UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

APROVECHAMIENTO DE LODO BIOLÓGICO Y MATERIA VEGETAL PROCEDENTE DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A

MERY LEE CUBA NOGALES

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2024

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

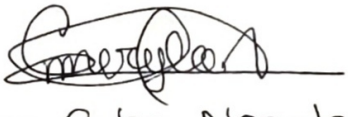
PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación o Graduación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado Aprovechamiento de lodo biológico y materia vegetal procedente de sistemas de tratamiento de aguas residuales. que presenté para obtener el título/grado de Ingeniera Química, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

Atentamente



Mery Lee Cuba Nogales 314342012
(Nombre, firma y número de cuenta de la persona alumna)

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	**Profesor: LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL**
VOCAL:	**Profesor: GARCÍA GONZÁLEZ SERGIO ADRIAN**
SECRETARIO:	**Profesor: RODRÍGUEZ CASTAÑEDA ILEANA**
1er. SUPLENTE:	**Profesor: GUTIÉRREZ LARA MARÍA RAFAELA**
2° SUPLENTE:	**Profesor: HERNÁNDEZ GÓMEZ LUCIANO**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA EXPERIMENTAL

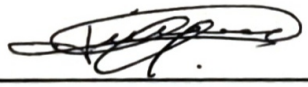
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

SUPERVISOR TÉCNICO:



M en C. Luciano Hernández Gómez

SUSTENTANTE:

Mery Lee Cuba Nogales

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por brindarme un lugar donde me permitió desarrollarme como profesional y persona.

Al Subprograma 127 “Formación Básica en Investigación” de loa Facultad de Química, UNAM, por el apoyo otorgado para la realización de la tesis.

Al PAIP VMLP 5000-9111, así como a la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAII) por la evaluación de muestras de lodos biológicos y materia vegetal para su integración en esta tesis.

Especial al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello por darme la oportunidad de trabajar este proyecto, por compartirme sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de esta tesis. Por sus consejos para mi desarrollo profesional y por todo su apoyo brindado en este tiempo que me permitieron crecer como profesional y persona.

Al M. en C. Luciano Hernández Gómez por todo el apoyo en la revisión del texto de la tesis, conocimientos sobre la microbiología y el apoyo técnico brindado para el desarrollo de la tesis.

A la M. en C. Ruth Martín Fuentes por el apoyo en la búsqueda de bibliografía, recolección de muestras, conocimientos y consejos brindados para el desarrollo de la tesis.

Al Ing. Fernando Gómez por la orientación profesional recibida y sus consejos para el desarrollo de la tesis, y al Dr. Pedro Magaña por el apoyo en la revisión del texto de la tesis y sus consejos brindados.

Al personal directivo y operario del Humedal Artificial Doble Espiral (SHADE) del Bosque de San Juan de Aragón, Biól. Yenitzia Chávez Carpio, Directora del Bosque San Juan de Aragón por las facilidades brindadas para la obtención de muestras de lodos activados, el Ing. Juan Hilario García, Superintendente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro del Agua” (PTARCA), por permitirme realizar la toma de muestras de agua.

A la M. en I. Ileana Rodríguez Castañeda por el gusto al área de procesos a través de todos sus aprendizajes y consejos brindados durante los cursos de la carrera para mi desarrollo como ingeniera química.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mis padres, por su amor y apoyo incondicional. Por estar a mi lado en todos los momentos que los necesitaba. Por todas sus sabidurías, experiencias y consejos que me han formado como una mejor profesionista y persona.

A mi madre, Inés Nogales, por brindarme todas las herramientas para mi desarrollo como profesionista. Por darme todo el cariño y amor en los momentos más difíciles, por vivir mis logros como si fueran los suyos. Por acompañarme en mis desveladas y aconsejarme siempre que lo necesitaba. Gracias por todo tu esfuerzo y trabajo que me permitieron formarme como profesionista.

A mi padre, César Cuba, por todos los consejos brindados durante la carrera y sobre todo mientras realizaba este trabajo. Por recordarme lo que soy capaz de hacer, por su paciencia y acompañarme en los momentos más difíciles. Por todas sus ocurrencias, risas y palabras de alientos mientras desarrollaba este trabajo. Gracias por todo tu infinito apoyo.

A mi hermano, Mauricio Cuba, por compartirme su gusto por la ingeniería y ser mi ejemplo a seguir desde ese entonces. Por todo su conocimiento, experiencia, consejos y apoyo brindado a lo largo de la carrera, pero sobre todo para el desarrollo de este trabajo.

A mi hermana, Alejandra Kim, por ser mi inspiración de esfuerzo y trabajo. Por todas sus anécdotas, ingeniosidades y risas. Por escucharme cuando más lo necesitaba, impulsarme a ser mejor y cuidarme siempre.

A Andrea Hernández, por toda su ayuda en mi crecimiento personal, por sus consejos, su tiempo en escucharme y apoyarme cuando me sentía perdida. Por su empatía, enseñanzas y apoyo en el desarrollo de la tesis. Por creer en mí y brindarme herramientas para el desarrollo de la tesis y para la vida.

A Laura Ramírez, por darme la cálida bienvenida al lugar que se convertiría en mi segundo hogar por un tiempo. Por su apoyo incondicional desde el primer momento, por compartirme sus conocimientos, experiencias, consejos y enseñanzas en el laboratorio, sobre todo en cuanto a los microorganismos. Por escucharme, aconsejarme y apoyarme en todas mis ideas para el desarrollo de este trabajo y en la vida. Gracias por tu amistad, todo tu amor y cariño.

A mis dos favoritos en el laboratorio, Jakie “Barbie” Apátiga y Luis Tapia por acompañarme en todo este proceso. Por su apoyo incondicional en todo momento y animarme siempre. Por todas las risas, ocurrencias y chistes internos. A la Q.F.B. por todo tu conocimiento, apoyo y el sin fin de explicaciones en cuanto a la microbiología. Por tus consejos, apoyo emocional, por nuestros momentos de chismes e intercambios. Al Ing. por todos los consejos, por preocuparse por mí y anotar todas las ideas que me fueran útiles para este trabajo. Por animarme siempre con tus ocurrencias y risas.

A Mariana Martínez, Michael Orlando, Misael Leopoldo y Axel Macías por su amistad y hacer el laboratorio más acogedor con sus risas, anécdotas y ser el mejor servicio social.

A mi mejor amiga, Nataly Cruz, por apoyarme, escucharme y aconsejarme en la realización de la tesis y en la vida. Por todo su amor, risas, anécdotas y por brindarme una amistad muy especial. Por animarme siempre, creer en mí y apoyarme incondicionalmente.

A mis amigos, Ixchel Guzmán, Ernesto Fukugauchi, Alexis Fuentes, Luis Varilla y Mauricio Mancisidor por todo su apoyo en la carrera, consejos, risas, y convertirse en mi segunda familia.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL....6
ÍNDICE DE FIGURAS....8
ÍNDICE DE TABLAS....8
Abreviaturas....9
Resumen....10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN....11
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO....13
2.1 Objetivo General....13
2.2 Objetivos Particulares....13
2.3 Estrategia de Trabajo....14
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO....15
3.1 Biomasa....15
3.1.1 Lodo biológico....18
3.1.2 Materia vegetal....19
3.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales....26
3.2.1 Sistema Convencional de Lodos Activados....26
3.2.2 Sistema de Humedales Artificiales....28
3.3 Aprovechamiento convencional de la biomasa....31
3.3.1 Fermentación....31
3.3.2 Compostaje....33
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA....35
4.1 Primera Etapa....35
4.1.1 Obtención del lodo biológico....36
4.1.2 Obtención de la materia vegetal....37
4.2 Segunda Etapa....38
4.2.1 Análisis....38
4.2.1.1 Gravimétrico....38
4.2.1.2 Elemental....38
4.2.1.3 Bromatológico....39
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN....40
5.1 Caracterización de biomasas....40
5.1.1 Caracterización del lodo biológico....40
5.1.2 Caracterización de materia vegetal....41

5.2 Comparativo de biomasas....44
5.3 Aprovechamiento general de la biomasa....47
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES....51
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS....52
ANEXO. GLOSARIO DE TÉRMINOS....57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrategia de trabajo. 14
Figura 2. Fuentes principales de biomasa elaborado por Axel Macías. 16
Figura 3. (a) Imagen obtenida de L. gibba del SHADE. (b) Morfología de L. gibba obtenida de English Botany 21
Figura 4. (a) Imagen obtenida de A. donax del SHADE. (b) Morfología de A. donax obtenida de Biodiversity Library 22
Figura 5. (a) Imagen obtenida de S. californicus del SHADE. (b) Morfología de S. californicus obtenida de Biodiversity Library 24
Figura 6. (a) Imagen obtenida de P. australis del SHADE. (b) Morfología de P. australis obtenida de Biodiversity Library 25
Figura 7 . Proceso de un sistema convencional de lodos activados. 27
Figura 8. Humedal artificial de flujo subsuperficial 29
Figura 9. Etapas experimentales 35
Figura 10. Obtención y acondicionamiento de muestras 36
Figura 11. Diagrama de proceso de la PTARCA 36
Figura 12. Diagrama del funcionamiento del SHADE 37
Figura 13. Porcentaje de sólidos de biomasas en estudio. 44
Figura 14. Análisis elemental de biomasas estudiadas. 45
Figura 15. Relación C/N de biomasas estudiadas 46
Figura 16. Porcentaje de materia y carbono orgánico en biomasas. 46
Figura 17. Procesos de aprovechamiento energético de biomasas 47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales criterios de selección de biomasa 17
Tabla 2. Composición típica de lodos biológicos. 19
Tabla 3. Clasificación del modo de operación en un reactor 32
Tabla 4. Métodos para la determinación de parámetros 38
Tabla 5. Análisis bromatológico. 39
Tabla 6. Análisis gravimétrico del lodo biológico. 40
Tabla 7. Análisis elemental de lodos biológicos. 41
Tabla 8. Materia y carbono orgánico de lodos biológicos 41
Tabla 9. Análisis gravimétrico de la materia vegetal 41
Tabla 10. Análisis elemental de la materia vegetal 42
Tabla 11. Materia y carbono orgánico de la materia vegetal 42
Tabla 12. Análisis bromatológico de las materias vegetales. 43
Tabla 13. Aprovechamiento energético de biomasas. 49
Tabla 14. Aprovechamiento agrícola de biomasas. 50

Abreviaturas

AGV	Ácidos grasos volátiles
BSJA	Bosque de San Juan de Aragón
C	Carbono
DNAB	Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica
FMVyZ	Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
H	Hidrógeno
HA	Humedal Artificial
LA	Lodos Activados
N	Nitrógeno
S	Azufre
SF	Sólidos Fijos
SHADE	Sistema de Humedal Artificial de Doble Espiral
ST	Sólidos Totales
STAR	Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales
SV	Sólidos Volátiles

Resumen

Los sistemas de tratamientos biológicos de aguas residuales (STAR) son empleados para la transformación de la materia orgánica disuelta en biomasa. Uno de los STAR más utilizados es el de lodos activados (LA), donde se genera una gran cantidad de biomasa microbiana (BM) que se pueden disponer de diferentes maneras, ya sea como relleno, composta o mezclarse con residuos sólidos, sin embargo, otro sistema que se está utilizando actualmente son los humedales artificiales (HA), que genera una alta cantidad de biomasa vegetal (BV). Por ello, el objetivo de este trabajo fue determinar el posible aprovechamiento de la BM y BV procedentes de sistemas de LA y HA. Para lo cual, el estudio se desarrolló en dos etapas: (1) revisión bibliográfica de los aspectos relevantes de biomasa microbiana y vegetal; (2) toma de muestras de biomasa, acondicionamiento y análisis de su composición física, química y nutrimental. A partir de los resultados obtenidos, se encontró evidencia contundente del potencial aprovechamiento de la BM y BV en la generación de biocombustibles, compostajes, usos agrícolas, entre otros. Dado que estos recursos son renovables, su utilización contribuiría significativamente a la sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales generadas en diversos sectores económicos. Por otro lado, los resultados del análisis de laboratorio practicados a las muestras de la BM, indican que puede ser empleada principalmente como abono orgánico y en la elaboración de composta para enmienda de suelos. En el caso de la BV, acorde con el análisis realizado, es posible uso como forraje; material constructivo en forma de aislante térmico; además de materia prima para múltiples artesanías, biopapel y composta. En cuanto a la combinación de BM con BV, es posible producir composta y usarla como enmienda de suelos, estableciendo así su empleo en el sector agrícola. Se puede concluir que la obtención de la BM y BV proveniente de los sistemas de tratamiento de LA y HA, pueden ser aprovechados para la producción de recursos renovables que contribuyan a la sostenibilidad del tratamiento de las aguas residuales, y pasar de ser residuos orgánicos contaminantes de difícil disposición, a ser consideradas como un material renovable, susceptible de ser aprovechado y contribuir a la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales, en un entorno de economía circular.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamientos biológicos de aguas residuales (STAR) son frecuentemente usados en los trenes de tratamiento, fundamentalmente se encargan de convertir los contaminantes orgánicos e inorgánicos disueltos en aguas residuales en biomasa microbiana (BM) o vegetal (BV). La generación de estos productos es abundante y requiere de un tratamiento adicional para su correcta disposición final (Comisión Nacional del Agua, 2015) (Luna Pabello & Cuba Nogales, 2023). El aprovechamiento de estos productos representa un área de oportunidad para diferentes actividades económicas, en el desarrollo sustentable de una economía circular. Este concepto surge como alternativa de solución, pretendiendo sustituir el modelo actual que representa la economía lineal, el cual ha generado grandes daños ambientales que comienzan desde la obtención y procesamiento de las materias primas, en la obtención del producto final, hasta la generación de un elemento o subproducto de desecho que ya pueden ser reutilizados (Esposito, Tse, & Soufani, 2018). La idea de la economía circular consiste en usar los residuos como insumos y darles un nuevo valor. Es decir, buscar aprovechar a su máximo los productos durante su ciclo de vida (Córdova, Salgado, & Bravo, 2021).

