tiempo de retención hidráulica (TRH), mejorando la alcalinidad del afluente y la tasa de reflujo generalmente se impulsan como estrategias de ingeniería para restaurar el UASB sufrido [37]. La eficiencia del Reactor UASB es del 60 al 75% en la remoción de DBO y del 65 al 80% de SS [37,38,39], y por lo tanto, para cumplir con los estándares de emisión de la legislación ambiental se necesita un tratamiento complementario, normalmente realizado con procesos aeróbicos. El tratamiento en fase sólida implica deshidratación y disposición final[40].

Figura 10. Esquem del reactor UASB



Fonte: Schneiders, D. apud Lettinga et al.; Chernicharo et al. (2013)

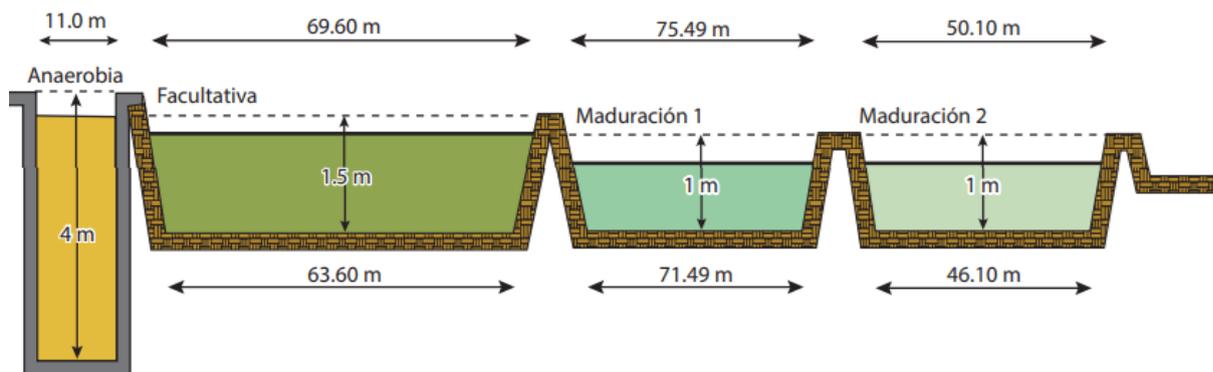
Cada sistema de tratamiento mencionado anteriormente tiene sus características específicas en la laguna opcional donde podemos tener procesos aeróbicos y anaeróbicos, las aguas residuales fluyen continuamente por todo el sistema y permanecen allí por muchos días. Las bacterias anaeróbicas tienen una tasa metabólica de reproducción más lenta que las bacterias aeróbicas. La remoción de DBO es del orden del 50 al 70%, aunque insuficiente, representa un gran aporte, reduciendo sustancialmente la carga a la laguna facultativa ubicada aguas abajo. La laguna opcional recibe una carga de sólo del 30 al 50% de la carga del efluente crudo[39,40], lo que por tanto le permite tener menores dimensiones. El requisito general de

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

área (laguna anaeróbica + laguna facultativa) es tal que se logra un ahorro de tierra del orden de  $1/3$ , en comparación con una sola laguna facultativa[40].

Se implementan diversas técnicas como una forma de reducir aún más el volumen del tanque aireado y aumentar el nivel de aireación por unidad de volumen de la laguna, creando así turbulencias que, además de asegurar la oxigenación, permiten mantener todos los sólidos en suspensión en el medio líquido, aumentando así su nivel de eficiencia. Pero tiene el inconveniente de que la biomasa queda suspendida en todo el volumen y sale junto con el efluente desde la laguna hacia el cuerpo receptor. Pero también se pueden diseñar con una de las dos configuraciones siguientes: (a) tres o cuatro estanques en serie o (b) un solo estanque con deflectores, como se ilustra a continuación.

Figura 11. Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración



Fonte (Facundo Cortés Martínez, et all 2017)

Entre los sistemas alternativos de tratamiento de efluentes, los Humedales Artificiales surgen como una solución a los problemas de aguas residuales en las zonas rurales. La viabilidad de estos sistemas se debe al bajo costo de implementación y operación, su eficiencia en la desinfección de aguas residuales, sin necesidad de aditivos químicos, su atractivo sustentable, además de su belleza estética y armonización con el medio ambiente. El sistema promueve una remoción complementaria de materia orgánica en la masa filtrante con la remoción de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, a través de los procesos de adsorción en el material filtrante, transformación biológica y absorción en la biomasa vegetal, demostraron estudios que un humedal de tratamiento flotante (FTW) utilizando sustratos artificiales (AS) Perifiton mostraron eficiencia en eliminación de nitrógeno de 60.4% en los tratamientos de AS y 65.3% en los FTW, mientras que la eficiencia de eliminación de fósforo total fue de 83.7% en los tratamientos de AS y 39.45% en los FTW [23,41].

En ese mismo año en México atreves de 10 unidades experimentales con tezontle y PET como sustrato y *Spathiphyllum blandum* como vegetación plantada y alimentadas con agua de río. Presentaron una eficiencia en la eliminación de DQO (77%), NT (49%), N-NH<sub>4</sub> (47%), PT (64%), SST (51%) y IB (71%) en sistemas con vegetación mientras que en sistemas sin vegetación la

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

eliminación de DQO (70%), NT (37%), N-NH<sub>4</sub> (36%), PT (64%), SST (32%) y IB (52%)[23,42]. Posterior a esto evaluaron el efecto del uso de *Canna hybrids* en humedales, de construcción vertical, parcialmente saturados alimentados con aguas porcinas. Demostrando que la utilización de *Canna hybrids* favoreció la eliminación de SS 69%, PT 39%, N-NO<sub>4</sub> 65%, y CF 62%. En cuanto a especies vegetales, ya se han utilizado varias plantas, desde micrófitos presentes en ambientes acuáticos, flores ornamentales y gramíneas forrajeras en los humedales artificiales. El uso de plantas ornamentales para la eliminación de contaminantes en estos sistemas se ha aplicado en diferentes países alrededor del mundo comúnmente en áreas tropicales y subtropicales. Entre las que destacan la utilización de la canna, iris, *Spathiphyllum blandum*, *Heliconia* y *Zantedeschia*[43,44].

En el uso del reactor anaeróbico de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) para el tratamiento secundario de aguas residuales, cuando se operó adecuadamente con un tiempo de detención hidráulica de alrededor de 8 horas, se demostró que la remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> alcanzó una eficiencia cercana a 60 y 70%, respectivamente. Sin embargo, es necesario que el efluente proveniente del reactor UASB sea sometido a un postratamiento, con el fin de complementar la remoción de materia orgánica y eliminar, sobre todo, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y organismos patógenos, y en este caso debería estar asociado a humedales [45].

En el caso de los Filtros Biológicos (FB), se destacan por su sencillez y bajo costo de operación, como se mencionó anteriormente, y por su aplicación continua en el tratamiento de aguas residuales sanitarias sobre soporte (piedras, cerámicas, plásticos, entre otros materiales). La percolación del líquido permite el crecimiento de microorganismos en la superficie del material utilizado como medio de soporte, formando una película activa de microorganismos comúnmente llamada biopelícula, y su eficiencia es del orden del 40 al 75% para el parámetro de demanda química de oxígeno. (DQO), y del 45 al 85% para el parámetro DBO, valores que dependen del tiempo de detención hidráulica y de las acciones de operación y mantenimiento del reactor [46].

Estudios recientes muestran otros métodos de tratamiento de efluentes que utilizan métodos electroquímicos como la electrocoagulación, donde se utilizan diferentes materiales en la electrólisis pero son específicos para eliminar una determinada característica del efluente, por ejemplo nitrógeno, fósforo, que no tomamos mucho en consideración en este compendio, pero los estudios demuestran que también se puede lograr una buena eficiencia del 88,5% y 96,2% en la degradación de la carga orgánica del efluente con una mínima generación de lodos[47,48,49].

## 4. Referencias

- [1]. DE LA TORRE, Félix Blanco. Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución. **Cuadernos de estrategia**, n. 186, p. 21-70, 2017.
- [2]. FATIMA, F., Fatima, N., Amjad, T., Anjum, A., Afzal, T., Riaz, J., & Razzaq, H. (2020). 5. A review on acid rain: An environmental threat. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 10(1), 301-310.
- [3].<https://archive.gazettes.africa/archive/mz/2004/mz-government-gazette-series-i-supplement-dated-2004-06-02-no-22.pdf>
- [4]. CASTEL-BRANCO, Carlos Nuno, Brito, Luís Sérgio Chichava . António Francisco, *Economia Extractiva e Desafios de Industrialização em Moçambique*.p.12 *Edição IESE, Maputo, Agosto de 2010*
- [5].CAMILA Soares Silvestre Tolêdo, Sergio Ricardo da Silveira Barros; *Industrial Wastewater Treatment: A Review of Fundamentals and Applications*, XVI CNEG \_ Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Rio de Janeiro, Brasil, 14, 15 e 16 de julho 2022
- [6]. ARRONE, Pedro Herculano et al. Análise da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Púnguè, Região Central de Moçambique. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/358749208>, February 2022
- [7]. BRITO ESPINO, Saulo Manuel. Método De Los Elementos Finitos Para La Resolución De Modelos Matemáticos De Procesos Anaerobios En Sistemas De Depuración Natural (Sdn) Para El Tratamiento De Efluentes Con Alta Carga Orgánica. 2022. Tese de Doutorado.
- [8].CAILLAMARA, Alisson Tatiana Toaquiza et al. Estrategias Sostenibles Ambiental en los Emprendimientos Agropecuarios en Ecuador 2023. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 8, n. 3, p. 7288-7304, 2024.
- [9]. VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Belo Horizonte: UFMG**, v. 452, 2005. 452 p.
- [10].VON SPERLING, Marcos; VERBYLA, Matthew E.; OLIVEIRA, Sílvia MAC. **Assessment of treatment plant performance and water quality data: a guide for students, researchers and practitioners**. IWA publishing, 2020.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

- [11]. VON SPERLING, Marcos et al. Post-treatment of anaerobic effluents. **Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation; Chernicharo, CAL, Bressani-Ribeiro, T., Eds**, p. 285-348, 2019.
- [12]. BRIKKÉ, F. Director Regional de Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial (WSP) para América Latina y el Caribe, Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. **Honduras: AZER Impresos**, 2006.
- [13]. BÁRCENA, Alicia; PRADO, Antonio. Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible. D-CEPAL, 2017.
- [14]. RIFFAT, Rumana; HUSNAIN, Taqsim. **Fundamentals of wastewater treatment and engineering**. Crc Press, 2022.
- [15]. NUNES, L.J.R.; Loureiro, L.M.E.F.; Sá, L.C.R.; Silva, H.F.C. Sugarcane industry waste recovery: A case study using thermochemical conversion technologies to increase sustainability. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 6481. [CrossRef]
- [16]. MARTÍNEZ, S. A. Arias; B.Toro Ferney Mauricio , Rojas G. Gómez , Hernández Ángel M. Lucía .Centro de Investigación y Estudios en medio Ambiente (CIEMA)) Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas:2019.Una revisión bibliográfica, 8982 14(2). [https:// DOI: 10.23850/22565035.5](https://doi.org/10.23850/22565035.5)
- [17]. VYMAZAL, Jan. Plants in constructed, restored and created wetlands. **Ecological engineering**, v. 61, p. 501-504, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.035>,
- [18]. GUARDIA-PUEBLA, Yans et al. Effect of hydraulic loading rate and vegetation on phytoremediation with artificial wetlands associated to natural swimming pools. **Journal of Water and Land Development**, n. 40, p. 39-51, 2019.
- [19]. CABRERA, Mercedes Arbona et al. Determinación de la influencia de variables de operación en la neutralización de las aguas residuales textiles con CO<sub>2</sub>. **Afinidad**, v. 80, n. 599, p. 187-192, 2023.. <https://doi.org/10.55815/417974>
- [20]. MANIKANDAN, S.; SARASWATHI, R. Electrocoagulation technique for removing Organic and Inorganic pollutants (COD) from the various industrial effluents: An overview. **Environmental Engineering Research**, v. 28, n. 4, 2023.
- [21]. Lara Acosta, Marimar et al. Tratamiento de Aguas Residuales Universitarias mediante un Humedal Artificial con Sustratos Híbridos y Plantas Ornamentales tropicales. 2021.
- [22]. GONZALEZ-DIAZ, Alexis et al. Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento terciario de efluentes de planta de beneficio de palma de aceite. 2022.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

- [23]. JARNERUD, Tova; KARASEV, Andrey V.; JÖNSSON, Pär G. Neutralization of acidic wastewater from a steel plant by using CaO-containing waste materials from pulp and paper industries. **Materials**, v. 14, n. 10, p. 2653, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14102653>
- [24]. LEE, Yong-Gu; CHON, Kangmin. Green technologies for sustainable water and wastewater treatment: removal of organic and inorganic contaminants. **Separations**, v. 9, n. 11, p. 335, 2022.
- [25]. ASPRILLA, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Revista Ingenierías USBMed*, 11(1), 65-73.
- [26]. CASTAÑEDA, L.; ALBERTO, L.; SARMIENTO, C. Una revisión sobre el uso de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales domesticas en América Latina: Diseño, operación y resultados. **Tecnología Bioresource**, p. 1-17, 2017.
- [27]. BIRKETT, Jason; LESTER, John. **Microbiology and chemistry for environmental scientists and engineers**. CRC Press, 2018.
- [28]. TÜRKER, O. C., Türe, C., Böcük, H., Çiçek, A., & Yakar, A. (2016). Role of plants and vegetation structure on boron (B) removal process in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 88, 143-152
- [29]. GONZALEZ-DIAZ, Alexis et al. Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento terciario de efluentes de planta de beneficio de palma de aceite. 2022.
- [30]. LIN, F., Zhang, S., Ma, G., Qiu, L. and Sun, H. (2018). Application of ceramic membrane in water and wastewater treatment. *E3S Web of Conferences*, 53, 1-4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185304032>,
- [31].HUAYTALLA, R. & Cruz, M. (2016). Eficiencia del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) a escala piloto en el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas provenientes de la comunidad de Carapongo - Lurigancho. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 2 (1), 7-23. <https://doi.org/10.17162/rictd.v2i1.628>
- [32]. LINARES, A., Pire-Sierra, M. G., Lameda-Cuicas, E., Molina-Quintero, L. y Pire-Sierra, M. C. (2021). Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en una embotelladora de bebidas no alcohólicas. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 1(8), 89-107. <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/3398Lochyński>,
- [33].RAMALHO, Rubens Sette. **Tratamiento de aguas residuales**. Reverté, 2021. Edición revisada,p. 253-530.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

- [34]. LI, Jianzheng et al. Performance of anaerobic sludge and the microbial social behaviors induced by quorum sensing in a UASB after a shock loading. **Bioresource Technology**, v. 330, p. 124972, 2021.
- [35]. CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; BRESSANI RIBEIRO, Thiago. Tratamiento de aguas residuales municipales. <http://dx.doi.org/10.18235/0004735> United States of America, Febrero 2023
- [36]. LETTINGA, Gatzke. My anaerobic sustainability story. 2014. Wageningen: LeAF. Amsterdam.
- [37]. CHERNICHARO, Carlos AL; BRESSANI-RIBEIRO, Thiago; VON SPERLING, Marcos. Introduction to anaerobic sewage treatment. **Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation; Chernicharo, CAL, Bressani-Ribeiro, T., Eds**, p. 1-7, 2019.
- [38]. LARROTA, Luis Salazar et al. Analysis of the efficiency of UASB reactors in a municipal wastewater treatment plant. **DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín**, v. 86, n. 209, p. 319-326, 2019.
- [39]. MUÑOZ CEDEÑO, Fidel José. **“Rediseño de las lagunas de tratamiento de aguas residuales del cantón Rocafuerte**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Jipijapa. UNESUM.
- [40]. GARZÓN-ZÚÑIGA, Marco Antonio; BUELNA, Gerardo. Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. **Revista internacional de contaminación ambiental**, v. 30, n. 1, p. 65-79, 2014.
- [41]. ATIENZA GREFA, Josselyn B.; HERNÁNDEZ YARPAZ, Viviana M. **Diseño de un sistema de alcantarillado y depuración de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales en la Comunidad Cotococha**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidad Estatal Amazónica.
- [42]. ESTRADA ARRIAGA, Edson et al. Diseño y evaluación de una planta tipo paquete de bajo consumo de energía para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias y su reutilización para riego agrícola. 2020.
- [43]. FACUNDO Cortés Martínez, Alejandro Treviño Cansino y Ana Cecilia Tomasini Ortiz. Dimensionamiento de lagunas de estabilización. México, 2017.
- [44]. JAGADEESH, Nagireddi; SUNDARAM, Baranidharan. Adsorption of pollutants from wastewater by biochar: a review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 9, p. 100226, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>.

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

- [45]. OCAÑA, Gaspar López et al. Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. **CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias**, v. 12, n. 24, p. 19-48, 2023.
- [46]. REED S.C.; CRITES R.W.; MIDDLEBROOKS E.J. Natural systems for waste management and treatment. 2nd ed. United States of America: McGraw-Hill, Inc; McGraw-Hill, Inc; 1995.
- [47]. GOTTSCHALL, Natalie et al. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada. **Ecological engineering**, v. 29, n. 2, p. 154-163, 2007., [dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.004)
- [48]. DE ANDRADA, Juliana GB; SANTOS, Pablo S.; SPERLING, Marcos von. Tratamento de esgoto simplificado, possibilitando atendimento a diversos critérios para reúso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 112-117, 2021..
- [49]. GOMES, Kaio Gustavo. Efeito de cargas orgânicas crescentes no tratamento de água cinza de pia de cozinha por reatores anaeróbios acidogênico metanogênico. 2023.

