

**ENZIMAS PROTEOLÍTICAS Y LIPOLÍTICAS DE ORIGEN BACTERIANO  
USADAS EN PROCESOS BIOTECNOLÓGICOS**



**LUIS DANIEL MAFLA ROSERO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE BIOLOGÍA  
POPAYÁN, CAUCA**

**2023**

**ENZIMAS PROTEOLÍTICAS Y LIPOLÍTICAS DE ORIGEN BACTERIANO  
USADAS EN PROCESOS BIOTECNOLÓGICOS**



**LUIS DANIEL MAFLA ROSERO**

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de Biólogo

Director:

**M. Sc. SANDRA CARLINA RIVAS ZÚÑIGA**

Asesor:

**Ph D. RICARDO BENÍTEZ BENÍTEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE BIOLOGÍA**

**POPAYÁN, CAUCA**

**2023**

## Nota de Aceptación

El director y jurados han  
leído el presente documento,  
escucharon la sustentación  
del mismo por su autor y  
la encuentran satisfactoria.

Director \_\_\_\_\_

M. Sc. Sandra Carlina Rivas Zúñiga

Asesor \_\_\_\_\_

Ph D. Ricardo Benítez Benítez

Jurado \_\_\_\_\_

M. Sc. Yenifer Yadira Tovar Rosero

Jurado \_\_\_\_\_

M. Sc. Clara Inés Giraldo Aristizábal

Fecha de sustentación: Popayán, Cauca \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios

*Al rey glorioso del cielo quiero darle las gracias por concederme salud, vida, fuerza, sabiduría y entendimiento para poder cumplir con este y muchos otros retos, que se han presentado y se seguirán presentando. Sé que bajo su amparo estoy en condición de aceptarlos y cumplirlos con todo el amor, honor y coraje.*

A mis amados padres Luis Mafla y Rosio Rosero

*Es indescriptible y no encuentro palabras que surjan de mi corazón o mente para expresar cuan inmensamente agradecido y feliz me siento con esos seres maravillosos que me han apoyado en absolutamente todo, son ellos mis confidentes, amigos y cómplices, los que me han arropado, en lo económico, lo afectivo y lo moral, y estoy seguro que sin ellos jamás sería quien soy y no hubiera logrado todo lo que he conseguido, gracias, por su sacrificio, consejos y paciencia, gracias por el pan que me han brindado cada día, amor es lo único que le hace honor a lo que en verdad siento por ustedes.*

A mi Hermano

*Por compartir tanto tiempo, por preocuparse, por subir mi moral a niveles insospechados con sus palabras, fuertes y amorosas, y como olvidar las veces que con sus ocurrencias me ha sacado más de una sonrisa, gracias, hermano.*

A mis queridos Docentes

Es admirable tener conocimientos, pero es aún más increíble y noble saberlos compartir, de corazón mil gracias a todos mis profes, por tantas aventuras, vividas en el campo y el laboratorio, especialmente aquellos dedicados a las áreas de microbiología y química.

## RESUMEN

Los desechos orgánicos representan una amenaza significativa para el medio ambiente debido a su inadecuada eliminación y la generación de lixiviados, olores y gases de efecto invernadero. Una solución viable para mitigar estos efectos es el uso de microorganismos y enzimas capaces de descomponer la materia orgánica de desecho de manera amigable y efectiva con el medio ambiente. Con el objetivo de recopilar y analizar información bibliográfica sobre las bacterias descomponedoras, particularmente de bacterias proteolíticas y lipolíticas y los mecanismos enzimáticos que utilizan, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en bases de datos, libros, revistas certificadas y depósitos electrónicos de revistas científicas, teniendo en cuenta criterios como, pertinencia, especificidad y énfasis. Se seleccionaron un total de 121 documentos, que incluyen aproximadamente 60 revistas, 55 repositorios y 4 libros. Además, se recopilaron datos estadísticos de la base de datos en línea de peptidasas MEROPS 2021 y el software SPSS. Se encontraron 19,496 tipos de proteasas bacterianas, agrupadas en 263 familias, 16 de las cuales se encuentran en bacterias descomponedoras, siendo *Bacillus*, *Clostridium* y *Pseudomonas* los géneros más comunes. Este trabajo proporciona una comprensión más profunda de las bacterias descomponedoras y los mecanismos enzimáticos utilizados para descomponer la materia orgánica, lo que puede ayudar a abordar los desechos orgánicos y mitigar su impacto ambiental.

**Palabras claves:** Desechos orgánicos, bacterias descomponedoras, lipasas, proteasas, *Bacillus*, *Clostridium*, *Pseudomonas*.

## **Tabla de contenido**

<b>1.</b>	8
<b>2.</b>	9
<b>3.</b>	10
<b>3.1.</b>	10
<b>3.2.</b>	10
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	10
4.1. Residuos orgánicos	10
<b>4.1.1. Clasificación de los residuos orgánicos</b>	12
4.2. Degradación de residuos orgánicos.	15
<b>4.2.1. Degradación de residuos orgánicos por microorganismos</b>	18
4.3. Enzimas.	19
<b>4.3.1. Proteasas.</b>	22
<b>4.3.2. Lipasas</b>	26
<b>5. MARCO METODOLÓGICO</b>	30
5.1. Delimitación del tema	30
5.2. Obtención y selección de la información.	31
<b>6. CUERPO DE LA MONOGRAFÍA</b>	31
6.1. Utilización y eficiencia de las bacterias en la descomposición de residuos orgánicos	31
6.2. Últimos avances sobre la actividad lipolítica y proteolítica de bacterias	37
6.3. Biorremediación enzimática	42
<b>7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN</b>	45
<b>8. CONCLUSIONES.</b>	47
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	47

Listado de figuras

Figura 1 ..... 23

Figura 2 ..... 28

Listado de tablas

Tabla 1 ..... 15

Tabla 2 ..... 19

Tabla 3 ..... 27

Tabla 4 ..... 31

## 1. INTRODUCCIÓN

Como resultado de la producción humana de bienes en grandes cantidades, se generan efectos colaterales en el ambiente asociados con el vertimiento de residuos en la naturaleza que contaminan los ecosistemas, los procesos de contaminación se despliegan en diferentes entornos tales como: el agua, el aire y el suelo. Con el fin de contrarrestar los efectos nocivos generados por los procesos antrópicos hacia los ecosistemas, se han utilizado una amplia variedad de microorganismos siendo las bacterias las más importantes.

Las bacterias son organismos de gran diversidad metabólica, que utilizan un rango amplio de enzimas para degradar compuestos orgánicos; dentro de este grupo microbiano, se puede destacar el grupo de las bacterias lipolíticas y proteolíticas que contribuyen en el aprovechamiento de biomasa residual.

Entendiendo la importancia de las bacterias como productoras de enzimas que degradan residuos orgánicos, en este documento se pretende dar a conocer los géneros bacterianos descomponedores de residuos orgánicos, a través de la revisión de bibliografía en repositorios universitarios, buscadores científicos y en la base de datos MEROPS 2021, para entender cómo funciona la degradación de este tipo de desechos por parte de las bacterias, como son los mecanismos metabólicos a través de la producción de enzimas y rutas bioquímicas, mediante las cuales los microorganismos aceleran la descomposición y digestión de hemicelulosas, celulosas, pectinas, grasas y azúcares junto con otras proteínas y carbohidratos comunes que se encuentran en los residuos orgánicos.

Es así como la información analizada muestra un avance en el conocimiento de las enzimas bacterianas que degradan desechos, particularmente las lipasas y proteasas, como herramientas a favor del medio ambiente en la lucha por la reducción de la contaminación.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La reutilización de residuos orgánicos mediante estrategias de reciclaje es fundamental para mitigar la contaminación ambiental causada por la acumulación de dichos residuos. A pesar de los avances en el tema, los residuos orgánicos no se manejan adecuadamente en la actualidad, lo que hace necesario realizar estudios de investigación que recopilen y divulguen información sobre la descomposición microbiana de la materia orgánica. Esta descomposición está estrechamente relacionada con diversos aspectos, que van desde la descomposición natural en un ambiente específico para la culminación de una cadena trófica, hasta la desintegración de los desechos antropogénicos, que en su mayoría se utilizan para producir compost, biogás y otros materiales que contribuyen al desarrollo sostenible (Kumar, 2020).

Es así como la recopilación, el análisis y la divulgación de la información sobre las enzimas bacterianas y el modo en que actúan sobre los desechos orgánicos, es fundamental para comprender como se mantiene un ecosistema y un ambiente en general sano, además de generar consciencia acerca de la importancia de las bacterias como herramienta fundamental en la degradación de desechos orgánicos que pueden ser aprovechados y devueltos al suelo en calidad de nutrientes, o a la humanidad como sustratos útiles de diversa índole, empleados en procesos biotecnológicos que generen productos de calidad, novedosos y en un menor tiempo, usados en la industria alimentaria, en la industria agrícola, o como artículos de aseo.

Teniendo en cuenta lo anterior, este documento brindará información correspondiente a bacterias descomponedoras, cuyas actividades proteolíticas y

lipolíticas contribuyen a degradar materia orgánica acumulada, dado su metabolismo enzimáticamente eficiente y la sencillez de su estructura; contribuyendo de esta manera como insumo y elemento de consulta para investigaciones posteriores relacionadas con estudios de usos de microorganismos en la degradación de residuos.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Sistematizar y analizar información relacionada con enzimas proteolíticas y lipolíticas de origen bacteriano utilizadas en procesos de degradación.

#### **3.2. Específicos**

- Recopilar información sobre enzimas proteolíticas y lipolíticas de origen bacteriano implicadas en procesos biotecnológicos.
- Resaltar el potencial uso de las enzimas lipolíticas y proteolíticas en bioprospección.

### **4. MARCO TEÓRICO**

#### **4.1. Residuos orgánicos**

Se le denomina residuo a todo material en estado líquido, sólido o gaseoso, producto de la actividad humana, que surge de un proceso de transformación, después del cual no tiene aplicación alguna o que es rechazado una vez ha perdido su utilidad. En la actualidad, con Estados Unidos y China a la cabeza se producen algo más de 2.100 millones de toneladas de residuos cada año, Latinoamérica por su parte tiene una producción de 541.000 toneladas por día, aproximadamente 197.465.000 toneladas anuales, y solo el 16%

de todos los desperdicios a nivel mundial son aprovechados o reutilizados de forma adecuada. A los desechos se los puede clasificar en función de su estado ya sea en sólidos, líquidos o gaseosos; según el lugar de procedencia como domésticos, industriales, agropecuarios, sanitarios y mineros; en función a su peligrosidad como residuos peligrosos, radioactivos e inertes; o a partir de la naturaleza de su fuente u origen, como residuos orgánicos e inorgánicos (Vega et al., 2020 & BBC, 2019).

Los residuos orgánicos por su parte, provienen de diversos lugares y podemos encontrarlos en cualquier estado, sin embargo todos ellos tienen un factor común que es el entorno que los rodea, donde tanto su origen como la manera en que se descomponen, es natural, es decir estos residuos provienen de fuentes vivas (seres bióticos), y su descomposición la llevan a cabo los mismos seres vivos y no se necesita estrictamente la intervención de la tecnología humana, aunque como se verá más adelante, esta puede optimizar y acelerar el proceso de degradación (Garita Sánchez, 2014).

Debido a la procedencia de los desechos orgánicos, es de esperar que a nivel químico molecular, sean similares o idénticos a sus fuentes originales, como reflejo de esto dichos residuos están compuestos en su mayoría por bioelementos, principalmente de C, H, N,P,S,O, con el carbono a la cabeza como el pilar principal, además la manera como se agrupan, da origen a las biomoléculas y macromoléculas tan características en los seres vivos, lípidos, proteínas, carbohidratos, e incluso en algunos casos ácidos nucleicos. Otra propiedad remarcable de los desechos orgánicos es la nobleza o facilidad para tratarlos, dada su estructura molecular estos se pueden degradar de forma más rápida, provechosa y eficiente, lo que los vuelve interesantes para diversos campos de la producción humana, principalmente la agricultura (Garita Sánchez, 2014).