Actualmente, se busca desarrollar una economía que permita reducir los daños ambientales por medio de la utilización de los productos obtenidos de las actividades humanas que tienen un impacto ambiental. Por lo tanto, el trabajo está enfocado hacia el estudio del aprovechamiento de residuos o subproductos generados en los sistemas de tratamiento biológico. Lo anterior, particularmente con el fin de proporcionar una amplia visión del aprovechamiento de la BM y BV obtenida de los diferentes STAR. Por esta razón, se requiere suponer que las características que poseen ambos tipos de biomasa son aptas para ser consideradas como recursos orgánicos renovables susceptibles de ser aprovechados, para lo cual se necesita hacer estudios fisicoquímicos y biológicos de dichos productos para poderlos tomar en cuenta.

Para este estudio fue de gran interés el uso de la biomasa microbiana y biomasa vegetal, la primera proveniente del sedimentador secundario del sistema lodos activados de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales “Cerro del Agua” (PTARCA), ubicada en Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México. La segunda es la que se obtiene en la etapa de mantenimiento periódico que se le da al Sistema Humedal Artificial de Doble Espiral (SHADE), ubicado en el Bosque de San Juan de Aragón (BSJA). Por medio de la poda o cosecha de plantas vasculares responsables de la depuración del agua a tratar, específicamente para nuestro estudio se consideraron las especies de *Arundo donax, Schoenoplectus californicus, Phragmites australis* y *Lemna gibba.*

Una vez obtenidos estos productos fue necesario llevar a cabo la caracterización de los lodos biológicos y materias vegetales, empleando técnicas y procedimientos internacionales como los descritos en Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales por sus siglas en inglés (American Society for Testing and Materials o ASTM International) que son métodos de prueba reconocidos internacionalmente, los cuales fueron utilizados para la caracterización de los productos en estudio, además de que permitió conocer sus beneficios como recurso renovable.

Por otro lado, es importante resaltar en la importancia de la disposición de los productos obtenidos de los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales ya que éstos requieren de un tratamiento y manejo adecuado. En México este problema se ve reflejado en la obligatoriedad de dar tratamiento a los lodos biológicos, tal como lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección Ambiental. - Lodos y Biosólidos. -Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO

2.1 Objetivo General

- Determinar el aprovechamiento de la biomasa microbiana (BM) y biomasa vegetal (BV) procedente de sistemas de tratamiento biológico mediante el análisis de sus características fisicoquímicas y su comparación con lo recomendado por la literatura.

2.2 Objetivos Particulares

- Describir los parámetros relevantes de la BM procedente de un sistema de lodos activados (LA) y la BV proveniente de un sistema humedal artificial (HA), mediante el uso de bibliografía especializada que permita determinar su posible aprovechamiento.

- Realizar la evaluación de composición de la BM y BV, procedente del LA y HA, respectivamente mediante técnicas gravimétricas y de análisis elemental, y bromatológico para su análisis comparativo.

- Realizar el análisis comparativo de la BM, BV y su combinación, a partir de información bibliográfica especializada para proponer su posible aprovechamiento en diferentes sectores económicos.

2.3 Estrategia de Trabajo

En la figura 1, se presenta la estrategia de trabajo, el cual se planificó de manera priorizada y consecutiva las actividades a realizar en el presente proyecto, a efecto de cumplir con los objetivos planteados.

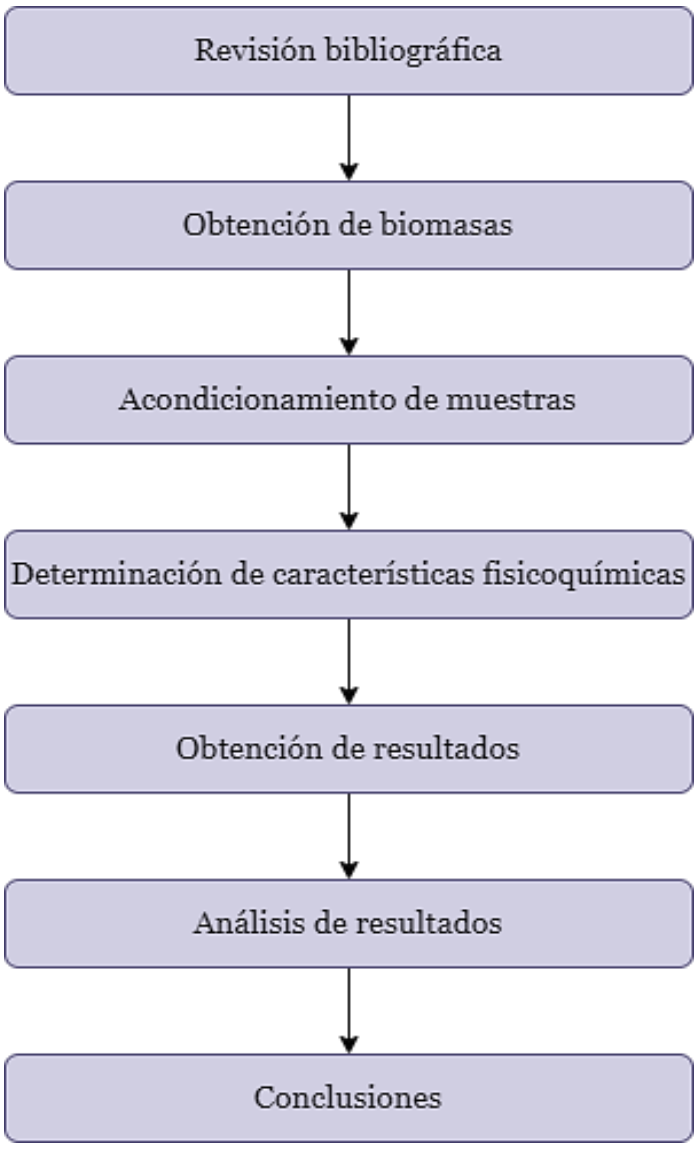


Figura 1. Estrategia de trabajo.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Biomasa

La biomasa es toda aquella materia orgánica de origen vegetal o animal disponible en el medio ambiente que puede ser biodegradable en un proceso biológico, este engloba todo tipo de desechos generados por los procesos provenientes de industria alimentaria, refresquera, energética, etc. (Figura 2), así como los sistemas de tratamiento de aguas residuales y humedales artificiales. La biomasa representa el material renovable más abundante en el mundo y resulta ser una alternativa muy prometedora para aprovecharla como energía sustentable (de Lucas, del Peso, Rodríguez, & Prieto, 2012). A lo largo de los años se han realizado diferentes estudios para el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía en procesos a nivel industrial, y así conseguir la sustitución de la demanda del petróleo por parte de las industrias, así como convertir la biomasa en materia prima para la producción de químicos de elevado valor añadido y asegurando la factibilidad económica, favoreciendo que las industrias inviertan en este tipo de recurso, y que además sea amigable con el medio ambiente. Es así como, teniendo en cuenta que la biomasa es la única fuente de energía renovable basada en el uso del carbono, su demanda potencial se ha visto incrementada considerablemente como candidato importante para la producción de biocombustibles (Baray-Guerrero & Manjarrez-Dominguez, 2020).

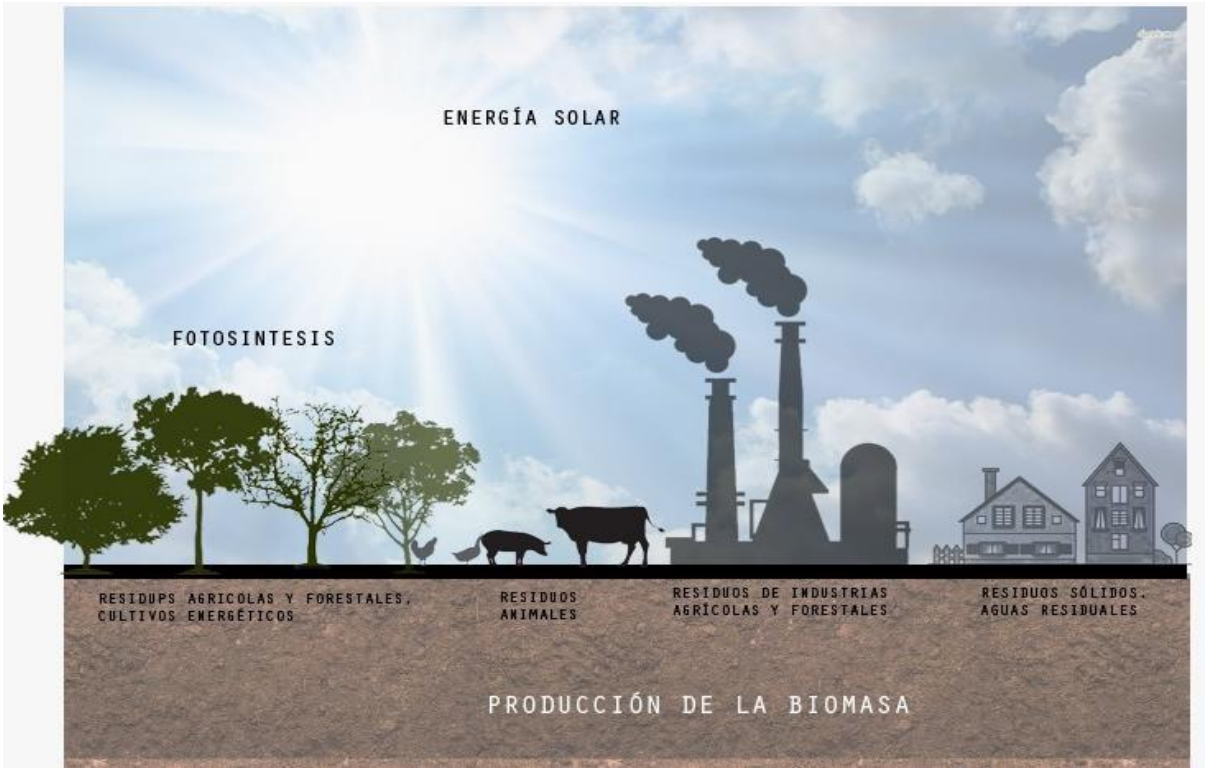


Figura 2. Fuentes principales de biomasa elaborado por Axel Macías.

Los diferentes tipos de biomasa están conformados por una parte orgánica, una inorgánica y agua, su composición permite determinar la cantidad que será transformada en diferentes productos sencillos, complejos o intermedios útiles dependiendo el tipo de biomasa que se trate (Quesada, Faba, Díaz, & Ordoñez, 2014). Existen diferentes clasificaciones de acuerdo con su origen, donde se puede tener la biomasa residual y la biomasa vegetal. La biomasa residual hace referencia a todo el conjunto de materia viva que conforma la materia orgánica derivado de las transformaciones industriales presentes en lodos activados de los sistemas de tratamiento. En cambio, la biomasa vegetal o también lignocelulósica está constituida por residuos forestales, agrícolas, maderas; que se caracterizan por ser abundantes provenientes de los humedales artificiales, sin embargo, uno de los problemas que se presentan es la disposición final de sus residuos.