## Parte III

Publicaciones originales que conforma la Tesis Doctoral

## 5. Treatment Of Domestic Effluents Using Sustainable Biofilter Methods

Desalination and Water Treatment 317 (2024) 100266

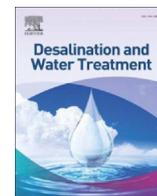


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Desalination and Water Treatment

journal homepage: [www.sciencedirect.com/journal/desalination-and-water-treatment/](https://www.sciencedirect.com/journal/desalination-and-water-treatment/)



### Tratamiento de efluentes domésticos mediante métodos de biofiltración sostenibles

Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>a</sup>, Nicolau Penicela Chirinza<sup>a</sup>, Federico León Zerpa<sup>b,\*</sup>,

Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Zambezi University (UniZambeze), Av. Alfredo Lawley, nº 1018, Matacuane, Beira, Sofala, Mozambique

<sup>b</sup> Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Campus de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain

A R T I C  
L E I N F

A B S T R A C T

*Keywords:*

Biofilter

Odorous  
emissions

Anaerobic  
reactors

Biodegradati  
on Effluent  
treatment

The discharge of effluents is a permanent environmental and sanitation concern. Efficient water management must include water treatment and reuse. It is therefore necessary to study treatment systems to improve their performance throughout the entire chain, from drinking water to wastewater or, more specifically, waste effluent. Currently, technologies using bio-filtration processes have proven to be an effective and low-cost method for treating industrial effluents and domestic sewage. In this study, a low-cost domestic sewage treatment system made up of biofilters and pipes was built on a bench model as a means of teaching practical classes, and its efficiency was also studied. The results showed that the equipment can be made from recyclable material and is low-cost, easy to detail technically and easy to handle and operate. The students involved can easily replicate the technology in their communities, thus spreading low-cost sanitation treatment technologies to low-income populations without access to conventional sanitation systems. The parameters pH, turbidity, chlorination, temperature, and electrical conductivity were all at acceptable levels for discharge into receiving bodies and domestic use.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## 1. Introducción

Sanitation in most regions of the world has been a serious global problem. Around 2.6 billion people do not have access to adequate sanitation. This figure is worrying, especially in the developing countries of which Mozambique is a part. Although we recognise the importance that basic sanitation plays in the health of rural and urban communities, particularly the poor. This scenario has the effect of exposing many people to greater vulnerability to infectious diseases and a vehicle for diseases such as diarrhoea and cholera [1].

Sewage or domestic effluent comes from any building with bathrooms, laundries and kitchens. It is made up of human waste, faeces and urine, and water produced in various daily activities, such as body grooming, food preparation, washing clothes and household utensils [2].

Over time, major pollution of all kinds has emerged, reflecting not only economic and social problems, but also the misuse of natural resources. As a result, it is not difficult to see a major environmental imbalance affecting human beings in general [3]. Water pollution is a major problem to be faced by societies, which have been degrading the environment at an ever-increasing rate for decades. The contamination of soils or bodies of water is due to the emission of polluting substances resulting from industrial processes, domestic sewage, motor vehicles and even agricultural activities [4].

Biological filters are devices made up of organic and inorganic materials and generally have four layers: the first is made up of organic material with a high population of micro-organisms and earthworms, to absorb and degrade the organic matter present in domestic sewage; the second layer has only organic material, providing new filtration of the effluent. The third and fourth layers are made up of stones to provide aeration and permeability in the system [5, 6]

They can have aerobic and anaerobic zones on whose separation surface microorganisms settle and grow in the form of biofilms and in whose interstices, microorganisms can also proliferate in the form of granules and flocs. In these reactors, the support medium is immobile or completely immobile. submerged. Among these reactors, biological infiltration filters stand out for their high operational safety and simpler operation and monitoring. These reactors are generally the most suitable for treating predominantly soluble waste, since the risk of clogging the support medium

increases in proportion to the concentration of suspended solids [7, 8].

The type of audience that is orientated towards the proposed innovation is engineering students with an orientation towards studies related to the environment, water processing from 1st level to the last level, or even post-doctoral studies. Another important reason for this work is the understanding of basic wastewater treatment techniques at a general level and the easy accessibility of instrumental techniques applied to wastewater. This leads us to the goal of learning to understand biofilter wastewater treatment systems for domestic water. Therefore, the subsequent level of compression of the biofilter is based on knowledge of instrumental techniques for determining and processing sanitary water through the biofilter medium. Ultimately, the learning outcome is to understand the operation of the biofilter as a means of processing wastewater and to provide a better understanding of the instrumental techniques for determining its disposal yield.

According to Mainardis et al [1], wastewater treatment technologies follow a predetermined sequence and objectives, namely primary treatment, secondary treatment and tertiary treatment. Thus, primary treatment aims to remove coarse solid particles and reduce the concentration of suspended solid material present in domestic sewage using the principles of physical or physico-chemical processes. Secondary treatment aims to reduce dissolved solids and very small, suspended solids.

Secondary treatments include biological processes that can be aerobic, when they use micro-organisms that need dissolved oxygen in the liquid medium, and anaerobic, which use micro-organisms that don't need dissolved oxygen in the liquid medium and are used in domestic sewage with a high organic load [1].

Tertiary treatment, on the other hand, aims to reduce pathogenic bacteria and finally remove organic matter, nitrogen, phosphorus, and other elements that have escaped from the previous stages and is applied when domestic sewage is discharged into receiving water bodies or for water reuse.

Organic and/or biological filters, more technically known as biofilters, are devices that form part of the class of secondary and tertiary treatment technologies made up of organic filter materials capable of removing solutes and retaining solids that are by-products of human, agricultural and

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

industrial activities. It is a technology that stands out due to the abundance of organic filter media, low acquisition costs and the possibility of composting once used, which is why it can be built to serve most of the population in a decentralized way, does not require a lot of operational engineering and design [9, 10]. Biofilters are also suitable for treating effluents containing odorous gases with H<sub>2</sub>S concentrations below 1.0 g/m<sup>3</sup> (approximately 687 ppm) or with concentrations of nitrogen and phosphorus, such as effluents containing manure and urine. [11, 12]. Biofilters can be classified into three main types:

- i) Unstructured biofilter with bottom filling;
- ii) Structured biofilter without bottom filling;
- iii) Prefabricated biofilter

In general, all biofilters are made up of the following parts or elements:

- i) Sewage inlet pipe and
- ii) Exhaust pipework and exhaust system;
- iii) False bottom;
- iv) Bottom drainage system;
- v) Support structure of the medium.
- vi) Medium support;
- vii) Media irrigation system

En la Figura 1 demostramos la composición de un biofiltro en uso en el laboratorio de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Zambezi.

Figure 1. Esquema de un biofiltro convencional y sus elementos (Fuente: Autor).

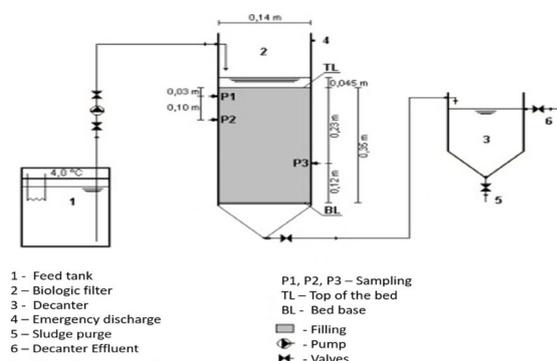


Figure 2. los elementos constituyentes



The filter selected in this study works as a downflow anaerobic/factory reactor with a drowned bed and is therefore part of the secondary treatment equipment class. Its construction makes it easy to remove excess sludge - which may eventually appear over time - but the risk of clogging the bed is reduced because part of the sludge formed inside it is gradually dragged by the effluent to the main outlet where the treated effluent is located [13-19].

The objective of this study was to provide the university community (professors and engineering students) with the technical procedures to build a system to treat domestic sewage from sinks and bathrooms or kitchens, through a home-made biofilter using sand and gravel, concerned with physical and biological processes. However, the technology will benefit the low-income population who do not have conventional sanitation systems, or anyone interested in installing decentralized sanitation systems in peri-urban or rural communities. For this proposal, the work consisted of treating black water from the kitchen of one of the canteens and the toilet of UNIZAMBEZE-FCT (Zambezi University - Faculty of Science and Technology). Physical, chemical, and microbiological parameters of the water treated by the biofilters were analyzed.

## 2. Material y métodos

Recyclable materials and low-cost products were used to build the biofilter and domestic water treatment system, which consisted of four twenty-litre buckets. Three of these buckets formed the body of the filter and the other bucket was used to transport domestic (black) water collected from the kitchen sink to the system located next to the laboratory block. The material used to fill the filters consisted of: gravel (maximum diameter 19 mm), pebbles (maximum diameter 9.5 mm), sand, nylon mesh and a "rough pipe" or "conduit". Filter 1 (top) was filled with two layers of 10 cm each, one of 19 mm gravel and one of sand. Filter 2 (intermediate) was filled with a layer of pebbles and a layer of sand, each 10 centimeters long. The sand was sieved through 18 mesh 10 sieves for filter 1 and 8 mesh

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

sieves for filter 2. In filter 3, the two grain sizes of gravel and sand were mixed and the same thickness was applied to the layers [20-24].

At the top of filter 1 is a reusable bag in the form of a net, designed to contain the coarser materials that make up domestic sewage, serving as a preliminary treatment for the sewage. In the top layer of filter 2 (intermediate), there is a "fishing net", handmade from nylon line, this material is resistant and difficult to degrade when disposed of in the environment, in the filter, it will serve as a holder of coarser materials. In filter 3, the difference is that its top layer contains waste materials from the construction industry, such as The analyses of the physical, chemical and microbiological parameters were carried out in the Water Analysis Laboratory, located on the main campus of unizambeze-FCT, where the following parameters were analyzed beforehand and in each filter phase of our system: Temperature (°C) samples; pH (Hydrogen Potential); Electrical

as "smooth or rough isogril pipe", a piece of material used to install power lines in homes, which has been cut into small pieces to serve as a medium for decomposing microorganisms to adhere to. Each filter contains a tap connected to a 20 mm perforated pipe (drainage pipe), located inside the bottom of the bucket, to collect individual samples for analysis as shown in figures 1 and 2 [25-27].

Each filter contains a tap connected to a 20 mm perforated pipe (drainpipe), located inside the bottom of the bucket, to take individual samples for analyses.

Conductivity (mS/cm); Sedimentable Solids (mg/L); Dissolved Oxygen (OD in mg O<sub>2</sub>/L L; Biochemical Oxygen Demand (BOD<sub>5</sub> in mg O<sub>2</sub>/L); Turbidity (UNT); Apparent Colour (UC); nitrogen (N), phosphorus (P); sodium (Na) and potassium (K), and are presented in the table 1 below [8].

Parametros	Amostra	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Salida
Temperatura(OC)	27.33	29.5	26.35	24.0	22.25
PH	8.28	7.49	7.32	6.97	6.94
Conditiv(mS/Cm)	0.4466	0.4966	0.3160	0.3082	0.2162
Tss(ml/l)	5.0	3.0	2.50	0.50	0
OD(mg O <sub>2</sub> /l)	6.90	6.40	6.40	6.60	6.1
BOD(mg/l)	4.00	4.00	3.40	3.00	2.00
COD(mg/l)	420.0	180.0	123.0	113.0	106.0
Turbiez(NTU)	108.0	85.5	59.6	26.5	10.5
Cor Aparrente(UC)	666.0	255.0	132.0	55.50	33.60

### 3. RESULTADOS

The system built and assembled to treat domestic sewage, as shown in Figure 2, made up of filters and pipes made from recycled material and low cost, proved to be easy for the students to assimilate, since it can be built even at home and since it proved to be a viable solution in communities or for people on low incomes. As for its operation, it proved to be promising, although some aspects of its size could be adjusted depending on the flow patterns or production of domestic sewage.

Analyzing the parameters of the samples at the inlet and outlet, in the case of temperature it was found that the values remained approximate in the samples between 29.8°C and 22.25°C, with an increase in temperature between the raw black water sample (Before treatment) and the treated water sample from the F3 filter in all the analyses. This effect is attributed to the ambient temperature and the

biological reactions taking place inside the filter, such as the respiration process of aerobic bacteria that release energy into the environment.

As for turbidity, the filter system showed great efficiency in removing solid particles, with turbidity units gradually decreasing in all filters. This data can be analysed in the figures 3 e 4 .

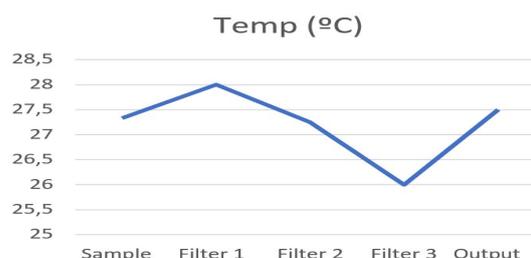


Figure 3 - Análisis de temperatura.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

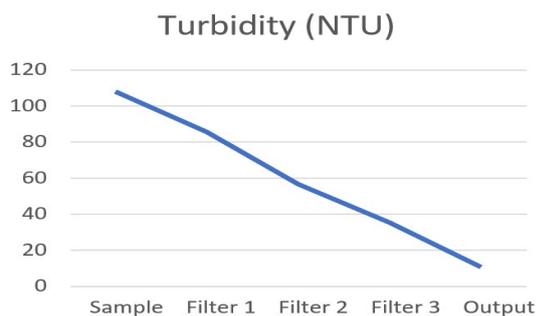


Figure 4 - Análisis de turbidez

In the graphs below it can be observed that there was a high removal of color units (CU) in the system samples, proving that the system operates with the capacity to retain dissolved substances and colloidal particles in suspension, significantly reducing this parameter. Fig 5.

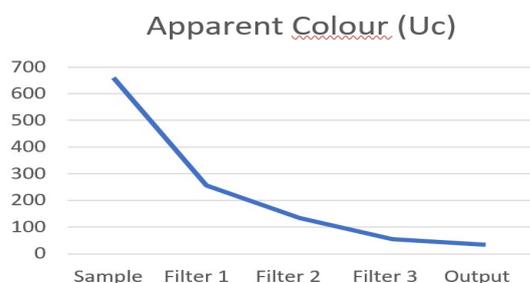


Figure 5: Color aparente

The system was successful in reducing the pH of wastewater, as shown in the graph. In all analyses, the pH value remained in the neutral range between 6.5 and 7.5 after passing through the filters. These values are considered optimal for agricultural irrigation, as well as for final disposal in land and water resources, with a pH between 5.0 and 9.0 being acceptable to ensure the quality of this resource. Fig 6

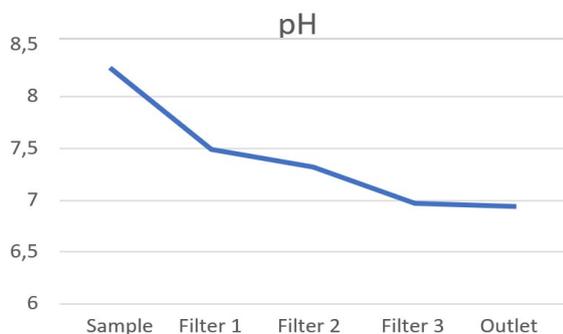


Figure 6: pH aparente

According to the electrical conductivity values shown in the graph, it can be observed that the

three filters after the initial analyses experienced a decrease in conductivity values.

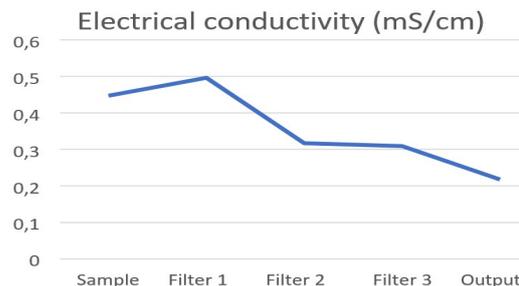


Figure 7. Conductividad eléctrica

Dissolved oxygen started to be measured from Filter 1 to Filter 2, where it showed constant values, but in Filter 3 the data were satisfactory, with values of 6.4 +/- 0.3 mg/L, after passing through the 3rd filter. This represents the almost anaerobic environment in which the filter was located, with DO values falling to zero, extinguishing aerobic microorganisms and leaving facultative ones. However, for chemical analyses such as BOD and COD for our experiment, reliable results would be obtained if the samples were analyzed in a time interval of at least 15 days, because it would be necessary to wait for the chemical processes in the reactors to start taking place.

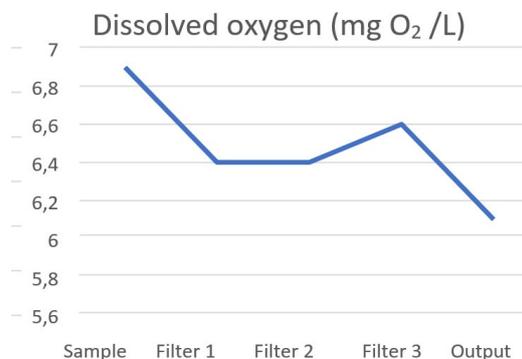


Figure 8. Oxígeno disuelto

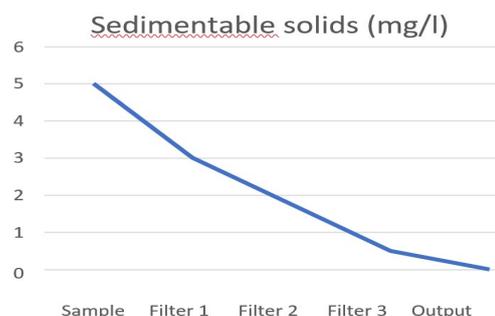


Figure 9. Sólidos sedimentados

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Therefore, for our experiment, we have no way to make the chemical analyses reliable. We only focused on the treatment of the physical parameters. Fig 8 and 9. The analyses show that after passing the sewage through filters 2 and 3, the treated water samples do not present sedimentable solids. There is a need for a decanter in the filters due to the granulometry of the sediments, since we are using sand filters.

In the case of the BOD values in domestic wastewater, after passing through the filters they are around 70% and 80% of the total value. When comparing the BOD values of the raw water samples, it can be observed that there is no variation in the dissolved oxygen levels, due to the time taken to analyze the water, which was the same number of days, since the microorganisms capable of oxidizing the organic matter present in the wastewater had not yet been created<sup>5</sup>, and this water does not yet have the characteristics of drinking water, but can be used for other purposes such as irrigation, washing employees' cars, etc.