#### **4.1.1. Clasificación de los residuos orgánicos**

De acuerdo con Dinelys Álvarez (2022); Sandra Portillo (2020); y Umoa Fajardo y colaboradores (2021), los residuos orgánicos se pueden clasificar en:

##### ***Residuos de alimentos o similares.***

Materiales sólidos o semisólidos de origen animal o vegetal que se descartan y antes fueron empleados como alimentos (fragmentos de frutas y de carne, productos en mal estado descartados), y luego inician un proceso de biodegradación posterior.

##### ***Residuo sólido aprovechable.***

Material sólido que no tiene valor de uso directo al originarse, pero puede ser incorporado a un proceso productivo generando una rentabilidad, un ejemplo de ello son los residuos fecales, especialmente de bovinos para el aprovechamiento de su potencial en la generación de fertilizantes y biogás.

##### ***Lixiviados.***

Un lixiviado es un líquido generalmente espeso resultante de la percolación de desechos sólidos, en otras palabras el líquido infiltrado dentro de los residuos sólidos se lleva muchos componentes de estos, y en algunos casos puede dar lugar a sustancias suspendidas de forma notoria o incluso una mezcla semisólida, en el caso de los residuos orgánicos estos aparecen mayoritariamente, en el compostaje fermentativo, o cuando se busca elaborar fertilizantes líquidos, debido a esto varios investigadores, no toman a los lixiviados como desechos si no como un producto derivado de estos, sin embargo, en varios casos aparecen antes de que cualquier proceso de descomposición inicie, ejemplo de ello es

las mezclas que se desechan y que suelen estar compuestas de sólidos y líquidos, como el caso de alimentos mezclados con agua o aceite, o lo que ocurre de forma natural cuando un desecho se expone a las lluvias, de este modo si se tomarían como un tipo de desperdicio orgánico.

### **Residuo líquido.**

Estos residuos, se presentan en estado líquido, y son el resultado de la actividad humana o natural, dentro de estos podemos encontrar a los aceites, los derivados animales como la leche, excrecencias, como la orina (empleada en muchos casos para la obtención de sales como la urea), y las secreciones vegetales, como las sustancias laticíferas.

### **Residuos semisólidos.**

Es el material, que se encuentra en el limbo entre sólido y líquido, se podría tomar también como un líquido con bastantes partículas y con espesor elevado, dentro de esta clasificación entrarían, los jarabes vegetales, claras y yemas de huevo, sustancias gelatinosas, cartílagos deteriorados etc.

### **Residuos gaseosos.**

Toda sustancia de origen natural, que presenta sus partículas con mayor espaciamiento y que sus propiedades tangibles se reducen al aroma, y en muy pocos casos pueden ser palpadas o vistas (depende en gran medida de la densidad y donde estén contenidos), son el resultado de cambios en presión y temperatura o un desprendimiento producto del tiempo en el que pasan los desechos expuestos a un ambiente determinado, ejemplo de ellos tenemos el metano, etano y butano que se desprenden de las heces

animales o de aceites vegetales, al igual que con los lixiviados se discute si en verdad son desechos o son el producto de ellos.

### **Residuo directo y/o residuo derivado de un organismo.**

Aquí se distinguen dos tipos de residuos orgánicos los directos son aquellos, que son parte del organismo, y que lo afectan de forma directa comprometiendo su vida, es decir se trata de cadáveres de animales, y árboles o troncos muertos, por su parte los derivados, no comprometen directamente la vida del organismo y este puede seguir o no con vida después de haberlos depositado en el ambiente, tenemos como ejemplo, la eses fecales, la orina, sustancias laticíferas, leche, esperma, garras, pieles mudadas, trozos de corteza etc. Todos estos residuos pueden ser aprovechados y transformados, aunque se pueden encontrar tanto en entornos silvestres como intervenidos, siendo este el caso los segundos son los que los seres humanos normalmente aprovechan.

En la clasificación vista se tomaron en cuenta dos parámetros el estado de la materia (sólido, líquido, gaseoso, semisólido, y la categoría especial de lixiviados) y la magnitud, o que tan invasivo es en el organismo de donde proviene, donde pueden ser simples derivados, o el organismo entero en sí, en el caso de los alimentos estos pueden caer en cualquiera de estas categorías, pero se los puso aparte debido a su nivel de importancia según Umoa Fajardo y colaboradores (2021), ya que representan con una diferencia abrumadora la mayor parte de desperdicios orgánicos a nivel global, además esta clasificación no es dada por ninguna regla o institución especializada si no por los autores mencionados, donde se compila sus aportes.

## 4.2 Degradación de residuos orgánicos.

Los residuos orgánicos pueden descomponerse gracias a la acción de microorganismos aerobios, mediante lombricultura, digestión anaerobia en biodigestores y por la acción controlada de larvas de mosca. Cada una de estas técnicas contempla una serie de etapas, que conllevan procesos metabólicos de biodegradación, donde se pasa de grandes biomoléculas a moléculas orgánicas más sencillas, teniendo en cuenta agentes biológicos como bacterias, hongos y animales, y factores como temperatura, agitación, iluminación, entre otros (Tabla 1) (Jiménez Álvarez, 2021).

Tabla 1. *Procesos para la descomposición de residuos orgánicos*

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Etapas</b>	<b>Parámetros</b>
Compostaje	Proceso de biodegradación de materia orgánica a partir de grandes biomoléculas para obtener moléculas más sencillas, que combinadas forman una sustancia compleja denominada humus (Monsalve et al., 2017).	Mesófila: dura de 2 a 8 días. Aquí los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de carbono (C) y nitrógeno (N) aumentando la temperatura a 40°C y bajando el pH a 4.5. A temperaturas de 45° aparecen las bacterias termófilas, las cuales degradan celulosa y lignina. Enfriamiento: se agotan las fuentes de carbono, desciende la temperatura y aparecen hongos. Se continúa degradando celulosa. Maduración (etapa final): Durante varios meses a temperatura ambiente, se producen reacciones secundarias de condensación y	Temperatura, pH, aireación, humedad, porcentaje C/N

		polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos	
Lombricultura	Proceso aerobio de utilización de lombrices para compostar residuos orgánicos, empleando los procesos de su sistema digestivo (Jiménez Álvarez, 2021).	Reproducción: siembra del pie de cría. Preparación del lecho: sustrato inicial formado por estiércol y pasto. Pre compostaje: los residuos se descomponen durante una semana. Prueba de alimentos: se mezcla lombrices, lecho con el pre compostaje y agua, se deja en oscuridad. Se verifica si las lombrices están activas. Cosecha de lombrices: en esta etapa aumenta la cantidad de lombrices y el compost presenta apariencia negruzca, se deben retirar las lombrices. Extracción de lombricompost: se tamiza el compost para su uso	Alimento, contenido de amonio, salinidad, luminosidad, pH, temperatura, relación C/N
Digestión anaerobia	Proceso de degradación progresiva de la materia orgánica, mediante reacciones químicas en ausencia de oxígeno, hasta llegar a la producción de biogás (metano y dióxido de carbono) (Hincapié Buitrago, 2018).	Hidrólisis: la materia orgánica es transformada con la ayuda de enzimas extracelulares (proteinasas, celulasas, etc.), en elementos más simples que podrán ser absorbidos por los diferentes microorganismos en la digestión (Hincapié Buitrago, 2018). Acidogénesis: los productos de la hidrólisis son degradados en ácidos orgánicos más simples	Bacterias, alimento, mezclado, condiciones anaerobias, temperatura, pH, humedad, sólidos totales, adición de inóculo, tiempo.

		<p>(acético, propinoico, butírico, etc.), alcoholes, amoniaco, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.  Unificar el lenguaje químico, nombre, y entre paréntesis fórmula. El pH desciende beneficiando a las bacterias acidogénicas y acetogénicas (Hincapié Buitrago, 2018).  Acetogénesis: el ácido acético y el hidrógeno producidos son procesados directamente por las bacterias metanogénicas. Los ácidos orgánicos por su parte son transformados por las bacterias acetogénicas (Hincapié Buitrago, 2018).  Metanogénesis: el ácido acético, el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> son transformados en CH<sub>4</sub> y ácido sulfúrico H<sub>2</sub>S, por parte de bacterias metanogénicas (Hincapié Buitrago, 2018).</p>	
Degradación de materia orgánica por larvas de moscas	Las larvas de moscas soldado ( <i>Hermetia illucens</i> ) degradan y consumen diferentes tipos de residuos incluyendo frutas, vegetales, desperdicios humanos y animales muertos	<p>Obtención de larvas de la mosca  Crianza de la mosca en condiciones de laboratorio  Desarrollo de las larvas en contacto con el sustrato  Cálculo de parámetros fisicoquímicos  Obtención del sustrato degradado</p>	Alimento, inóculo, temperatura, pH, humedad.

#### 4.2.1. Degradación de residuos orgánicos por microorganismos

Para llevar a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica de desecho antes mencionados, se necesita de la intervención efectiva y controlada de diversidad de microorganismos, especialmente bacterias, que, gracias a su versatilidad, ubicuidad y metabolismo enzimáticamente eficiente, han logrado adaptarse al consumo de una gran variedad de materia orgánica, contribuyendo a degradar gran parte de los desechos que se producen a nivel mundial. Las bacterias tienen la capacidad de actuar sobre residuos vegetales, degradando macromoléculas como la celulosa, hemicelulosa y lignina; o en residuos de origen animal, desperdicios de cocina, sobrantes de la industria etc. (Vallejo Villegas et al., 2021).

Este tipo de metabolismo bacteriano es de carácter heterótrofo y emplea múltiples mecanismos para la degradación de materia orgánica como lo son la glicolisis y el ciclo del ácido cítrico, así como también rutas más especializadas como la ceto-desoxi-fosfogluconato en *Pseudomonas*, y la ruta de la pentosa fosfato. De igual manera, son diversos los géneros bacterianos que actúan en la descomposición de residuos orgánicos, tanto para sustratos específicos como generales, los cuales intervienen en el rendimiento de sus actividades metabólicas y enzimáticas, dando como resultado la efectiva degradación de los residuos orgánicos. A continuación, se presentan ejemplos de algunos géneros bacterianos asociados a un determinado sustrato (Vallejo Villegas et al., 2021).

**Tabla 2.** Géneros bacterianos y residuos donde actúan

<b>Bacterias</b>	<b>Tipos de residuos</b>
------------------	--------------------------

<i>Microbulbifer, Marinobacterium y Sagittula</i>	Residuo sólido rural específicamente bagazo proveniente de las plantas de tequila ( <i>Agave tequilana</i> ) (Tanya Morocho & Leiva-Mora, 2019).
<i>Acinetobacter sp., Actinomyces sp, Alcaligenes, Pasteurella sp, Staphylococcus hominis, Bacillus, Klebsiella oxytoca, Methanosarcina y Methanosaeta</i>	Aguas residuales (Tanya Morocho & Leiva-Mora, 2019).
<i>Ruminococcus flavefaciens, Ruminococcus albus, Bacteroides succinogenes y Butyrivibrio fibrisolvens, Lactobacillus.</i>	Rumen bovino y caprino, residuos de herbáceas vegetales pertenecientes a la familia Poaceae (Tanya Morocho & Leiva-Mora, 2019).
<i>Lactobacillus, Lactococcus y Clostridium.</i>	Cáscaras y frutos en mal estado de <i>Musa paradisiaca</i> (Banana común), para la producción de ácido acético y láctico (Toala, 2018).
<i>Enterobacter spp.</i>	Asociadas al intestino de termitas ( <i>Nasutitermes nigriceps</i> ), para descomposición de plantas lignificadas y no lignificadas (Tanya Morocho & Leiva-Mora, 2019).