Selección de biomasa

El uso de fuentes renovables ha desplegado una línea de investigación con un alto grado de interés en utilizar la biomasa como materia prima, que sea utilizada para la transformación de productos sin llevar a cabo una conversión química. En donde la biomasa funciona como fuente de carbono y de energía para los microorganismos en las rutas de síntesis biotecnológicas, de esta manera se obtiene una fuente renovable de uso industrial.

Dentro de los criterios de selección de biomasa para la producción de moléculas de interés comercial se encuentran: Una Alta disponibilidad anual, Disponibilidad geográfica cercana a la producción, Mínimo o ningún nivel de competencia con el sector alimentario, Bajo costo, Mínimo o ningún pretratamiento requerido, Alto contenido de azúcares, Alta pureza y Contribución medioambiental positiva (Tabla 1). Sin embargo, no existe biomasa que cumpla con todos los criterios de selección resumidos, de ahí, que el desarrollo de nuevas tecnologías podría permitir el diseño de procesos más eficientes que se adecuen a las características de las biomasas disponibles.

Tabla 1. Principales criterios de selección de biomasa.

Alta disponibilidad anual
Disponibilidad geográfica cercana a la producción
Mínimo o ningún nivel de competencia con el sector alimentario
Bajo costo
Mínimo o ningún pretratamiento requerido
Alto contenido de azúcares
Alta pureza
Contribución medioambiental positiva

Fuente: (Vuan, 2018).

3.1.1 Lodo biológico

El lodo biológico es el residuo sólido, semisólido que se genera por el tratamiento de aguas residuales de un sistema biológico, de ahí la clasificación como lodo biológico. Estos son producidos como subproducto del proceso de depuración de aguas residuales realizado en plantas de tratamiento.

El sistema más usado en la actualidad es el de lodos biológicos, estos presentan la característica de preceder de la sedimentación secundaria, por lo que son productos de un crecimiento biológico. De igual forma, los lodos activados generados dependen de las características de sedimentación de los sólidos y de la carga de los procesos de sedimentación secundaria, influenciada por los procesos biológicos. La característica más importante de los lodos de acuerdo con el sistema es la alta generación de materia orgánica. Uno de los problemas que presenta este tipo de sistema es su alto contenido de patógenos y volumen de lodo producido que presenta una dificultad para su uso, manejo y disposición. Por lo que se incluye una etapa de tratamiento de lodos para su estabilización y disposición final, de acuerdo a la normativa (NOM-004-SEMARNAT-2002). Generalmente, en el sistema de lodos activados se producen tres tipos de lodos: lodos primarios, secundarios y en ciertos casos lodos terciarios. Los lodos primarios se producen en la sedimentación primaria, donde se remueven sólidos sedimentables. Los lodos secundarios se caracterizan por ser producidos en un sedimentador secundario que involucra procesos de tratamientos biológicos que convierten residuos o sustratos solubles en biomasa (Limón, 2013). También denominados lodos biológicos que incluyen la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. La cantidad producida depende de varios factores: eficiencia del tratamiento primario, relación de sólidos y materia orgánica, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento. En la Tabla 2, se presenta la composición química y física típica de los lodos biológicos de un sistema de lodos activados.

Tabla 2. Composición típica de lodos biológicos.

Parámetros	Unidades	Lodo biológico
Humedad	%	97.5 – 98
Sólidos totales	%	0.8 – 1.2
Sólidos volátiles	%	59 – 88
Nitrógeno	%	2.4 – 5
Fósforo	%	2.8 – 11
Azufre	%	0 – 2.4
Proteína	%	32 – 41
pH	u. pH	6.5 – 8

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014).

3.1.2 Materia vegetal

Existe una gran diversidad de especies de plantas utilizadas en los HA, con la capacidad de mantener especies adaptadas a crecer en suelos saturados (arenas) y sedimentos finos (arcillas), junto con vegetación emergente (carrizo, juncos). Las especies emergentes, se desarrollan en los bordes de cuerpos de agua que son capaces de soportar periodos de inundación y sequía. Aprovechando la interacción con microorganismos y la atmósfera para remover la materia orgánica, permitiendo la transferencia de oxígeno (Sierra & López, 2001).

Las plantas acuáticas flotantes y terrestres denominadas macrófitas, brindan directa o indirectamente alimento, protección y un gran número de hábitats para muchos organismos de estos ecosistemas (Arroyave, 2004). Sus láminas foliares se encuentran flotando sobre la superficie del agua. Se desarrollan en zonas más profundas a comparación de la vegetación emergente y habitan en cualquier parte del cuerpo de agua (Sierra & López, 2001). Presenta la ventaja de ser utilizadas como materia prima en las industrias, así como su uso en los procesos de biorremediación, gracias a la capacidad de absorber sustancias disueltas y aportar oxígeno mediante la fotosíntesis. La biorremediación es un proceso biotecnológico que utiliza microorganismos y sus enzimas para recuperar un ambiente contaminado a su estado natural (Grande, 2016).

Lemna gibba

La *Lemna gibba* es una planta acuática pequeña muy prolífica conocida como lenteja de agua, de la familia *Lemnaceae*. Se caracteriza en tener frondas ampliamente ovadas o casi redondeadas, gruesas, de 2-5 mm de largo, generalmente con envés visiblemente protuberante; frondas verde grises o a veces pardo rojizas por encima, envés con 40-50; cada fronda con una raíz. 4-6 óvulos, florece en primavera y principios de verano (Figura 3). El mecanismo de propagación de las *Lemnaceae* es vegetativo, en tan solo 24 horas puede llegar a duplicarse en número, por esta razón presenta una alta productividad potencial en biomasa. La función principal *L. gibba* en los sistemas de tratamiento de humedales artificiales es la de proporcionar sombreo para dificultar el crecimiento de las algas, además de actuar extrayendo nutrientes (Martelo & Lara, 2012).

Taxonómicamente se agrupan en:

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Orden:	Alismatales
Familia:	*Lemnáceas*
Subfamilia:	*Lemnoideae*
Tribu:	*Lemneae*
Género:	*Lemna*
Especie:	*gibba*

(a) *(b)*

Figura 3. (a) Imagen obtenida de L. gibba del SHADE. (b) Morfología de L. gibba obtenida de English Botany.

Arundo donax

Es una planta perenne de tipo terrestre, conocida coloquialmente como carrizo, de la familia *Poaceae*. Se caracteriza por ser una planta robusta en alcanzar los 4 m de altura y 2 cm de diámetro, con un rizoma rastrero con capacidad para crecer en la superficie buscando agua. Presenta un color verde y brillante al caracterizarse por su gran contenido de humedad, durante el periodo de desecación, este va desvaneciendo su color, adquiriendo una tonalidad dorada (Salazar, 2018). Su germinación se produce en temperaturas alrededor de 20°C. El carrizo es conocido como la especie vegetal en mayor distribución a nivel mundial. Se utiliza en humedales artificiales con la ventaja de tener un efecto oxigenador potencialmente mayor por la liberación de oxígeno desde los rizomas. Su tolerancia a distintos parámetros de contaminación es amplia, soportando niveles moderados de salinidad en el agua y en el suelo, necesitando suelos encharcados hasta profundidades de 5 dm, desarrollando una estructura vegetativa emergente por encima de la lámina de agua (Beascoechea, Muñoz, & Curt, 2014).

Taxonómicamente se agrupan en:

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Orden:	Poales
Familia:	*Poaceae*
Subfamilia:	*Arundinoideae*
Tribu:	*Arundineae*
Género:	*Arundo*
Especie:	*donax*

(a) *(b)*

Figura 4. (a) Imagen obtenida de A. donax del SHADE. (b) Morfología de A. donax obtenida de Biodiversity Library.

Schoenoplectus californicus

La *Schoenoplectus californicus* es una hierba acuática también conocida como junco, que sobresale de la superficie del agua, presenta un tallo de 60 a 120 cm de alto, liso y de forma triangular. Sus características morfológicas constan de inflorescencia compuesta seudolateral; involucro de 2-3 brácteas; espiguillas aisladas de 8-12mm y un fruto ovoide, de color castaño de 2.3 x 1.25 mm (Rodríguez & Fica, 2020). Presentan una epidermis muy delgada, con el objetivo de reducir la resistencia al paso de agua, gases y nutrientes. Se almacena y circula aire con oxígeno gracias a la formación de una red de conductos huecos, por los grandes espacios intracelulares; transportan grandes cantidades de oxígeno desde los tallos hasta sus raíces. Son una de las macrófitas más conocidas y usadas en los humedales artificiales. Poseen un gran rango de adaptación, soportan condiciones de saturación de humedad e inundación, soportan una limitación en la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Permiten la asimilación directa de nutrientes, sobre todo el nitrógeno y fósforo (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Taxonómicamente se agrupan en:

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Orden:	Cyperales
Familia:	*Cyperaceae*
Género:	*Schoenoplectus*
Especie:	*californicus*

(a) *(b)*

Figura 5. (a) Imagen obtenida de S. californicus del SHADE. (b) Morfología de S. californicus obtenida de Biodiversity Library.

Phragmites australis

Es una planta acuática normalmente conocida como carricillo, arraigada al sustrato, presentan culmos (falso tallo) de 1-4 m de alto, que sobresalen del agua. Las pequeñas hojas están unidas alrededor del tallo, formando una banda estrecha o vaina con dorso redondeado de color negro-verde en cada articulación, más largas que los internodios; lígula pequeña, escariosa, con bordes pilosos; láminas planas, de 20-40 cm de largo por 1-3 cm de ancho, lisas. Poseen un fruto simple pequeño llamado cariopsis, su semilla es un buen alimento para la avifauna. (Rodríguez & Fica, 2020). Son generalmente de hoja caduca en climas fríos, y permanecen durante el invierno en climas más cálidos. Forma densas colonias. Planta propia del margen de lagos, ríos y arroyos, así como de zonas pantanosas. En su periodo reproductivo empieza la formación de “conos” de abril a noviembre (Beascoechea, Muñoz, & Curt, 2014).

Taxonómicamente se agrupan en:

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Orden:	Poales
Familia:	*Poaceae*
Subfamilia:	*Arundinoideae*
Tribu:	*Arundineae*
Género:	*Phragmites*
Especie:	*australis*

(a) *(b)*

Figura 6. (a) Imagen obtenida de P. australis del SHADE. (b) Morfología de P. australis obtenida de Biodiversity Library.

3.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

3.2.1 Sistema Convencional de Lodos Activados

El sistema de “lodos activados” fue denominado por Arden y Lockett por la producción de una masa activa de microorganismos capaces de estabilizar, en condiciones aerobias la materia orgánica disuelta en el agua (Metcalf & Eddy, 2014). Generalmente, los lodos activados constan de dos etapas fundamentales la primera a partir de un tanque de aireación y la segunda de un sedimentador (clarificador) secundario. En la primera etapa del sistema, el influente se mezcla con diversos microorganismos en un tanque de aireación, donde estos últimos obtienen sus nutrientes de la materia orgánica disuelta en el influente, lo cual permite su desarrollo en grupos microbianos suspendidos formando los flóculos; también conocido como “licor mixto o licor mezclado”. Después de un determinado tiempo de retención, el licor mixto pasa a la segunda etapa.

En la segunda etapa, el licor mixto pasa al tanque sedimentador, donde la masa activa resultante se separa del líquido por medio de la sedimentación de los lodos y de esta manera se eliminan los flóculos sedimentados, sin embargo, hay que resaltar que una parte de la biomasa sedimentada recircula al tanque de aireación para mantener una concentración estable del licor mixto y otra parte se retira del sistema como desecho denominado “lodo activado residual”. El líquido resultante del sedimentador denominado efluente pasa al sistema de desinfección para su reúso como agua tratada” (Figura 7) (Ramírez, 2004). Este tipo de sistema es el comúnmente usado en las PTAR, debido a la facilidad en los tratamientos del efluente. Sin embargo, la alta generación de lodos residuales es la desventaja que presenta. Por tanto, es necesario realizar un tratamiento adicional al sistema en conjunto para su estabilización y disposición final.