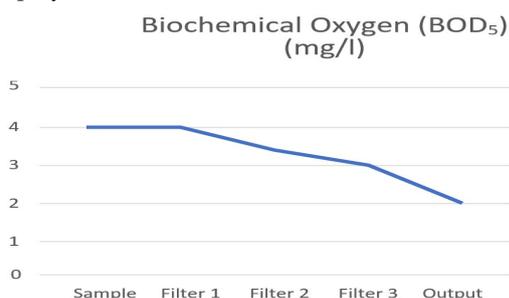


Figure 10. Oxígeno bioquímico

$$\text{Eficiencia del biofiltro(\%)} = \frac{P_{\text{entrada}} - P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} * 100\%$$

## 4. Conclusiones y recomendaciones

According to the two graphs presented, the treatment system consisting of filters to treat Unizambeze sewage worked satisfactorily and efficiently to remove turbidity, color and sedimentable solids. The parameters pH, turbidity, chlorination, temperature and electrical conductivity showed acceptable levels for discharge to receiving bodies and domestic use, but the chemical parameters such as BOD and COD did not give satisfactory results. However, it is recommended that the samples be analyzed at 15-day intervals to effectively determine how the chemical characteristics vary in domestic biofilters, which can also be used to treat sanitary water in suburban areas.

It is recommended to perform maintenance on Filter 1 to remove solids that clog the pores of the gravel and sand layer. After each treatment, it is recommended to remove 3 centimeters of the gravel layer for washing and scrape 3 to 5 centimeters of the sand layer with new disinfected material, because Filter 1 receives raw black water. For the other filters, it is suggested to clean them once or twice a month or when problems with clogging and decreased flow occur. It is also suggested that the system be equipped with a grease trap to reduce the amount of grease and food residues that lead to filter clogging problems, and inspection boxes for solid sedimentation. Therefore, the objective of this work was to present a simple, efficient and low-cost methodology in a didactic way to students and the urban community for the treatment of waste water and also to present the procedures for the maintenance of the system.

When implementing these biofilters to also treat waste water in communities, areas or houses with larger areas are required to facilitate connections to small discharge wells and not for areas with 15/20 type lots as is the case in some neighborhoods in the city of Beira, since the soils are mostly muddy and with a very high water table that facilitates filling.

## 5. Declaration of conflicts of interest

The authors declare that they have no known financial conflicts of interest or personal relationships that could have influenced the work reported in this article.

## 6. Acknowledgements

This project was made possible thanks to the unconditional contribution of the third-year Industrial Process Engineering students, 2023 edition, who participated in the search for the materials used. This research was co-financed by the INTERREG V-A Cooperation program, Spain-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canary Islands) 2014-2020, MITIMAC project (MAC2/1.1a/263).

## Referencias

- [1] Mainardis, M.; Buttazzoni, M.; Goi, D. UASB reactor, Upflow Anaerobic Sludge Blanket. Kennes & Thalasso Developing source control programmes for commercial and industrial wastewater. 2010.
- [2] Von Sperling, M.; Gonçalves, R. F. Sewage sludge. Environmental Science. Water intelligence online. 2010.
- [3] Falda, L. P.; Assunção, E. G.; Kuroda, E.K. Pretreatment of water by biofiltration for the removal of the contaminants atrazine, simazine, 17 $\beta$ -estradiol, diclofenac and microcystin-LR. Eng Sanit Ambient v. 28, e20220168, 2023.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

[4] Francielen, K. S., Eyng, J.. The treatment of wastewater from the dairy industry: A comparative

study between biofiltro and conventional lagoon system treatment methods. *R. gest. sust. ambient., Florianópolis*, v. 1, n. 2, p. 4 - 22. 2013.

[5] Figueiredo, E.G.B; Castro, J.S.; Lameiro, K.K.A; Siqueira, L. A, de; Santos, L. V. dos; França, S. P de. Alternative treatment of industrial effluents using pistia stratiotes and zeolite biofilters. *Rev.Bras.Proc.Quím., Campinas, SP*, v.3 n.1, p.1-50, 2022.

[6] UNIZAMBEZE Water and Effluent Analyses Laboratory Guide. 2023.

[7] Magalhães, E.; Catrosilva, J.; Argenton, L.; Poliana, S. Alternative treatment of industrial effluents using pistia stratiotes and zeolite biofilters. *Rev.Bras.Proc.Quím., Campinas, SP*, v.3 n.1, p.1-50, jan./jun. 2022

[8] Batista, R. O; Oliveira, A. F, M; Santos, D. B. dos; Francisco de Oliveira Mesquita, F. O; Silva, K. B. da . Removal of oil and total solids in biofilters operating with primary domestic sewage *Water Resources and Irrigation Management*. v.2, n.1, p.37-43, Jan.-Apr., 2013.

[9] Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M.; Abe, D. S.; Rocha, O.; Starling, F. Limnology of inland waters: impacts, conservation and recovery of aquatic ecosystems. In: *Fresh waters in Brazil*. 3 ed. São Paulo: Escrituras, 2012. p. 203-237.

[10] Elsergany, "The Potential Use of Moringa peregrina Seeds and Seed Extract as a Bio-Coagulant for Water Purification," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/w15152804.

[11] Nour, E. A. A.; Barretto, A. Dos S.; Candello, F. P.; Domingues, L.M.; Santos, E. M. Dos R. Dos. Use of a combined anaerobic filter system followed by a submerged aerated biofilter in the treatment of sewage containing formaldehyde. *Braz. J. of Develop., Curitiba*, v. 6, n. 3, p. 10106-10117, mar. 2020. ISSN 2525-8761.

[12] Costanzi, R. N.; Daniel, L. A. Treatment of paper mill effluents. *Journal of Sanitary and Environmental Engineering*, v. 7, n. 3, 2012.

[13] Sardinha, C. A. Avaliação da Situação do Saneamento Básico do Meio e Seus Efeitos Sobre a Saúde Comunitária Rural da Vila do Distrito de Inhassoro. Monograph UEM, ESUDER, 2015.

[14] Saiani, C. C. S. Deficit in access to basic sanitation services in Brazil. IPEA-CAIXA 2006 Award, Brasília, 2018.

[15] Facin, F.; Cabral, C. B. G; Filho, P. B; Lamin; P. C. Operational evaluation of a WWTP composed of a UASB reactor followed by a submerged aerated biofilter, a case study in a full-scale WWTP in the municipality of Luzerna-SC. ASSEMAE - National Association of Municipal Sanitation Services. 48 Congress. 27 to 30 May 2018. CEARA. BR.

[16] Nascimento, N. O.; Heller, L. Science, technology and innovation at the interface between the areas of water resources and sanitation. *Journal of Sanitary and Environmental Engineering*, v. 10, n. 1, 2015.

[17] Alam, P. Pandey, F. Khan, B. Souayeh, and M. Farhan, "Study to investigate the potential of combined extract of leaves and seeds of moringa oleifera in groundwater purification," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 20, pp. 1- 13, Oct. 2020, doi: 10.3390/ijerph17207468.

[18] Alazaiza et al, "Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 2. MDPI, Jan. 01, 2022. doi: 10.3390/w14020140.

[19] Chales. B. S. Tihameri, N. V. M. Milhan, C. Y. Koga-Ito, M. L. P. Antunes, and A. G. Dos Reis, "Impact of Moringa oleifera Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/w14132058.

[20] Hadadi, A. Imessaoudene, J. C. Bollinger, A. A. Assadi, A. Amrane, and L. Mouni, "Comparison of Four Plant- Based Bio-Coagulants Performances against Alum and Ferric Chloride in the Turbidity Improvement of Bentonite Synthetic Water," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 20, Oct. 2022, doi: 10.3390/w14203324.

[21] Khumalo, "characterisation of south African Brewery wastewater," pp. 1-12, 2022.

[22] Knap-Baldyga and Żubrowska-Sudoł .M, "Natural Organic Matter Removal in Surface Water Treatment via Coagulation-Current Issues, Potential Solutions, and New Findings," *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13853, Sep. 2023, doi: 10.3390/su151813853.

[23] Meng et al, "Effect of substrate on operation performance of ecological floating bed for treating simulated tailwater from wastewater treatment plant," *Chemistry and Ecology*, vol. 37, no. 8, pp. 715-728, 2021, doi: 10.1080/02757540.2021.1955868.

[24] Ribeiro et al, "Magnetic Natural Coagulants for Plastic Recycling Industry Wastewater Treatability," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/w15071276.

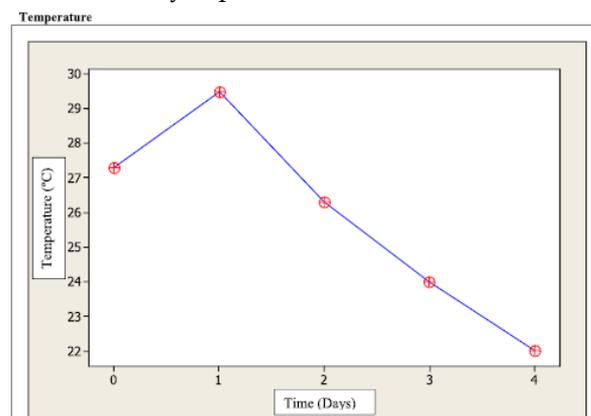
[25] Shabangu, B, Bakare, F, and Bwapwa J, "The Treatment Effect of Chemical Coagulation Process in South African Brewery Wastewater: Comparison of Polyamine and Aluminum-Chlorohydrate coagulants," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14162495.

[26] Takaara. M and K. Kurumada. K, "Optimum Conditions for Enhancing Chitosan-Assisted Coagulation in Drinking Water Treatment," *Sustainability*, vol. 15, no. 19, p. 14197, Sep. 2023, doi: 10.3390/su151914197.

[27] Urrea-Florián and Torres-Benítez. A, "Evaluation of Seeds Moringa oleifera Lam. Present in Urban Forests as a Coagulant-Flocculant for Water Treatment," *MDPI AG*, Feb. 2021. doi: 10.3390/iecp2020-08553.

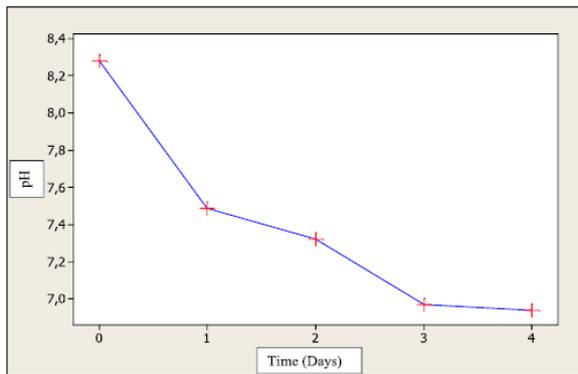
## Annexes

The annex contains a list of physical and chemical parameters of the water based on the number of days spent in each filter medium.

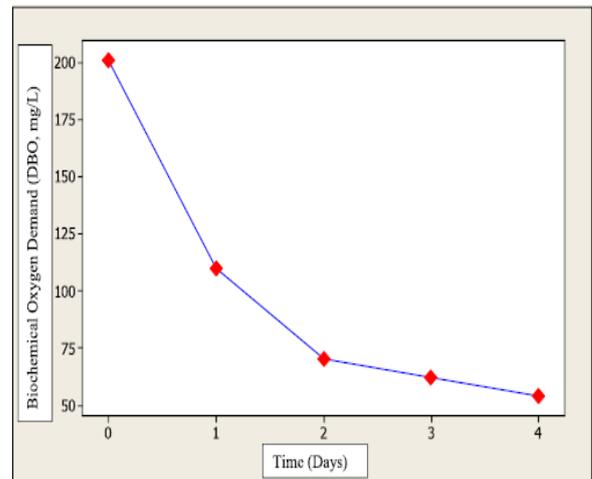


# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

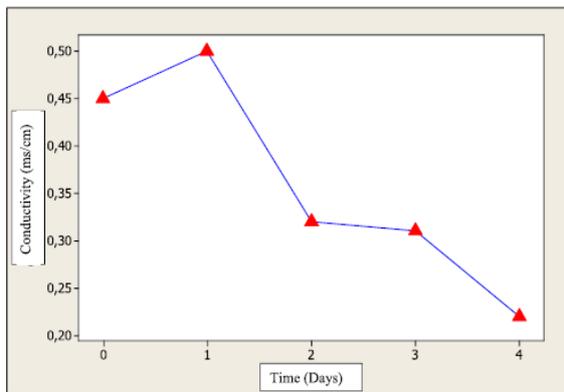
pH



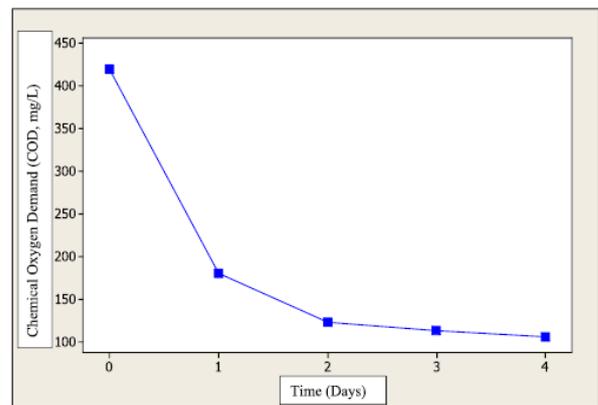
Biochemical Oxygen Demand (BOD)



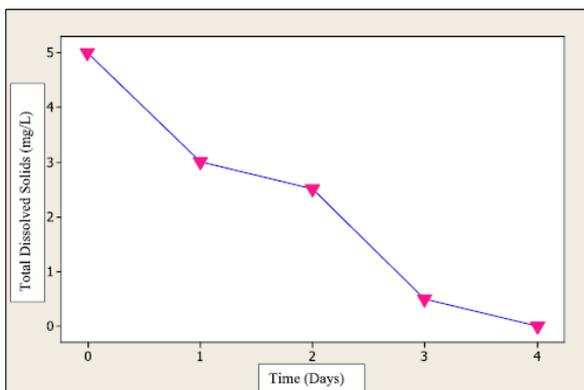
Conductivity



Chemical Oxygen Demand (COD)



Total Dissolved Solids (TDS)



## Appendix A. Supplementary information

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100266>

## 6. Evaluation of the physico-chemical properties of effluents from the Mozambique Sugar Company. a proposal for effluent treatment

	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE EFLUENTES DE LA EMPRESA AZUCARERA MOZAMBIQUE. UNA PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES	Disciplina UNESCO 3308.06
ARTICULO DE INVESTIGACION	Nicolau Penicela Chirinza, Paulino Vasco Mariano Muguirrima, Federico León Zerpa*, Carlos Alberto Mendieta Pino	

### EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE EFLUENTES DE LA EMPRESA AZUCARERA MOZAMBIQUE. UNA PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

### EVALUATION OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF EFLUENTS FROM THE MOZAMBIQUE SUGAR COMPANY. A PROPOSAL FOR EFFLUENT TREATMENT

Paulino-Vasco Mariano-Muguirrima<sup>1</sup>, Nicolau Penicela-Chirinza<sup>1</sup>, Federico León-Zerpa<sup>2\*</sup>, Carlos-Alberto Mendieta-Pino<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Zambeze (UniZambeze), Mozambique.

<sup>2</sup> Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (iUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

\* federico.leon@ulpgc.es

Recibido: 12/Feb./2024 - Revisando: 20/Feb./2024 - Aceptado: 11/Sep./2024 - DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>

To cite this article: LEON-ZERPA, Federico, MUGUIRRIMA, Paulino Vasco, CHIRINZA, Nicolau Penicela et al. EVALUATION OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF EFFLUENTS FROM THE MOZAMBIQUE SUGAR COMPANY. A PROPOSAL FOR EFFLUENT TREATMENT. DYNA Energía y Sostenibilidad, Jan.-Dec. 2024, vol. 13, n.1, DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>

#### ABSTRACT:

Wastewater from the sugar industry presents complex characteristics and is considered a challenge for environmental engineers in their quest for treatment and reuse. The main objective of this study is to determine the physico-chemical characteristics of the wastewater from the Mozambique Sugar Mill. The choice is due to the large volumes of water (around 900 m<sup>3</sup>/h) that the sugar industry uses in its production processes, as well as the effluent management model to be adopted. For this study, samples were taken over a period of six months, every two months, and physical and chemical parameters were analysed. The results were compared with the regulations (Decree 18/2004) in force in Mozambique and with the values estimated by the World Bank in the various articles. The novelty of this research and the purpose is to suggest the best method to treat these effluents in a more environmentally friendly way. With the results obtained, it was possible to do so in most of the sugar producing countries that have liquid effluent control standards with limitation in the number of organics between 15 and 60 mg/L BOD.

Keywords: Environmental management, sugar industries, wastewater, treatment systems.

#### RESUMEN:

Las aguas residuales de la industria azucarera presentan características complejas y se consideran un reto para los ingenieros medioambientales en su búsqueda de tratamiento y reutilización. El objetivo principal de este estudio es determinar las características físico-químicas de las aguas residuales de la Central Azucarera de Mozambique. La elección se debe a los grandes volúmenes de agua (alrededor de 900 m<sup>3</sup>/h) que la industria azucarera utiliza en sus procesos de producción, así como al modelo de gestión de efluentes que se debe adoptar. Para este estudio, se tomaron muestras durante un período de seis meses, cada dos meses, y se analizaron parámetros físicos y químicos. Los resultados se compararon con la normativa (Decreto 18/2004) vigente en Mozambique y con los valores estimados por el Banco Mundial en los distintos artículos. La novedad de esta investigación y el propósito es sugerir el mejor método para tratar estos efluentes de forma más respetuosa con el medio ambiente. Con los resultados obtenidos, fue posible hacerlo en la mayoría de los países productores de azúcar que tienen normas de control de efluentes líquidos con limitación en el número de orgánicos entre 15 y 60 mg/L de DBO.