### 4.3 Enzimas.

Las enzimas son proteínas y en casos excepcionales contienen fragmentos de ARN, que cumplen la función de ser catalizadores biológicos en procesos de degradación o síntesis de sustancias. Si bien, su componente mayoritario son los aminoácidos, también suelen tener iones metálicos inorgánicos denominados cofactores u otras moléculas orgánicas complejas denominadas coenzimas, además son unidades muy selectivas que tienen una excelente capacidad de adaptación a ambientes biológicos, por lo cual su presencia determina el tipo de metabolismo de una célula o ser vivo (Rigo et al., 2021).

La función principal de las enzimas está en intervenir sobre la energía de activación de las reacciones químicas, para que esta se dé a una velocidad óptima, en donde el sitio activo de la enzima se acopla perfectamente al sustrato (interacción enzima–sustrato),

incrementado o disminuyendo la actividad enzimática, dando lugar así a una regulación por retroalimentación positiva o negativa, respectivamente (Rigo et al., 2021).

Un claro ejemplo de esto es el rol que cumplen las enzimas hidrolasas en el catabolismo, donde se encargan de desarmar macromoléculas, mediante la ruptura de enlaces químicos en presencia de moléculas de agua, para que la célula pueda obtener materiales fácilmente aprovechables, muchos de los cuales son utilizados para la formación de nuevas moléculas, llevándose a cabo un reciclaje biológico (Rigo et al., 2021).

De igual manera, las enzimas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de reacción que realizan sobre el sustrato, como es el caso de las lipasas que degradan lípidos, las proteasas que trabajan sobre las proteínas, las nucleasas que rompen la estructura de los ácidos nucleicos y las glucosidasas que rompen los enlaces de los glúcidos o hidratos de carbono, todas ellas importantes en la degradación de residuos orgánicos (Hernández, et al., 2015). Es así como se puede obtener una clasificación de siete grupos de enzimas, como se indica a continuación.

### ***Oxidoreductasas***

Catalizan reacciones de oxidorreducción o reacciones redox. Estas consisten en la transferencia de equivalentes reductores entre un donador y un aceptor. Ejemplos: deshidrogenasas, peroxidasas.

### ***Transferasas***

Transfieren grupos funcionales a otras sustancias receptoras. Ejemplos: transaminasas, cinasas.

### ***Hidrolasas***

Catalizan reacciones de hidrólisis con la consiguiente obtención de monómeros a partir de polímeros. Ejemplos: glucosidasas, lipasas, esterasas.

### ***Liasas***

Catalizan reacciones en las que se eliminan o adicionan grupos  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $NH_3$  (tener en cuenta los subíndices) para formar un doble enlace o añadirse a un doble enlace. Ejemplos: descarboxilasas, fenilalanina amonio liasa.

### ***Isomerasas***

Actúan sobre determinadas moléculas obteniendo o cambiando de ellas sus isómeros funcionales. Suelen actuar en procesos de interconversión. Ejemplo: epimerasas (mutasa).

### ***Ligasas***

Catalizan la degradación o síntesis de los enlaces «fuertes» mediante el acoplamiento a moléculas de alto valor energético. Ejemplos: sintetasas, carboxilasas.

### ***Translocasas***

Proteínas integrales de membrana que transfieren un sustrato desde el lado 1 a lado 2 de una membrana. Ejemplo: el citocromo-c oxidasa o el transportador tipo P exportador de  $H^+$

### **4.3.1 Proteasas.**

Las enzimas proteolíticas también denominadas peptidasas o proteasas son las macromoléculas responsables de llevar a cabo la hidrólisis de los enlaces peptídicos de las proteínas, dando origen a péptidos y aminoácidos libres. (Morales, et al., 2019).

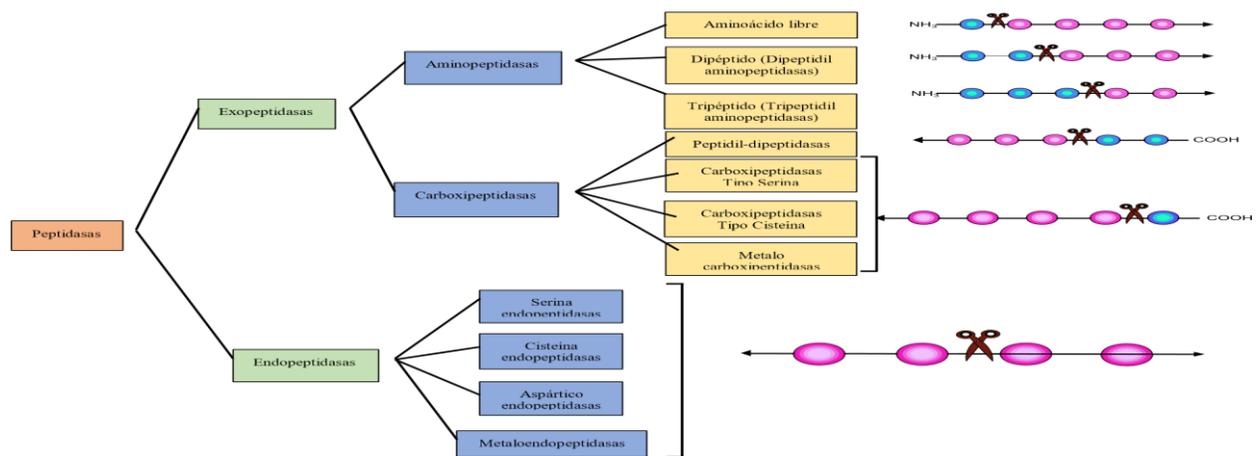
Estas enzimas forman parte del grupo de las hidrolasas y tienen gran importancia en el control de procesos fisiológicos y ecosistémicos, encontrándose en una gran variedad de organismos, desde bacterias y hongos hasta grandes vertebrados, forman parte del proceso de regulación proteica desde su síntesis hasta su degradación, también en el control del ciclo celular, el aprovechamiento de aminoácidos, el control de la respuesta inmunitaria, entre otros (Morales, et al., 2019., Rawat, et al, 2021).

De igual manera, las peptidasas desarrollan funciones dentro del ambiente o ecosistema, ayudando a mantener la normalidad de este, mediante la degradación de grandes proteínas, dando lugar a material orgánico más simple y asimilable, como es el caso de los desechos orgánicos de origen antrópico, que, dada su complejidad, resultan más difíciles de reducir; sin embargo, existe diversidad de proteasas microbianas capaces de llevar a cabo esta tarea (Morales, et al., 2019)

#### **4.3.1.1 Tipos y estructura de las proteasas**

Las proteasas están compuestas básicamente de un cuerpo proteico y un sitio activo al igual que otras enzimas, salvo que la configuración del sitio activo depende de residuos de aminoácidos, que se configuran en tridentes o duplas, es decir, uniones entre dos o normalmente tres de estos residuos buscando tener un sitio capaz de interactuar con diferentes proteínas (Morales, et. al., 2019).

Por lo anterior, estas se pueden clasificar en grupos, basándose en tres criterios que son: sitio de acción, naturaleza del sitio catalítico y pH. Se dividen en exopeptidasas las que actúan en los extremos del péptido y endopeptidasas las que desdoblan el enlace peptídico desde el centro de la molécula. Las exopeptidasas por su parte pueden clasificarse como aminopeptidasas, carboxilopeptidasas, dipeptidil aminopeptidasas, en caso de dividir en dos residuos, y tripeptidil aminopeptidasas si se trata de tres residuos; mientras que las endopeptidasas se clasifican de acuerdo al aminoácido presente en su sitio activo como: Serin proteasas, Aspartil proteasas, Cistein proteasas, Metaloproteasas (Figura 1) (Morales, et al., 2019).



**Figura 1.** Clasificación de las Proteasas. Nota. Clasificación de las peptidasas.

Reproducido de Microbial aspartic proteases: current and potential applications in industry.

*Applied Microbiology and Biotechnology*, de L. W. Theron y B. Divon. 2014

### **4.3.1.2. Clasificación de las proteasas**

#### **4.3.1.2.1. Serin proteasas.**

Esta clase de endopeptidasas tienen como rasgo principal poseer serina en su sitio activo, trabajan de forma adecuada a pH alcalino o neutro, como lo son la tripsina, enzima fundamental en procesos digestivos, que es secretada por el páncreas, cuya actividad da lugar a pequeños oligopéptidos y aminoácidos libres dentro del aparato estomacal, por lo cual es clave en la absorción de aminoácidos libres por parte del intestino, siendo estos necesarios dentro de los procesos anabólicos (Morales, et al., 2019).

Las serin proteasas comprenden más de un tercio de todas las peptidasas, siendo el grupo más extenso e importante dentro de este grupo enzimático. El residuo de serina incrustado en la hendidura del sitio activo concede a estas enzimas nucleofilia y sus propiedades características, además está acompañada por los aminoácidos aspartato e histidina. A su vez, las serin proteasas se agrupan en 15 clanes y 56 familias, que poseen la triada típica, compuesta por serina, aspartato, histidina, mientras que otras pueden presentar variaciones como por ejemplo serina- lisina- histidina en el clan SF o serina- histidina- glutamato en el clan SN (García, et al., 2019).

#### **4.3.1.2.2. Cistein proteasas.**

Las cistein proteasas son un tipo de enzimas presentes tanto en eucariotas como en procariotas, que se caracterizan por poseer cisteína en su sitio activo o un tiol nucleófilo de la cisteína, por lo que también suelen llamarse tiol proteasas, además poseen una histidina asociada. Estas proteasas suelen comportarse bien a pH neutro, aunque también se ha reportado actividad en medios ácidos (Morales, et al., 2019).

Las cistein proteasas normalmente trabajan con la diada histidina-cisteína, aunque suele ser bastante común que se asocien a un tercer residuo, bien sea ácido aspártico, treonina o asparagina para formar una triada. La histidina funciona como base en el transporte de electrones y mejora de este modo la nucleofilia de la cisteína (Rawat, et al., 2021).

Las cistein proteasas se clasifican en 16 clanes o también llamados súper familias, siendo el clan CA el más grande de todos al poseer 44 familias, dentro del que se encuentra la papaína (Rawat, et al., 2021).

#### **4.3.1.2.3. Metaloproteasas.**

Las metaloproteasas, son un tipo de hidrolasas que rompen los enlaces peptídicos por acción de moléculas de agua, esto en presencia de iones metálicos bivalentes, como el zinc, el cobalto, el manganeso o el níquel. El metal generalmente se liga a tres aminoácidos conservados, pues el ion metálico funciona como nucleófilo. (Morales, et al., 2019).

Las metaloproteasas pueden dividirse en cuatro grupos, alcalinas, neutras, mixobacter 1 y mixobacter 2 (Morales, et al., 2019).

#### **4.3.1.2.4. Aspartil proteasas.**

Las aspartil proteasas dependen de dos residuos de ácido aspártico para su funcionamiento, actúan a pH bajos, tienen preferencia de escisión por residuos hidrófobos y su actividad es inhibida por la pepstatina. Estas proteasas se encuentran en gran variedad de organismos desempeñando importantes funciones, que van desde la regulación de otras proteínas hasta el control de parásitos, como lo es el caso de *Necator americanus* y

*Ancylostoma duodenal*, nematodos causantes de anquilostomiasis en seres humanos (Liu et al., 2020).