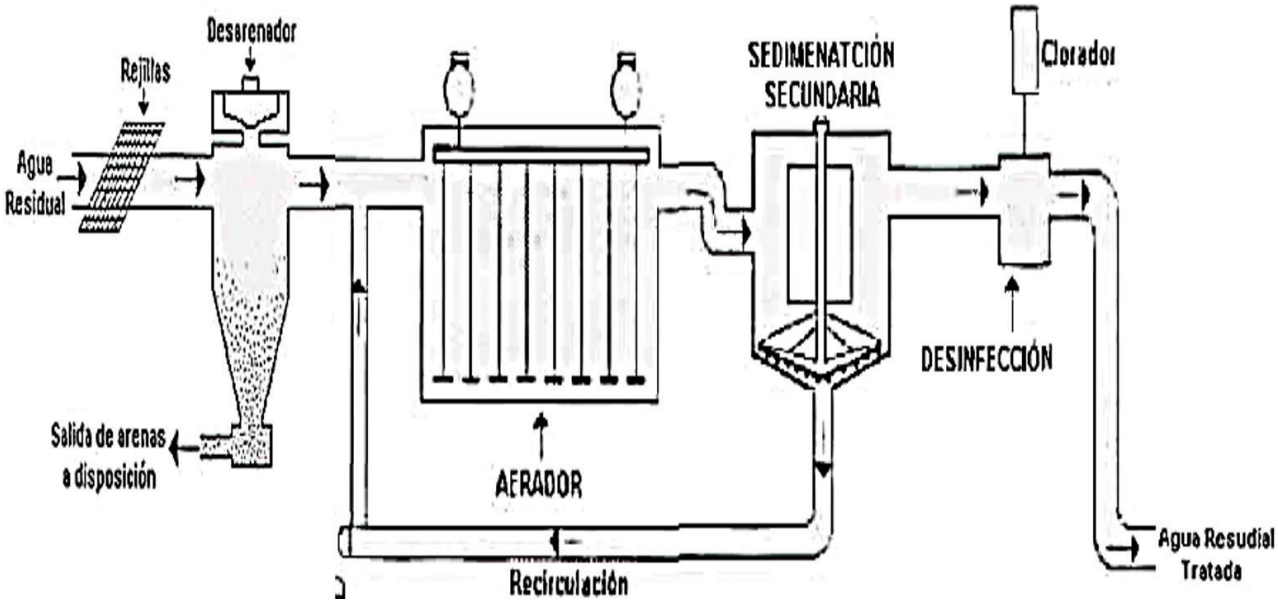


Figura 7 . Proceso de un sistema convencional de lodos activados.

Fuente: Modificado de Escalante (2006).

Uno de los indicadores para comprobar que los lodos activados funcionan correctamente es la edad que tienen y esta corresponde al tiempo en el que los microorganismos presentes en la biomasa se mantienen retenidos en el sedimentador secundario antes de que una parte se recircule al tanque de aireación y el resto se purgue (Metcalf & Eddy, 2014). Por lo tanto, los lodos activados se pueden dividir en tres que son lodos jóvenes, lodos maduros y lodos viejos:

- **Lodos jóvenes**

  Son aquellos que poseen una mayor concentración de sólidos volátiles (SV) y menor concentración de sólidos fijos (SF), con un porcentaje del 80% de SV aproximadamente. El tiempo de retención de estos lodos es de unas cuantas horas hasta de uno a dos días. Lo que permite que se formen flóculos filamentosos voluminosos en la superficie, presentando un color grisáceo (Escalante, y otros, 2006).

- **Lodos maduros**

  Son aquellos que presentan concentraciones similares de SV y SF, el tiempo de retención es de 3-10 días, pero puede llevar hasta los 15 días, se forman gránulos densos en forma redonda de color negro, estables en la sedimentación. Una de las características importantes es la de presentar una carga orgánica alta la que se recircula nuevamente al sistema para asegurar una concentración de microorganismos estables para su buen funcionamiento (López-Vázquez, Buitrón, Cervanes, & Hernández, 2017).

- **Lodos viejos**

  Son aquellos que se caracterizan por un tener una mayor concentración de SF en comparación a los SV, el tiempo de retención sobrepasa los 15 días, lo que conlleva a una baja actividad bacteriana, presentan un color marrón-rojizo y sedimentan muy rápido (Metcalf & Eddy, 2014). Es importante destacar que lo primero que sale cuando se purga el sedimentador secundario es este tipo de lodos, ya que son los primeros en sedimentar.

3.2.2 Sistema de Humedales Artificiales

Un humedal es aquella área que se encuentra inundada por agua dulce o salada, temporal o permanentemente y presenta una vegetación típica y adaptada a vivir en condiciones de suelos saturados, son sistemas de transición entre zonas terrestres y acuáticas, los cuales, pueden ser naturales o artificiales.

Los humedales artificiales son sistemas específicamente diseñados y construidos por el hombre como una herramienta para tratar aguas residuales, ya que en estos se aumenta la capacidad depuradora o eficiencia de tratamiento mediante la optimización de los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en los ecosistemas de humedales naturales (Miranda Ríos y Luna Pabello, 2001).

El sistema consiste de tres componentes primordiales que son: a) Plantas vasculares que obtienen y absorben los nutrientes disueltos en el agua para sus funciones básicas, los compuestos nitrogenados y fosforados que son integrados a su biomasa, además de que permite tener condiciones aerobias en el sistema; b) Microorganismos que se adhieren al medio de soporte donde metabolizan o degradan las sustancias contaminantes disueltas en el agua; c) Medio de soporte o empaque funciona como medio filtrante donde se inmovilizan los contaminantes presentes en el agua residual y permite aumentar el área de contacto entre los microorganismo y las impurezas. Es importante destacar que en estos sistemas se llevan a cabo procesos físicos, químicos y biológicos, tales como filtración, absorción, sedimentación, volatilización, difusión, convección, fijación vegetativa, mineralización, reacciones óxido-reducción y descomposición (Segura Miranda, 2014).

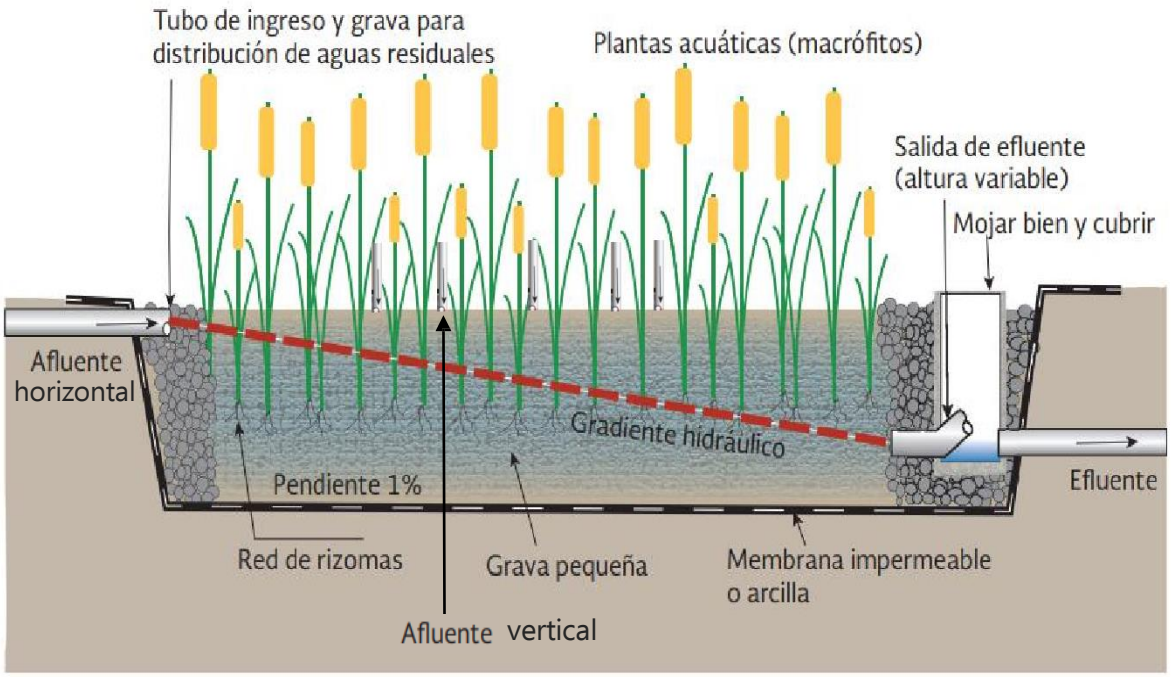


Figura 8. Humedal artificial de flujo subsuperficial.

Fuente: Modificado de Comisión Nacional del Agua (2015).

Los humedales artificiales se clasifican en humedales de flujo superficial, humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical.

- Flujo Superficial

  En los sistemas de flujo superficial, el agua se desplaza sin restricciones a una velocidad baja sobre la superficie del suelo, además de atravesar los tallos y raíces de la vegetación que emerge. La vegetación permanece anclada al suelo, con sus hojas y tallos sobresaliendo por encima de la superficie del agua (Miranda & Luna-Pabello, 2001). Para el diseño de estos sistemas se realizan combinaciones de espacios abiertos y zonas de plantas emergentes, con ello desde el punto de vista del entorno natural, este sistema tiene la capacidad para albergar una variedad de especies, como peces, anfibios, aves, entre otros (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

- Flujo Subsuperficial

  El sistema de flujo subsuperficial consiste en una capa, siendo de tierra o arena y grava. Para evitar filtraciones en el suelo, se recubre con una membrana impermeable. Se caracteriza por la circulación de agua que fluye por la zona de la raíz y a través del medio de soporte (granular), en la que las raíces penetran hasta el fondo del lecho En su mayoría se utiliza el *Phragmites australis*, llamada comúnmente como carricillo (Comisión Nacional del Agua, 2015). Este tipo de humedales se clasifica de acuerdo al tipo de patrón del flujo que sigue el agua en el lecho, ya sea de tipo vertical u horizontal (Miranda & Luna-Pabello, 2001).

3.3 Aprovechamiento convencional de la biomasa

Actualmente, el aprovechamiento de estos recursos ha resultado ser innovador y de importancia para darle un nuevo uso. Este concepto forma parte de la economía circular, en la que se ha reciclado para ser renovado y reutilizado, brindando un valor añadido a este nuevo producto y extender su ciclo de vida el mayor tiempo posible (Martínez, Octaviano, & Nieto, 2020). Lo que da pie a diferentes resoluciones y propuestas de acuerdo con el tipo de biomasa que se genera de acuerdo con la vía utilizada como la fermentación y el compostaje.

3.3.1 Fermentación

La fermentación es un proceso metabólico generador de energía donde los donadores y aceptores de electrones son los compuestos orgánicos, dando como resultado unos productos oxidados y otros reducidos, para lo cual las bacterias y levaduras llevan a cabo una reacción de oxidación parcial descomponiendo moléculas complejas sin requerimiento de oxígeno (proceso anaeróbico) a moléculas sencillas (Grande, 2016). Cada bacteria, así como levaduras tienen distintas rutas metabólicas de acuerdo con el tipo de sustrato; por lo cual existen diferentes tipos de fermentaciones. Por lo general, los microorganismos descomponen la glucosa para generar ácidos orgánicos (ácidos grasos volátiles, ácidos carboxílicos, entre otros) (Vuan, 2018)**.**

Las fermentaciones se realizan en reactores biológicos dependiendo del tipo de cultivo que se realice en los fermentadores o si se cultivan cepas bacterianas en los distintos tipos de biorreactores, o si utilizan células vegetales o animales. Los diferentes diseños de fermentadores están acorde al modo de operación, ya sea, continuo, semicontinuo y discontinuo, por esta razón el tipo de reactor seleccionado definirá el sistema de cultivo y sus parámetros (Grande, 2016). En la Tabla 3, se presenta las clasificaciones de los cultivos conforme al tipo de operación del reactor.

Tabla 3. Clasificación del modo de operación en un reactor.

	Cultivo		
Operación	**Continuo**	**Semicontinuo**	**Discontinuo**
Tipo de reactor	Quimiostato	Feed-batch	Batch
Características	Reactor de tanque agitado continuo. Se introduce medio y se retira biomasa constantemente. Volumen constante.	Alimentación por lotes a lo largo de la reacción. Crecimiento máximo de biomasa y aumento de productividad. La biomasa se retira hasta finalizar la reacción.	Alimentación inicial única, permanece el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso productivo, determinado por la cinética de la reacción y el tiempo de retención.
Conformación de sistema	Flujo de entrada: alimentación constante. Flujo de salida: producción continua.	Flujo de entrada: alimentación por lotes Flujo de salida: hasta finalizar la reacción	No presenta flujos de entrada ni flujos de salida.

Participación de lodos biológicos en el proceso de fermentación

Los lodos biológicos representan un cultivo mixto, por la variedad de microorganismos concentrados en la materia orgánica. Un cultivo mixto se encuentra conformado por un consorcio de microorganismos de especies distintas, ya sea bacterias u hongos de fácil adquisición al ser desechos orgánicos. Dependiendo la procedencia del tipo de lodos, será el tipo de microorganismos que se presenten en la biomasa.