Palabras clave: Gestión medioambiental, industrias azucareras, aguas residuales, sistemas de tratamiento.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## 1.- INTRODUCCION

Las aguas residuales de la industria azucarera contienen diversos compuestos que deben tratarse química o biológicamente antes de verterse a las masas de agua. La reutilización eficiente de las aguas residuales producidas por las industrias azucareras es una cuestión a considerar en la actualidad, con el objetivo de la sostenibilidad. Así, la evaluación de las características de los efluentes generados en la industria azucarera tiene creciente interés tanto en el campo de la investigación aplicada como en la búsqueda de la mejor alternativa tecnológica de tratamiento para atender el destino final del efluente o la reutilización del agua a explicar en los siguientes temas[1].

Las aguas residuales de la industria alimentaria contienen un alto nivel de compuestos orgánicos, y en algunos casos puede ser hasta 10 veces superior al de las aguas residuales municipales. El vertido de efluentes con una elevada carga de compuestos orgánicos crea graves problemas medioambientales. Por lo tanto, estos efluentes deben limpiarse adecuadamente antes de verterlos al medio ambiente [2,3,4,5]. Numerosos estudios han señalado que las aguas residuales de la industria azucarera pueden contener altos niveles de contaminantes, como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos disueltos totales (SDT), que a menudo pueden superar las normas ambientales recomendadas para su vertido [1, 2, 3]. Cabe señalar que la industria azucarera es estacional y sólo funciona entre 150 y 210 días al año (de noviembre a mayo). En la industria azucarera se utilizan diversos productos químicos, principalmente para coagular las impurezas y refinar los productos finales. Ca(OH)<sub>2</sub> se utiliza para clarificar y aumentar el pH de los zumos. Antes de la clarificación se añade una pequeña cantidad de H<sub>3</sub> PO<sub>4</sub> para mejorar la clarificación [1]. Aquí investigamos las características de los efluentes de Açucareira de Moçambique y las condiciones en que se vierten al medio ambiente, para diagnosticar medidas más adecuadas y sostenibles.

En ingeniería medioambiental y, más concretamente, en las tecnologías de tratamiento de efluentes, la concentración de materia orgánica en el efluente se mide utilizando dos parámetros analíticos principales: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). La DBO muestra la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar la materia orgánica carbonosa mediante procesos bioquímicos, indicando indirectamente la cantidad de carbono orgánico biodegradable. La DQO es el máximo de materia orgánica que puede oxidarse, mientras que la DBO es la materia utilizable por los organismos vivos[10].

La novedad de esta investigación y el propósito es sugerir el mejor método para tratar estos efluentes de forma más respetuosa con el medio ambiente. La elección de las tecnologías de tratamiento para cualquier efluente depende de la relación DQO/DBO, según estudios[13]. Así, según Matos, M.P.: Relación DQO/DBO baja (<2,5): la fracción biodegradable es alta y se recomienda el uso de tratamiento biológico. Para una relación DQO/DBO intermedia (entre 2,5 y 4,0), se sugiere realizar pruebas de tratabilidad para confirmar la idoneidad del tratamiento biológico debido a la fracción biodegradable relativamente baja. El proceso conocido como tratamiento biológico se utiliza normalmente para el tratamiento de nivel secundario [10; 12]. En los casos en los que la relación DQO/DBO sea elevada (>4,0), puede no ser aconsejable utilizar un sistema biológico, y puede ser necesario evaluar la posibilidad de utilizar en su lugar un sistema de tratamiento químico. Del mismo modo, si la relación DQO/DBO es baja (4,0), puede no ser recomendable utilizar un sistema biológico, y puede ser necesario evaluar el potencial para utilizar un sistema de tratamiento químico[13].

Para analizar la biodegradabilidad, se utiliza la DBO:N:P que es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales, así como en el control del agua potable, comparando la demanda biológica de oxígeno, nitrógeno y fósforo. Se utiliza una relación DBO:N:P mínima de 100:5:1 para procesos aerobios y una relación DQO:N:P de al menos 350:7:1 para procesos anaerobios[13]. Algunos autores, como los mencionados en la Ta-bla 1, han realizado estudios en la industria azucarera y han mostrado algunos resultados característicos. La tabla muestra que, en general, la mayoría de los resultados para el tratamiento de efluentes industriales están en el rango de los tratamientos primarios y secundarios [11; 12; 13].

Tabla 1. Valores de parámetros de efluentes de algunos autores

Parámetros	[1]	[8]	[11]
Temperatura(° C)	40	29.3-44.3	24.3
pH	5.5	6.7-8.4	4.0
Turbidez (NTU)			621
DBO (mg/L)	970	654.4-1968.5	431.9
DQO (mg/L)	3682	1100.3-2148.9	1536.8
Conductividad (µS/cm)	2230	540.3-925.9	534
Fosfato (mg/L)	5.9	1-19	15
Nitrógeno (mg/L)		11.9-40.6	30

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

La industria mozambiqueña de la acucareira (Mafambisse) carece de un sistema de tratamiento de aguas residuales. Las aguas residuales simplemente se vierten al medio ambiente sin tratamiento previo. En este estudio, pretendíamos analizar el efluente de aguas residuales e identificar el método de tratamiento más eficaz. Para ello, analizamos la relación DBO/DQO para determinar el método óptimo de tratamiento de las aguas residuales. Los resultados del análisis del efluente indicaron que la relación DBO/DQO era inferior a 2. Este valor se sitúa dentro del intervalo de 1,8 a 2, lo que es indicativo de un nivel de contaminación de bajo a moderado. El método de tratamiento biológico resultó ser el más adecuado para este tipo de contaminación. Si los valores fueran superiores a 2,5, habría que recurrir a otro tipo de tratamientos, como el UASB, que depende del tipo de contaminación. La novedad de esta investigación es la siguiente: estos valores se obtuvieron por primera vez en un entorno de laboratorio, lo que nos permitió identificar un sistema de tratamiento adecuado.

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción de los lugares de muestreo

La Azucarera de Mozambique (Mafambisse) es una industria azucarera situada en el distrito de Dondo, al sur de la ciudad de Beira, a 1 kilómetro de la carretera nacional 6 (EN6). La azucarera está gestionada por la empresa Tongaat Hulett desde 1996. Tongaat Hulett es una empresa sudafricana que opera en el sector azucarero en varios países del país: Mozambique, Botswana, Sudáfrica, Suazilandia, Zimbabue y Namibia. Normalmente, la industria azucarera se compone de dos sectores productivos: el sector agrícola, es decir, el cañaveral, y el sector de transformación (Fábrica) [14-19].

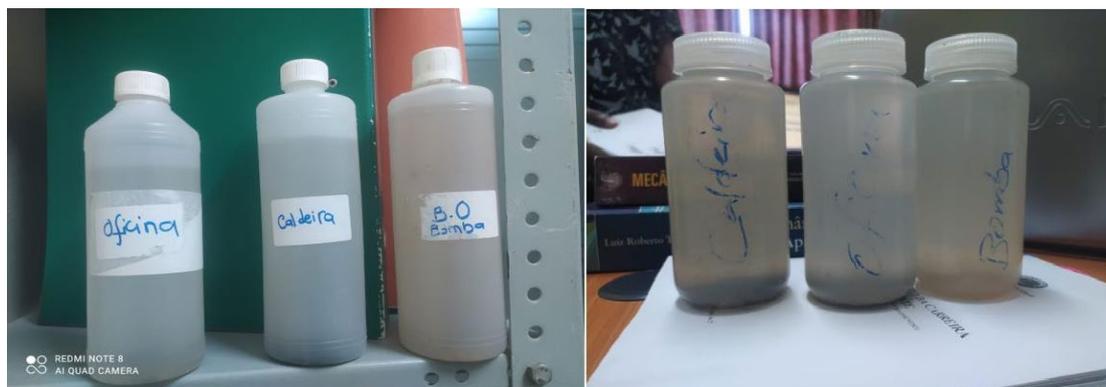
En Mozambique, Tongaat Hulett tiene fábricas en Xinavane, provincia de Maputo, y en el puesto administrativo de Mafambisse, distrito de Dondo, provincia de Sofala, con la misión de promover servicios y productos derivados de la caña de azúcar, mejorar las propiedades, buscar la satisfacción del cliente y el desarrollo del país, cuidando la protección del medio ambiente [6,7]. Sin embargo, utilizan grandes volúmenes de agua, que oscilan entre [900m<sup>3</sup> y 1000m<sup>3</sup> ]/hora extraída del río Púngue para la refrigeración de máquinas, rodamientos, molinos, calderas, etc.

### 2.2. Recogida y análisis de muestras

El proceso de transformación de la caña de azúcar es altamente complejo, generando importantes cantidades de aguas residuales compuestas por descargas líquidas y sólidas provenientes del procesamiento, manipulación y transformación de la caña. Estos vertidos resultan de los procesos de enfriamiento, calentamiento, extracción y reacción, así como del lavado y del control de otros subproductos de especificación rechazados. Las cantidades y calidades de estos vertidos son muy variables. A medida que el agua pasa por las cámaras y tanques desde la extracción hasta la cristalización del azúcar, su carga contaminante en términos de materia orgánica y diversos contaminantes aumenta significativamente. Aproximadamente el 75% del volumen total de efluentes vertidos por las industrias de la caña de azúcar se debe al lavado de la caña, que incluye también el agua de lavado de los tanques que contienen residuos de la transformación. Por otra parte, los procesos de desfibrado y molienda, que extraen el jugo, dan lugar a residuos sólidos, a saber: el bagazo, que se compone de fibra [8]. Todas las muestras de efluentes se recogieron y analizaron el mismo día, de acuerdo con la metodología descrita en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23<sup>rd</sup> Edition 2017) [20-24]. Para estos análisis, las muestras se recogieron en botellas PET de 500 ml utilizando un colector artesanal. Tras la recogida, las botellas con las muestras se identificaron debidamente y se transportaron en una caja aislada a los laboratorios de Microbiología y Bioquímica del Departamento de Ingeniería de Procesos Industriales de la Universidad de Zambezi para su análisis. El proceso de recogida se llevó a cabo a lo largo del periodo de estudio de 6 meses, a intervalos de cada 2 meses, en las secciones de las bombas (efluente total de la fábrica), salida de la caldera y efluente total de los talleres, Como se muestra en la fig. 1

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Fig. 1. Foto de muestras de efluentes tomadas en talleres, bombas y calderas.



En todos los casos, las muestras de aguas residuales se recogieron en botellas de plástico previamente limpiadas y lavadas con ácido y se almacenaron en un frigorífico a 4°C hasta que se utilizaron para los análisis. Por último, los análisis de laboratorio de las muestras de aguas residuales que se llevaron a cabo según métodos estándar en nuestros laboratorios locales.

Entre los parámetros físico-químicos de las aguas residuales de la industria azucarera, el pH y la temperatura se midieron inmediatamente in situ, mientras que los demás parámetros físico-químicos, como los sólidos totales (ST), los sólidos en suspensión (TSS), la DBO, la DQO, las pruebas de cloruros y sulfatos, la turbidez, la alcalinidad, la densidad y la conductividad, se analizaron en la Universidad de Zambezi (Mozambique).

La mayoría de los países productores de azúcar tienen normas de control de efluentes líquidos que limitan el número de orgánicos a entre 15 y 60 mg/L de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno). Sin embargo, India tiene un límite de 100 mg/L (Purchase, 1996). El tratamiento de los efluentes puede realizarse en lagunas anaerobias o aerobias [9].

Tabla 1. Valores de los parámetros físico-químicos de la plantación de azúcar de Mozambique

Parámetros	Bomba	Calderas	Oficinas	Decreto 18/2004
Temperatura(° C)	45	50	40	< =24
pH	6.34	8.13	6.96	6-9
Dureza (mg/L)	240.63	490.20	177.13	
Alcalinidad (mg/L)	187.00	215.00	138.33	
Cloruros (mg/L)	105.60	172.63	81.43	
TDS(mg/L)	1392.00	1174.67	1137.00	
SST(mg/L)	17.33	25.67	22.00	50
Turbidez (NTU)	9.15	11.16	15.03	
DBO(m/L)	731.67	628.00	675.00	50
DQO(m/L)	1048.67	991.33	1351.00	250
Conductividad (S/cm)	2.49	1.96	7.83	
Fosfato (mg/L)	11.91	16.22	16.23	2
Nitrógeno (mg/L)	14.11	10.58	11.39	10

Por otra parte, el marco legislativo sudafricano no ha variado significativamente durante el periodo examinado. La legislación vigente aborda cuestiones técnicas, colma ciertas lagunas de la normativa, mejora algunas disposiciones y actualiza referencias obsoletas.

### 3.- RESULTADOS

Las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria azucarera aquí estudiadas están muy por encima de los valores límite de la legislación en vigor (Decreto 18/2004), aunque algunos valores no se utilicen en el documento [25-27].

Así, de acuerdo con los datos obtenidos y los volúmenes de efluente generados (900-1000 m<sup>3</sup>/h), sería mejor utilizar lagunas aerobias, ya que con un tiempo de residencia de más de 120 horas o hasta 7 días, se garantiza la reducción de la temperatura a valores ambientales y se permite la ocurrencia de procesos aerobios, lo que podría reducir la carga contaminante, de acuerdo con las referencias [12,13].

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Los resultados de la relación DQO/DBO para el presente estudio en las diferentes zonas de estudio oscilan entre 1,48 y 2,0, respectivamente para los sectores de bombas, calderas y talleres, siendo la relación media de 2,0, lo que indica que para este rango la tecnología de tratamiento sugerida según [13] es de tipo biológico secundario.

Mientras tanto, esta tecnología se analizará en detalle utilizando parámetros técnicos como el caudal de efluentes y la superficie disponible para su eliminación y tratamiento final.

## 4.- CONCLUSIONES

El estudio de los parámetros físicos y químicos de los efluentes del ingenio azucarero mozambiqueño mostró que el valor del pH estaba dentro de las normas establecidas por el reglamento sobre normas de calidad ambiental y emisiones de efluentes para la industria azucarera (Decreto 18/2004).

Según la legislación mozambiqueña, la relación DQO/DBO es de 5. En este estudio, la relación osciló entre 1,4 y 2,0, muy por debajo de los límites establecidos, lo que indica la alta biodegradabilidad de la carga efluente.

La tecnología sugerida es, por tanto, el tratamiento biológico. Para analizar la biodegradabilidad se utiliza la relación DBO:N:P, que es uno de los indicadores más importantes para medir la contaminación en las aguas residuales. Se utiliza una relación DBO:N:P mínima de 100:5:1 para los procesos aerobios y una relación DQO:N:P de al menos 350:7:1 para los procesos anaerobios.

## REFERENCIAS

- [1] Pradeep K, Poddar; Omprakash Sahu. Quality and management of wastewater in sugar industry. *Water Sci* 2 November 2014.
- [2] Ana Marszalek and Ewa Puszczalo. Effect of Photooxidation on nanofiltration membrane fouling during wastewater treatment from the confectionary Industry. *Water* 2020,12,793, doi:3390/w12030793/ 12 march
- [3] Abou-Elela, S.I.; Nasr, F.A.; El-Shafai, S.A. Wastewater management in small- and medium-size enterprises: Case studies. *Environmentalist* 2008, 28, 289-296
- [4] Ozgun, H.; Karagul, N.; Dereli, R.K.; Ersahin, M.E.; Coskuner, T.; Ciftci, D.I.; Ozturk, I.; Altinbas, M. Confectionery industry: A case study on treatability-based effluent characterisation and treatment system performance. *Water Sci. Technol.* 2012, 66, 15-20
- [5] Sahu, O.P.; Chaudhari, P.K. Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and colour removal. *J. Electroanal. Chem.* 2015, 739, 122-129
- [6] Yotamo, A. F. D., Energy Balance of Boilers and Steam Lines, Monograph, 2009.
- [7] Marques, António E.C. Efficient Steam Generation from Bagasse, Internship Report, December 2014.
- [8] Abdoul Wahab Nouhou Moussa; Boukary Sawadogo; Yacouba Konate; Sayon dit Sadio Sidibe; and Marc Heran. Critical State of the Art of Sugarcane Industry Wastewater Treatment Technologies and Perspectives for Sustainability. *Membranes* 2023, 13, 709. <https://doi.org/10.3390/membranes13080709>.
- [9] José M. F. de Andrade; Kátia M. Diniz. Environmental Impacts of the Sugarcane Agroindustry: Subsidies for Management. Piracicaba September 2007
- [10] Nilton Bruno Silva Batista, André Aguiar, Study of physicochemical parameters and their correlations for dairy effluents in the state of Minas Gerais. XXII Latin American Scientific Initiation Meeting, XVIII Latin American Postgraduate Meeting and VIII Teaching Initiation Meeting - University of Vale do Paraíba, 2018;
- [11] Apoorva D, Chandrashekar B. Treatment of Sugar Industry Wastewater by Adsorption method, *International Research Journal of Modernisation in Engineering Technology and Science*. Volume:04/Issue:08/August-2022.
- [12] Muguirrima, P.V.M; Chirinza, N.P.; Grande, S.C; Mendieta Pino, C. A; León Zerpa, F; Pérez Báez, S.O; Martín, A. R. Tratamiento de efluentes domésticos mediante métodos biofíltros sostenibles. X Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el ámbito de las TIC y las TAC Las Palmas de Gran Canaria, 16 and 17 November 2023.
- [13] Matos, M.P. Effect of Binomial Time-Temperature of sample incubation on Biochemical Oxygen Demand diffusion of wastewater. Master's dissertation. Federal University of Viçosa, Minas Gerais 2012.
- [14] D. K. Amenorfenyo et al, "Microalgae brewery wastewater treatment: Potentials, benefits and the challenges," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 11, Jun. 2019, doi: 10.3390/ijerph16111910.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