Dentro de las Aspartil proteasas se encuentran la pepsina, quimosina, catepsina D y catepsina E, cuyo mecanismo de acción más aceptado es la catálisis ácido base, que consiste en dos residuos de ácido aspártico que actúan uno como donador y otro como aceptor de protones, así como una molécula de agua que reside entre ellos y que actúa sobre el carbono carbonílico específico del sustrato, este a su vez captura un protón del ácido aspártico generando un enlace tetraédrico intermedio (Morales et al., 2019; Liu et al., 2020).

#### **4.3.2. Lipasas**

Las lipasas son enzimas encargadas de catalizar la hidrólisis de los enlaces éster de los acilglicérols, además tienen la propiedad de intervenir en la simplificación de un grupo amplio de ésteres carboxílicos. Este tipo de enzimas tienen una distribución amplia tanto en plantas, animales y microorganismos, siendo solubles en agua, pero con la capacidad de actuar sobre moléculas insolubles apolares, pudiendo estar en interfaces lípido-agua. La actividad enzimática de estas hidrolasas se ve favorecida cuanto más arriba está la concentración micelar crítica, niveles por debajo de dicho punto pueden llegar a disminuir e incluso anular la actividad enzimática (Salazar Carranza et al, 2020).

La catalización reversible para la conversión de triglicéridos a ácidos grasos es la función con la que más se asocia a las lipasas, pero algunas de estas hidrolasas pueden actuar tanto en la hidrólisis como en la transesterificación, esterificación, interesterificación, aminólisis, acidólisis y alcoholólisis (Salazar Carranza et al, 2020).

Dada su capacidad de producir compuestos orgánicos, su estereo-selectividad versatilidad y rendimiento, las lipasas han llamado fuertemente la atención de la industria. En los últimos tiempos el interés por las lipasas se ha intensificado, dado el uso potencial que se les da en la producción de detergentes, artículos de aseo personal, productos farmacológicos, agro-insumos e incluso biodiesel y últimamente en la biorremediación (Salazar Carranza et al, 2020).

La mayoría de lipasas tienen pesos entre 27 y 60 KDa sin embargo se conocen algunas que están por fuera de este intervalo, y tienen puntos isoeléctricos entre 3,8 y 7,3 con algunas excepciones (Tabla 3).

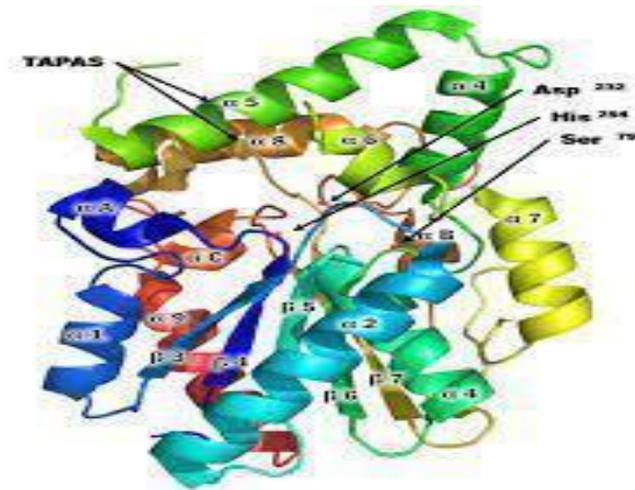
**Tabla 3.** Fuentes, masa molecular y punto isoeléctrico de algunas lipasas

<b>Fuente</b>	<b>Masa molecular (KDa)</b>	<b>Punto isoeléctrico</b>
<i>Chromobacterium viscosum</i>	33	7,1
<i>Candida rugosa</i>	60	5,04-4,8
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>	32	7,3
<i>Rhizomucor miehei</i>	31,6	3,8
<i>Acinetobacter</i>	33	ND
Orden Scorpiones (glándulas digestivas)	50	ND
Clamar <i>Todarodes pacificus</i> (hígado)	27	ND

Adaptada de Enzimas con potencial para el desarrollo de biocatalizadores inmovilizados por adsorción interfacial realizada, de González, et al., 2010.

#### **4.3.2.1. Tipos y Estructura de las lipasas**

Las lipasas están compuestas por ocho hojas  $\beta$  dentro de un dominio estructural canónico, estas cadenas a su vez se encuentran conectadas por hélices  $\alpha$ . El núcleo de este tipo de enzimas no solo define el plegamiento si no también la actividad catalítica, la cual se sustenta en la triada clásica de nucleófilo- ácido- histidina, el nucleófilo normalmente suele ser una serina que interconecta a una hoja  $\beta$  y una hélice  $\alpha$  (Salazar Carranza et al, 2020).



**Figura 2.** *Imagen tridimensional de una lipasa.* Nota: Estructura tridimensional de una lipasa con un clásico plegamiento de  $\alpha/\beta$ -hidrolasa. Las hélices  $\alpha$  y las hojas  $\beta$  fueron coloreadas de acuerdo a la posición en la secuencia, desde el N-terminal en azul hasta el C-terminal en rojo. La triada catalítica conformada por serina, aspartato e histidina se exhibe a través de las abreviaciones Ser79, Asp232 e His254 y se encuentran marcadas con un círculo rojo. Adaptado de Crystal Structure of *Proteus mirabili* Lipase, a Novel Lipase from the *Proteus*/Psychrophilic Subfamily of Lipase Family I.1 de T. Korman & J Bowie, 2012 por Mercado F, 2014.

#### 4.3.2.2. Centro activo.

El centro activo de las lipasas está protegido por una cubierta que solo se desplaza cuando la enzima es activada, la cubierta puede ser una hélice alfa, con una estructura nativa activa o inactiva, en donde las primeras se estabilizan en las interfaces lípido agua, y

en las segundas se halla un sitio activo altamente hidrófobo conocido como zona de contacto lipídico (Palomo, 2021).

Por su naturaleza las lipasas requieren de activación interfacial, este fenómeno es conocido también como activación lípido-agua, y se basa en que la máxima actividad de las lipasas se da cuando se encuentra con una interface entre moléculas de agua y lípidos (Salazar Carranza et al, 2020).

Cuando la lipasa se encuentra con una interface, el ambiente dieléctrico de la superficie proteica se modifica de tal manera que permite el desplazamiento de la cubierta del sitio activo, generando un espacio en la zona activa que relaciona residuos hidrófobos e hidrófilos, favoreciendo la afinidad de la enzima por los sustratos lipídicos (Salazar Carranza et al, 2020).

Las lipasas normalmente actúan de forma adecuada a pH de entre 7,0 a 9,0 y a una temperatura adecuada entre 35 a 50 °C, aunque existen lipasas termoestables que exhiben valores de temperatura adecuados por encima de los 50°C (Salazar Carranza et al, 2020).

#### **4.3.2.3. Clasificación de las lipasas**

De acuerdo con Salazar y colaboradores (2020) las lipasas se pueden clasificar de acuerdo a su estructura y propiedades sumadas al lugar y el orden en el que se descubrieron, organizándose en 8 grupos principales.

**Las lipasas verdaderas o familia I:** Fueron las primeras en clasificarse y la primera fuente de la que se aislaron fueron especímenes del género *Pseudomonas*, a su vez esta familia se divide en seis subfamilias y el peso de estas oscila entre los 20 y 45 kDa.

**Familia II o GDSL:** Su estructura está conformada principalmente de una glicina, ácido aspártico, serina y leucina de allí su nombre GDSL.

**Familia III:** Presenta la triada catalítica clásica, normalmente compuesta por serina, cisteína y treonina.

**Familia IV o lipasa sensible a la hormona (LSH):** Presenta en su sitio activo la triada catalítica, serina, histidina, glutamato.

**Familia V:** Posee la triada catalítica, serina, aspartato e histidina, se encuentra ampliamente distribuida en bacterias termófilas, mesófilas y psicrófilas.

**Familia VI:** Son esterasas de bajo peso molecular normalmente entre los 23 kDa a 26 kDa.

**Familia VII:** Se encuentran tanto en eucariotas como en procariotas, son especialmente abundantes en *Arthrrobacter* y su peso oscila los 55 kDa.

**Familia VIII:** Poseen alrededor de 380 aminoácidos y una elevada homología con las B-Lactamasas de clase C.

## 5. MARCO METODOLÓGICO

### 5.1. Delimitación del tema

El estudio fue de naturaleza bibliográfica y se orientó a sistematizar y analizar información de bases de datos en línea, sobre investigaciones realizadas en el área de microbiología, que evalúan y analizan el potencial de las bacterias proteolíticas y lipolíticas utilizadas en la degradación de desechos orgánicos, con la intención de compilar y comunicar los avances más significativos y actuales en el tema.

## **5.2. Obtención y selección de la información.**

La información se obtuvo mediante una revisión bibliográfica en bases de datos disponibles en línea, Google Scholar, ScienceDirect, Scielo, Elsevier, Nature, introduciendo palabras como: “bacterias descomponedoras”, “hidrolasas”, “actividad enzimática” y en inglés se emplearon palabras como “Lypolitic bacteria”, “Decomposition of organic waste” “decomposition enzymes”, obteniéndose así un total de 130 documentos, entre artículos, libros y tesis de grado, los cuales posteriormente se depuraron mediante criterios de selección de accesibilidad, es decir, aquellos documentos que estuvieran libres de restricciones económicas; pertinencia, teniendo en cuenta la especificidad; el énfasis y la complejidad del manuscrito, y actualidad empleando un rango de fechas de publicación desde el 2014 hasta el 2021.

Lo anterior, permitió contar con una base de 121 documentos, entre los se recogieron aproximadamente 60 revistas, 55 repositorios y 4 libros

## **6. CUERPO DE LA MONOGRAFÍA**

### **6.1. Utilización y eficiencia de las bacterias en la descomposición de residuos orgánicos**

La utilización de bacterias en la descomposición de residuos orgánicos es una estrategia amigable con el medio ambiente y eficiente para el tratamiento de estos residuos. Los desechos orgánicos, como restos de comida, hojas y ramas son una fuente importante de contaminación y emisiones de gases de efecto invernadero si no se manejan adecuadamente. Cuando estos residuos se descomponen de manera natural, se liberan gases

como el metano y el dióxido de carbono, que son nocivos para el medio ambiente y la salud humana.

Las bacterias son microorganismos que tienen la capacidad de descomponer la materia orgánica de los residuos y convertirla en compuestos más simples, como agua, dióxido de carbono y otros nutrientes. Las bacterias proteolíticas y lipolíticas, en particular, son capaces de descomponer proteínas y grasas, respectivamente, en los residuos orgánicos.

La información sobre la utilización y eficiencia de las bacterias en la descomposición de residuos orgánicos está directamente relacionada con los microorganismos eficientes, ya que se refiere a la capacidad de ciertas bacterias para descomponer la materia orgánica de los residuos de forma eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Estos microorganismos eficientes pueden ser utilizados como herramientas para el tratamiento de residuos orgánicos, ya sea en sistemas de compostaje o en la producción de biogás. Además, la identificación y estudio de estos microorganismos puede llevar a la mejora de los procesos de descomposición de residuos y a la identificación de nuevos recursos para la producción de energía renovable. La utilización de microorganismos eficientes en la descomposición de residuos orgánicos puede tener un impacto positivo en la gestión de residuos y en la producción de energía sostenible..

En la década de los 80's se generaron las primeras investigaciones con microorganismos eficientes (ME) utilizando herramientas biotecnológicas, que permitieron el desarrollo, en 1982, del primer cultivo mixto de microorganismos en la Universidad de Ryukyus (Okinawa) en Japón, que podían optimizar las cualidades del suelo, además de mejorar la nutrición de los cultivos, dilucidando un mecanismo de acción correspondiente a

un sinergismo colectivo dado por la asociación de las facultades de los microorganismos al actuar sobre determinado sustrato (Vargas Terán, 2019).