El uso de este proceso permite la producción de diferentes bioproductos, como los bioplásticos, la producción de biogás y ácidos grasos volátiles (AGV). De igual forma, los lodos provenientes de un sistema de lodos activados se encuentra la presencia de AGV en el cultivo (González, González, & Uc, 2001).

3.3.2 Compostaje

El compostaje consiste en la transformación de residuos orgánicos a través de un proceso biológico aerobio en un producto estable el cual puede ser utilizado como abono orgánico o enmienda de suelos. Esta técnica de estabilización consta de destruir a través de un proceso de calor bacterias patógenas (Negro, y otros, 2000). El proceso de compostaje ocurre en cuatro etapas: mesofílica, termofílica, de enfriamiento y de maduración. La cual puede llevarse a cabo en dos tipos de sistema: cerrado y abierto. En la que se involucran operaciones primarias, y secundarias (Mendoza, 2012).

El compostaje es una de las principales tecnologías utilizadas en las unidades de producción como la agricultura, en la que los residuos orgánicos generados pueden ser reciclados siendo este un gran aliado para la conservación de la humedad del suelo en cultivos (Luna, García, Rodríguez, Pimienta, & Jiménez, 2007).

Parámetros de calidad en el compostaje

Estos parámetros indican la calidad que debe tener nuestra materia prima para ser considerada en el proceso de compostaje y sea de buena calidad.

- **Humedad**

  El porcentaje ideal es entre el 45-65%, pues permite el crecimiento de microorganismos. Debajo de este rango, la actividad microbiana desciende limitando su crecimiento. Por encima del rango, puede llegar a producir putrefacción. No se tienen valores de humedad estandarizados, porque depende de cada materia, de las características físicas, químicas y biológicas que afectan la relación humedad y porosidad (Pérez, 2019).

- **Relación C/N**

Al inicio del proceso se recomienda un valor de 25-30. Este parámetro ayuda al desarrollo efectivo de microorganismos al proporcionar fuentes necesarias para permitir el crecimiento microbiano (Pérez, 2019).

- **Temperatura**

Normalmente su temperatura es de 63-65°C, esto para asegurarse de la muerte de cualquier bacteria patógena. Al principio, los microorganismos mesófilos son los que se van desarrollando a una temperatura de 20-45°C. Conforme continua el proceso de compostaje, los microorganismos termófilos son los principales en la reacción aumentando su actividad microbiana a una temperatura dada entre los 40 y 65% (CSR Laboratorio, 2023).

- **pH**

Al inicio del compostaje se tiene un pH de 5.5 aproximadamente, debido a la formación de ácidos orgánicos. Este pH ácido favorece a la eliminación de algunos patógenos. Conforme avanza el proceso el pH pasa a ser alcalino de 6.0-8.5. Al finalizar, la composta posee un pH entre 7-8 (CSR Laboratorio, 2023).

- **Carbono Orgánico**

Generalmente representa más del 90% del carbono total del compost. Es uno de los componentes más importantes, pues la materia orgánica que lo conforma se degrada por la actividad de los microorganismos al utilizar el carbono orgánico como fuente de energía (Mendoza, 2012).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

El proceso experimental de este trabajo se realizó en dos etapas. La primera etapa consiste en la obtención y acondicionamiento de las biomasas para continuar con la segunda etapa, que radica en la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de estas biomasas.

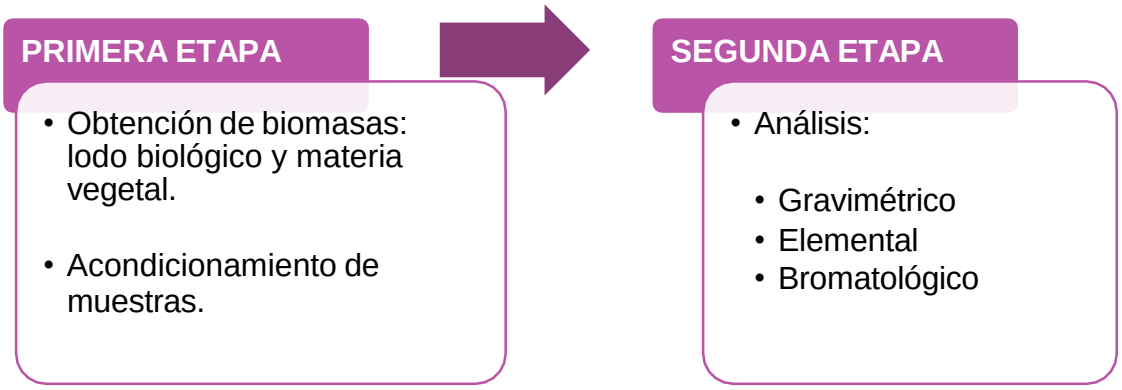


Figura 9. Etapas experimentales.

4.1 Primera Etapa

Correspondió a la obtención y preparación de muestras de lodos biológicos provenientes de la planta de lodos activados de la PTARCA en la UNAM y la materia vegetal del humedal artificial SHADE en el Bosque de San Juan de Aragón, Ciudad de México. El procesamiento de las muestras de éste estudio se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Microbiología Experimental Departamento de Biología de la Facultad de Química, UNAM. Cabe destacar que la obtención y preparación de muestra se realizó acorde a la normativa mexicana (NMX-AA-052-1985) (Figura 10).

Figura 10. Obtención y acondicionamiento de muestras.

4.1.1 Obtención del lodo biológico

Se colectaron un total de 4L de muestra de lodos activados en un recipiente de plástico obtenidos del a la salida del sedimentador secundario de la planta de lodos activados de la PTARCA en la UNAM (Figura 11). En el Laboratorio de Microbiología Experimental se llevó a cabo la homogenización y aeración de la muestra por medio de una bomba de aire ELITE799, con una potencia de 1.5 W, por un tiempo de 2 a 24 horas, se dejó sedimentar, se eliminó el exceso de agua; se distribuyeron 45 mL en tubos de Epeendorf de 50 mL, se centrifugaron a 150 rpm en el equipo Heraeus Multifuge X1 Centrifuge por 20 minutos, se desechó el sobrenadante y se guardó en refrigeración hasta su uso.

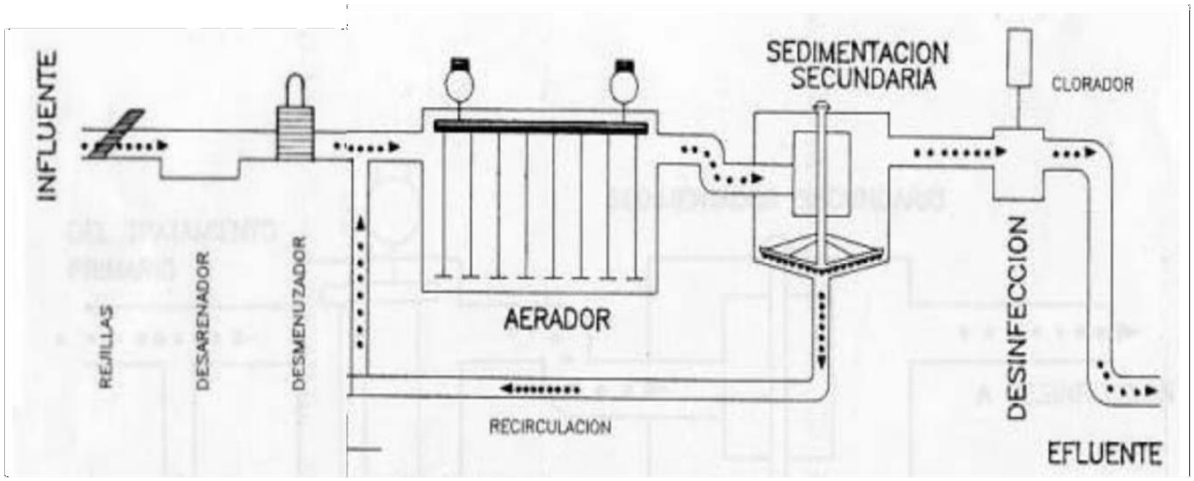


Figura 11. Diagrama de proceso de la PTARCA.

Fuente: Modificado de Escalante (2006).

4.1.2 Obtención de la materia vegetal

Se colectaron 4 kg aproximadamente de cada una de las siguientes especies de plantas *Arundo donax, Schoenoplectus californicus, Phragmites australis* y *Lemna gibba*, que fueron obtenidas de las celdas del humedal artificial SHADE del Bosque de San Juan de Aragón (Figura 12). En el Laboratorio de Microbiología Experimental las muestras vegetales se procesaron de la siguiente forma:

Para la especie *Lemna gibba*, primero se lavó cuidadosamente la lenteja obtenida con agua del grifo de 3 a 4 veces hasta eliminar la mayor parte de flora y fauna acuáticas que no pertenecieran a la especie vegetal en estudio. Se dejó secar a temperatura ambiente por 48 horas, se molió y tamizó hasta la obtención de un polvo fino donde se obtuvo una cantidad 44 g de biomasa seca por cada 1 kg de biomasa húmeda recolectada. Las tres especies vegetales restantes se cortaron en trozos de aproximadamente 10 cm, se dejaron secar a temperatura ambiente durante 15 días obteniendo entre 168-320 g de biomasa seca por kg de biomasa húmeda recolectada.

Figura 12. Diagrama del funcionamiento del SHADE.

Fuente: SEDEMA, 202.1

4.2 Segunda Etapa

Los métodos y equipos utilizados para el análisis los análisis físico-químicos fueron de acuerdo a las normativas mexicas relacionadas a cada parámetro.

4.2.1 Análisis

4.2.1.1 Gravimétrico

El análisis gravimétrico consistió en la evaluación de las características físicas como los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos (SF), porcentaje de humedad y la cantidad de cenizas presentes. Las determinaciones de parámetros para los lodos biológicos y materias vegetales se realizaron con base en su peso seco. En la tabla 8 se presentan los parámetros y técnicas que fueron seleccionados para su evaluación de acuerdo con las normas y métodos.

Tabla 4. Métodos para la determinación de parámetros.

Parámetros	Técnicas
pH	NMX-AA-025-1984. Potenciómetro.
Temperatura	NMX-AA-025-1984. Potenciómetro.
Humedad	NMX-AA-016-1984. Secado.
Sólidos totales, volátiles y fijos	APHA, 2540 G. Evaporación y Calcinación
Materia Orgánica	NMX-AA-021-1985. Método Walkey y Black.

4.2.1.2 Elemental

El análisis elemental se realizó en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAII) en la Facultad de Química, UNAM. Con el fin de conocer de forma cuantitativa la composición elemental de los componentes carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S); de las muestras obtenidas.

4.2.1.3 Bromatológico

El análisis bromatológico se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica (DNAB) de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVyZ) de la UNAM, para conocer las composiciones de los nutrientes existentes en las muestras de la materia vegetal obtenida. (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis bromatológico.

Parámetros	**Técnicas (Método AOAC 2015)**
Materia seca	Método AOAC 2015 934.01. Evaporación.
Humedad	Método AOAC 2015 934.01. Evaporación.
Proteína Cruda	Método AOAC 2015 2001.11. Destilación Kjeldahl.
Extracto Etéreo	Método AOAC 2015 920.39. Método Soxhlet.
Cenizas	Método AOAC 2015 942.05. Calcinación.
Fibra Cruda	Método AOAC 2015 962.05. Método Weende.
Extracto Libre de Nitrógeno	Método AOAC 2015 2001.11. Método Kjeldahl.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de biomasas

5.1.1 Caracterización del lodo biológico

De los 4L de lodos activados colectados en la PTARCA se logró obtener en el análisis gravimétrico un total de 5.6 g_{seco}/kg $_{húmedo}$, un pH: 7.3, humedad 95%, 12% cenizas, 88% de SV que fue mayor que los SF donde se obtuvo un 12% (Tabla 6). De acuerdo con los resultados obtenidos de estas características, se puede observar que se encuentran en el rango de los lodos secundarios típicos mencionados por Metcalf & Eddy, 2014 en la Tabla 2.

Tabla 6. Análisis gravimétrico del lodo biológico.