- [15] Z. Luo, D. Xu, Y. Ma, and Q. Cheng, "Experimental study on co-firing of coal and brewery wastewater sludge," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 21, pp. 1- 11, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10217589.
- [16] M. Vítězová, A. Kohoutová, T. Vítěz, N. Hanišáková, and I. Kushkevych, "Methanogenic micro-organisms in industrial wastewater anaerobic treatment," *Processes*, vol. 8, no. 12. MDPI AG, pp. 1-27, Dec. 01, 2020. doi: 10.3390/pr8121546.
- [17] K. P. Shabangu, B. F. Bakare, and J. K. Bwapwa, "The Treatment Effect of Chemical Coagulation Process in South African Brewery Wastewater: Comparison of Polyamine and Alumi-num-Chlorohydrate coagulants," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14162495.
- [18] A. Karlović, A. Jurić, N. Ćorić, K. Habschied, V. Krstanović, and K. Mastanjević, "By-products in the malting and brewing industries-re-usage possibilities," *Fermentation*, vol. 6, no. 3. MDPI AG, 2020. doi: 10.3390/FERMENTATION6030082.
- [19] P. Thanekar and P. Gogate, "Application of hydrodynamic cavitation reactors for treatment of wastewater containing organic pollutants: Intensification using hybrid approaches," *Fluids*, vol. 3, no. 4. MDPI AG, Dec. 01, 2018. doi: 10.3390/fluids3040098.
- [20] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/w14101604.
- [21] G. Salbitani and S. Carfagna, "Ammonium utilisation in microalgae: A sustainable method for wastewater treatment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 2. MDPI, pp. 1-17, Jan. 02, 2021. doi: 10.3390/su13020956.
- [22] A. Chakraborty, A. Pal, and B. B. Saha, "A Critical Review of the Removal of Radionuclides from Wastewater Employing Activated Carbon as an Adsorbent," *Materials*, vol. 15, no. 24. MDPI, Dec. 01, 2022. doi: 10.3390/ma15248818.
- [23] C. A. Mendieta-Pino, T. Garcia-Ramirez, A. Ramos-Martin, and S. O. Perez-Baez, "Experience of Application of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) in Livestock Farms in Canary Islands," *Water Journal (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2022, Editorial MDPI doi: 10.3390/w14142279.
- [24] S. M. Khumalo, B. F. Bakare, S. Rathilal, and E. K. Tetteh, "Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/w14101604.
- [25] A. G. Rao, T. S. K. Reddy, S. S. Prakash, J. Vanajakshi, J. Joseph, and P. N. Sarma, "pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: A case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber," *Bioresour Technol*, vol. 98, no. 11, pp. 2131-2136, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.011.
- [26] F. Younas et al, "Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations, and environmental implications," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 2. MDPI AG, Jan. 02, 2021. doi: 10.3390/w13020215.
- [27] G. G. Santonja, P. Karlis, K. R. Stubdrup, and T. Brinkmann, "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries," 2010.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es financiado a cargo de fondos propios de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria de 2023, con título PIE "Aplicación de técnicas de aprendizaje activo y colaborativo en laboratorios como entornos de trabajo. Diseño, desarrollo y adaptación de equipos para su aplicación en sesiones de prácticas" y código PIE 2023-60 de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Esta investigación ha sido cofinanciada también por el programa de Cooperación INTERREG V-A, España- Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020, proyecto MITIMAC (MAC2/1.1a/263).

## 7. Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique

Cod. 11360 | Ingeniería y tecnología del medio ambiente | 3308.06 Regeneración del agua

nota técnica ■■■■

# Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique

*Evaluation of the physico-chemical properties of effluents from the sugar industry in Mozambique*

Paulino Vasco Mariano Muguirrima<sup>1</sup>, Nicolau Penicela Chirinza<sup>1</sup>, Federico León Zerpa<sup>2</sup>\*, Carlos Alberto Mendieta Pino<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> UniZambeze, (Mozambique)  
<sup>2</sup> IUNAT, ULPGC (España)

DOI: <https://doi.org/10.52152/D11360>

Las aguas residuales generadas por la industria azucarera presentan características complejas y suponen un reto importante para los ingenieros medioambientales en sus esfuerzos por idear estrategias eficaces de tratamiento y reutilización. El objetivo principal de este estudio es evaluar las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales de la Azucarera de Mozambique. Se seleccionó esta instalación debido a los considerables volúmenes de agua utilizados en sus procesos de producción (aproximadamente 900 m<sup>3</sup>/h), así como al modelo de gestión de efluentes que se aplicará. Se recogieron muestras durante un período de seis meses, con intervalos bimensuales, y se analizaron diversos parámetros físicos y químicos. Los resultados se compararon con las normas reglamentarias establecidas por Mozambique (Decreto 18/2004) y con los valores sugeridos por el Banco Mundial en varios informes.

La novedad de esta investigación radica en proponer un método óptimo para tratar estos efluentes de forma más sostenible desde el punto de vista medioambiental. Los resultados indican que la mayoría de los países productores de azúcar, donde existen normas de control de efluentes líquidos, limitan las cargas orgánicas a una concentración de DBO (demanda biológica de oxígeno) que oscila entre 15 y 60 mg/L [1].

Para evaluar la biodegradabilidad, la relación DBO:N es uno de los indicadores clave para medir los niveles de contaminación de las aguas residuales, así como para controlar la calidad del agua potable, comparando la demanda biológica de oxígeno, nitrógeno y fósforo. Normalmente se requiere una relación DBO:N mínima de 100:5:1 para los procesos de tratamiento aerobio, mientras que los procesos

Parámetros	[1]	[8]	[11]
Temperatura (°C)	40	29.3-44.3	24.3
pH	5.5	6.7-8.4	4.0
Turbidez (NTU)			621
DBO (mg/L)	970	654.4-1968.5	431.9
DQO (mg/L)	3682	1100.3-2148.9	1536.8
Conductividad (µS/cm)	2230	540.3-925.9	534
Fosfato (mg/L)	5.9	1-19	15
Nitrógeno (mg/L)		11.9-40.6	30

Tabla 1. Valores de los parámetros de efluentes de algunos autores

anaerobios exigen una relación DQO:N de al menos 350:7:1. La Tabla 1 presenta algunos resultados característicos, demostrando que, en general, la mayoría de los resultados para el tratamiento de efluentes industriales entran dentro de los rangos asociados a los procesos de tratamiento primario y secundario. [2-4].

Las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria azucarera analizadas en este estudio superan significativamente los valores umbral establecidos por la legislación aplicable (Decreto 18/2004), aunque algunos parámetros no se abordan explícitamente en el documento legal. Basándose en los datos obtenidos y en los grandes volúmenes de efluentes producidos (900-1000 m<sup>3</sup>/h), se recomienda el uso de lagunas aerobias. Con un tiempo de retención hidráulica superior a 120 horas o hasta 7 días, dichas lagunas facilitarían la reducción de la temperatura del efluente a niveles ambientales y promoverían los procesos aeróbicos, lo que podría disminuir significativamente la carga contaminante, como se menciona en [3].

El estudio también reveló que los niveles de pH de las aguas residuales cumplían las normas reglamentarias establecidas en la legislación que regula la calidad ambiental y las emisiones de efluentes de la industria azucarera (Decreto 18/2004). Según la normativa mozambiqueña, la relación DQO/DBO está fijada en 5. Sin embargo, en este estudio, la relación osciló entre 1,4 y 2,0, lo que está considerablemente por debajo del límite establecido,

indicando un alto nivel de biodegradabilidad en el efluente [4].

En consecuencia, se sugiere la tecnología de tratamiento biológico para gestionar estos efluentes. La relación DBO:N se utiliza para evaluar la biodegradabilidad, ya que es uno de los indicadores más críticos para evaluar los niveles de contaminación en las aguas residuales. Para los procesos de tratamiento aeróbico, se requiere una relación DBO:N mínima de 100:5:1, mientras que los procesos anaeróbicos necesitan una DQO:N.

### REFERENCIAS

- [1] P. Muguirrima et al, "Evaluation of the physico-chemical properties of effluents from the Mozambique sugar company. Una propuesta de tratamiento de efluentes". DYNÁ Energía y Sostenibilidad, Ene.-Dic. 2024, vol. 13, n. 1, DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11188>
- [2] Pradeep K, Poddar; Omprakash Sahu. Calidad y gestión de las aguas residuales en la industria azucarera. Water Sci 2 noviembre 2014.
- [3] Ana Marszalek y Ewa Puszczalo. Effect of Photooxidation on nanofiltration membrane fouling during wastewater treatment from the confectionary Industry. Agua 2020,12,793, doi:3390/w12030793/ 12 marzo
- [4] Abou-Elela, S.I.; Nasr, F.A.; El-Shafai, S.A. Gestión de aguas residuales en pequeñas y medianas empresas: Case studies. Environmentalist 2008, 28, 289-296.

### AGRADECIMIENTOS

Artículo cofinanciado por el proyecto MITIMAC (MAC2/I.1a/263).

## 8. Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company



*sustainability*



*Type of the Paper (Article, Review, Communication, etc.)*

### SIZING A SISTEM FOR TREATING EFLUENTS FROM THE MOZAMBIQUE SUGAR CANE COMPANY

Paulino Muguirrima <sup>1</sup>; Nicolau Chirinza <sup>1</sup> ; Carlos Mendieta<sup>2</sup>; Federico Zerpa<sup>2</sup> ; Sebastian Beaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science and Technology, Zambezi University

<sup>2</sup>Institute of Environmental Studies and Natural Resources (iUNAT), University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

**Abstract:** As with all industries, the sugar industry needs to be managed in a way that seeks innovation in terms of the waste generated throughout the process. Sugar mill waste has a high organic load and a high potential to pollute water bodies from various stages such as cooling bearings, mills, sugar cane washing, bagasse waste and cleaning products, hence the need to find treatment mechanisms that not only reduce this waste, but also return purer water to the environment, combining the reuse of water in various applications. The aim of this study was to analyse the results of the physical and chemical properties of the effluents generated and the main treatment technologies used to treat industrial wastewater from sugar factories. Mozambique's sugar mill wastewater has high levels of dissolved or suspended solids, organic matter, pressed mud, bagasse and atmospheric pollutants. It was

**Citation:** To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Paulino Muguirrima

Received:

Revised:

Accepted:

Published:



**Copyright:** © 2023 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

observed that the BOD/ COD ratio is low (<2.5), suggesting secondary treatment or more specifically biological treatment, which are humid systems built from stabilisation ponds, and the resulting water can be reused for irrigation purposes in agriculture.

**Keywords:** Environmental management, sugar industries, wastewater, treatment systems.

#### 1. Introduction

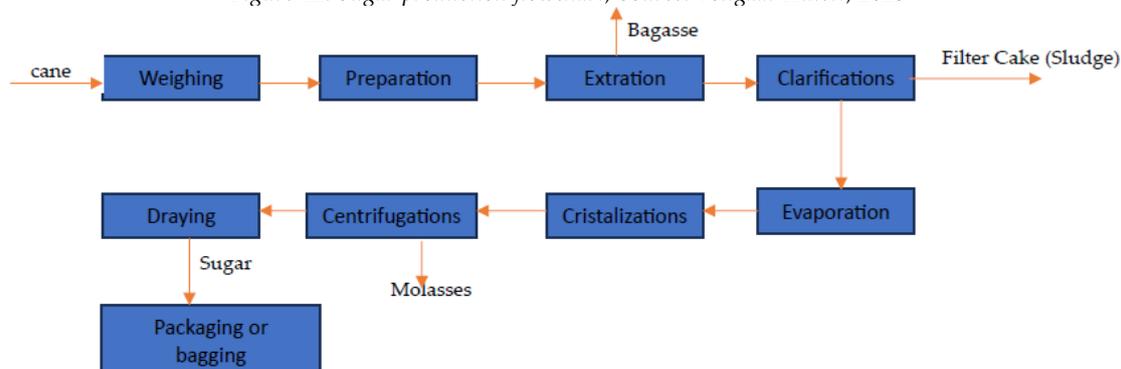
Industrialisation is essential for a country's development, but the pollution it generates is a serious concern worldwide. Reducing and controlling water consumption in industrialised countries is linked to optimising industrial and domestic wastewater treatment processes. Currently, there is a global interest in avoiding or reducing the effects of pollution on the environment, yet countless contaminations continue to occur, especially since a large part of the effluents generated in industrial production processes are difficult to remedy through conventional treatments and

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

the food sector is one of the environments that consume the most water and produce the most effluents per unit of production [1].

The sugar cane transformation process is highly complex, generating significant quantities of wastewater comprising liquid and solid discharges from the processing, handling and transformation of sugar cane. These discharges result from cooling, heating, extraction and reaction processes, as well as the washing of by- Products and the control of other rejected specification by-products. The quantities and qualities of these discharges are highly variable. As the water passes through the chambers and tanks from 35 extraction to sugar crystallization, its pollutant load in terms of organic matter and various pollutants increases significantly [3]. However, this sugar production route results in the generation of large quantities of solid waste such as cane straw bagasse, molasses and pressing sludge. Bagasse is obtained after pressing (crushing) the sugar cane stalks to extract 38 the juice. When processing one tonne of sugar cane, between 0.25-0.30 tonnes of bagasse are obtained. In 39 factories in Brazil, 0.28 tonnes of bagasse are normally generated [2]. According to other studies, 0.14 tonnes of 40 bagasse (dry mass) and 0.14 tonnes of straw (stalks) are obtained from one tonne of sugar cane [4]. The figure below shows the flow of the sugar production process and at each point in the process the type of effluent that is removed from the process and its characterisation at the next point.

Figure 12. Sugar production flowchart, Source: Tongaat Hulett, 2023



## 2. Composition of Industrial Effluents

### 2.1. Description of sugar industry effluents

In any sector of the food industry, food production is carried out with significant energy consumption, and relatively large quantities of waste result from technological processes. Thus, the main challenges in food technology are linked to energy and industrial effluent management. These effluents are of a solid, semi-solid and liquid nature and can be classified into two categories: waste from the harvesting operation, represented by cane leaves and tips; and waste from the cane processing flow, which includes bagasse, bagasse ash from incineration, pressing sludge (sludge from juice sedimentation and residual cake from juice filtration), and bearing lubricants in mills [7]. Normally, crushing one tonne of sugar cane yields around 280-300 kg of bagasse with 50% moisture, 30 kg of press mud and 41 kg of molasses. The energy from sugar cane is distributed according to the three main components extracted from the stalks: juice (sugar or ethanol), fibres (bagasse) and leaves (LT) have the same level of energy content, so currently only two thirds of the total energy potential is used. The energy content of one tonne of sugar cane is 6,560 MJ, distributed as follows: 140 kg of sugar for 2,340 MJ; 280 kg of bagasse (50% moisture) for 2,110 MJ and 280 kg of LT (50% moisture) 2,11 MJ [8]

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## 2.2. Sample Collection and Analysis

The sugarcane transformation process is highly complex, generating significant quantities of wastewater comprising liquid and solid discharges from the processing, handling and transformation of sugarcane. These discharges result from cooling, heating, extraction and reaction processes, as well as the washing of by-products and the control of other rejected specification by-products [6]. After collecting and analysing the effluents at the three points of the factory, namely the, boilers, workshops and pumps, the analytical results for TSS show that the workshop unit had the highest TSS of of 22 mg/L than the boiler and pump sections, values which are low in relation to the values established by Mozambican legislation of 50 mg/L. As for TDS, the values at all the collection points were as high [1137-1392] (mg/L) in relation to the value of the legislation and in comparison, with other sugar industries [6]. These TDS values are due to the industry's high crushing rate and as a result generate a greater amount of fly ash and heavy ash. The bagasse stacking plant is also nearby, so the coarse bagasse particles are mixing with the final effluent. In the mills, particularly in the bearings, there is a lot of spillage of lubricants due to the long use of these vises, which have been in use since national independence (1975 Independence of Mozambique, post-colonial era) and have several leaks which are the main contributors to TDS. The BOD and COD values were analysed for each collection point from the entrance and exit of the sector in the factory, and in the end the average in each sector and in general in the total effluents of the factory was evaluated. All the BOD and COD values were found to be higher than the standard values of 50 mg/L and 250 mg/L respectively according to Mozambican legislation [6]. The raw effluent values at the outlet showed BOD and COD values of 731 mg/L and 1351 mg/L respectively, a COD/BOD ratio of approximately 2:1, showing that the biodegradable fraction is high and biological treatment technology is the most suitable method, and on the other hand these high values can be endorsed by the spillage of molasses and sugar leaked onto the floors of the mills, which are swept and washed, the parameters of these effluents are shown in the table. [6]. Among the physical-chemical parameters of the sugar industry's wastewater, pH and Temperature were measured immediately on site, while the other physical-chemical parameters, such as Total Solids (ST), Suspended Solids (TSS), BOD, COD, chloride and sulphate tests, Turbidity, Alkalinity, Density and Conductivity, were analysed in our laboratories here at Zambezi University.