A partir de aquí, las investigaciones se orientaron a comprender rutas metabólicas y a conocer los microorganismos que participan en la degradación de desechos orgánicos, con la finalidad de evaluar su eficiencia en la depuración de residuos y sus posibles aplicaciones a gran escala. Las investigaciones han demostrado que hay una gran diversidad de bacterias que tienen la capacidad de degradar materia orgánica de desechos de origen antrópico o natural, bajo unas determinadas condiciones de temperatura, pH, salinidad, entre otras, permitiéndoles incorporar diversos residuos a sus rutas metabólicas como fuente nutricional, los que son transformados a elementos con menor toxicidad o eliminados del ambiente. Estas reacciones son potencializadas por la participación de enzimas, las cuales son consideradas catalizadores biológicos debido a su función de degradación de materiales contaminantes medioambientales o industriales, dado que pueden actuar sobre desperdicios orgánicos gracias a su participación en el metabolismo al acelerar los procesos de degradación de materia orgánica, para convertirla en metabolitos de aprovechamiento, permitiendo que los microorganismos descomponedores puedan emplear los recursos que les rodean para obtener nutrientes esenciales como carbono, nitrógeno, fósforo, aminoácidos libres y demás materiales del medio (Tabla 4) (Sánchez et al., 2020).

Tabla 4. Relación entre tipos de sustrato, microorganismos y genes implicados en la degradación de desechos orgánicos.

<b>Sustrato (residuo orgánico)</b>	<b>Bacteria</b>	<b>Genes implicados en la expresión o síntesis de enzimas degradadoras</b>
Asociadas a la rizosfera de bosques alto andinos	<i>B. aryabhatai</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Azotobacter spp.</i> , <i>Azospirillum spp.</i> , <i>Rhizobium spp.</i> (Toloza & Lizarazo, 2014).	<i>opD opaA, hocA</i>  (Chennappa et al., 2019)
Oxalato y compuestos N-heterocíclicos donde se incluye la quinolina, nicotinato y nicotina	<i>P. abietaniphila P. putida</i> , <i>B. niacini, Mycobacterium spp</i> (Jiang, et al., 2015., Lee, et al., 2020)	<i>podA, glpA</i>  (Chennappa et al., 2019)
Azúcares, proteínas y lípidos de cadáveres de la industria porcina	<i>Zooglea spp</i> , <i>Achromobacter spp</i> , <i>Flavobacterium spp</i> , <i>Bdellovibrio spp</i> , <i>Mycobacterium spp</i> , <i>Nitrosomonas spp</i> , <i>Acinetobacter spp</i> , <i>Peptococcus spp</i> , <i>Bifidobacterium spp.</i> , (Hernández 2007)	<i>nidAB, pdoA2B2</i>  (Yuan et al., 2019).
Desechos de cosechas de maíz y trigo.	<i>Promicromonospora spp</i> , <i>Bacillus spp</i> , <i>Agromyces spp</i> , <i>Streptomyces spp</i> , <i>Sinorhizobium spp</i> , <i>Lysobacter spp</i> (Chávez, 2016)	<i>Lactasa aiiA</i> ,
Celulosa y lignocelulosa especialmente de <i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol común)	<i>Geobacillus spp</i> (Chen, et al., 2021).	<i>dbCAN2</i>  (Bhalla et al., 2022)

Lignocelulosa para transformación de etanol, ácido láctico, formiato, y ácido acético	<i>Geobacillus thermoglucosidasius</i> (Parachin, et al., 2011).	<i>dbCAN2</i> (Bhalla et al., 2022)
Estiércol vacuno, contenido ruminal, aserrín, urea y melaza	<i>Proteus mirabilis</i> y <i>Citrobacter spp</i> (Andueza, et al., 2018).	<i>luxS, HBCD-hd-1</i> (Wasfi et al., 2020; Peng et al., 2022)
Aguas residuales oleosas.	<i>Acinetobacter spp</i> (Azdarphoor, et al., 2014)	<i>fadY</i> (Ye et al.m 2020)

De este modo se ha evidenciado que las bacterias que hacen parte de los microorganismos eficientes (ME), participan no solo en la degradación de desechos orgánicos, sino también en la reducción de malos olores, en la producción de alimentos libres de agroquímicos, el manejo de desechos sólidos y líquidos generados por la producción agropecuaria, la industria de procesamiento de alimentos, fábricas de papel y mataderos, entre otros (Tanya Morocho & Leiva-Mora, 2019). En los últimos años ha tomado mayor relevancia la aplicación de los ME en el compostaje, dada su eficiencia para la degradación de desechos orgánicos ya que en el proceso de fermentación se liberan y se sintetizan sustancias y compuestos, los cuales hacen que mejoren sus características físicas, químicas y microbiológicas (Quispe Enríquez, 2019).

Otro ejemplo de ME son las bacterias lipolíticas y proteolíticas, que mediante la ruta fermentativa metabolizan las grasas, producen ácidos grasos libres y degradan proteínas, resultando en la liberación de amoníaco, gracias a la acción de unas enzimas que trabajan dentro de la célula (endoenzimas) y otras que trabajan por fuera (exoenzimas), como las hidrolasas, que están presentes en la etapa inicial de la digestión celular, y les permiten

aprovechar los recursos del medio en el que se encuentran, al descomponer grandes macromoléculas en estructuras más simples, dejando un exceso de materia orgánica en el exterior, la cual puede ser utilizada por otros organismos y también por la industria.(Guevara et al., 2015 & Kuhar et al., 2016).

En este mismo sentido, se ha encontrado que las bacterias suelen producir un tipo de hidrolasas con una acción determinada, ya sea proteolítica, lipolítica, celulítica, o como es el caso de *Pseudomonas putida*, que es una bacteria polihidrolítica, es decir, que tiene la capacidad de producir una gama amplia de hidrolasas; debido a esto, se ha evidenciado que estos microorganismos, pueden degradar por sí solos macromoléculas específicas como el almidón, la celulosa y los lípidos, o trabajar en conjunto cuando se requiera la acción de diferentes capacidades hidrolíticas, tal como lo demuestra Herrera (2015), quien determinó que de 55 aislamientos bacterianos analizados, el 10% no presentaban actividad hidrolítica, el 54% mostraba un solo tipo de actividad, el 31% presentó dos actividades, el 5% contaban con tres actividades y en ninguno de los 55 aislados se evidencio cuatro tipos de actividades hidrolíticas.

Esta convergencia de diversas enzimas presentes en un mismo organismo, se ha estudiado desde el punto de vista filogenético, pues actualmente se han logrado nuevas clasificaciones de las enzimas bacterianas, subdivididas en grupos y subgrupos, de acuerdo a la presencia o no de un grupo de peptidasas, lo que se denomina homología proteica y enzimática, y consiste en que una misma proteína se puede encontrar en diversos organismos, pero desempeñar papeles totalmente diferentes, como lo demuestra Rivas (2015), quien encontró que la proteasa C93.001 presente en *Pseudomonas fluorescens*, una bacteria descomponedora de desechos orgánicos, también puede estar presente en otros

organismos como *Brucella abortus*, un patógeno al que no se le encontró ninguna relación con la capacidad de degradación de materia orgánica; esto ha generado un paradigma en el cual, se presenta mayor interés en el organismo del cual proviene la peptidasa, que a la molécula como tal, pues si bien dos enzimas son iguales, pueden cumplir funciones diferentes en cada microorganismo, por lo que no brindarán iguales rendimientos en la descomposición de residuos (MEROPS, 2021)

Teniendo en cuenta lo anterior, el estudio de las moléculas que tengan la capacidad de degradar residuos orgánicos naturales y antrópicos, ha tomado gran relevancia entre la comunidad científica, sobre todo para identificar mecanismos moleculares y rutas metabólicas eficientes en la degradación de la materia orgánica, así como en la obtención de metabolitos aprovechables a nivel industrial, por lo cual se han creado rutas de investigación que van desde la identificación tradicional directa, mediante cultivos, pruebas bioquímicas, tinción de Gram, observación al microscopio, y procedimientos más tecnificados como el uso de herramientas moleculares con las cuales se puede obtener una información mucho más amplia en cuanto a la variedad de enzimas hidrolíticas de una población bacteriana de interés (Herrera, 2015; Montaña, 2015).

Estos estudios han develado múltiples mecanismos de degradación de residuos orgánicos en microorganismos, partiendo de la obtención del secretoma bacteriano, que es precisamente el conjunto de mecanismos mediante los cuales se da la translocación al exterior de diversos componentes, entre los que se encuentran las maquinarias Sec y Tat (Twin arginine traslocation) el sistema de secreción tipo II y el transportador tipo ABC, implicados directamente en la secreción de hidrolasas, lo cual está relacionado con el tipo de pared celular presente en la bacteria, ya que, las Gram negativas tienen una membrana

externa adicional, y las Gram positivas solo cuentan con la membrana plasmática que rodea al citoplasma, esto hace que el tipo de espacio y distancia que se va a atravesar sea diferente, por lo que se da una alternancia entre pliegue y despliegue de la hidrolasa que es secretada con ayuda de túneles transmembrana y otros tipos de moléculas (Gallego, 2020).

Finalmente, todos estos avances en materia de bioingeniería enzimática y descripción de rutas metabólicas bacterianas en la degradación de desechos, han permitido la implementación de tecnologías limpias a través del uso de microorganismos con efectos benéficos en la agricultura para la supresión de agentes patógenos, el reciclaje de nutrientes del suelo para incrementar su disponibilidad hacia las plantas, además de degradar agentes tóxicos como pesticidas y la solubilización de macro y microelementos para recuperar la estabilidad del medio ambiente (Tanya Morocho & Leiva-Mora, 2019).

## **6.2. Últimos avances sobre la actividad lipolítica y proteolítica de bacterias**

En la actualidad, los perfiles enzimáticos de las bacterias se han convertido en una importante fuente de investigación dados sus múltiples usos para la descontaminación de fuentes de agua, suelos y otros ambientes, además, se están estudiando no solo microorganismos productores de enzimas sino también resistentes a gran variedad de condiciones, como es el caso de los extremófilos de la Antártida, que son bacterias aerobias y heterótrofas adaptadas al frío, pertenecientes a las especies *Pseudomonas mandelii*, *Pseudomonas prosekii* y *Exiguobacterium artemiae*, cuya actividad enzimática hidrolítica está relacionada con la presencia de enzimas amilolíticas, proteolíticas y lipolíticas, con

gran potencial biotecnológico en la descontaminación de aguas residuales (Támara Acosta & Mercado Molina, 2021).

De igual manera, los extremófilos de aguas termales también han sido evaluados en su potencial de degradación de tributirina y caseína, así como en su capacidad para degradar grasas presentes en el agua, de tal manera que bacterias psicotolerantes pertenecientes a los géneros *Haemophilus*, *Proteus*, *Gardnerella*, *Plesiomonas*, *Psychrobacter*, *Campylobacter* y *Micrococcus*, han presentado una mayor actividad enzimática de tipo proteolítica y lipolítica, demostrando que en el agua termal existen factores que favorecen el crecimiento bacteriano y su desarrollo metabólico para la degradación de ciertos contaminantes (López Almeida & Soria Noroña, 2018).

Además, se está evaluando el papel de los microorganismos en la producción de biodiesel, como lo revela Najjar et al. (2021), estudio en el que se determinó la eficiencia de *Kokuria flava*, una especie bacteriana que posee enzimas lipolíticas resistentes a compuestos químicos como el etanol y agentes físicos como las altas temperaturas, eso sumado al alto rendimiento en el proceso de esterificación, convirtiendo a este microorganismo en una biomáquina apta para la producción de combustibles diésels de bajo impacto ambiental.