Muestra Lodos	pH	Peso seco ($g/kg_{húmedo}$)	Humedad (%)	Cenizas (%)	ST (%)	ST (g/L)	SV (%)	SV (g/L)	SF (%)	SF (g/L)
Promedio	7.30	5.6	95	12	5	0.056	88	0.049	12	0.007
Desviación estándar	0.018	0.007	0.707	0.144	0.707	0.003	0.144	0.004	0.144	0.001

En cuanto a los resultados del análisis elemental de la materia orgánica proveniente de los lodos indicados en la Tabla 7, se puede destacar que el porcentaje de nitrógeno es de 7.81%, el cual es superior al valor típico de lodos que es de 2.4-5%. Por otra parte, la composición del azufre fue del 0.97% la cual está dentro del intervalo típico de un lodo que va de 0-2.4%. Con respecto al carbono e hidrógeno con valores de 41.62% y 6.78, respectivamente, se encuentran en el intervalo de la composición de lodos que de acuerdo con Degremont (2007), van de 20-70% de carbono y 6.5-7.3% de hidrógeno, correspondientemente.

Tabla 7. Análisis elemental de lodos biológicos.

	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Nitrógeno (%)	Azufre (%)
Promedio	41.62	6.78	7.81	0.97
Desviación estándar	0.26	0.08	0.20	0.13

En cuanto al contenido de materia orgánica y carbono orgánico de los lodos biológicos, se obtuvieron valores de 36% y 21%, respectivamente (Tabla 8), indicando que se trata de un lodo típico. Ese contenido es precisamente el sustrato que los microorganismos pueden consumir y transformar biomasa microbiana (González & Rosete, 1998).

Tabla 8. Materia y carbono orgánico de lodos biológicos.

	Materia orgánica (%)	Carbono orgánico (%)
Promedio	36	21
Desviación estándar	7.39	4.29

5.1.2 Caracterización de materia vegetal

Los resultados obtenidos a partir del polvo de la planta *Lemna gibba*, se consiguió 75 g_{seco}/kg $_{húmedo}$, 4% de ST, un 96% de humedad, 9% de cenizas, un 91% de SV (Tabla 9), presentando un alto porcentaje de SV y mayor que los lodos. Éste es un dato importante porque nos indica que las especies vegetales pueden ser utilizadas en diferentes procesos de transformación como es fermentación (Valero-Valdivieso, Ortegón, & Uscategui, 2013).

Tabla 9. Análisis gravimétrico de la materia vegetal.

Muestra Vegetal	pH	Peso seco ($g/kg_{húmedo}$)	Humedad (%)	Cenizas (%)	ST		SV		SF	
					(%)	(g/L)	(%)	(g/L)	(%)	(g/L)
Promedio	7.01	75	96	9	4	0.750	91	0.68	9	0.069
Desviación estándar	0.014	0.001	0.000	0.707	0.707	0.707	0.707	0.005	0.707	0.006

En cuanto a los resultados del análisis elemental y la materia orgánica realizado a *Lemna gibba*, se observó que el carbono total presenta un 39% y de carbono orgánico representa un 56% del 97% de materia orgánica (Tabla 10 y 11).

Tabla 10. Análisis elemental de la materia vegetal.

	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Nitrógeno (%)	Azufre (%)
Promedio	38.47	5.87	5.17	0.50
Desviación estándar	0.16	0.01	0.12	0.05

Tabla 11. Materia y carbono orgánico de la materia vegetal.

	Materia orgánica (%)	Carbono orgánico (%)
Promedio	97	56
Desviación estándar	0.11	0.06

Análisis bromatológico

El análisis bromatológico representa la evaluación nutrimental de las especies vegetales obtenidas del SHADE. Los resultados que se observan en la Tabla 12, muestran que a partir de 100 g de muestra seca analizada se ve que en todas las especies muestran un porcentaje mayor al 90% de materia seca, lo que nos indica que existe una gran cantidad de nutrientes disponibles.

En cuanto al porcentaje de humedad de todas las especies, los datos que se observaron son valores por debajo del 10%, que es un valor óptimo, ya que esto permite que se puedan utilizar en diferentes procesos como por ejemplo en el área de artesanías o enmienda de suelos (Gómez, 2019).

Tabla 12. Análisis bromatológico de las materias vegetales.

Parámetros (%)	Lemna	Junco triangular	Carrizo	Carricillo
Materia seca	93.45	92.95	94.22	94.22
Humedad	6.55	7.05	5.78	5.78
Proteína Cruda	11.04	7.56	14.09	7.30
Extracto Etéreo	2.71	2.21	2.68	4.64
Cenizas	16.18	8.31	10.84	12.36
Fibra Cruda	11.28	29.89	27.06	26.57
Extracto Libre de Nitrógeno	52.23	44.98	39.55	43.35

Por otro lado, el análisis de cenizas representa el contenido de minerales que aportan las plantas para el forraje, en las especies del presente estudio se obtuvieron porcentajes de cenizas totales del 8 - 16%, es así que éste resultado es importante porque de acuerdo a la bibliografía las plantas de forraje más comunes presentan un porcentaje de cenizas del 5 al 10% (Jurado, Luna, & Barretero, 2004).

En cuanto a los resultados obtenidos a la fibra cruda en las especies en estudio correspondieron al residuo orgánico insoluble, donde *Lemna gibba* presenta el valor más bajo con un 11% en comparación del resto de las especies vegetales en estudio, es así, que estos resultados nos indican una mayor cantidad de materia orgánica soluble que puede ser aprovechada en un compostaje, por ejemplo. Por otro lado, el parámetro de extracto libre de nitrógeno representa una medición indirecta de los carbohidratos contenidos en muestras de los vegetales en estudio, por lo tanto este representa la composición de azúcares libres, almidón y otros tipos de carbohidratos digeribles que tienen como papel ser fuentes de energía (Villanueva, 2023).

5.2 Comparativo de biomasas

- **Sólidos**

  Se presentaron características importantes en cuanto al porcentaje de SV, la BM (lodos biológicos) con un 88%, la BV (*Lemna gibba*) con un 91% SV. Los SV son indicativos de la cantidad de materia orgánica presente en la biomasa. Aproximadamente entre el 20 y 30% de los SV son convertidos en dióxido de carbono y agua (Metcalf & Eddy, 2014). El porcentaje restante puede transformarse en compuestos orgánicos como ácidos grasos volátiles (AGV), haciendo posible que materias vegetales con alto porcentaje de SV sean utilizadas con ese fin.

  Los SF que permanecen después de que los SV son sometidos a calcinación a una temperatura de 550°C. Representan principalmente a sales inorgánicas solubles (MICROLAB Industrial, s.f.).

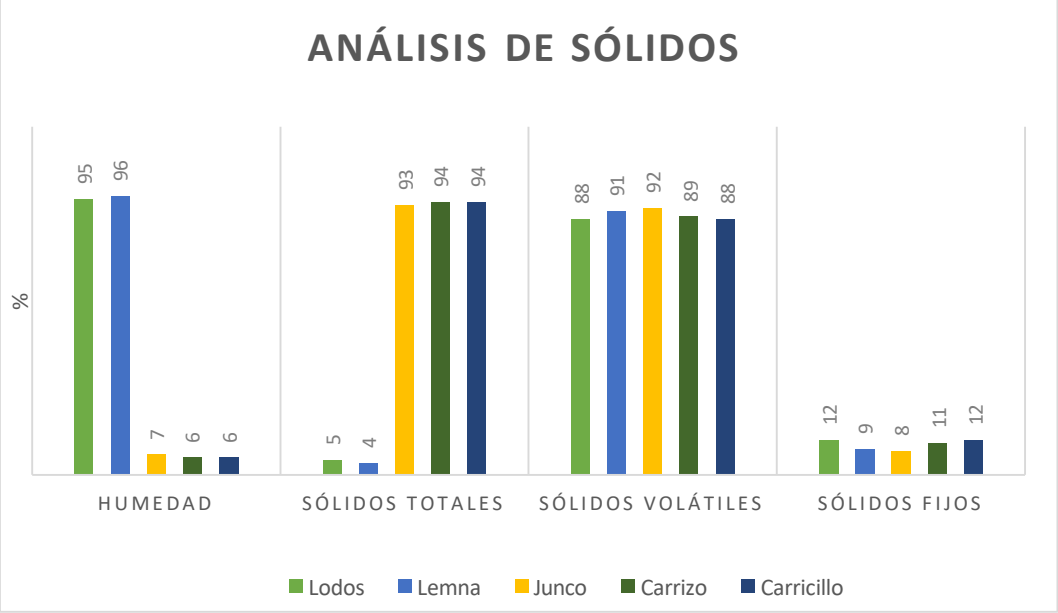


Figura 13. Porcentaje de sólidos de biomasas en estudio.

- **Análisis elemental**

Conforme a los análisis, la BM mostró un mayor porcentaje en todas las composiciones químicas que la BV. Lo resaltante en este análisis comparándolo con la determinación de carbono orgánico (ver Figura 16), es que la BV exhibió una proporción superior de carbono orgánico (56%) en contraste con la BM (21%). Por lo tanto, a pesar de que hay un mayor contenido de carbono total en la BM del 41.62%, la cantidad que corresponde a la orgánica es menor a la presente en la BV, siendo del 21%. La biomasa vegetal presento un 38.47% de carbono total, de la cual el 56% corresponde a carbono orgánico. La Figura 15 exhibe la comparación del análisis elemental entre biomasas.

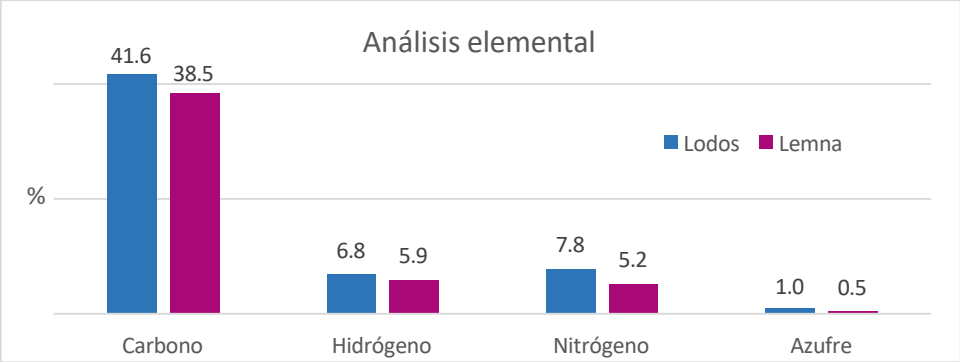


Figura 14. Análisis elemental de biomasas estudiadas.

- **Relación C/N**

Los resultados obtenidos de los análisis previos proporcionan la relación Carbono/Nitrógeno de las biomasas conforme a los cálculos establecidos por la norma mexicana (NMX-AA-067-1985). Las altas relaciones de C/N favorecen la proliferación microbiana, asegurando un medio de crecimiento óptimo (Vega, 2016). La biomasa vegetal (*Lemna gibba*) exhibió una relación mayor del 7.44 en comparación con la biomasa microbiana (lodos biológicos) con un valor de 5.33. Este parámetro es significativo para determinar su potencial de uso. Para que la biomasa pueda ser considerada útil en suelos de estanque, debe presentar una relación C/N dentro del rango de 6.0-12.0 (Vázquez, 2018), lo que sugiere que la biomasa vegetal es un indicador prometedor en este aspecto.

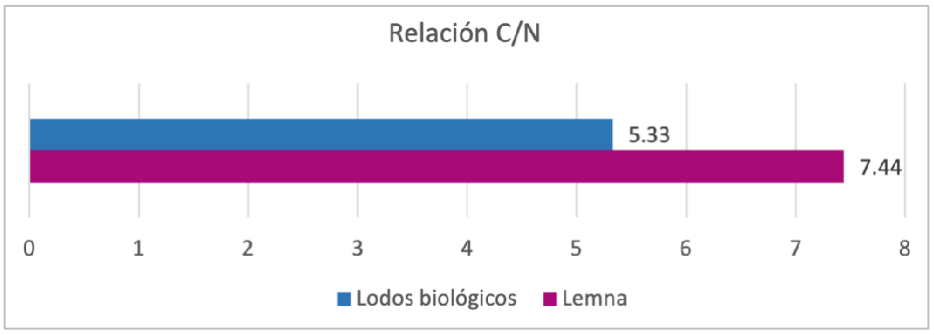


Figura 15. Relación C/N de biomasas estudiadas.

- **Materia orgánica**

Acorde a los resultados de materia orgánica presente en las biomasas exhibidos en la Figura 17, se obtuvo una mayor cantidad en la BV con un 97%. Es decir, prácticamente toda la BV es capaz de ser utilizada para ser transformado, a comparación de la BM con un 36%. Finalmente, presentando una mayor cantidad de carbono orgánico en la BV con un 56%, y de la BM del 21%.