Table 1. Values of the Physico-Chemical Parameters of the Mozambique sugar plantation

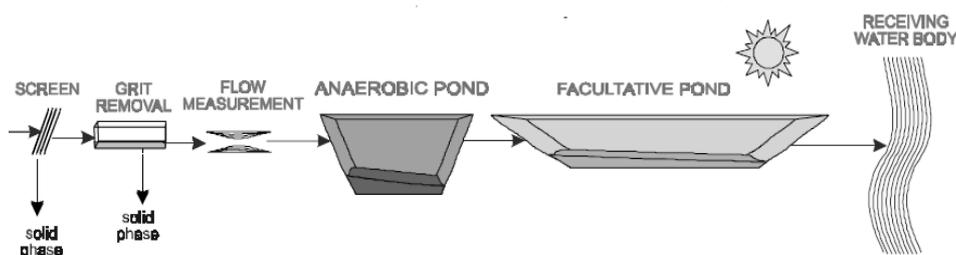
Parameters	Pump	Boilers	Opficinas	Decree 18/2004
Temperature( <sup>0</sup> C)	45	50	40	< =24
PH	6.34	8.13	6.96	6-9
Hardness (mg/l)	240.63	490.20	177.13	
Alkalinity (mg/l)	187.00	215.00	138.33	
Chlorides (ml/g)	105.60	172.63	81.43	
TDS(mg/l)	1392.00	1174.67	1137.00	
TSS(mg/l)	17.33	25.67	22.00	50
Turbidity (NTU)	9.15	11.16	15.03	
BOD(m/l)	731.67	628.00	675.00	50
COD(m/l)	1048.67	991.33	1351.00	250
Conductivity (S/cm)	2.49	1.96	7.83	
Phosphate (mg/l)	11.91	16.22	16.23	2
Nitrogen (mg/l)	14.11	10.58	11.39	10

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

## 3. Effluent treatment techniques

The processes used to treat industrial effluents can be categorised as physical, chemical and biological. Physical treatment includes processes in which there is no chemical or biological alteration of the substances. It is a primary treatment that aims to use physical phenomena to remove particles such as suspended solids and separate immiscible liquids. Examples of physical processes include filtration, flocculation and sedimentation [10]. Chemical treatment involves carrying out chemical reactions to improve the quality of the wastewater. In this type of treatment, neutralisation is commonly used to adjust the pH of the effluent. Operations such as electrochemical processes and advanced oxidative processes are also classified as chemical treatment [11]. Most effluent treatment plants use biological processes to remove organic compounds from wastewater. Biological treatment aims to break down polluting substances into stable products through the biochemical reactions of microorganisms, mostly bacteria. The main biological processes used in this type of wastewater treatment are: aerobic, anaerobic, facultative and a combination of the three types. In aerobic biological treatment, oxygen is present and used by microorganisms to degrade organic compounds into carbon dioxide and water. An example of an aerobic reactor widely used for effluent treatment is the conventional activated sludge reactor [12]. For this work, according to the data obtained in [6], we opted for a combination of stabilisation ponds. Stabilisation ponds are biological treatment systems in which organic matter is stabilised by bacteriological oxidation (aerobic oxidation or anaerobic fermentation) and/or photosynthetic reduction by algae. The diagram below gives us the routes we will follow in this work on the treatment processes for these effluents in the sequence of Physical, Chemical and finally Biological Processes, in which the latter we will focus on the stabilisation ponds and their sizing

Figure 13. Degradation processes from effluent load to final disposal, Source: adapted from Von Sperling (2005, p.303)

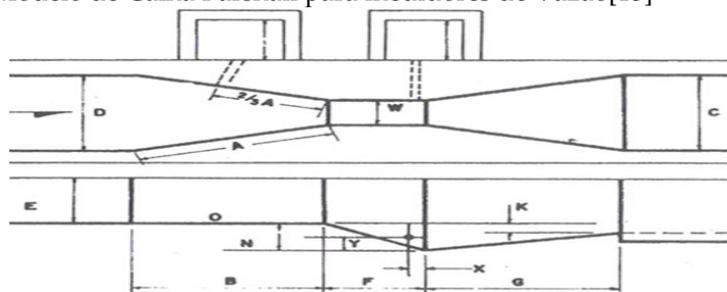


### 3.1.1. Preliminary treatment

Firstly, we'll carry out preliminary treatment, where we'll remove the solid parts of our effluent, such as silt, residual bagasse from extraction that may be in the effluent. It usually consists of the following stages: grating, desander and Parshall flume. The main purpose of this treatment is to remove coarse solids and sand through physical removal mechanisms, to protect the sewage transport equipment (pumps and pipes), to protect the subsequent treatment units and to protect the body receiving the treated effluent. In addition to the physical removal mechanisms, this system has a flow measurement unit (e.g. Parshall flume) [14][15]. The grating is made of iron or steel grids, depending on the corrosive action of the effluent and the spacing between the bars varies between 0.5 and 2 cm, which can be simple grids or mechanised grids depending on the volume of solids to be removed and which facilitate cleaning. The desander removes the coarse solids that may be present in the effluent, such as sand and earth, especially during rainy periods, which need to be separated. This is to prevent these particles from damaging the structures and causing blockages in the pipes and negative interference in biological processes. The Parshall flume is used to take flow measurements which, by means of throttling and bouncing, establish, for a given vertical section upstream, a relationship between the flow rate and the water table in that area. They have a low pressure drop and are very accurate at reading flow rates[15]. The figure below shows the flume model and the flow calculation ratios.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Figure 14. Modelo de Calha Parshall para medidores de Vazão[15]



To calculate the flow rate we use the following relationship:

$$Q = kh^n \quad (1)$$

Where Q- is the flow in m<sup>3</sup>/s

K and n- coefficients as a function of throat width

h-water blade.

Typical values for calculating effluent flow in parshall flumes are shown below

Table 1. the values of the constants K and n. Von sperling

Throat(W)	W(m)	n	k
3"	0,076	1,546	0,176
6"	0,152	1,580	0,381
9"	0,229	1,530	0,535
1"	0,305	1,522	0,690
2"	0,610	1,550	1,426
3"	0,915	1,566	2,182
4"	1,220	1,578	2,935
6"	1,830	1,595	4,515
8"	2,440	1,606	6,101

After passing through the previous stages, in particular the **Parshall** flume, the effluent goes to a stabilization tank, where it is completely homogenised. This is where some preliminary treatment processes take place, such as minimising shocks caused by overloading the system, diluting substances in the effluent and stabilising the pH, in order to improve the final quality of the treated effluent. In this way, the effluent becomes suitable for biological treatment. A detention time of between 3 and 6 days is used to calculate the equaliser tank[5]. The established detention time is the most suitable for stabilisation and the first biological treatment. A time of less than 3 days could cause the methanogenic bacteria in the effluent in the lagoon to exceed their own reproduction rate, which will be slow, depending on the temperature and the time of year. Times longer than 6 days can promote the emergence of an aerobic zone in the lagoon. Such a condition would be fatal to anaerobic bacteria. The detention times recommended in standards are shown in the table below[16].

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

*Table 2. Tempos de detenção recomendados*

Average temperature of the lagoon in the coldest month(° C)	Detention time (d)	
	Start of Plan	End of Plan
≤ 20	≥ 4	≤ 6
> 20	≥ 3	≤ 5

When the effluent leaves the factory, its temperature plays an important role in the degradation process in the lagoon, and if it coincides with the time when the ambient temperature is warm, then we will have greater degradation of the effluent in terms of BOD removal, but if it is cold, the degradation time will be slower[13]. This means that the temperature of the effluent at the outlet may not require a longer detention time for anaerobic processes. However, the values we measured at the plant ranged from 40<sup>0</sup> C to 50<sup>0</sup> C, and taking into account that the area where the plant is located has high ambient temperatures ranging from 29 C to 38<sup>0</sup>C [9], this could lead to a shorter detention time and greater efficiency in removing the load from the effluent. Stabilisation pond systems comprise units specially designed and built for the purpose of treating effluents, and are the simplest form of wastewater treatment[17], due to their low operating cost, but also due to the good efficiencies in removing organic matter, which can exceed 90% BOD removal [18] and pathogenic microorganisms, with 99.9% removal of faecal coliforms in the case of maturation ponds [15] that can be achieved in these systems. Among stabilisation pond systems, the facultative pond process is the simplest, depending solely on natural phenomena, according to [16]. To calculate the volume of stabilisation ponds, we need the hydraulic retention time (HRT), which is the time required for the effluent to remain in the pond for proper treatment. The typical TRH for stabilisation ponds varies from 20 to 50 days, depending on the organic load and the temperature of the environment[14]. And according to our data, the temperatures of the effluent leaving the factory ranged from 40<sup>0</sup> C to 50<sup>0</sup> C, so we can consider our lowest TRH to be between 15 and 20 days, depending on whether the season is cold or hot, which is why we found the highest value to be 20 days

$$V_{eq1} = Q_{ind} * T_{RH} \quad (2)$$

Where  $V_{eq1}$  - is the volume of effluent in m<sup>3</sup>/day

$Q_{ind}$  - is the effluent flow rate

$T_{detencion}$ - Hydraulic Retention Time (HRT) in days

As the plant pumps 900 to 1000 m<sup>3</sup>/hour, we need to convert this to m<sup>3</sup>/day:  $Q = 900 \times 24h$  a  $1000 \times 24h$  for the flow range we have, in which we will have 21600m<sup>3</sup> /day to 24000m<sup>3</sup> /day. With this flow data we can estimate the volume of effluent in the lagoon and estimate its occupied area, bearing in mind that according to [19] the typical depth of anaerobic lagoons varies from 3 to 5 metres, for our work we consider a depth of 4 metres. From here we calculate the volume of the lagoon considering a THR of 20 days (an average value)

$$V = 21600m^3/dia \times 20 \text{ days} \quad \text{ou} \quad 24000m^3/dia \times 20 \text{ days}$$

$$V = 432000m^3 \quad \text{ou} \quad V = 480000m^3 . \quad (3)$$

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

With this volume of effluent and adopting a minimum depth of 4m[15] we can find the area of our stabilization pond.

$$\begin{aligned} \text{Área} &= \frac{V}{\text{Profundidade}} = \frac{432000m^3}{4m} \quad \text{ou} \quad \frac{480000m^3}{4m} \quad (4) \\ \text{Área} &= 108000m^2 \quad \text{a} \quad 120000m^2 \end{aligned}$$

When the temperature of the effluent is higher, the microbial activity in the anaerobic and facultative treatment process tends to be even more efficient, potentially allowing the hydraulic retention time (HRT) to be reduced. By analysing the data in the table, we can analyse the load of the effluent contaminated by

$$C_{DBO} = \frac{S_0 \times Q_{max}}{1000} \quad (5)$$

In which:

$C_{DBO}$ - is the BOD load in kgBOD/day

$S_0$ - BOD concentration ( $S_0=731.67\text{mg/l}$ )

$Q_{max}$ - is the maximum effluent flow ( $Q_{max}=24000m^3/\text{day}$ )

With this data we can estimate our load

$$C_{DBO} = \frac{S_0 \times Q_{max}}{1000} = \frac{731.67\text{mg/l} \times \frac{1\text{kg}}{1000000} \times 24000m^3/\text{dia}}{1000} = 17.560\text{kg/day} \quad (6)$$

Next we need to determine the surface application rate ( $L_s$ ). According to [15], there are several empirical equations available internationally that correlate the surface application rate ( $L_s$ ) and the local temperature. This work will use the equation proposed by [23], which according to him can be used worldwide

$$L_s = 350x[1.107 - (0.002xT_{min}^0)]^{T_{min}^0-25} \quad (7)$$

In which:

$L_s$ - is the surface application rate, in kgDBO/ha.day

$T_{min}^0$ - average air temperature in the coldest month of the year ( $T_{min}^0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$$L_s = 350x[1.107 - (0.002x20)]^{20-25} = 338.83\text{kgDBO/ha.d} \quad (8)$$

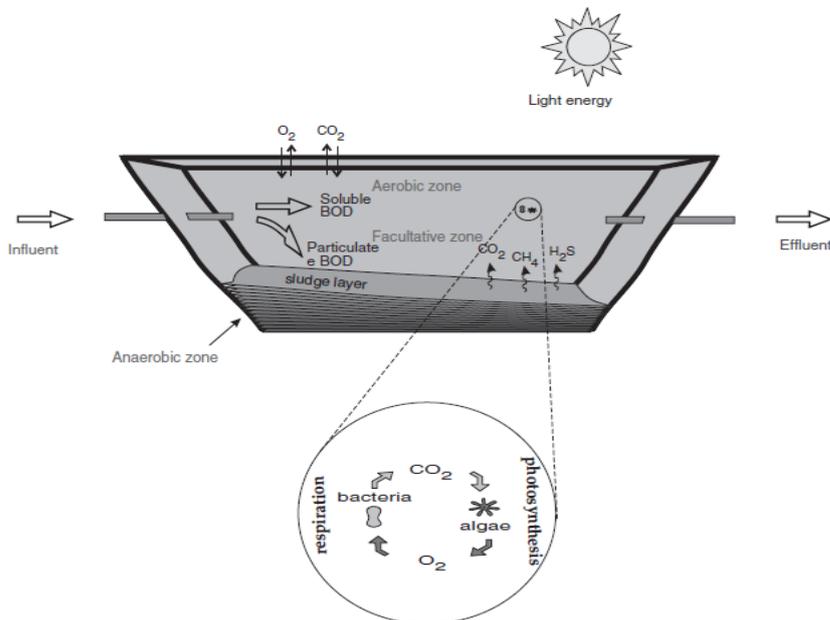
Next, we calculate the area required ( $A_{lagf}$ ) for the implementation of the lagoons. According to [16], the area required for the implementation of the facultative lagoon is calculated based on the Equation

$$A_{lagf} = \frac{C_{DBO}}{L_s} = \frac{17.560\text{ka/day}}{338.83\text{kgDBO/ha.day}} = 0.0518\text{ha} \quad (9)$$

Therefore, 0.0518 hectares, or 51.8 m<sup>2</sup>, will be needed to set up the ponds. Comparing the values in (4) and (9) leads us to make series connections for each type of stabilisation pond, i.e. anaerobic, aerobic and facultative ponds, and further on we will show how many of each type will be needed. Facultative ponds are made up of three treatment zones: aerobic, anaerobic and facultative (Figure 4). Formed by algae and aerobic bacteria, the aerobic zone is responsible for decomposing organic matter by means of oxidative processes on the surface of the pond. In contrast, the anaerobic zone is characterised by the absence of oxygen and anaerobic bacterial activity, which is found at the bottom of the lagoon. The facultative zone is found in the middle of the two aforementioned zones and is formed by the combination of the two types of microorganisms (aerobic and anaerobic), which eliminate the organic material still present in the liquid medium[20].

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

Figure 15. Drawing of a facultative lagoon representing the different zones of microbiological activity, aerobic, facultative and anaerobic, and the exchange of gases with the atmosphere. Source:[20]



Given that in anaerobic lagoons the degradation efficiency of BOD removal is around 50% (for temperatures less than or equal to 20°C) to 60%, this alone is not enough to make the effluent suitable. This is why it is not implemented as the only treatment, more commonly followed by a facultative lagoon for an organic matter removal efficiency of 82% on average [16]. However, a disadvantage of the anaerobic process is the generation of bad odours due to the production of methane and the reduction of sulphur which produces hydrogen sulphide gas

$$DBO_{Remainig} = 731,67mg/l \times (1 - 0.60) = 292,67mg/l \quad (10)$$

To determine the removal of the BOD/ COD effluent load, this is determined as a function of the average temperature. The higher the temperature, the higher the rate applied, reducing the total volume of the pond to be dimensioned. Next, we will analyse the concentration of BOD and COD and their removal expectations according to the type of stabilisation pond

Determine the total contaminant load in terms of BOD and COD..

Maximum flow : 24000 m<sup>3</sup>/day

Maximum BOD concentration:: 731.67 mg/L

Maximum COD concentration:: 1351 mg/L

$$Carga\ de\ DBO = Q_{maxim} \times Concentracao\ de\ DBO$$

$$Charge\ BOD = 24000m^3/dia \times 731,67mg/l \times \frac{1kg}{1000000mg} = 17.560kg/dia \quad (11)$$

$$Carga\ de\ DQO = Q_{maxim} \times Concentracao\ DQO$$

$$Charge\ COD = 24000m^3/dia \times 1351mg/l \times \frac{1kg}{1000000mg} = 32.424\ kg/dia \quad (12)$$

### 3.1.2. Removal Efficiency by Lagoon Type:

*In the Anaerobic lagoon:* 50-70% BOD and COD removal.

$$Charge\ BOD\ remainig: 17,560kg/day \times (1 - 0.6) = 7,024kg/day \quad (13)$$

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

$$\text{Charge de COD remainig: } 32,424\text{kg/day} \times (1 - 0.6) = 12,970\text{kg/day} \quad (14)$$

*In the Facultative lagoon:* 60-80% BOD and COD removal (after the anaerobic lagoon).

$$\text{Charge de BOD remainig: } 7,024\text{kg/dia} \times (1 - 0.7) = 2,107\text{kg/day} \quad (15)$$

$$\text{Carga de DQO remanescente: } 12,970\text{kg/dia} \times (1 - 0.7) = 3,891\text{kg/day} \quad (16)$$

*In the Aerobic lagoon:* 80-90% BOD and COD removal (after the facultative lagoon).

$$\text{Charge de BOD remaning: } 2.107\text{kg/day} \times (1 - 0.85) = 0,3160\text{kg/day} \quad (17)$$

$$\text{Charge de COD remaning: } 3,891\text{kg/day} \times (1 - 0.85) = 0,584\text{kg/day} \quad (18)$$

The rate of application of the parameters for sizing anaerobic lagoons depends on the temperature, where warmer locations allow for a higher rate and consequently a smaller volume. Below is an estimate of BOD removal in an anaerobic lagoon with a minimum depth of 4 metres depending on the temperatures in the coldest months of the year..

*Table 3. Estimated BOD removal in anaerobic lagoon[18]*

Average temperature in Lagoa in a cold month(° C)	BOD Removal Efficiency %
≤ 20	≤ 50
> 20	≤ 60

### 3.1.3. Dimensionamento do número de Lagoas:

To determine the number of ponds, we must consider the load removal capacity of each pond. Sizing Based on Load:

*In Anaerobic Lagoons:* Average BOD removal efficiency of 60%, with removal capacity per typical lagoon: Let's assume 5,000 kg of BOD/day.

$$\text{Número of Anaerobic Lagoons} = \frac{\text{Charge of BOD removal}}{\text{Capacity of Remotion per lagoons}} = \frac{17,560\text{kg/dia} \times 0.6}{5.000\text{kg/days}}$$

$$\text{Número of Anaerobic Lagoons} = 2.11 \quad (19)$$

Rounding the value up will give us 3 anaerobic ponds.

Facultative ponds with a BOD removal efficiency of 70% after anaerobic ponds, which have a typical removal capacity of 2000kg of BOD/day

$$\begin{aligned} \text{Númeber of Facultatives logoons} &= \frac{\text{Charge of BOD removal}}{\text{Capacity Remotions per lagoons}} \\ &= \frac{7,024\text{kg/dia} \times 0.7}{2.000\text{kg/dia}} \end{aligned}$$

$$\text{Número of Facultatives lagoons} = 2.46 \quad (20)$$

Rounding the value up will give us 3 facultative ponds.