Esto ha hecho que los catalizadores biológicos se hayan convertido en una excelente opción en la producción de biodiesel frente a los catalizadores inorgánicos homogéneos, debido a su alta selectividad y adaptabilidad al provenir de fuentes vivas, además de su eficiencia para dar origen a muy pocos o ningún producto secundario no deseado como jabones, sin embargo, poseen algunas dificultades como los costes y la falta de experiencia

para trabajarlos, aun así cuentan con un excelente rendimiento para aprovechar lípidos comunes encontrados en los residuos de aceite de cocina, como el ácido pentadecanoico, ácido hexadecanoico, ácido octadecanoico y ácido 9,12-octadecadienoico (Najjar, et al., 2021).

Por consiguiente, y en estudios más recientes enfocados en la ingeniería genética y metabólica, también se están usando las enzimas lipolíticas para el aprovechamiento de los lípidos en la producción de biocombustibles, dos buenos ejemplos de ello son los estudios realizados con dos organismos, las microalgas de la especie *Fistulifera solaris* y bacterias del tipo *Clostridium tyrobutyricum*, en donde el primer microorganismo funciona como una fuente importante de lípidos (aceites) quien actualmente ha sufrido modificaciones genéticas en las rutas de síntesis de lipasas y sus inhibidores, para promover una mayor acumulación de triglicéridos útiles y así obtener mejores rendimientos que puedan ser aplicados en masa, en diferentes campos; de igual manera, en *Clostridium tyrobutyricum* también se ha empleado la mejora genética-metabólica, para aumentar la producción de triglicéridos y lípidos en general, potenciando su actividad lipolítica (Maeda et al., 2021., Feng et al., 2021).

Otro ejemplo, de sinergismo enzimático son las combinaciones de lipasas, las cuales han mostrado mayor rendimiento que el efecto individual de las enzimas, por lo que hoy en día se trabaja en las combilipasas, llamada también mezcla de lipasas inmovilizadas, tal como lo manifiestan Toro y Godoy (2020), quienes identificaron y emplearon las lipasas pertenecientes a dos microorganismos *Thermomyces lanuginosus* y *Candida antarctic* en una proporción de 75:25 respectivamente; esta mezcla demostró la efectividad de las combi-lipasas ya que estas reducen con mayor eficiencia la energía de activación respecto a

las mono lipasas, además han mostrado una mayor resistencia al metanol y a la temperatura, exhibiendo una mejor velocidad de reacción en los procesos de esterificación y transesterificación, y si bien la producción de compuestos intermedios, como diglicéridos y ácidos grasos se ve incrementada durante la producción de biodiesel, estos son aprovechados rápidamente sin generar consecuencias.

Del mismo modo, los cócteles bacterianos o en combinación con otros microorganismos, seleccionados de acuerdo a su potencial, son excelentes alternativas industriales para la degradación de residuos, los cuales se están fabricando a gran escala para ser comercializados bajo los nombres de Descomplant C.E., Degradex, Aguamarket y Biogem, que contienen gran variedad de microorganismos entre los cuales están *Lactobacillus*, *Burkholderia*, *Saccharomyces*, *Bifidobacterium*, *Lactococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Streptococcus*, *Aspergillus*, *Trichoderma* y *Gliocladium*, quienes han demostrado un rendimiento óptimo sobre los residuos de cosechas y se emplean en el compostaje (Montoya, 2008).

Lo anterior ha permitido que se dé un incremento en el desarrollo de diversos productos a partir de bacterias descomponedoras, logrando el reemplazo de productos sintéticos y petroquímicos nocivos para el medio ambiente, tal es el caso de la investigación realizada por Pérez (2019), quien demostró que las bacterias son las mayores productoras de tensoactivos, que hoy en día se usan para la producción de detergentes y jabones, también se pueden obtener proteasas usadas en la fabricación de alimentos, biorremediación y agroinsumos, además, celulasas, glicosilasas y demás metabolitos bacterianos son empleados en la biorremediación de lugares contaminados.

A pesar de lo anterior, las investigaciones con microorganismos descomponedores han evidenciado una serie de dificultades para el aprovechamiento de los metabolitos bacterianos, entre las que se destacan las condiciones que el ambiente impone, los inhibidores, y el coste en producción e investigación, sin embargo, la tecnología utilizada, ha disminuido costos lo cual podría impulsar en un futuro una mayor producción de dichos metabolitos y una optimización del proceso de descomposición bacteriana, mediante las combinaciones más óptimas de microorganismos, al seleccionar aquellos más aptos, con mejor rendimiento y que no compitan ni inhiban a otros al momento de ser inoculados, ya sea adicionando un pretratamiento químico, corrigiendo las condiciones físicas o con la mejora genética y metabólica (Benavidez & Hidalgo, 2019).

Es así como, controlar factores físicos como la temperatura, el pH y también los campos magnéticos y/o eléctricos, permite que algunos microorganismos respondan de forma positiva en la degradación de desechos orgánicos sólidos ante un incremento en las pulsaciones y actividad electromagnética, mejorando su actividad de descomposición sobre los residuos sólidos orgánicos (Recalde et al., 2013).

De igual manera, con el avance de la tecnología y la industrialización, se han desarrollado nuevas técnicas como la ingeniería genética y la metabólica, que buscan potenciar a estos organismos para una mayor producción de bienes deseados, como es el caso de algunas especies de *Bacillus* y *Clostridium* en donde se pretende mejorar la producción de lipasas; o en otros casos, se requiere encontrar una solución para impedir la sobreproducción de elementos no deseados, como lo trabajado con *Lactobacillus delbrueckii bulgaricus*, al cual se le ha reducido la producción excesiva de proteasas que puedan dañar la consistencia de los productos lácteos a través de la secuenciación del

secretoma y la posterior manipulación genética para la inhibición en la producción de enzimas, demostrando que el metabolismo bacteriano puede ser manipulado con biotecnología para el aprovechamiento industrial de rutas metabólicas específicas (Trigueros 2016., Feng et al., 2021).

Finalmente, y desde un punto de vista más humano desde el campo de la medicina, se ha comprobado la efectividad de las enzimas para la estética, en el retraso y disminución de las líneas de expresión en personas mayores, ya que estas trabajan en conjunto con otras enzimas para remover el exceso de grasa en la piel y ayudar a rellenar espacios; de igual manera, en la lucha contra el COVID-19 (SARS-CoV-2) se ha demostrado que la acumulación de ciertos triglicéridos puede favorecer la proliferación del virus mediante mecanismos donde el agente infeccioso aprovecha estas grasas libres y disponibles en el torrente sanguíneo y demás tejidos, por ello, para esta situación, se creó la alternativa de inhibir ciertas lipasas que descomponen los triglicéridos, haciendo que estas grasas no sean absorbidas por el sistema intestinal (Chu et al., 2021; Quisirumbai et al., 2020; Rivera, 2020).

### **6.3. Biorremediación enzimática**

Son múltiples las fuentes que se han identificado como contaminantes del medio ambiente, especialmente de suelos y fuentes hídricas, como lo son la industria petroquímica, la extracción minera, las actividades agropecuarias, las cuales dejan grandes cantidades de residuos orgánicos e inorgánicos, difíciles de degradar y que se acumulan generando cambios desfavorables para los organismos (Salomón & Tovar, 2020).

Frente a lo anterior, se están empleando tecnologías que utilizan agentes biológicos para la reducción o remoción de contaminantes, mediante el conocimiento o el estudio de mecanismos moleculares o fisiológicos, que les confieran resistencia a los agentes frente a los desechos para que puedan incorporarlos a su metabolismo y transformarlos, de tal manera que estos organismos puedan ser reproducibles *in vitro* y evaluar sus rendimientos (Salomón & Tovar, 2020).

A este conjunto de técnicas se le conoce con el término de biorremediación, que hace referencia a la *utilización de organismos vivos para reducir o eliminar riesgos medioambientales resultantes de la acumulación de compuestos químicos tóxicos y otros residuos peligrosos*, teniendo en cuenta el potencial metabólico de los microorganismos para limpiar terrenos o aguas contaminadas, gracias a su capacidad de catalizar la destrucción o transformación de compuestos químicos en otros menos tóxicos, al mineralizar los contaminantes hasta productos intermedios, en un ambiente aerobio o anaerobio, siempre y cuando tengan los factores adecuados como los son la presencia nutrientes esenciales y condiciones medioambientales apropiadas (pH, potencial redox, humedad) (González Rojas, 2021).

Las bacterias y las levaduras son microorganismos ampliamente utilizados en las técnicas de biorremediación enzimática, gracias a sus derivados metabólicos y enzimas hidrolíticas que potencian su efecto degradador, esto se evidencia en un estudio realizado por Hoyos (2021), quien mediante la documentación sobre el uso de enzimas lipolíticas microbianas en la biorremediación de ecosistemas contaminados con aceites residuales, mostró que las lipasas producidas por microorganismos cumplen un papel fundamental en la biodegradación de aceites, debido a que son capaces de desdoblar sustancias químicas

que los componen, dando lugar a sustancias más simples, que son fácilmente degradables, adicionalmente encontró que el uso de los microorganismos productores de enzimas lipolíticas pueden ser una gran alternativa gracias a su fácil reproducción y estabilidad, sobre todo para procesos de biorremediación.

De igual manera, Rodríguez-Gonzales et al. (2022), también documentaron los avances en cuanto a la degradación de hidrocarburos por parte de las bacterias, como resultado del desarrollo de una serie de adaptaciones, como la modificación de sus vías metabólicas para ser capaces de utilizar hidrocarburos como sustratos, debido a la presencia de enzimas oxigenasas y peroxidasas, que son responsables de la alimentación de oxígeno al hidrocarburo, generando estructuras de tipo catecol, que pasan al ciclo de Krebs, para reducirse a moléculas inofensivas.

Otro ejemplo del empleo de enzimas en la biorremediación, es el trabajo elaborado por Ruiz Moré et al. (2021), quienes, a través de una revisión literaria sobre los métodos de biorremediación del cianuro mediados por microorganismos y enzimas, encontraron que la enzima *Rodanasa*, es la más eficiente pues es capaz de transformar el compuesto en tiocianato, el cual es más amigable con el medio ambiente. Esta enzima es ubicua en todos los organismos incluido el hombre, y funciona como un adecuado biorreactor para la descomposición de este compuesto.

Cabe resaltar que se están adelantando pruebas para evaluar la eficiencia de los cócteles microbianos que degradan diversos sustratos, de tal manera que transformen las sustancias hasta metabolitos inactivos o hasta consumirlas totalmente y eliminarlas, como es el caso de los biocatalizadores empleados para la reducción de contaminación del suelo

por aceite, proveniente del sector automotor en el que se emplean especies bacterianas como *Pseudomonas* y *Rhodococcus pyridinivorans*, que presentan porcentajes de remoción en un 70 a 80%. También se han encontrado microorganismos que no son cultivables, por lo que se deben aplicar estudios metagenómicos, para analizar su efectividad en la remoción de otros contaminantes (Partida & Naim, 2014; Cuno Rodriguez & Tapia Jimenez, 2021).

## 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Una forma de mejorar la descomposición de los desechos orgánicos es a través del uso de microorganismos. Según Bohórquez (2019), un solo microorganismo puede descomponer los desechos orgánicos siempre y cuando tenga todas las enzimas necesarias para llevar a cabo la degradación. Sin embargo, es más común utilizar un conjunto de microorganismos que tengan una actividad degradadora completa. Dependiendo del tipo de residuo orgánico a degradar y el ambiente, se pueden utilizar diversas combinaciones de microorganismos con actividad lipolítica, proteolítica, amilolítica o glicolítica. La utilización de un conjunto de microorganismos para la descomposición de los desechos orgánicos puede resultar en una actividad degradadora más eficiente y completa.