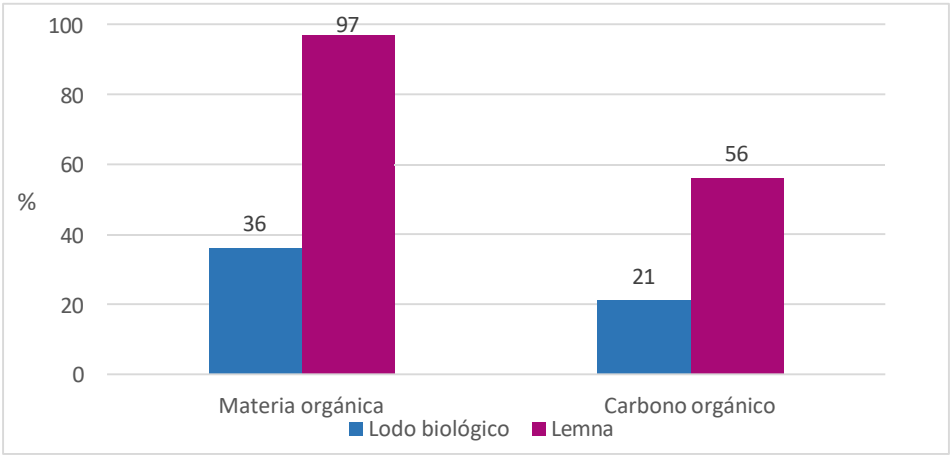


Figura 16. Porcentaje de materia y carbono orgánico en biomasas.

5.3 Aprovechamiento general de la biomasa

La posibilidad de aprovechar residuos para darles un nuevo uso ha sido investigada a lo largo de los años. Se ha demostrado que es posible utilizarlos como materia prima en otros procesos. Este trabajo exploró la posibilidad de usar biomasa proveniente de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, considerando el análisis de la composición química y características físicas de los lodos biológicos y de las especies vegetales. A partir de esta información es posible definir las alternativas para su aprovechamiento. En este sentido, al ser recursos que se encuentran en gran abundancia, pueden tener la oportunidad de ser aprovechadas de manera directa o mediante pretratamiento. De acuerdo con la bibliografía consultada, los principales sistemas de aprovechamiento de biomasa están dirigidos al sector energético y agrícola. Por otro lado, se han investigado otras áreas de aprovechamiento que actualmente son de gran interés como es el caso de bioproductos, tales como los bioplásticos (Vega, 2016).

En la Figura 10, se presentan los diferentes procesos existentes para el aprovechamiento energético de la biomasa según el proceso analizado. De igual forma, los parámetros analizados influyen en el producto final que se va a obtener.

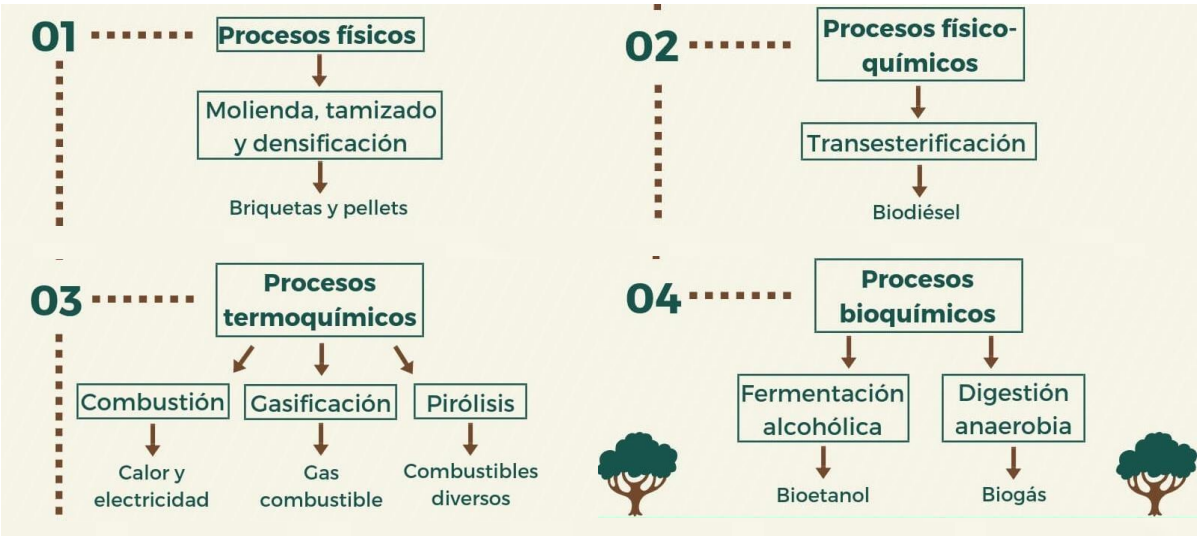


Figura 17. Procesos de aprovechamiento energético de biomasas.

Fuente: Modificado de Actitud Ecológica (2023).

En el caso de la BM de los lodos biológicos analizados, presentan un contenido del 36% de materia orgánica, lo cual resulta ideal para su aprovechamiento mediante un proceso físico de molienda y posterior tamizado que permita la generación de briquetas de lodos (una clase de biocombustible sólido). Asimismo, otra propuesta de aprovechamiento, conforme a las características fisicoquímicas de la BM analizada en este trabajo, está dirigida al proceso termoquímico de gasificación, el cual consiste en la transformación de un residuo orgánico a un gas combustible de bajo poder calorífico. De acuerdo con Pliego-Bravo, García-Reyes, Urrea-García, & Vergara-Hernández (2014), el proceso de gasificación con lodos residuales utilizando como agente gasificante el aire obtiene buenos rendimientos para la producción de gas frío y colateralmente se disminuyen los costos de secado de lodos. Mientras que, en el caso de la *Lemna gibba*, el contenido de materia orgánica es relativamente alto con un 97%. Haciéndolo susceptible a participar en procesos termoquímicos y bioquímicos, para la obtención de productos como gas combustible y calificándose como un posible sustrato para un proceso de fermentación hacia la generación de bioproductos, como el bioetanol (Baray-Guerrero & Manjarrez-Dominguez, 2020). En cuanto al resto de las especies vegetales, resultan atractivas en los procesos físicos para la fabricación de pellets, utilizado como biocombustible principalmente en sistemas de calefacción (Baena Solar, 2018). La elaboración de pellets consiste en el triturado, secado y prensado del material vegetal aplicando condiciones elevadas de presión y temperatura. Presentan ventajas en cuanto a la facilidad de manejo al ser compactadas en cilindros pequeños, sin requerir la adición de aglomerantes, ya que la BV presenta componentes propios que actúan como ligantes (López- Verdugo & Osuna- Flores, 2015).

En la Tabla 13, se presenta el resto de las propuestas de aprovechamiento energético de la BM y BV, para la obtención de distintos tipos de combustible utilizando información extraída de los elementos identificados en las fuentes bibliográficas examinadas a partir de lodos residuales, y sugiere diversas formas viables de emplear estos recursos comparando con las composiciones de biomasas estudiadas.

Tabla 13. Aprovechamiento energético de biomasas.

Lodos biológicos (BM)		**42%**	**8%**	**7%**	**1%**	**95%**	**88%**	**12%**
***Lemna gibba* (BV)**		**38%**	**5%**	**6%**	**0.5%**	**94%**	**91%**	**9%**
Mezcla BM y BV		**40%**	**7%**	**6.5%**	**0.8%**	**94.5%**	**90%**	**10%**
Obtención de combustible a partir de lodos	**Referencias**	**C**	**N**	**H**	**S**	**Humedad**	**Materia volátil**	**Cenizas**
Gas combustible	Pliego-Bravo, y otros, 2014	35%	6%	7%	0.8%	81%	55%	38%
Briquetas	FEMP, 2013	s/d	< 3%	s/d	<0.2%	≤ 20%	s/d	< 10%
Combustibles diversos	Pinedo, 2013	51%	0.2%	6.3%	0	14%	79%	0.4%
Bioetanol	Ventura, y otros, 2017	s/d	s/d	s/d	s/d	7.5%	78%	5.7%

s/d: sin datos

En la Tabla 14, se presenta una matriz comparativa que analiza el aprovechamiento en los diversos usos, estableciendo la relación entre la biomasa de lodos activados y *Lemna gibba* por separado, así como mezcladas. Esta matriz se desarrolla con base en indicadores derivados de los parámetros identificados en las fuentes bibliográficas consultadas y propone diversas aplicaciones prácticas para dichos recursos. En el caso de los lodos biológicos, con un contenido de materia orgánica del 36%, resulta factible su aprovechamiento en la producción de composta y en uso agrícola (Moeller, 2018).

Tabla 14. Aprovechamiento agrícola de biomasas.

Lodos biológicos (BM)		**36%**	**8%**	**21%**	**95%**	**7.30**
***Lemna gibba* (BV)**		**97%**	**5%**	**56%**	**94%**	**7.01**
Mezcla BM y BV		**66.5%**	**7%**	**38.5%**	**94.5%**	**7.16**
Obtención de sustratos a partir de lodos	**Referencias**	**Materia orgánica**	**Nitrógeno**	**Carbono orgánico**	**Humedad**	**pH**
Acondicionador de suelos	Moeller, 2018	50%	2.2%	28%	15-20%	7.0-7.5
Composta	Salcedo, y otros, 2007	30.63%	4.06%	17.78%	99%	5.88
Agrícola	Moeller, 2018. Bustamante, 2016	51.9%	6.6%	30.10%	24.7%	8.0
Abono orgánico	González U. & Rosete V., 1998	25-40%	6%	15-23%	s/d	s/d
Suelo agrícola	Cardoso, 2004	29.2-60%	0.44-3.84%	16.94-34.81%	s/d	7.1-9.1

s/d: sin datos

Por otra parte, los resultados de los análisis exhibieron que la materia orgánica presente en la *Lemna gibba* es del 97% de la muestra. Lo que se traduce en un aprovechamiento prácticamente total de su contenido. Lo anterior, hace posible que la biomasa de este tipo de ejemplares participe favorablemente como sustrato en procesos de fermentación tendientes a la obtención de diferentes bioproductos. En consecuencia, se requiere de buenas condiciones de fermentación de esta materia para tener un rendimiento óptimo. Asimismo, el resto de las especies vegetales presentes, pueden ser empleadas para su uso como materiales de construcción, específicamente como aislantes térmicos. En cuanto a su aprovechamiento, este también es factible en el área de compostaje, debido a que tanto las materias vegetales, como los lodos biológicos presentan características efectivas para ser usados como abono orgánico, por separado y combinados.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

- La BM y BV poseen propiedades que las hacen altamente valiosas en términos de fertilidad del suelo, contenido nutricional y potencial como fuente de materias primas renovables y mostrando diversas posibilidades de aprovechamiento de estos recursos en diferentes sectores económicos, desde la generación de energía hasta aplicaciones agrícolas y de manufactura.

- Se caracterizó la BM de un LA, y la BV de un HA, para determinar su aprovechamiento; demostrando que la cantidad de materia volátil, cenizas, carbono total y nitrógeno total son parámetros útiles para definir las posibilidades de aplicación en diversos sectores económicos y maximizar los beneficios económicos y ambientales.

- Se evaluó mediante la aplicación de diversas técnicas, la calidad composicional de la BM y BV, que permitieron definir su posible uso.

- En el caso de la BM presenta un gran potencial para la generación de energía mediante briquetas de lodos y gas combustible. Mientras que el uso agrícola sería mediante la producción de composta y mejorador de suelos. En cuanto a la BV, resulta factible la obtención de energía a través de productos como gas combustible y bioetanol. En cuanto a su uso agrícola, sería como forraje, composta y mejorador de suelo. Con relación a los otros materiales vegetales, resultan útiles como elementos constructivos, artesanías, forraje, la producción de pellets biocombustibles. Finalmente, la combinación de ambas biomasas resultaría en su uso para la producción de briquetas y pellets, la elaboración de composta y como enmienda de suelos.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abudi, Z. N., Hu, Z., Sun, N., Xiao, B., Rajaa, N., Cuixia, L., & Guo, D. (2016). Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid wate), TWAS (thickened wate activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS preatreatment and mixiing ratio. *Energy*(107), 131-140.

Ambientum. (25 de Noviembre de 2022). Obtenido de Contribución de la bioamsa: https://eprints.ucm.es/id/eprint/72629/1/T43234.pdf

APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* American Waater Works Association.

Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). Determinación de la biomasa en procesos biológicos. *Tecnología del agua*, 45-52.

Arroyave, M. (febrero de 2004). LA LENTEJA DE AGUA (Lemna minor L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA. *Revista EIA*(1), 33-38. Obtenido de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149217763003

Baena Solar. (29 de Agosto de 2018). *¿Qué son los pellets y cómo se fabrican?* Obtenido de Baena Solar. Climatización y Energías Renovables: https://www.baenasolar.es/que-son-los-pellets-y-como-se-fabrican/

Baray-Guerrero, M. R., & Manjarrez-Dominguez, C. B. (2020). Capítulo 2 Caracterización de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles. En A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz, & A. Bautista, *Ciencias ambientales, uso de recursos* (págs. 24-34). Querétaro: ECORFAN.

Beascoechea, E., Muñoz, J., & Curt, M. (2014). *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación.* EDITA.

Bustamante, M. A. (2016). *Utilización de compost de lodo en agricultura.* UNIVERSITAS Miguel Hernández. Obtenido de https://masterresiduos.umh.es/2016/06/02/utilizacion-de-compost-de-lodo-en-agricultura/

Cardoso, L. (2004). *Tratamiento y aprovechamiento de lodos residuales.*

Catalunya, A. d. (2009). *Gencat*. Recuperado el Agosto de 2023, de Digestión anaerobia: https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/digestio_anaerobia/

Comisión Nacional del Agua, C. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Córdova, M. L., Salgado, L., & Bravo, B. (2021). Economía circular y su situación en México. *INDICIALES, 1*(1), 25-37.

Corrales, L., Antonilez, D., Bohorquez, J., & Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova, 13*(24), 55-81.

CSR Laboratorio. (9 de Agosto de 2023). *Factores que afectan al proceso de compostaje*. Obtenido de CSR Laboratorio: https://csrlaboratorio.es/laboratorio/agricultura/fertilizantes-y-abonos/abonos-organicos-y-especiales/factores-que-afectan-al-proceso-de-compostaje/#

de Lucas Herguedas, A. I. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad.* (C. T. Agroalimentario, Ed.)

de Lucas, A. I., del Peso, C., Rodríguez, E., & Prieto, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad.* (C. T. Agroalimentario, Ed.)

Degremont. (2007). *Water Treatment Handbook* (Séptima ed.). Lavoisier.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.* Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).

Escalante, V. E., Ramírez, E., Pozo, F., Cardoso, L., Tomasini, A. C., & Moeller, G. E. (2006). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos activados.* México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA.

Esposito, M., Tse, T., & Soufani, K. (2018). The circular economy: An opportunity for renewal, growth, and stability. Thunderbird International Business Review. doi:https://doi.org/10.1002/tie.21912

Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP). (2013). *Estudio sobre el aprovechamiento de la biomasa a escala local.* Madrid: Red Española de Ciudades por el Clima.

Gómez, F. (2019). *Conociendo más del papel artesanal*. Obtenido de AGEO Archivo General del Estado de Oaxaca: https://www.oaxaca.gob.mx/ageo/conociendo-mas-del-papel-artesanal/

González U., L. I., & Rosete V., R. (1998). *Elaboración de compostra a partir de material vegetal y lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas de ciudad universitaria.* Tesis licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

González, S., González, O., & Uc, L. (2001). *Fermentación anaerobia continua de aguas residuales utilizando lodos secundarios como inóculo.* Instituto de Ingeniería, UNAM.

Grande, C. D. (2016). *Valoración biotecnológica de residuos agrícolas y agroindustriales.* Colombia: Bonaventuriana.

Hernández, N. (2021). *Tecnologías de vanguardia para la producción de bioplásticos a partir de residuos complejos.* Madrid.

Jurado, P., Luna, M., & Barretero, R. (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 42*(3), 379-395.

López- Verdugo, L., & Osuna- Flores, I. (2015). *Elaboración de pellets como biocombustible sólido, para el mejoramiento ambiental y económico en el norte de Sinaloa, México.* Universidad Autónoma Indígena de México, Posgrado de Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales.

López-Vázquez, C. M., Buitrón, G., Cervanes, F. J., & Hernández, H. A. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño.* IWA Publishing.

Luna Pabello, V., & Cuba Nogales, M. (2023). Aprovechamiento de lodo biológico y materia vegetal procedente de sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Cartel presentado en el 6° Encuentro Estudiantil de Ingeniería Química.* Ciudad de México.

Luna, A., García, ,. M., Rodríguez, E., Pimienta, E., & Jiménez, C. (2007). *La composta, vermicomposta estiercol de bovino en la retención de humedad del suelo.* Universidad de Guadalajara.

Luna-Pabello, V. M. (2023). *Tratamiento de Aguas Residuales.* Presentación, Facultad de Química.

Luna-Pabello, V., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 17*(1), 32-55.

Mantilla, G., Sandoval, L., Ramírez, E. M., Gasca, S., Navarro, J., Hernández, N., . . . Calderón, C. G. (2017). *Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales* (Primera ed.). Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento de México; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Martelo, J., & Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia, 8*(15), 221-243.

Martínez, A., Octaviano, C., & Nieto, J. (2020). *Evaluación de la situación actual de la economía circular para el desarrolllo de una hoja de ruta para Brasil, Chile, México y Uruguay.* Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Mata Gómez, J. A. (2006). *Caracterización de los exopolisacáridos producidos por microorganismos halófilos pertenecientes a los géneros Halomonas, Alteromonas, Idiomarina, Palleronia y Salipiger.* Granada: Editorial de la Universidad de Granada.

Mendoza, M. (2012). *Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura.* Tesis licenciatura, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.* New York: McGraw-Hill.

MICROLAB Industrial. (s.f.). Recuperado el Agosto de 2023, de https://www.microlabindustrial.com/parametros/propiedades-agregadas/565/solidos-disueltos-fijos#:~:text=Los%20s%C3%B3lidos%20disueltos%20fijos%20son,principales%20a%20sales%20inorg%C3%A1nicas%20solubles.

Miranda, M., & Luna-Pabello, V. (2001). *Estudio del Arte y Perspectivas de Aplicación de los Humedales Artificiales de Flujo Horizontal en México.* Ciudad de México: D.R.

Moeller, G. E. (2018). Lodos residuales de plantas de tratamiento: ¿Oportunidad o Amenaza? *TANTALUS Economía Sustentable de los Recursos Naturales*.

Negro, M., Villa, F., Aibar, J., Alarcón, R., Ciria, P., Cristóbal, M., . . . Zaragoza, C. (2000). *Producción y gestión del compost.* CSIC.

NMX-AA-016-1984, S. d. (s.f.). *Protección al Ambiente- Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales- Determinación de humedad.* Dirección General de Normas.

NMX-AA-021-1985. (s.f.). *Protección al ambiente- Contaminación del Suelo- Residuos sólidos municipales- Determinación de Materia Orgánica.*

NMX-AA-025-1984, C. d. (s.f.). *Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos sólidos-Determinación del pH-Método Potenciométri.* Norma Mexicana.

NMX-AA-052-1985, S. d. (s.f.). *Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Preparación de Muestras en el Laboratorio para su Análisis.* Normativa Oficial Mexicana, México. Obtenido de http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa052.pdf

NMX-AA-067-1985, C. d. (s.f.). *Protección al Ambiente- Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales- Determinación de la relación Carbono/Nitrógeno.*

NOM-004-SEMARNAT-2002. (s.f.). *Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.* Diario Oficial de la Federación.

Pérez, M. (2019). *Dinámica de pH, emisión de NH3 y CO2 durante el compostaje de estiércol bovino combinado con azufre.* Tesis maestría, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.

Pinedo, A. U. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual.* Trabajo de Fin de Máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Departamento de Ciencias Analíticas, Madrid.

Pliego-Bravo, Y., García-Reyes, M., Urrea-García, G., & Vergara-Hernández, M. (2014). Simulación del proceso termoquímico sugerido para el aprovechamiento de lodos residuales como fuente de energía alterna. *Revista Mexicana de Ingeniería Química, 13*(2), 619-629.

Pulgarin, G. D. (2010). *Estudio bromatológico, microbiológico, foliar y de fertilidad de los suelos en los cultivos de Aloe vera Barbadensis Miller en tres fincas del*

departamento de Risaralda. Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología.

Quesada, J., Faba, L., Díaz, E., & Ordoñez, S. (2014). La biomasa como alternativa al petróleo para la obtención de productos químicos: acetona y etanol como moléculas plataforma. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 31-49.

Ramírez, E. C. (2004). *Fundamentos teóricos de lodos activados y aireación extendida.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Rodríguez, R., & Fica, B. (2020). *Guía de Campo Plantas Vasculares Acuáticas en Chile.* Concepción, Chile: Corporación Chilena e la Madera.

Salazar, T. (28 de Diciembre de 2018). *Carrizo, una opción para la construcción*. Obtenido de Medium: https://medium.com/@tresalaz12/carrizo-una-opci%C3%B3n-para-la-construcci%C3%B3n-5fe794541575

Salcedo, E., Vázquez, A., Krishnamaurthy, L., Zamora, F., Hernández, E., & Rodríguez, R. (Febrero de 2007). Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México. *Interciencia, 32*(2), 115-120. Obtenido de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33932207

SEDEMA. (2021). *Informe de Avances. Programa Ambiental y de Cambio Climático para la Ciudad de México 2019-2024.* Ciudad de México.

Serafim, L. S., Lemos, P. C., & Torres, C. (2008). The influence of process parameters on the characteristics of polyhydroxyalkanoates produced by mixed cultures. *Macromolecular Bioscience, 8*, 355-366. doi:10.1002/mabi.200700200

Sierra, O. M., & López, G. (2001). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artifciales. *KUXULKAB´ Revista de Divulgación de la División Académica de Ciencias Biológicas*, 47-55.

Valero-Valdivieso, M., Ortegón, Y., & Uscategui, Y. (2013). *Biopolímeros: Avances y Perspectivas.*

Vázquez, R. (2018). *Relación carbono nitrógeno (C/N) en los abonos orgánicos.*

Vega, O. A. (2016). *Extracción y caracterización estructural de un PHA, obtenido de residuos de cáscaras de yuca y piña mediante procesos de fermentación; y su aplicación en la fabricación de fibras por electrospinning.* Tesis doctoral, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.

Ventura, J., Honorato, J. A., Hernández, A., Aburto, J. A., Vaquera, H., & Enríquez, J. F. (2017). Composición química y rendimiento de biomasa de maralfalfapara producción de bioetanol de segunda generación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8*(1), 215-221.

Villanueva, G. (Marzo de 2023). Interpretación de análisis bromatológicos de los alimentos balanceados. (B. Editores, Ed.) *Entorno Ganadero*.

Vuan, V. (2018). *Tendencias de producción de ácido láctico a partir de recursos renovables.* Universidad ORT Uruguay.

ANEXO. GLOSARIO DE TÉRMINOS

- Biomasa:
  Es toda aquella materia orgánica disponible en una base renovable originada de un proceso biológico.

- Brácteas:
  Hoja situada en la cercanía de la flor, distinta de las hojas normales (Moreno, 2007).

- Cariopsis:
  Fruto seco, indehiscente, uniseminado, con pericarpo soldado a la semilla. La cariopsis es el fruto típico de las gramíneas (Moreno, 2007).

- Eutrofización:
  Enriquecimiento del agua por nutrientes, especialmente compuestos de nitrógeno y fósforo, los cuales aceleran el crecimiento de algas y macrófitas (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

- Fermentación:
  Proceso metabólico en el que se lleva a cabo una reacción de oxidación parcial descomponiendo moléculas complejas sin requerimiento de oxígeno (proceso anaeróbico) a moléculas sencillas (Grande, 2016).

- Humedales Artificiales:
  Sistemas creados intencionalmente con el propósito de realizar tratamiento de aguas servidas o residuales. Permite aumentar el valor escénico, la disponibilidad de fuentes de agua o acrecentar la oferta de hábitat para la vida silvestre. Tienen variadas formas de construcción, tamaños y funcionamiento, según los intereses (Beascoechea, Muñoz, & Curt, 2014).

- Lígula:

  En las gramíneas es una formación membranosa o pilosa ubicada en la cara interna de la hoja entre la vaina y la lámina (Moreno, 2007).

- Materia orgánica:

  Mezcla heterogénea de residuos orgánicos de vegetales o animales en cualquier grado de descomposición (Ramírez, 2004).

- Proceso biológico:

  Permite el desarrollo de una depuración de origen natural en la que los microorganismos son capaces de devolver (depurar) agua contaminada a su estado natural (APHA, 2005).