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

For Aerobic lagoons, the average removal efficiency is 85% of BOD after the Facultative lagoons, the removal capacity per typical lagoon: Sopomos of 1.000kg of BOD/day

$$\begin{aligned} \text{Número of Aerobic lagoons} &= \frac{\text{Charge de BOD removal}}{\text{Capacity of Remotion per lagoons}} = \frac{2,107\text{kg/dia} \times 0.85}{1.000\text{kg/day}} \\ \text{Número of Aerobic lagoons} &= 1.79 \quad (21) \end{aligned}$$

Rounding the value up will give us 2 aerobic ponds. In summary, Table 5 shows the calculations, and below there is a more detailed explanation of the results in the context of the study objective.

**Table 5.** Lagoon number results.

<b>Lagoon Number Calculations</b>	
Number of Anaerobic lagoons	2.11
Number of Facultative lagoons	2.46
Number of Aerobic lagoons	1.79

A quantitative analysis of the calculations for the system in question reveals that the number of lagoons required based on the contaminant load will consist of the following: the system will require three anaerobic lagoons, three facultative lagoons, and two aerobic lagoons, for a total of eight lagoons. It is important to note that the pumping system must be designed in a way that allows for gravity-fed flow, as this will help to minimize energy consumption. It is essential that the connections between the lagoons be designed in a manner that allows for the continuous flow of effluent, with the preference being for this to occur by gravity. However, the use of pumps is an acceptable alternative in instances where gravity is not feasible. It is essential to install flow control to guarantee sufficient flow at each stage and to maintain load balance. It is crucial to monitor the contaminant load in each lagoon and to make any necessary adjustments to the process [48–50].

Maintenance and access must be monitored for each lagoon, and it must be ensured that all environmental and safety regulations are complied with in the construction and operation of the lagoons. Expected efficiency in our system of anaerobic lagoons: 50–70% BOD/COD removal; facultative lagoons: 60–80% additional removal after anaerobic; aerobic lagoons: 80–90% additional removal after facultative. After the preliminary treatment, where most of the processes are physical, we move on to the biological treatment phase, which takes place in the stabilization ponds for primary treatment [51–53]. We have already analyzed the detention time, depth and BOD removal rate of the incoming effluent, and we will now focus on primary treatment, which involves anaerobic reactions carried out by microorganisms in the presence of sunlight, which take place in the ponds over a period of 3 to 6 days. These results align with the objective of this study, which was to analyze the results of the physical and chemical properties of the effluents generated and the principal treatment technologies employed for the remediation of industrial wastewater from sugar factories. This can be achieved through humid systems built from stabilization ponds, with the resulting water suitable for reuse in agricultural irrigation

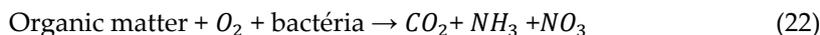
### 3.3. Biological Treatment in Stabilisation Ponds

In stabilisation ponds, bacteria such as *Achromobacter*, *Proteus*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Thiospirillum* and *Rhodothecae* predominate, and are responsible for degrading organic matter by oxidation [12]. The predominance of sunlight and the CO<sub>2</sub> synthesised by bacteria further facilitates the process of algae growth and thus increases photosynthesis in lakes, subsequently increasing the oxygen concentration. The most common algae are *Chlorella*, *Euglena*, *Scenedermus* and *Microcistis* [10]. As more and more algae grow inside the lake, the oxygen produced by the algae with the help of sunlight and the photosynthetic process increases, allowing the bacteria to break down more waste and achieve a reduction in the organic level [11]. The most common redox reactions are:

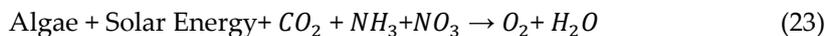
# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

:

### Oxidation:

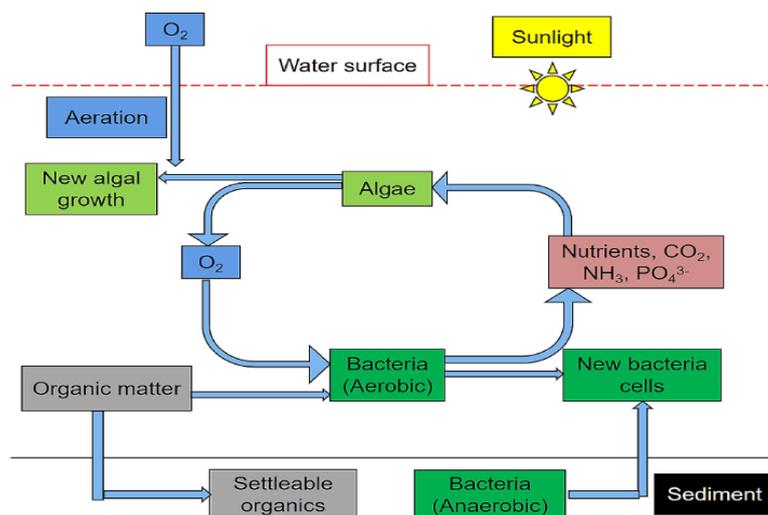


### Reduction:



During the night the upwelling process is weak and the organic solids and sludge settle to the bottom of the WSP and in the absence of oxygen, the anaerobic bacteria convert the insoluble inorganic waste into soluble organics such as ethanol and others which are broken down by anaerobic bacteria to form  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ . The sludge deposited at the bottom of the tank can be removed by dredging[11]. Below we show the biological cycle that takes place in the stabilisation ponds mentioned above, which is the final process for the effluent to remove its contaminant load in its entirety

Figura 16. Ciclo de remocao da carga por procesos Biologicos



## 4. Advantages and disadvantages

### 4.1. Advantages of using stabilisation pond systems

The use of different types of lagoons has a number of advantages: high BOD and coliform removal efficiency; reduced operating and maintenance costs; and simple operation.

### 4.2. Disadvantages of using this type of Stabilisation Pond system

The main disadvantages are: they require large areas to implement these systems; biological activity is affected by temperature; if they are in cold regions the process is slow; and they generate bad odours

## 5. Conclusion

The treatment of industrial effluents is of immeasurable importance and the consequences of improper disposal can be seen in various spheres of society. In environmental terms, the improper disposal of wastewater causes eutrophication of water bodies, death of aquatic life, contamination of soil and groundwater, since these systems use huge quantities of water for their production activities. For the

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

first time, based on the parameters obtained from the effluents from this factory, we were able to design a system for treating these

effluents using anaerobic, aerobic and facultative ponds. The lagoon system represents a reliable and dependable solution for basic sanitation, and is widely implemented in several countries. In Mozambique, due mainly to its tropical climate, lagoons represent a reliable and dependable solution for basic sanitation. In general, lagoons are easy to operate, have relatively low maintenance and construction costs and consume little energy. In terms of BOD removal efficiency, the typical range is between 75 and 85 per cent. With regard to coliform removal, up to 99.9 per cent efficiency can be achieved. This serial scheme, with three anaerobic, three facultative and two aerobic lagoons, maximizes contaminant removal efficiency and ensures that the treated effluent meets regulatory parameters before being released into the environment. We now need approval for the proposal from the sugar factory and support from the government of Mozambique to introduce our solution all across the country.

**Author Contributions:** Conceptualization, P.M. and S.O.P.B.; methodology, P.M.; software, N.C.; validation, P.M., F.A.L.Z. and C.A.M.P.; formal analysis, N.C.; investigation, P.M.; resources, F.A.L.Z.; data curation, C.A.M.P.; writing—original draft preparation, P.M.; writing—review and editing, F.A.L.Z.; visualization, C.A.M.P.; supervision, S.O.P.B.; project administration, F.A.L.Z.; funding acquisition, C.A.M.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was co-funded by Project PIE 2023-60 CONVOCATORIA DE PROYECTOS DE INNOVACIÓN EDUCATIVA 2023 de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. This research was also co-funded by the INTERREG V-A Cooperation, Spain-Portugal MAC (Madeira- Azores-Canaries) 2014-2020 program, MITIMAC project (MAC2/1.1a/263).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

**Data Availability Statement:** The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## 6. References

1. ALMEIDA, Jéssica Santos; SOUSA, Láisa Vieira; SILVA, Enoque Pereira. Sistema de Tratamento de Águas Residuárias de Laticínios. Anais do 3º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsona. 2020; 617-630
2. PEREIRA, F. JULIÃO, A Concepção e Eficiência do Sistema de Esgotamento Sanitário de João Pessoa - PB com ênfase na estação de tratamento do baixo paraíba, outubro de 2018
3. M. Meghana and Y. Shastri. Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. Elsevier Ltd. All rights reserved , 27 January 2020
4. Munagala Meghana, Yogendra Shastri. Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. Bioresource Technology 303 (2020) 122
5. A. Panhwar, A. Kandhro, S. Bhutto1, N. Brohi3, S. Naz. Chemical Treatment Options of Wastewater from Sugarcane Industry and its Priority Parameters Comparison as Per Smart Rules of Sindh Environmental Protection Agency. Pakistan Journal of Science (Vol. 73 No. 1 March, 2021)
6. Muguirrima, Paulino; Nicolau Chirinha, Federico Leon Zerpa, Carlos Mendieta Avaliação das Propriedades Físico-Químicas dos Efluentes da Companhia Açucareira de Moçambique, 2024.
7. Nicoleta Ungureanu, Valentin Vladut, and Sorin-S, tefan Biris. Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing. Sustainability 2022, 14, 11089. <https://doi.org/10.3390/su141711089>.
8. Pierossi Ma et al . Sugarcane Leaves and Tops: Their Current use For Energy and Hurdles to be Overcome, Particularly in South Africa, for Greater Utilisation. Proc S Afr Sug Technol Ass (2016) 89: 350-360
9. <https://www.inam.gov.mz/index.php/pt/?provincia=Sofala>

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

10. Camila Soares Silvestre Tolêdo. Tratamento de Efluentes Industriais: Uma Revisão de Fundamentos e Aplicações. XVI CNEG \_ Congresso Nacional de Excelência em Gestão ; INOVARSE \_ Simpósio de Inovação e Responsabilidade Social, ISSN 1984-9354. Rio de Janeiro, Brasil, 14, 15 e 16 de julho 2022.
11. Nilton Bruno Silva Batista, André Aguiar, *Estudo de Parâmetros Físico-Químicos e suas correlações para efluentes de Laticínios do estado de Minas Gerais*. XXII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VIII Encontro de Iniciação à Docência - Universidade do Vale do Paraíba, 2018;
12. Apoorva D, Chandrashekar B. *Treatment of Sugar Industry Wastewater by Adsorption method*, International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. Volume:04/Issue:08/August-2022;
13. Muguirrima, P.V.M; Chirinza,N.P.; Grande,S.C; Mendieta Pino, C. A;León Zerpa,F; Pérez Báez,S.O; Martín, A. R. *Tratamiento de efluentes domésticos mediante métodos biofiltro sostenibles*. X Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el ámbito de las TIC y las TAC Las Palmas de Gran Canaria, 16 y 17 de noviembre de 2023.
14. Matos,M.P.*Efeito de Binomio Tempo-Temperatura de incubação da amostra na demanda Bioquímica de Oxigenio difusão de águas residuárias*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais 2012.
15. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 3. ed. v. 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005, 452 p.
16. VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. v. 3. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002, 196 p.
17. VON SPERLING, M. Lodos ativados. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 1. ed. v. 4. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 1997, 428 p.
18. CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 649–679, 2015.
19. IMPACTOS na saúde e no sistema único de saúde decorrentes de agravos relacionados a um saneamento ambiental inadequado. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde, 2010. 246 p. Disponível em: Acesso em: 09 05. 2023.
20. NEVES, A. P. N. das; FERREIRA, D. da S.; CASTRO, D. A.; CAVALLINI, G. S. Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica em efluente sanitário em função da idade do lodo de reator UASB: um estudo de caso. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 449–456, 2019. DOI: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n4.neves. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/7832>. Acesso em: 26 maio 2023.
21. GEHLING, G. Lagoas de estabilização. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul
22. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas E Saneamento Básico. Atlas Esgoto/ Ministério do Desenvolvimento Regional, ANA. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2020.
23. MARA, D.D. Design manual for waste stabilisation ponds in India. Lagoon Tecnology International Ltd. Leeds: 1997
24. Chernicharo, C.A.L.; Van Lier, J.B.; Noyola, A.; Bressani Ribeiro, T. Anaerobic sewage treatment: State of the art, constraints and challenges. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **2015**, 14, 649–679. [CrossRef]
25. IMPACTOS na Saúde e no Sistema Único de Saúde Decorrentes de Agravos Relacionados a um Saneamento Ambiental Inadequado; Fundac.º Nacional de Saúde: Brasília, Brazil, 2010; 246p.
26. Zaharia, C.; Musteret, C.-P.; Afrasinei, M.-A. The Use of Coagulation-Flocculation for Industrial Coloured Wastewater Treatment- (I) The Application of Hybrid Materials. *Appl. Sci.* **2024**, 14, 2184. [CrossRef]

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN)  
APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN  
MOZAMBIQUE

27. Montero, A.A.G.; Arrieta, Y.M.B.; Serrano, E.V.P. Treatment of Slaughterhouse Wastewater through a Series System: Upflow Anaerobic Reactor and Artificial Wetland. *Water* **2024**, *16*, 700. [CrossRef]
28. Maria, M.P.; Torres, N.H.; Nascimento, V.R.S.; Chagas, T.S.A.; Saratale, G.D.; Mulla, S.I.; Bharagava, R.N.; Cavalcanti, E.B.; Ferreira, L.F.R. Current advances in the brewery wastewater treatment from anaerobic digestion for biogas production: A systematic review. *Environ. Adv.* **2023**, *13*, 100394. [CrossRef]
29. Bao, Y.; Koutavarapu, R.; Lee, T.G. Derivation of Optimal Operation Factors of Anaerobic Digesters through Artificial Neural Network Technology. *Systems* **2023**, *11*, 375. [CrossRef]
30. Mendieta-Pino, C.A.; Garcia-Ramirez, T.; Ramos-Martin, A.; Perez-Baez, S.O. Experience of Application of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) in Livestock Farms in Canary Islands. *Water* **2022**, *14*, 2279. [CrossRef]
31. das Neves, A.P.N.; Ferreira, D.d.S.; Castro, D.A.; Cavallini, G.S. Avaliac.º da eficiªncia de remoc.º de matªria orgªnica em efluente sanitªrio em func.º da idade do lodo de reator UASB: Um estudo de caso. *J. Biotechnol. Biodivers.* **2019**, *7*, 449–456. Available online: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/7832> (accessed on 26 May 2023). [CrossRef]
32. Mendoza-Tinoco, T.P.; Sánchez-Vázquez, V.; del Carmen Fajardo-Ortiz, M.; González, I.; Beristain-Cardoso, R. How does a low-magnitude electric field influence anaerobic digestion in wastewater treatment? A review. *Chemosphere* **2023**, *325*, 138402. [CrossRef] [PubMed]
33. Khumalo, S.M.; Bakare, B.F.; Rathilal, S.; Tetteh, E.K. Characterisation of South African Brewery Wastewater: Oxidation-Reduction Potential Variation. *Water* **2022**, *14*, 1604. [CrossRef]

## 9. Resúmenes de los Artículos

### 9.1. Treatment Of Domestic Effluents Using Sustainable Biofilter Methods

**Resumen:** Este artículo presenta un método de tratamiento de efluentes, comenzando por los caseros que utilizamos en el laboratorio de agua de la Universidad de Zambezi, que utilizamos para la investigación y el tratamiento de caracterización, de manera educativa para nuestros estudiantes de pregrado y posgrado. El modelo plantado se basa en un sistema de membranas filtrantes con diferentes grametrías, compuestas por arena, grava y rocas, y una bolsa de nailon utilizada en el laboratorio. El sistema funciona en base a los procesos naturales de depuración que encontramos en la Naturaleza. Se realiza una simulación de un sistema de tratamiento de aguas residuales sanitarias del comedor universitario. Con este método aumentamos las habilidades de los estudiantes de pregrado para utilizar los mismos sistemas en sus comunidades donde la red de salud no los cubre. Los resultados nos muestran el comportamiento del prototipo diseñado donde se espera eliminar la carga de efluente al pasar de un filtro a otro. Finalmente, recogiendo la salida de cada filtro, se dibujan gráficos de tendencia para la eliminación de los parámetros del agua residual hasta la salida final del efluente.

A partir de estos gráficos se pudo verificar la degradación de los parámetros físicos de las aguas residuales sanitarias de manera satisfactoria, solo falta la degradación de los componentes químicos y biológicos que generalmente requieren de un tiempo de residencia estimado mayor al realizado en los experimentos para su degradación. Sería necesario un tiempo de residencia más prolongado para estimular las actividades microbiológicas en cada sección de los filtros..

**Objetivos** -Los principales objetivos de este estudio son:

- Enseñar a la comunidad académica técnicas de tratamiento de aguas residuales a nivel de la Universidad de Zambezi.
- Utilizar el biofiltro como una de las técnicas de tratamiento de efluentes a menor escala y utilizarlo para mejorar los sistemas macroscópicos de tratamiento de efluentes.
- Analizar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales mediante el biofiltro.

#### **Metodología**

Ya se ha mencionado en la literatura que el tratamiento de aguas residuales se divide básicamente en cuatro niveles: preliminar (remoción de sólidos gruesos, grasas y arena); primario (eliminación de sólidos suspendidos sedimentables); secundaria (predominio de mecanismos biológicos, encaminados a eliminar la demanda de oxígeno) y terciaria o avanzada (eliminación de nutrientes, organismos patógenos, metales pesados, sólidos inorgánicos disueltos y compuestos no biodegradables). Y en nuestra metodología seguimos estos pasos: en primer lugar, se recogieron las aguas residuales sanitarias y se analizaron los parámetros físico-químicos en el laboratorio

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

de agua de la Universidad de Zambezi. Con la ayuda de contenedores de 20l se recoge el efluente y se introduce en el biofiltro disponible en el laboratorio.