El estudio de bacterias con actividad lipolítica y proteolítica es de gran importancia debido a su papel clave en la degradación de residuos orgánicos. Las investigaciones en este campo han permitido identificar mecanismos enzimáticos que intervienen en la descomposición de estos desechos, lo que a su vez ha llevado a la obtención de cócteles microbianos y enzimáticos con una alta eficiencia degradadora y capacidad de generar

residuos aprovechables. Además, la producción de estos productos comerciales ha permitido el desarrollo de soluciones sostenibles para el tratamiento de residuos orgánicos, lo que a su vez tiene un impacto positivo en el medio ambiente. En conclusión, la investigación sobre bacterias con actividad lipolítica y proteolítica es fundamental para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento de residuos y reducir el impacto ambiental de estos desechos (Bohórquez, 2019; Fernández et al., 2014).

En el campo de los biocatalizadores, se están flexibilizando los protocolos y formas de preservar, extraer y conservar estas macromoléculas gracias a la implementación de tecnologías más avanzadas y accesibles, como el modelamiento por computadoras (in silico), que permite predecir con mayor exactitud los resultados. Además, la automatización en la purificación y obtención de enzimas de alta pureza mediante reactores químicos e incubadoras controladas por software, ha permitido liberar de tareas manuales engorrosas y mejorar el rendimiento, al controlar de manera automática las condiciones físicas y químicas e intervenir en el crecimiento óptimo de los microorganismos. A estas ventajas, se suman el alto rendimiento y la selectividad de las enzimas bacterianas, dos características notables (González, 2016).

En la actualidad, se están diseñando metodologías para incrementar la actividad enzimática, aprovechando la efectividad comprobada de los pretratamientos químicos y la naturaleza única de cada enzima. Esto permite crear sustratos que posean las moléculas adecuadas para degradarse, aplicándolos a gran escala en la industria para obtener mejores rendimientos con las enzimas presentes en todos los microorganismos hasta ahora

identificados y descritos en la base de datos MEROPS. Además, estas técnicas permiten completar los perfiles de cada organismo y su potencial en la biotecnología (Ferrero et al., 2015; González, 2016).

A nivel mundial, se ha evidenciado una amplia variedad de empresas especializadas en la producción y búsqueda de enzimas. Con el uso de técnicas avanzadas como la mutagénesis dirigida y la ingeniería genética, se están desarrollando enzimas recombinantes altamente específicas y resistentes a condiciones extremas como la temperatura, el pH, la presencia de solventes, entre otras. Estas enzimas son cuidadosamente evaluadas para demostrar su inocuidad antes de su aplicación definitiva en la industria, a pesar de no poseer efectos negativos demostrados sobre la población (Navarro González & Periago Castón, 2012).

Cabe resaltar el hecho de que, en la actualidad, se están llevando a cabo estudios con microorganismos y herramientas tecnológicas que demuestran la alta eficiencia en la degradación de compuestos contaminantes, como la remoción de grasas y aceites mediante bacterias lipolíticas. Estas bacterias metabolizan la grasa presente en los residuos y aprovechan los nutrientes, minerales, carbohidratos y proteínas presentes en ellos. Los sustratos utilizados por estas bacterias son principalmente nitrógeno y fósforo, lo que también permite disminuir sustancias presentes en los efluentes industriales (Morales et al., 2022).

Lo anteriormente mencionado demuestra que la implementación de estas alternativas es viable, siempre y cuando se realicen los estudios necesarios que respalden la aplicación de estas herramientas, permitiendo que las bacterias sean capaces de realizar sus

procesos de degradación y que estos procesos logren su adaptación y optimización. Esto representa un gran avance en el uso de tecnologías biológicas dirigidas a la degradación y aprovechamiento de los residuos orgánicos (Morales et al., 2022).

Finalmente, es importante destacar que las enzimas, especialmente las bacterianas, están encontrando cada vez más aplicaciones en la degradación de diversos tipos de contaminantes, y su modelamiento genético ha llevado a la producción de enzimas con mejores rendimientos. En este sentido, los análisis moleculares y metagenómicos han permitido importantes avances en esta materia, lo que ha hecho que las enzimas adquieran mayor relevancia en áreas como la biorremediación, las técnicas de compostaje y el aprovechamiento de residuos (González, 2016).

## **8. CONCLUSIONES.**

La investigación y aplicación de bacterias descomponedoras, en especial las lipolíticas y proteolíticas, se ha convertido en un hito importante en el desarrollo de herramientas biotecnológicas amigables con el medio ambiente para la degradación de materia orgánica acumulada. Estos avances representan un progreso significativo en el campo de la ciencia, ya que su aplicación ha demostrado ser fácil, económica y altamente eficiente en la degradación de contaminantes.

Es esencial comprender y estudiar la maquinaria enzimática de las bacterias descomponedoras no solo para avanzar en la comprensión de sus mecanismos fisiológicos y

moleculares, sino también para desarrollar estrategias a nivel global que permitan una descontaminación más efectiva del medio ambiente.

A pesar de que hay investigaciones, informes e incluso industrias que trabajan en la descomposición de materia orgánica con microorganismos como herramienta a favor del medio ambiente, aún hay vacíos por llenar e información por sistematizar.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez D. O. (2022). Residuos Orgánicos. Universidad Nacional de Quilmes Argentina.

Andueza, F., Nacimba, G., Sari, D. C. (2018). Tratamiento de desechos orgánicos empleando microorganismos celulíticos [Versión electrónica]. Revista Universidad Central del Ecuador, 1(1).

Azhdarpoor, A., Mortazavi, B., & Moussavi G. 2014. Oily wastewaters treatment using *Pseudomonas* sp. isolated from the compost [Versión electrónica]. *Journal Of Environmental Health Science & Engineering*.

BBC. (2019). "Crisis mundial de la basura": 3 cifras impactantes sobre el rol de Estados Unidos. Recuperado de. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48914734>.

Benavides, G., & Hidalgo, F. (2019). Evaluación de la actividad antimicrobiana de extractos proteicos res de tripsina provenientes de semillas de sangorache (*Amaranthus hybridus* L.). [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Salesiana.

Bhalla, A., Arce, J., Ubanwa, B., Singh, G., Sani, R. K., & Balan, V. (2022). Thermophilic geobacillus WSUCF1 Secretome for Saccharification of Ammonia fiber Expansion and Extractive Ammonia Pretreated Corn Stover. *Frontiers in microbiology*, 13.

Bohórquez Santana, W. (2019). El proceso de compostaje. Ediciones Unisalle.  
Recuperado de:

<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=libros>

Chávez Romero, Y. (2016). Dinámica de poblaciones bacterianas durante la descomposición de materia orgánica en suelo sometido a diferentes prácticas agrícolas. [Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio CINVESTAD.

Chen X., Wu Ch., Li X., Wang Ch., Li Q., Zhou P., Wei D., Shi J., & Zhijun Zhao Z. (2021) Effect of *Geobacillus toebii* GT-02 addition on composition transformations and microbial community during thermophilic fermentation of bean dregs [Versión electrónica]. *Nature*

Chennappa, G., Udaykumar, N., Vidya, M., Nagaraja, H., Amaresh, Y. S., & Sreenivasa, M. Y. (2019). *Azotobacter*—A Natural Resource for Bioremediation of Toxic Pesticides in Soil Ecosystems. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, 267–279. doi:10.1016/b978-0-444-64191-5.00019-5

Chu, J., Xing, C., Du, Y., Duan, T., Liu, S., Zhang, P., Cheng, C., Henley, J., Quian, C., Yin, B., Yuncheng, H., y Wang, R. (2021). Pharmacological inhibition of fatty acid synthesis blocks SARS-CoV-2 replication [Versión electrónica]. *Nature Metabolism* 3, 1466-175.

Cuno Rodríguez, G., & Tapia Jiménez, O. (2021). Tratamientos biocatalíticos para la reducción de contaminación del suelo por aceite proveniente del sector automotor: Revisión sistemática, 2021. Universidad Cesar Vallejo. Revisado en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/75248>

Feng, J., Zhang, J., Ma, Y., Feng, Y., Wang, S., Guo, N., Wang, H., Wang, P., Jiménez Bonilla, P., Gu, Y., Zhou J., Zhang, Z., Cao, M., Jiang, D., Wang S., Liu, X., Shao, Z., Borovok, L., Huang, H., & Wang, Y. (2021). Renewable fatty acid ester production in *Clostridium* [Versión electrónica]. Nature.

Fernández, A., Farji, Brener A. & Satti, P. (2014). Factores que influyen sobre la actividad microbiana en basureros de hormigas cortadoras de hojas [Versión electrónica]. Ecología Austral, (24), 103-110.

Ferrero G., Sánchez E., Argañaraz C., Vaschetto E., Eduardo R. Herrero E., & Eimer G (2015). Diseño de biocatalizadores para la producción de biodiesel. Recuperado de: [http://www.cac-mercocat2015.plapiqui.edu.ar/admin/images/trabajos/3-Ferrero-CITEQ\\_Corregido.pdf](http://www.cac-mercocat2015.plapiqui.edu.ar/admin/images/trabajos/3-Ferrero-CITEQ_Corregido.pdf)

Gallego, J. J (2020). Una pequeña introducción al secretoma bacteriano. Recuperado de: <https://naukas.com/2020/05/26/una-pequena-introduccion-al-secretoma-bacteriano/>.

García Gonzales, G., González, G.M., & Palma, N. (2019) Las proteasas de serina bacterianas y su implicación en la fisiopatología de la infección [Versión electrónica]. Revista del Laboratorio Clinico,12(3), 137- 146.

García Pérez, J. F. A. (2014). Caracterización de los residuos sólidos ordinarios presentes en el área de interés paisajístico Alonso Vera (Girardot, Cundinamarca) y sus posibles implicaciones ambientales. Revista Luna Azul. Recuperado de:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n40/n40a14.pdf>

Garita Sánchez, N., Rojas Vargas., Calderón. L. (2014) Guía práctica para el manejo de los residuos orgánicos utilizando composteras rotatorias y lombricompost. Universidad Nacional de Costa Rica Recuperado de.  
[https://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/3818/Manual%20Composteras.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20son%20los%20residuos%20org%C3%A1nicos,materia%20org%C3%A1nica%20\(Mantra%202014\).](https://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/3818/Manual%20Composteras.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20son%20los%20residuos%20org%C3%A1nicos,materia%20org%C3%A1nica%20(Mantra%202014).)

González Bacerio, J., Rodríguez Hernández, J., & Alberto del Monte Martínez. (2010). Las lipasas: enzimas con potencial para el desarrollo de biocatalizadores inmovilizados por adsorción interfacial [Versión electrónica]. Revista Colombiana de Biotecnología, 22 (1), 124.140.

González Pérez, C. J. (2016). Caracterización bioquímica y estructural de una lipasa de *Vibrio parahaemolyticus* causante de síndrome de mortalidad temprana en camarón blanco. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Recuperado el de.  
[https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/750/1/Gonz%C3%A1lez-P%C3%A9rez%20C%20J\\_MC\\_2016.pdf](https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/750/1/Gonz%C3%A1lez-P%C3%A9rez%20C%20J_MC_2016.pdf).

González Rojas, E. H. (2021). Concepto y estrategias de biorremediación. Universidad Antonio Nariño. Revisado en:  
<http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/3890>

Guevara Bravo, C.A., Arenas, H.A., & Peláez-Jaramillo, C. A. (2015). Hidrólisis endo-enzimática y producción de etanol a partir del banano de rechazo [Versión electrónica]. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 13 (2), 86-93.

Hernández, I., Alejo, K. M., Méndez, L., García, A., Córdova, A., & García, A. (2015) Estudio cinético enzimático de la hidrolasa a partir de cítricos.

Hernández, N. L. (2007). Estudio en fosa para el tratamiento de residuos orgánicos en la granja porcina. [Tesis de Maestría, Universidad de Concepción del Uruguay]. Repositorio Universidad de Concepción Uruguay.

Herrera, L. (2015). Microorganismos productores de enzimas hidrolíticas provenientes del oligoqueto antártico, *Grania* sp. [Tesis de Pregrado, Universidad de la República del Uruguay]. Repositorio Universidad del Uruguay.

Hincapié Buitrago, E. (2018). Residuos orgánicos producidos en viviendas: una mirada desde su potencial para la producción de energía. caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura - Moravia. Universidad Nacional de Colombia.

Jiang, Y., Tang, H., Wu, G., & Xu P. (2015). Functional Identification of a Novel Gene, moaE, for 3-Succinoylpyridine Degradation in *Pseudomonas putida* [Versión electrónica]. *Nature*.

Jiménez Álvarez, B. J. (2021). Evaluación de un plan de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, provenientes del municipio de Choachí por medio de un proceso tecnológico (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Korman T.P., & Bowie J.U. (2012). Crystal Structure of *Proteus mirabilis* Lipase, a Novel Lipase from the *Proteus*/Psychrophilic Subfamily of Lipase Family I.1. *Plous One*.

Kuhar F., Castiglia, V., & Zamora, J. C. (2016) Detection of manganese peroxidase and other exoenzymes in four isolates of *Geastrum* (Geastrales) in pure culture [Versión electrónica]. *Revista Argentina de Microbiología*, 48 (4), 274-278.

Kumar, S. (2020), Problemas de la basura: causas, efectos y soluciones. Rescatado de: <https://www.ecoportal.net/temas-especiales/problemas-de-la-basura-causas-efectos-y-soluciones/>

Lee, Y., Choi, O., Kang, O., Bae, J., Kim, S., & Kim, J. (2020). *Revista nature*. Grey mould *Pseudomonas* control by oxalate degradation using non-antifungal abietaniphila strain ODB36 [Versión electrónica]. *Nature*.

Liu, Y., Abuzeid, A., Yue Huang, Y., Long He, L., Qi Zhao, Q., Shilan Zhu, S., Tingting Zhuang, T., Xiaoyu Chen, Li X., Liu, J., & Li G. (2020). Molecular cloning, expression and characterization of aspartyl protease inhibitor from *Ancylostoma ceylanicum* [Versión electrónica]. *Nature*.

López Almeida, J. V., & Soria Noroña, L. C. (2018). Evaluación prospectiva de la actividad lipolítica y proteolítica en bacterias de las aguas termales de los Ilinizas, provincia de Cotopaxi (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Maeda, Y., Watanabe K., Kaha, M., Yabu, Y., Yoshino, T., Mitsufumi Matsumoto, M., & Tanaka, T. (2021). Assessment on the oil accumulation by knockdown of

triacylglycerol lipase in the oleaginous diatom *Fistulifera solaris* [Versión electrónica].  
Nature.

Mercado Malebrán, F. (2014). Modelamiento estructural y caracterización de una lipasa activa a bajas temperaturas mediante ingeniería de proteínas [Tesis de Doctorado, Universidad de Chile], Repositorio Universidad de Chile.

MEROPS. (2021). Recuperado de: <https://www.ebi.ac.uk/merops/>

Monsalve, O. I., Gutiérrez, J.S., y Cardona, W.A. (2017) Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo [Versión electrónica]. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 11(1), 200-209.

Montaña Lara, J. S. (2015). Aproximación metagenómica para la identificación de enzimas lipolíticas en suelo de bosque alto andino del parque nacional natural los nevados [Tesis de Doctorado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional- Pontificia Universidad Javeriana.

Montoya, C. A. (2008). Ficha técnica Descomplant. Empresa agrícola Sanoplant. Recuperado de: [http://sanoplant.com.co/fichas/FICHA\\_TECNICA\\_DESCOMPLANT.pdf](http://sanoplant.com.co/fichas/FICHA_TECNICA_DESCOMPLANT.pdf)

Morales. V., TOVAR, J., Ramírez, M., & Mercado, Y. (2019). Capítulo I Enzimas proteolíticas: Generalidades y la importancia de las aspartil proteasas fúngicas. Recuperado de:  
[https://www.ecorfan.org/handbooks/Handbooks\\_Mujeres\\_en\\_la\\_Ciencia\\_TIV/Handbooks\\_Mujeres\\_en\\_la\\_Ciencia\\_TIV\\_1.pdf](https://www.ecorfan.org/handbooks/Handbooks_Mujeres_en_la_Ciencia_TIV/Handbooks_Mujeres_en_la_Ciencia_TIV_1.pdf)

Najjar, A., Hassan, A., Zabermaawi, N., Saber, H., Leena H. Bajrai, L., Almuhayawi, M., Abujamel, T., Almasaudi, S., Azhar, L., Moulay, M., & Harakeh, S. (2021).

Optimizing the catalytic activities of methanol and thermotolerant *Kocuria fava* lipases for biodiesel production from cooking oil wastes [Versión electrónica]. Nature

Palomo, J. M. (2021). Synthetic complexity created by lipases [Versión electrónica]. Science.

Parachin, B., Hägerdal H., Bettiga M. (2011). microbial perspective on the ethanolic fermentation of lignocellulose.

Partida, M., & Naim, G. (2014). Obtención de enzimas recombinantes para biorremediación. Universidad Autónoma de Nayarit.

Pérez Pérez, J. E. (2019). Evaluación de microorganismos capaces de crecer en presencia de tensoactivos aislados a partir de efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón Patate (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Portillo, S. (2020). Lixiviados: definición, ejemplos y tratamiento. [Versión electrónica]. Revista Ecología Verde.

Quisirumbay, J., López, P., y Aragón Vázquez, E. (2020). Suplementación de enzimas y probióticos sobre la ganancia de peso y metabolismo proteico en terneras [Versión electrónica]. *Revista de Investigación Veterinaria de Perú*, 31(3) 1-5

Quispe Enríquez, A. (2019). Microorganismos eficientes en el tratamiento de residuos orgánicos municipales del distrito de Pucusana-Lima. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (trabajo de suficiencia).

Rawat, A., Roy, M., Jyoti, A., Kaushik, S., Verma K., & Kumar Srivastava, V. (2021) Cysteine proteases: Battling pathogenic parasitic protozoans with omnipresent enzymes [Versión electrónica]. Nature.

Recalde C.G., Cheverría, M. M., & Castro, R. P. (2013). Descomposición de materia orgánica con microorganismos benéficos magnetizados [Versión electrónica]. Información Tecnológica 26 (6) 9-16.

Rigo, D., Gayeski, L., Tres, G. A., Camera, F. D., Zeni, J., Valduga, E., ... & Backes, G. T. (2021). Produção microbiológica de enzimas: Uma revisão. Brazilian Journal of Development, 7(1), 9232-9254.

Rivas Solano, O. (2015). *Brucella abortus*: patogénesis y regulación génica de la virulencia [Versión electrónica]. Tecnología en Marcha, 28 (2) 61-74.

Rivera, Z. 2020. Uso de enzimas como tratamiento dermatológico regenerador de las líneas de expresión [Versión electrónica]. Revista Salud VIVE 3(8), 77-84.

Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G., & Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. Revista de Ciencias Ambientales, 56(1), 178-208.

Ruiz Moré, A.A., Carvajal Ciomina, E. & González Méndez, L. (2021). Biorremediación de cianuro en aguas residuales empleando la enzima Rodanasa. Propuesta general para la implementación. In AMBIMED 2021.

Salazar Carranza, L., Guerraro Hinojosa, M., Acosta Gaibor, M., Torres Escobar, F., & Vázquez, A. (2020). Caracterización, clasificación y usos de las enzimas lipasas en la producción industrial [Versión electrónica]. Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas

Salomón, J. S. C., & Tovar, S. D. D. (2020). 1. Introducción a la biorremediación microbiana en Colombia. Libros Universidad Nacional Abierta ya Distancia, 10-30.

Sánchez Castelblanco, E. M., Heredia Martin, J. P., Buitrago Morales, S. M., & Medina Rodríguez, J. P. (2020). Aislamiento e identificación de microorganismos potencialmente amilolíticos y celulíticos de suelos de humedales de Bogotá [Versión electrónica]. Revista Colombiana de Biotecnología, 22(1), 36-44.

Támara Acosta, A. K., & Mercado Molina, B. R. (2021). Caracterización de bacterias adaptadas al frío lipolíticas, proteolíticas, celulolíticas y amilolíticas de la Isla Livingston, Antártida. Universidad Tecnológica de Bolívar. Revisado en <https://hdl.handle.net/20.500.12585/10601>

Tanya Morocho, M., & Leiva-Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Centro Agrícola, 46(2), 93-103.

Theron, L.W., y Divol, B. (2014). Microbial aspartic proteases: current and potential applications in industry. Applied Microbiology and Biotechnology.

Toala, G. O., (2018). Elaboración de ensilaje de cáscara de banano (*Mussa paradisiaca*), utilizando microorganismos eficientes. [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal del Sur De Manabí]. Repositorio Unesum.

Tolosa Moreno, D. L., & Lizarazo Forero, L. M. (2014). Poblaciones microbianas asociadas a la rizósfera y filósfera de plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.) [Versión electrónica]. Revista de Ciencias Univalle, 18(2), 27-38.

Toro, E. & Godoy, C. (2020). Efectos de algunos parámetros de reacción en la producción de ésteres etílicos empleando una combi-lipasa de TLL y CALB en Lewatit VP OC 1600 [Versión electrónica]. Revista ION.

Trigueros, C. I. (2016). Estudio sobre el crecimiento de bacterias proteolíticas y lipolíticas en leche y quesos obtenidos a partir de cabras tratadas con Enrofloxacin. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Valencia.

Umoa Fajardo, L.I., Rubio Guerrero, H.T. & Prieto Acosta, J.R. (2021). Estimación de un índice de generación de residuos sólidos para la ciudad de Villavicencio. Universidad Cooperativa de Colombia. (Tesis de pregrado).

Vallejo Villegas, Y., Fernández Aguirre, M. F., & Realpe Rúa, V. (2021). Evaluación de la degradación de residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario a escala piloto. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (Tesis de pregrado).

Vargas Terán, L. J. L. (2019). Aplicación de microorganismos eficientes para mejorar la descomposición de residuos sólidos orgánicos en el centro compostero de Granja Porcón-Cajamarca. Universidad César Vallejo (tesis de pregrado).

Vega, E. O. S., Rodríguez, I. P. A., León, K. J. S., & Palacios, D. L. L. (2020). Factores de riesgos visuales en obreros con manipulación de desechos orgánicos e inorgánicos. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 4(33), 69-82.

Wasfi, R., Hamed, S. M., Amer, M. A., & Fahmy, L. I. (2020). *Proteus mirabilis* biofilm: development and therapeutic strategies. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 10, 414.

Ye, T., Zhou, T., Xu, X., Zhang, W., Fan, X., Mishra, S., ... Chen, S. (2020). Whole-Genome Sequencing Analysis of Quorum Quenching Bacterial Strain *Acinetobacter lactucae* QL-1 Identifies the FadY Enzyme for Degradation of the Diffusible Signal Factor. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(18), 6729. doi:10.3390/ijms21186729

Yuan, K., Xie, X., Wang, X., Lin, L., Yang, L., Luan, T., & Chen, B. (2019). Transcriptional response of *Mycobacterium* sp. strain A1-PYR to multiple polycyclic aromatic hydrocarbons contaminations. *Environmental Pollution*. doi:10.1016/j.envpol.2018.09.001