El sistema consta de tres filtros con materiales de diferentes granulometrías, para el filtrado se utilizan arena, piedra triturada y grava. Las aguas residuales se colocan en el primer filtro donde tenemos material de mayor gramometría para la primera filtración. Aquí se retiran los materiales gruesos contenidos en el efluente, luego en el segundo donde hay materiales más finos (gravilla) para la segunda etapa de remoción y finalmente el último filtro donde se contiene arena para la etapa final de filtración, allí se realiza la remoción paulatina de particulados que componen las aguas residuales. En cada etapa, se recoge la muestra mediante una pipeta de PVC y se analizan los parámetros. Después de cada ciclo es necesario limpiar y raspar, por ejemplo en el primero donde hay mayor deposición de capas. El pH y la temperatura se miden mediante tiras de pH y un termómetro respectivamente, los datos se analizan mediante Excel u Origin para trazar los gráficos para una mejor ilustración. A esto le sigue el análisis de datos y la discusión de los resultados. Resultados

Con los resultados de las características obtenidas a la salida de cada medio filtrante, los datos se insertan en programas como excel u origin para una mayor visualización, se obtuvieron tablas y gráficos para un mejor control de las características. Donde se comprobó como cada parámetro de las aguas residuales como PH, temperatura, Tss, Tds se degradaban con mayor eficiencia. Los parámetros biológicos no se analizaron de forma más eficiente porque el tiempo de residencia previsto para la clase no fue suficiente para que se produjeran fenómenos químicos.

Teniendo en cuenta que este modelo es para uso en laboratorio y está alineado con sistemas de tratamiento naturales, puede usarse como prototipo para sistemas de mayor flujo como los de zonas urbanas para el tratamiento de efluentes. Los mismos principios se aplican en los sistemas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), donde simplemente por sus características se pueden agregar otras técnicas de degradación al tener más parámetros a degradar como lodos activados, sistemas de aireación, entre otros.

### **9.2. Evaluation of the Physico-Chemical Properties of Effluents from the Mozambique Sugar Company. a Proposal for Effluent Treatment**

**Resumen:** En este artículo buscamos analizar los efluentes que se arrojan al río Pungue desde la fábrica de azúcar de Mozambique. Es una característica común que todas las empresas azucareras de Mozambique vierten sus efluentes en los ríos donde están instaladas. Al analizar estos parámetros se comparan con otra literatura a nivel mundial y también con los estándares establecidos en el país por el decreto 18/2004, el cual se encuentra actualmente vigente. Se tomaron muestras de agua y, con la ayuda de los laboratorios de análisis de agua de la universidad y otros laboratorios de otras agencias, se promedió la variación de estos parámetros y, por primera vez, se

# EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

obtuvieron datos característicos de la composición de los efluentes de las fábricas de azúcar en Mozambique (Mafambisse). Con estos datos se intentó analizar la carga contaminante y la relación DBO/DQO y DQO/DBO para encontrar qué sistema de tratamiento sería más adecuado y económicamente viable, tras analizar una propuesta para su tratamiento.

**Objetivos** - El objetivo de este trabajo fue realizar la evaluación físico-química de las propiedades de los efluentes de la fábrica utilizando la literatura para encontrar el modelo adecuado para su tratamiento.

## Metodología

En principio se definieron los puntos donde se generan efluentes como cenizas en las calderas, donde hay mezclas de vapor y aceites de cojinetes (talleres) y donde se mezclan y se mezclan las dos líneas de agua, provenientes de los talleres y calderas (bombas). bombeada. Con esto podemos tener las características del agua antes y después de mezclarla y antes de ser arrojada al río. Utilizamos contenedores tipo PET donde recolectamos las muestras y se miden las temperaturas del agua en cada lugar. Estas muestras recolectadas fueron tomadas para su análisis en al menos tres laboratorios de análisis de agua, uno de uniZambeze, del Fondo de Abastecimiento de Agua (FIPAG) y del Laboratorio - Laboratorio Nacional de Higiene del Agua y de los Alimentos (LNHAA - LAB), allí fueron evaluadas por primera vez. tiempo, los parámetros de temperatura, PH, dureza, alcalinidad, cloruros, TDS, Tss, turbidez, DBO, DQO, Conductividad, fosfatos y nitratos. Con estos datos creamos una tabla de valores medios de los parámetros evaluados y creamos una tabla además de insertar su comparativa según decreto 18/2004. A partir de estos datos podemos estimar la composición del efluente de cada sector de la fábrica y a nivel de fábrica.

## Resultados

Con los parámetros medidos a nivel de fábrica, se realizó una discusión consultando bibliografías de trabajos similares en otras azucareras del mundo y se realizó un análisis de la relación de biodegradabilidad utilizando la relación DQO/DBO. Los resultados bibliográficos muestran que para analizar la biodegradabilidad se utiliza una relación DBO:N:P mínima de 100:5:1 para procesos aeróbicos y una relación DQO:N:P de al menos 350:7:1 para procesos anaeróbicos, y en el En el caso de la industria azucarera de Mozambique, esta relación DQO/DBO era altamente biodegradable. Este parámetro de biodegradabilidad es el que dicta la elección del tipo de tratamiento que se debe idealizar. A partir de ahí se eligió el sistema más conveniente para este tipo de efluente y caudal, que en nuestro caso fue el sistema lagunar.

### 9.3. Evaluación de las propiedades fisico-químicas de los efluentes de la industria azucarera de Mozambique

**Resumen:** Las aguas residuales generadas por la industria azucarera presentan características complejas y representan un desafío importante para los ingenieros ambientales en sus esfuerzos por diseñar estrategias efectivas de tratamiento y reutilización. Sin embargo, para conocer el nivel de carga contaminante es necesario evaluar sus propiedades físico-químicas, comparar estos resultados con los decretos establecidos en el país y compararlos con los estándares ambientales sugeridos por el decreto 13 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Evaluación de parámetros físicos como temperaturas, pH, dureza, alcalinidad, cloroformos, turbidez, conductividad, TDS, TSS, Fósforo y Nitrógeno, y los parámetros Bioquímicos DBO, DQO podemos conocer el nivel de la carga contaminante, clasificar el tipo de tratamiento si es biológico o Físico-Químico. Pero debido a la naturaleza de los efluentes del ingenio azucarero de Mozambique, fueron clasificados como biológicos.

**Objetivo:** O objetivo del estudio es evaluar las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales de la Azucarera de Mozambique en un período de seis meses, con intervalos bimestrales y comparar los resultados con los estándares regulatorios establecidos por Mozambique (Decreto 18/2004) y con los valores sugeridos por el Banco Mundial en diversas Informaciones y clasificar el tipo de tratamiento si es biológico o Físico-Químico.

#### Metodología

Se recogieron muestras durante un periodo de seis meses, con intervalos bimensuales, y se analizaron diversos parámetros físicos y químicos. Los resultados se compararon con las normas reglamentarias establecidas por Mozambique (Decreto 18/2004) y con los valores sugeridos por el Banco Mundial en varios informes. Utilizamos contenedores tipo PET donde recolectamos las muestras y se miden las temperaturas del agua en cada lugar. Estas muestras recolectadas fueron tomadas para su análisis en al menos tres laboratorios de análisis de agua, uno de uniZambeze, del Fondo de Abastecimiento de Agua (FIPAG) y del Laboratorio - Laboratorio Nacional de Higiene del Agua y de los Alimentos (LNHAA - LAB), allí fueron evaluadas por primera vez. tiempo, los parámetros de temperatura, PH, dureza, alcalinidad, cloruros, TDS, Tss, turbidez, DBO, DQO, Conductividad, fosfatos y nitratos. Con estos datos creamos una tabla de valores medios de los parámetros evaluados y creamos una tabla además de insertar su comparativa según decreto 18/2004. A partir de estos datos podemos estimar la composición del efluente de cada sector de la fábrica y a nivel de fábrica.

#### Resultados

Las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria azucarera analizadas en este estudio superan significativamente los valores umbral establecidos por la legislación aplicable (Decreto 18/2004), aunque algunos parámetros no se

## EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MOZAMBIQUE

abordan explícitamente en el documento legal. El estudio también reveló que los niveles de pH de las aguas residuales cumplían las normas reglamentarias establecidas en la legislación que regula la calidad ambiental y las emisiones de efluentes de la industria azucarera (Decreto 18/2004). Según la normativa mozambiqueña, la relación DQO/DBO está fijada en 5. Sin embargo, en este estudio, la relación osciló entre 1,4 y 2,0, lo que está considerablemente por debajo del límite establecido, indicando un alto nivel de biodegradabilidad en el efluente. La novedad de esta investigación radica en proponer un método óptimo para tratar estos efluentes de forma más sostenible desde el punto de vista medioambiental, se sugiere la tecnología de tratamiento biológico para gestionar estos efluentes. La relación DBO:N se utiliza para evaluar la biodegradabilidad, ya que es uno de los indicadores más críticos para evaluar los niveles de contaminación en las aguas residuales. Para los procesos de tratamiento aeróbico, se requiere una relación DBO:N mínima de 100:5:1, mientras que los procesos anaeróbicos necesitan una DQO:N.

### **9.4. Sizing a System for Treating Effluents from the Mozambique Sugar Cane Company**

*Resumo-* Después de analizar las características físicas y químicas de los efluentes, en este artículo seguimos la etapa de cómo sería el sistema de tratamiento, dimensionando nuestro sistema, conociendo el caudal y definiendo el tiempo de residencia del efluente. Empezamos analizando cuánto efluente tenemos por día y cuántos estanques y tipos de estanques se podrían necesitar para depurar nuestro efluente. Estimamos el área que sería necesaria para cada lago dependiendo de la profundidad utilizada en las bibliografías, evaluamos el porcentaje de degradación de DBO y DQO para cada tipo de lago, estabilización y maduración. Calculamos cuántos se necesitarían observando el caudal, el tiempo de residencia, la carga máxima de DQO y DBO y su respectiva eficiencia. Luego calculamos cuántos estanques se necesitarían y cuántos se necesitarían con la combinación de estanques de estabilización y maduración. También se evaluó la posibilidad de otros sistemas de tratamiento y su viabilidad.

**Objetivo-** Diseñar un sistema de tratamiento para la empresa azucarera de Mozambique.

- Evaluar dependiendo del tiempo de residencia y profundidad de cada tipo de lago.
- Analizar la remoción de la carga contaminante DBO y DQO
- Calcular cuántos estanques se necesitarían dependiendo del área requerida
- Analizar la posibilidad de combinar estanques de estabilización y maduración.

*Metodología-* Básicamente se trataba de mirar el volumen de agua que se sacaba de la fábrica cada hora y luego estimar el flujo que tendríamos durante el día. Con este

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN)  
APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN  
MOZAMBIQUE

caudal y un tiempo de residencia predeterminado para cada tipo de sistema (estabilización y maduración), calcular la carga contaminante DBO o DQO que se retira de fábrica por día. Con esta carga contaminante, evaluar el área requerida para estabilizar esta carga. Luego estime la eficiencia de cada uno de los sistemas. Con la carga removida/capacidad de remoción, estimamos cuántos estanques se necesitarían tanto individualmente como en combinación, porque a veces estos sistemas pueden complementarse entre sí. Y evaluamos las ventajas y desventajas.

## **Parte IV**

### **Conclusiones Finales**

## 10. Consideraciones y conclusiones

En este trabajo se abordaron los distintos tipos de tratamientos de efluentes, ya sean sanitarios o industriales. Para los sistemas de salud partimos de los más simples a través de procesos educativos a nivel de comunidades universitarias y sus multiplicidades en comunidades rurales como los biofiltros sustentables que utilizamos en laboratorios pero que también se pueden mejorar en comunidades rurales ETDAR o en sistemas domiciliarios. Para diseñar un sistema de tratamiento, en primer lugar, es necesario conocer las propiedades fisicoquímicas de los efluentes, a vazao do efluente y con estas características evaluar su carga contaminante para luego clasificarlos según su biodegradabilidad. En función de su biodegradabilidad elegir el tipo de sistemas de tratamiento, ya sea físico, biológico o químico. La mayoría de estos procesos de tratamiento se pueden describir en cuatro niveles: - Tratamiento preliminar: prioriza la eliminación de sólidos gruesos mediante mecanismos físicos; - Tratamiento primario: tiene como objetivo eliminar los sólidos sedimentables y, en consecuencia, parte de la materia orgánica (también utiliza mecanismos físicos para esta eliminación); - Tratamiento secundario: tiene como objetivo eliminar la materia orgánica, y posiblemente algunos nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, a través de mecanismos biológicos y fisicoquímicos; - Tratamiento terciario: busca la eliminación de contaminantes específicos como compuestos tóxicos o no biodegradables, pudiendo también aspirar a eliminar adicionalmente contaminantes que no se eliminan suficientemente en el tratamiento secundario. Para que el sistema sea más eficiente, la elección del proceso que se utilizará es fundamental para satisfacer las necesidades de la población atendida y también los requerimientos ambientales actuales, es decir, la calidad del efluente final debe ser adecuada a las necesidades del preceptor. Además, se debe respetar el nivel de eficiencia deseado, el área disponible para implementar el sistema, el costo y la complejidad de implementar y operar los procesos, la producción y eliminación de lodos y la dependencia de insumos externos.

La legislación de cada país también juega un factor importante en la evaluación de los efluentes y sus normas de eliminación. Para la realidad mozambiqueña contamos con 4 ingenios azucareros que no cuentan con sistemas de tratamiento, en este trabajo trajimos metodologías adecuadas para el sistema de tratamiento y su eficiencia. También podrán adoptarse otros sistemas de tratamiento, siempre que sean económicos y ambientalmente aceptables.

## 10.1. Conclusiones

Con el presente trabajo, cuyo objetivo fue implementar un sistema natural de depuración de aguas residuales de una empresa azucarera en Mozambique, luego de analizar las características de las aguas residuales, el flujo de agua que es necesario para alimentar la fábrica, teniendo en cuenta la bibliografía Referencias, legislación imputada a las características del agua, así como diversos sistemas de tratamiento de agua, los parámetros físico-químicos de los efluentes generados se encuentran fuera de los límites recomendados para su disposición en los ríos si miramos la legislación mozambiqueña, así como lo que se recomienda ambientalmente a nivel global. Para llegar a estos sistemas, analizamos varios procesos que utilizan SDN como medio de purificación de aguas residuales. La primera de esta tesis por compendio fue el biofiltro sustentable, donde los análisis realizados en los laboratorios de la UniZambeze en colaboración con otros expertos lograron una eficiencia del 65 al 70% de los valores DBO/DQO, los cuales son compatibles con otras bibliografías que también están relacionadas. al tiempo de residencia en cada medio filtrante, tiempos más largos mayor eficiencia de eliminación.

Al analizar sistemas con mayores flujos de efluentes industriales el caso da azucarera en Mozambique, de alrededor de 900 a 1000 m<sup>3</sup>/h. Para estos sistemas utilizamos lagunas donde podemos definir el tiempo de residencia, profundidad y conexión entre ellas para un mayor almacenamiento de efluente industrial. Con el nivel de la ratio DBO/DQO (<2,5) recurrimos a tratamientos secundarios, concretamente tratamientos biológicos. Para este tipo de cargas de efluentes son opcionales las lagunas con sistemas aeróbicos y anaeróbicos.

Analizando los caudales, haciendo cálculos entre los volúmenes de agua vertidos por la fábrica, las temperaturas a las que salen estos efluentes, el tiempo necesario para retirar la carga contaminante, evaluando los espacios disponibles en el campo de la fábrica, estimamos que con una conexión en serie de Con 3 lagunas anaeróbicas, 2 lagunas opcionales y 2 lagunas aeróbicas, podemos lograr un tratamiento eficaz de los efluentes industriales de las empresas azucareras de Mozambique en un Económicamente viable ya que no habría costos de electricidad y hay mucho espacio disponible para implementar las lagunas. Los sistemas de lagunas facultativos y anaeróbicos que operan con sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales muestran una buena eficiencia con una efectividad de alrededor del 80 al 90%.

Otros sistemas como el UASB tienen rendimientos mayores que las lagunas, pero siempre requieren un mayor consumo de energía. Si aplicamos sistemas de combinaciones de lagunas facultativas y anaeróbicas en serie, los estudios revelan que se pueden lograr mayores niveles de eficiencia en la eliminación de cargas contaminantes de estos sistemas sin consumo eléctrico.

## 10.2. Recomendaciones

Para futuros estudios, se recomienda realizar investigaciones exhaustivas en otras fábricas de las mismas empresas, que tampoco cuentan con un sistema de tratamiento, tomando como referencia documentos explícitos sobre estándares internacionales o nacionales para el tratamiento de agua, teniendo en cuenta que otras fábricas como Xinavane, además de producir azúcar, también producen alcohol y melaza.

Las comunidades universitarias deben involucrarse en las industrias universitarias, realizando estudios recurrentes no sólo de efluentes líquidos, sino también gaseosos, ya que existen vapores en dispersión con diversos tipos de contaminantes, olores provenientes del azúcar vaporizado.

Para las regiones centrales, que tienen otros ingenios azucareros de otras empresas, se debe realizar un estudio y caracterización de sus efluentes, ya que en la región central también tenemos las empresas Sena Sucar, que están siendo administradas por Terreos, una multinacional de capital indio/brasileño. Y también las empresas Buzi. Esto, en última instancia, contribuiría a una menor contaminación de los ríos, que normalmente son el cuerpo de desechos líquidos, lo que genera muchos impactos en la salud pública dado que la mayoría de la población mozambiqueña utiliza los ríos como fuente de supervivencia, como la agricultura y la pesca.

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN)  
APLICADOS EN LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN  
MOZAMBIQUE

**Simbología**

*AW-Artificial Wetlands*

*SDN-Sistema de depuração Natural*

*DOCARNA- Doctorado en Calidad Ambiental y Recursos Naturales*

*DBO-Demanda Bioquímica de Oxígeno*

*DQO-Demanda Química de Oxígeno*

*TSS-Total de sólidos Suspensos*

*TDS-Total sólidos Dissueltos*

**EN6**-Estrada Nacional Número 6

**PH**-Potencial de Hidrogénio

**NSS**-Natural Purification Systems

*EDAR- Estación Depuradora de Aguas Residuales*

*SC-Sistemas Convencionais*

**UASB** - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

**RAFA**-Reactor de Fluxo Ascendente

*LNHAA -LAB- Laboratório Nacional de Higiene de Águas e Alimentos - Laboratório*

**WSP**- Water and Sanitation Program

**CIEMA**- Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente