

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

LICENCIATURA EN QUÍMICA FARMACÉUTICA BIOLÓGICA

**“PRODUCCIÓN DE ENZIMAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES. ANÁLISIS  
BIBLIOGRÁFICO”**

**Correspondiente al proyecto genérico:**

Obtención de materias primas, principios activos, medicamentos y productos biológicos

PRESENTA

Irving Joseph Escalona Morales

**Matrícula**

2152033186

ASESORES:

Dra. Luz María Zenit Tovar Castro    Dr. José Antonio Martínez Ruiz  
No. Económico: 32252    No. Económico: 30046

**Lugar de realización:** Laboratorio de Biotecnología, Departamento de Sistemas Biológicos, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco/ Planta Piloto de fermentación sólida, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa: Calzada del Hueso 1100. Col. Villa Quietud, Delegación Coyoacán, C.P 04960, Cd. De México, México.

Periodo de realización: del 21 de febrero del 2022 al 21 de agosto del 2022

Ciudad de México a 22 de agosto de 2022

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	2
2.1. ENZIMAS.....	2
2.1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ENZIMAS .....	2
2.1.2. ESTRUCTURA DE LAS ENZIMAS .....	4
2.1.3. REGULACIÓN ENZIMÁTICA.....	6
2.2. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (RAIS).....	10
2.2.1. QUÉ SON LOS RAIS.....	10
2.2.2. APROVECHAMIENTO DE LOS RAIS .....	11
2.2.3. RAIS COMO FUENTE DE NUEVOS PRODUCTOS.....	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. OBJETIVO GENERAL .....	16
4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5. METODOLOGÍA .....	16
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	19
6.1. IMPORTANCIA BIOTECNOLÓGICA DE LAS ENZIMAS .....	19
6.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ENZIMAS DE IMPORTANCIA INDUSTRIAL .....	20
6.2.1. Uso de enzimas en la fabricación de alimentos.....	22
6.2.2. Uso de enzimas en la industria textil .....	23
6.2.3. Uso de enzimas en la industria de detergentes.....	24
6.2.4. Enzimas utilizadas en la industria del papel .....	26
6.2.5. Aplicación de las enzimas en análisis clínicos.....	26
6.2.6. Uso de enzimas como productos médicos y farmacéuticos .....	27
6.2.7. Enzimas en fase orgánica.....	29
6.3. IMPORTANCIA DE LOS RAIS Y SU PAPEL EN LA PRODUCCIÓN DE ENZIMAS.....	29
6.3.1. Residuos agroindustriales para la producción de metabolitos de interés.....	33
6.4. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN Y OBTENCIÓN DE ENZIMAS A PARTIR DE RAIS.....	33
6.4.1. Fermentación.....	33
7. CONCLUSIONES .....	39
8. OBJETIVOS Y METAS ALCANZADAS.....	39
9. BIBLIOGRAFÍA .....	40

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria agrícola y la alimentaria son de las más importantes a nivel mundial. El procesamiento de alimentos genera grandes cantidades de residuos agroindustriales que en la mayoría de los casos no son aprovechados. Estos residuos suelen utilizarse para la extracción y recuperación de compuestos bioactivos, la producción de enzimas, antibióticos, hongos comestibles, ácidos orgánicos y biocombustibles, como alimento para animales y para la producción de composta. Además, son ricos en compuestos orgánicos, muchos de ellos con alto valor agregado como fibras dietéticas, pigmentos, pectinas, oligosacáridos, flavonoides, carotenoides, compuestos fenólicos, tocoferoles y vitaminas. Las enzimas son una alternativa ecológicamente amigable para la extracción de estos compuestos. Los residuos más utilizados en la actualidad provienen de frutas y mariscos. A través de transformaciones enzimáticas, los compuestos bioactivos extraídos de los residuos son empleados para la síntesis de nutraceuticos.

Una problemática actual con respecto a la conservación medioambiental radica en cómo otorgarles utilidad a los residuos ocasionados por la actividad industrial y social del hombre. Actualmente, los procesos de reciclaje de residuos constituyen una vía muy utilizada para paliar las consecuencias ambientales derivadas del vertimiento incontrolado de estos al medio ambiente. Sin embargo, estos métodos no siempre pueden ser aplicados, sobre todo en el caso de los subproductos y residuos generados por la agricultura y el procesamiento industrial de los productos agrícolas, debido a muchas peculiaridades inherentes a estos, como su heterogeneidad, dispersión en espacio y tiempo y alto contenido de humedad, fundamentalmente.

Las enzimas son proteínas que se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza y que han sido utilizadas a lo largo de la historia, principalmente en las industrias farmacéuticas y alimenticias. Las enzimas son el producto industrial más importante de la biotecnología y están ganando suficiente atención en los últimos años debido a que sus contrapartes químicas generan contaminación ambiental y a los elevados costos que en muchos casos las industrias deben asumir. Tienen ventajas sobre los tratamientos

químicos, ya que son catalizadores altamente específicos y trabajan en condiciones de reacción moderadas, lo cual se traduce en una menor generación de residuos y subproductos, así como en un menor consumo de energía. Por lo tanto, las enzimas pueden utilizarse en el pretratamiento de los residuos, la extracción de compuestos e incluso en la modificación y síntesis de nuevas moléculas a partir de los compuestos bioactivos. Estos compuestos son moléculas que en el cuerpo humano tienen beneficios para la salud, como la prevención de cáncer y enfermedades del corazón, por lo que son de interés para diferentes industrias.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ENZIMAS**

Las enzimas son biomoléculas de naturaleza proteica que aceleran la velocidad de reacción hasta alcanzar un equilibrio. Constituyen el tipo de proteínas más numeroso y especializado y, actúan como catalizadores de reacciones químicas específicas en los seres vivos o sistemas biológicos. Muchas de las enzimas no trabajan solas, se organizan en secuencias, también llamadas rutas metabólicas, y muchas de ellas tienen la capacidad de regular su actividad enzimática. Tienen una enorme variedad de funciones dentro de la célula: degradan azúcares, sintetizan grasas y aminoácidos, copian fielmente la información genética, participan en el reconocimiento y transmisión de señales del exterior y se encargan de degradar subproductos tóxicos para la célula, entre muchas otras funciones vitales (*McKee T. et al., 2016*).

La identidad y el estado fisiológico de un ser vivo está determinado por la colección de enzimas que estén funcionando con precisión de cirujano y con la velocidad de un rayo en un momento dado dentro de las células.

#### **2.1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ENZIMAS**

Cada enzima se clasifica y se le denomina según la clase de reacción que cataliza, las seis categorías principales de enzimas son las siguientes:

- 1. Oxidorreductasas.** Las oxidorreductasas catalizan reacciones redox en las cuales cambia el estado de oxidación de uno o de más átomos en una molécula. La oxidación-reducción en sistemas biológicos implica una o dos reacciones de transferencia de electrones acompañadas del cambio compensatorio de la cantidad de hidrógeno y de oxígeno en la molécula. Son ejemplos notables las reacciones redox facilitadas por las deshidrogenasas y por las reductasas. Así, la deshidrogenasa alcohólica cataliza la oxidación de etanol y de otros alcoholes, y la reductasa de ribonucleótido cataliza la reducción de ribonucleótidos para formar desoxirribonucleótidos. Las oxigenasas, las oxidasas y las peroxidasas se encuentran entre las enzimas que utilizan  $O_2$  como aceptor de electrones.
- 2. Transferasas.** Las transferasas transfieren grupos moleculares de una molécula donadora a una aceptora. Entre tales grupos están el amino, el carboxilo, el carbonilo, el metilo, el fosforilo y el acilo ( $RC = O$ ). Los nombres triviales comunes de las transferasas a menudo incluyen el prefijo trans: son ejemplos las *transcarboxilasas*, *las transmetilasas* y *las transaminasas*.
- 3. Hidrolasas.** Las hidrolasas catalizan reacciones en las que se produce la rotura de enlaces como C-O, C-N y O-P por la adición de agua. Entre las hidrolasas están las *esterasas*, *las fosfatasas* y *las peptidasas*.
- 4. Liasas.** Las liasas catalizan reacciones en las que se eliminan grupos (p. ej.,  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $NH_3$ ) para formar un doble enlace o se añaden a un doble enlace. Son ejemplos de liasas las *descarboxilasas*, *las hidratasas*, *las deshidratasas*, *las desaminasas* y *las sintetasas*.
- 5. Isomerasas.** Se trata de un grupo heterogéneo de enzimas. Las isomerasas catalizan varios tipos de reordenamientos intramoleculares. Las *epimerasas* catalizan la inversión de átomos de carbono asimétricos y las *mutasas* catalizan la transferencia intramolecular de grupos funcionales.

**6. Ligasas.** Las ligasas catalizan la formación de enlaces entre dos moléculas de sustrato. Por ejemplo, la ligasa de DNA une entre sí fragmentos de cadenas de DNA. Los nombres de muchas ligasas incluyen el término sintetasa. Varias otras ligasas se denominan carboxilasas (McKee T. et al., 2016).

### 2.1.2. ESTRUCTURA DE LAS ENZIMAS

Todas aquellas propiedades que hacen de las enzimas un catalizador altamente eficiente derivan de su estructura. Las enzimas tienen naturaleza proteica y por ende presentan las estructuras básicas de las proteínas. La estructura más elemental de las enzimas es la estructura primaria, la cual consiste en la unión secuencial de aminoácidos por enlace peptídico entre el grupo carboxilo de un aminoácido y el grupo amino del siguiente (figura 1). La secuencia con la cual se unen los aminoácidos, así como la naturaleza de los residuos (R), definen las características y el comportamiento de las enzimas.

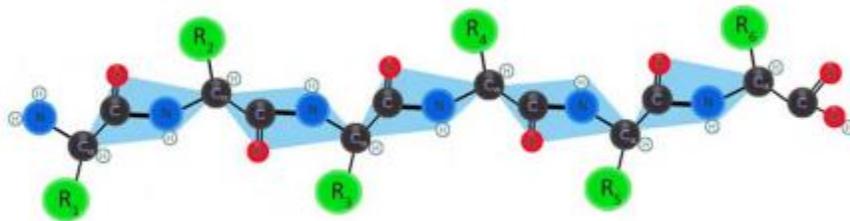


Figura 1. Estructura primaria de las enzimas (Castañeda M, 2019).

Los aminoácidos próximos en la cadena polipeptídica pueden interactuar mediante enlaces puentes de hidrógeno entre los grupos amidas dando lugar a dos tipos de conformaciones espaciales, conocidas como estructura secundaria:  $\alpha$  hélice (la más predominante en enzimas) y  $\beta$  lámina (fig. 2) (Castañeda M., 2019).

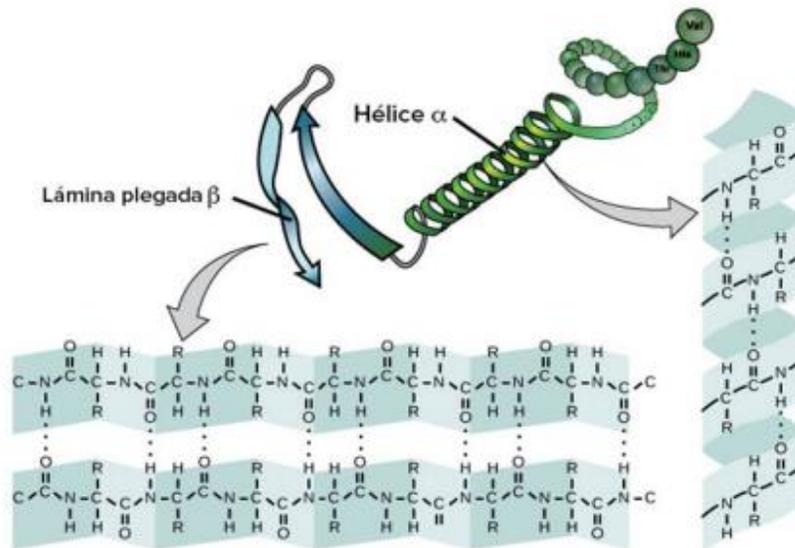


Figura 2. Estructura secundaria de las enzimas (Castañeda M, 2019).

Además, de estas interacciones entre aminoácidos próximos, también tienen lugar interacciones entre los R de aminoácidos produciendo un plegamiento adicional de las configuraciones nombradas. Estos plegamientos resultan en una estructura tridimensional más compleja, denominada estructura terciaria (fig. 3), las enzimas presentan estructura terciaria globular, lo que les confiere algunas de sus propiedades más características como la solubilidad en agua (Castañeda M., 2019).

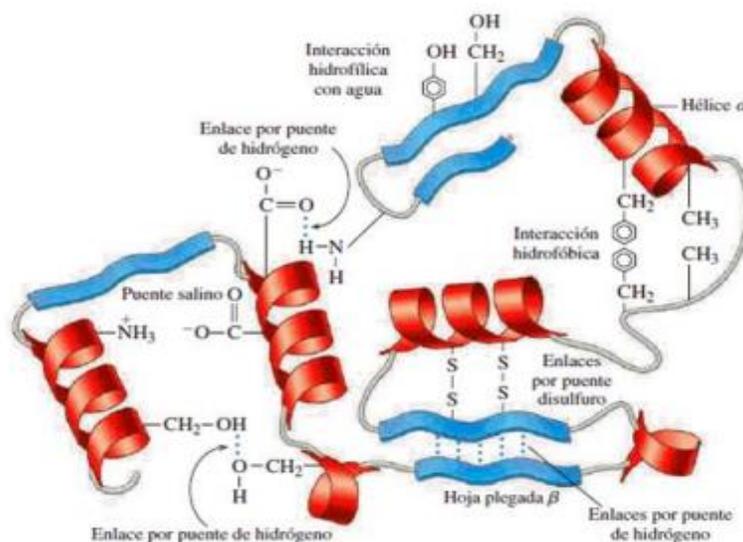


Figura 3. Estructura terciaria de las enzimas (Castañeda M, 2019).

Algunas enzimas pueden contar con una estructura cuaternaria constituida por varias cadenas polipeptídicas, conformando subunidades, las cuales pueden tener o no la misma función catalítica dentro de este complejo (fig. 4), su funcionalidad biológica dependerá de su estructura nativa, es decir; la estructura tridimensional más estable bajo condiciones fisiológicas.

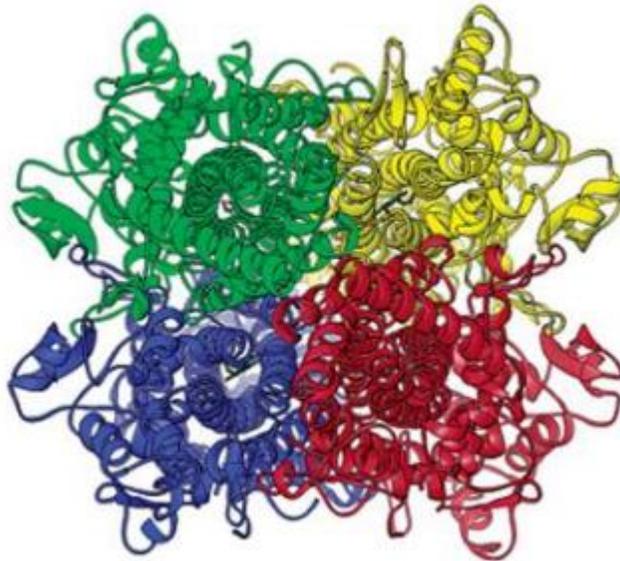


Figura 4. Estructura cuaternaria de las enzimas (Castañeda M, 2019).

Es importante mencionar que algunas enzimas pueden conjugarse con diferentes macromoléculas, estas son denominadas holoenzimas y su parte no conjugada se le conoce como grupo prostético, estos están unidos fuertemente a las apoenzimas (grupo proteico) y no se disocian durante la catálisis.

### **2.1.3. REGULACIÓN ENZIMÁTICA**

Los seres vivos tienen mecanismos sofisticados para regular sus extensas redes de vías bioquímicas. La regulación es esencial por varias razones:

1. Mantenimiento de un estado ordenado. La regulación de cada vía da lugar a la producción de las sustancias que se requieren para mantener la estructura y la función celulares de forma oportuna y sin desperdiciar recursos.

2. Conservación de la energía. Las células se aseguran de consumir sólo los nutrientes suficientes para satisfacer sus requerimientos de energía mediante un control constante de las reacciones que la generan.
3. Capacidad de respuesta a los cambios ambientales. Las células pueden realizar ajustes relativamente rápidos a los cambios de temperatura, pH, fuerza iónica y concentración de nutrientes, debido a que pueden aumentar o disminuir las velocidades de reacciones específicas.

La regulación de las vías bioquímicas se logra principalmente ajustando las concentraciones y las actividades de determinadas enzimas. El control se realiza mediante (1) modificación covalente, (2) regulación alostérica y (3) compartimentación (*McKee T, et al, 2016*).

### Regulación alostérica

En general, la regulación alostérica, es solo cualquier forma de regulación donde la molécula reguladora (un activador o un inhibidor) se une a una enzima en algún lugar diferente al sitio activo. El lugar de unión del regulador se conoce como sitio alostérico (*Tymoczsko, J, et al., 2002*).

La actividad de muchas enzimas puede inhibirse por la unión de moléculas pequeñas e iones, esta constituye el principal mecanismo de control de los sistemas biológicos. La regulación de las enzimas alostéricas es un ejemplo de este tipo de control.

La inhibición enzimática puede ser reversible e irreversible (fig.5). En la inhibición irreversible el inhibidor queda unido fuertemente a la enzima, por lo tanto su disociación es muy lenta. La inhibición reversible se caracteriza por su rápida disociación del complejo enzima-inhibidor. En la inhibición competitiva, la enzima puede unirse al sustrato (formando complejo Enzima-Sustrato) o al inhibidor (complejo Enzima-Inhibidor) pero no a ambos. Muchos inhibidores competitivos son similares al sustrato y se unen al centro activo de la enzima, de este modo se impide la unión del sustrato al mismo centro activo. Un inhibidor competitivo disminuye la velocidad de catálisis, por lo tanto, reduce la proporción de moléculas de enzima que quedan ligadas al sustrato (*Berg, M. et al., 2007*).

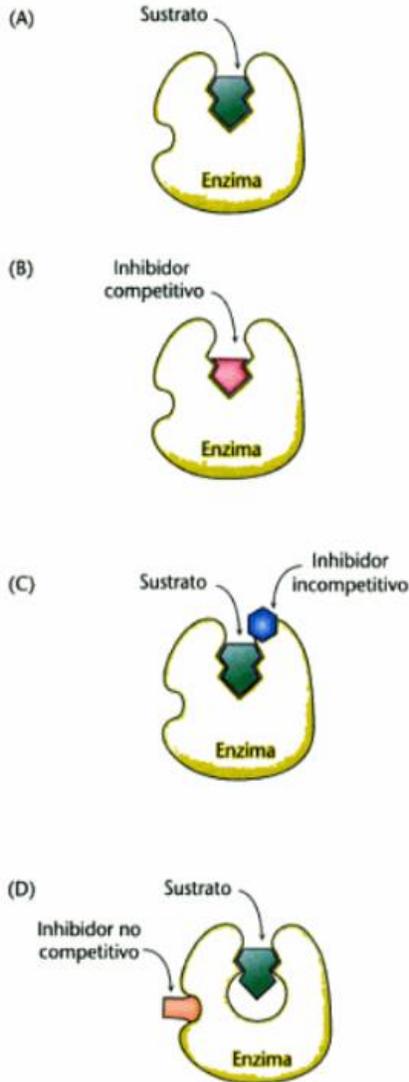


Figura 5. Diferencias entre inhibidores reversibles. (A) Complejo enzima-sustrato; B) inhibidor competitivo se une al centro activo e impide la unión del sustrato; C) inhibidor incompetitivo se une al complejo enzima-sustrato; D) inhibidor no competitivo no impide la unión del sustrato (*Berg, M. et al., 2007*).

### Modificación covalente

Algunas enzimas son reguladas por la interconversión reversible entre sus formas activa e inactiva. Estos cambios de función son producidos por varias modificaciones covalentes. Muchas de estas enzimas poseen residuos específicos que pueden ser fosforilados y desfosforilados. Varias enzimas se sintetizan y almacenan en forma de precursores inactivos denominados proenzimas o zimógenos. Éstos se convierten en las enzimas activas por la rotura

irreversible de uno o varios enlaces peptídicos, Por ejemplo, el quimotripsinógeno se produce en el páncreas (fig.6) (McKee T. et al., 2016).

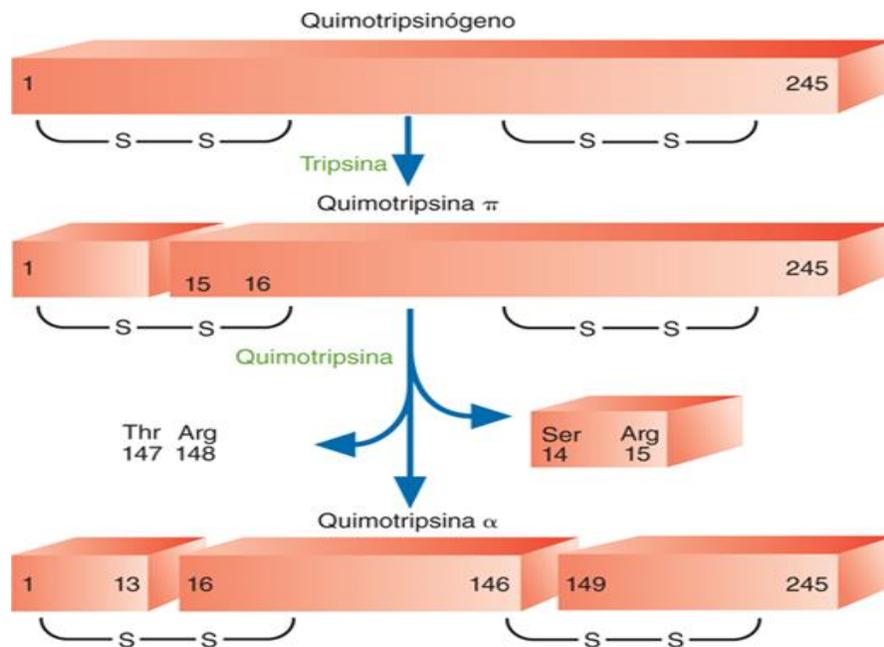


Figura 6. Activación del quimotripsinógeno (McKee T, et al, 2016).

El zimógeno inactivo quimotripsinógeno se activa en varios pasos. Tras su secreción al intestino delgado, el quimotripsinógeno es convertido a π-quimotripsina cuando la tripsina, otra enzima proteolítica, rompe el enlace peptídico entre la Arg 15 y la Ile 16. Más adelante, las moléculas recortadas de quimotripsina se activan unas a otras mediante la eliminación de dos segmentos polipeptídicos para provocar la formación de la quimotripsina α (McKee T. et al., 2016).

### Compartimentación

La compartimentación, creada por la infraestructura celular, es un recurso importante para regular reacciones bioquímicas, porque la separación física hace posible el control independiente. La compartimentación celular resuelve varios problemas interrelacionados:

1. División y control. La separación física de reacciones en mutua competencia (p. ej., aquellas en las que una revierte lo hecho por otra, como en el caso de las cinasas y las fosfatasas) permite una regulación coordinada que impide el derroche de recursos.
2. Barreras a la difusión. En el interior hacinado de las células, la difusión de moléculas de sustrato es un factor potencialmente limitante de las velocidades de reacción. Las células evitan este problema creando microambientes en los que se concentran las enzimas y sus sustratos, y mediante la canalización de metabolitos, que es la transferencia de moléculas de producto de una enzima a la siguiente en un complejo multienzimático.
3. Condiciones de reacción especializadas. Determinadas reacciones requieren de un ambiente con propiedades únicas. Por ejemplo, el bajo pH dentro de los lisosomas facilita las reacciones hidrolíticas.
4. Control de daños. La segregación de productos potencialmente tóxicos de las reacciones protege a otros componentes celulares.

El control metabólico global requiere la integración de todas las vías bioquímicas de la célula, lo que se logra en parte mediante mecanismos de transporte que transfieren metabolitos y moléculas de señal entre los compartimentos (*McKee T. et al., 2016*).

## **2.2. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (RAIS)**

### **2.2.1. QUÉ SON LOS RAIS**

La agroindustria tiene la capacidad de fomentar el desarrollo económico, social y ambiental global, siempre y cuando mantenga el equilibrio entre la actividad desarrollada y la protección del medio ambiente en cada uno de sus procesos, desde la manipulación de la materia prima hasta la distribución y disposición final de los subproductos o residuos generados. Existen diferentes definiciones de agroindustria. Sin embargo, una de las más acertadas es la expuesta por *Saval (2012)*, quien la define como una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para obtener alimentos o materias primas semielaboradas destinadas al mercado. Es necesario definir el término residuo, el cual, de acuerdo con Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México, es “material o

producto cuyo propietario desecha y que puede ser susceptible de ser valorizado o someterse a tratamiento o disposición final conforme a lo previsto en la misma ley” (*Mejías, et al, 2016*). Esto permite enunciar que, los residuos agroindustriales son productos orgánicos sólidos, semisólidos y líquidos generados a partir del uso directo de productos primarios o de su industrialización, no útiles para el proceso que los generó, pero sí susceptibles de un aprovechamiento o transformación que genere otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social.

### **2.2.2. APROVECHAMIENTO DE LOS RAIS**

La producción en toneladas de materia orgánica derivadas de procesos fotosintéticos en la tierra oscila alrededor de 155 billones/año, sin embargo sólo una mínima fracción puede ser consumida de manera directa por el hombre y/o animales, en su mayoría esta materia orgánica se transforma en residuos no comestibles que se constituyen en una fuente de contaminación ambiental. En la actualidad las agroindustrias no solo son valoradas por su desempeño productivo y económico, sino también por su relación con el medio ambiente, de manera que la protección de este ya no solo es una exigencia sujeta a multas o sanciones sino que representa amenazas, oportunidades y hasta condiciona su permanencia o salida del mercado, de manera que la utilización eficaz, de bajo costo y ecológicamente racional de estos materiales es cada vez más importante, sobre todo por las restricciones legales que ya empiezan a surtir efecto en muchos países (*WADHWA et al., 2013*). Existen dos tipos de agroindustria, la alimentaria y la no alimentaria. La primera de ellas comprende materia prima proveniente del sector agrícola, pecuario, acuícola y forestal, dirigido exclusivamente a la obtención de alimentos, mientras que, la segunda, la agroindustria no alimentaria, se encarga de la transformación de productos del campo a productos como: maderas, flores, tabaco, fibras, colorantes, entre otros, es decir, no alimenticios (*Escandón y Pineda, 2014*).

La agroindustria mexicana se desarrolla en un entorno ampliamente dominado por la presencia de empresas internacionales, este crecimiento presenta problemas de equidad e inclusión dado el desequilibrio que existe en las agrocadenas, donde la adición de valor es limitada a unos pocos participantes, perjudicando al resto, como pequeños agricultores y/o productores, puesto

que, estos al tener menos recursos quedan excluidos de las cadenas de abastecimientos. Esto implica que es necesario contar con políticas y estrategias que promuevan el aprovechamiento de sus residuos y al mismo tiempo consideren los temas de competitividad, equidad e inclusión que permitan una sostenibilidad social y económica real (*Da Silva, et al, 2013*).

En la agroindustria mexicana los productos que se industrializan mayoritariamente son: frutas, verduras, tubérculos y vainas, semillas, raíces, hojas; algunos comercializados en fresco y otros son procesados y transformados en harinas, aceites, néctares, jugos, vinos, mermeladas, ensaladas, concentrados en polvo, entre otros, por lo que es notable la generación de residuos, desde la cosecha misma, pasando por los centros de concentración y distribución y finalizando en la industrialización, comercialización y consumo. Bajo este contexto y dados los procesos necesarios para la generación de productos que brinden al país desarrollo económico, seguridad alimentaria y confort de sus habitantes, la agroindustria mexicana enfrenta una grave problemática referente a que no existe una legislación específica que promueva la gestión de sus residuos que asegure un manejo integral desde su generación hasta su disposición final, así como la falta de recursos económicos y capacidad tecnológica.

Son pocos los productores que forman parte de proyectos gubernamentales ambientales que pudieran estar realizando cambios estructurales en sus formas de trabajo. Las industrias, están reguladas por normativas ambientales gubernamentales, donde, sin embargo, a cada nada es noticia derrames de químicos o su gestión de residuos consiste en regalías de sus residuos a agricultores para alimento del ganado, por lo tanto, es poca o nula la conciencia ecológica para el manejo de tales materiales (*Mejías, et al,2016*). La consecuencia es un efecto ambiental causado por el daño al suelo, agua, aire, el cual no es en sí causado por los cultivos, la ganadería, etc., sino por las malas prácticas realizadas por muchos agricultores, dueños de terrenos y las agrocadenas que a partir de aquí se enfrentan: distribución, procesos industriales, comercialización, exportación, y consumo como destino final del producto, conllevando a lo que se conoce como impacto ambiental.

Los efectos ambientales más sobresalientes causados por toda esa generación residual enunciados ya por muchas organizaciones mundiales, gobiernos, académicos, grupos ecologistas son (Zúñiga, 2011):

- Rápido incremento de la polución y la contaminación, que genera crecientes problemas de salud, degradación del patrimonio natural, destrucción de ecosistemas esenciales y degradación/degeneración de funciones críticas de la biosfera.
- Respecto a la salud, la existencia de "basurales" cerca de localidades alienta la proliferación de vectores epidémicos, siendo los sectores sociales menos favorecidos los que más sufren estas enfermedades infecto-contagiosas (como el cólera). Además, la acumulación de basura sin ningún tratamiento o manejo técnico adecuado provoca la proliferación de ratas, cucarachas y mosquitos, agentes todos estos, de graves enfermedades. Por ejemplo, en 1 m<sup>2</sup> de basura a cielo abierto, se producen 2.500.000 de moscas/semana.
- Emisión de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>) a causa de productos químicos utilizados que han causado cambios en la utilización del suelo y la propia producción agraria, quedando claro entonces, que la agricultura no solo es una víctima del cambio climático, sino que contribuye a él.

### **2.2.3. RAIS COMO FUENTE DE NUEVOS PRODUCTOS**

Los residuos agroindustriales presentan una característica común la fracción orgánica, ideal para su valorización en un sinnúmero de procesos dentro del mismo sector y/o en el flujo económico del país. Lo deseable en toda gestión propuesta es que los residuos agroindustriales no generen otros residuos, sino que sean utilizados mediante las llamadas tecnologías limpias con la intención de reducir el impacto ambiental.

A través de la biotecnología es posible la bioconversión de los residuos agroindustriales mediante procesos de extracción directa o de transformación microbiana o química en productos comerciales de mayor valor añadido (pigmentos, antibióticos, enzimas, etc.) y con mayor impacto la intención de mejorar la calidad ambiental a través de tecnologías orientadas

hacia una transformación sustentable de los recursos naturales. De igual manera uno de los retos de esta área de la ciencia es la adquisición de materias primas de fácil adquisición y bajo costos que sirvan como sustratos fermentables, es decir, ricos en carbono y nitrógeno (*Barragán, et al, 2008*) y la agroindustria a través de un gran número de subproductos puede proporcionarlos.

Existe evidencia científica sobre el aprovechamiento de los RAIS, se mencionan algunos:

- En el jimado del Agave tequilana con el que se fabrica tequila se desechan una gran variedad de productos (hojas y sus fibras, pencas, cutículas). *Tronc y colaboradores*, reportaron en el 2007, la transformación de los residuos de fibras y extractos de hojas para la obtención de resinas termoplásticas y para la extracción de ligninas, celulosa, glucósidos y etanol. En el 2008, Laguna y colaboradores dan uso a las pencas desechadas para ser utilizadas en la elaboración de fibras.
- Residuos de la *uva pomace* se han utilizado como fuente nutritiva y exclusiva para la fermentación y producción de enzimas hidrolíticas (celulasas y pectinasas) con aplicación en la industria textil, química y de alimentos usando cepas de *Aspergillus awamori*. El precio bajo de este material lo hace potencialmente prometedor para tales usos (*Botella, 2005*).
- *Fanchini y colaboradores (2010)* utilizaron bagazo de caña, avena, salvado de trigo, residuos de cebada y cáscaras de yuca como sustrato junto con una cepa de *Penicillium janczewskii* obtuvieron enzimas para ser utilizadas para la fabricación de pastas, harina de trigo como aditivo en alimentos de aves de corral y procesos de blanqueo en la industria química.

Algunos productos agroindustriales son desechos debido a que presentan problemas serios de disposición y que son objeto de estudio para convertirlos en productos útiles, por ejemplo, el aserrín, el cual ha sido objeto de diversos estudios para la remoción de contaminantes tales como colorantes, sales y metales pesados a partir de agua y efluentes acuosos.

Subproductos y residuos provenientes de diferentes agroindustrias contienen cantidades importantes de biomasa rica en *celulosa, hemicelulosa, lignina, glucósidos y ácidos grasos*, los

cuales son sustratos potencialmente útiles cuando se les transforma mediante tratamientos químicos o microbiológicos para la producción de bioenergéticos. Al mismo tiempo, la combinación efectiva de necesidades y recursos naturales puede promover el desarrollo sostenible y mejorar la economía, la sociedad y el medio ambiente local.

La biomasa y su conversión a bioenergía a través de la producción de los diferentes biocombustibles, es una estrategia viable y competitiva que puede implementarse para el desarrollo local sostenible de México y de la región latinoamericana, a partir de toda la biomasa residual que se genera en la agricultura. Los bioenergéticos reportados producto de las investigaciones científicas que se realizan a nivel mundial y apoyados por organizaciones mundiales como la FAO y la ONU que pueden obtenerse mediante biomasa natural y residual proveniente de la agroindustria son: bioalcoholes (principalmente bioetanol), biodiésel y biogás como los más desarrollos y con tecnologías establecidas y otros como biohidrógeno y pellets. México está apto para la producción de biogás, biodiésel, bioetanol, pellets, combustibles de primera y segunda generación y biocombustibles sólidos (*Mejías, et al, 2016*).

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Una problemática actual con respecto a la conservación medioambiental radica en cómo otorgarles utilidad a los residuos ocasionados por la actividad industrial y social del hombre. Actualmente, los procesos de reciclaje de residuos constituyen una vía muy utilizada para paliar las consecuencias ambientales derivadas del vertimiento incontrolado de estos al medio ambiente. Sin embargo, estos métodos no siempre pueden ser aplicados, sobre todo en el caso de los subproductos y residuos generados por la agricultura y el procesamiento industrial de los productos agrícolas, debido a muchas peculiaridades inherentes a estos, como su heterogeneidad, dispersión en espacio y tiempo y alto contenido de humedad, fundamentalmente.

Las enzimas son el producto industrial más importante de la biotecnología y están ganando suficiente atención en los últimos años debido a que sus contrapartes químicas generan contaminación ambiental y a los elevados costos que en muchos casos las industrias deben asumir. Tienen ventajas sobre los tratamientos químicos, ya que son

catalizadores altamente específicos y trabajan en condiciones de reacción moderadas, lo cual se traduce en una menor generación de residuos y subproductos, así como en un menor consumo de energía. Por lo tanto, las enzimas pueden utilizarse en el pretratamiento de los residuos, la extracción de compuestos e incluso en la modificación y síntesis de nuevas moléculas a partir de los compuestos bioactivos. Estos compuestos son moléculas que en el cuerpo humano tienen beneficios para la salud, como la prevención de cáncer y enfermedades del corazón, por lo que son de interés para diferentes industrias.

#### **4. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis bibliográfico sobre la importancia de las enzimas y su producción a partir de residuos agroindustriales.

##### **4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una búsqueda bibliográfica para conocer la importancia biotecnológica de las enzimas.
- Identificar y describir a las enzimas de mayor relevancia industrial.
- Analizar la importancia de los residuos agroindustriales y su papel en la producción de enzimas.
- Comparar los métodos de producción y obtención de enzimas a partir de residuos agroindustriales.

#### **5. METODOLOGÍA**

**Diseño:** Se realizó una revisión sistemática de documentos de diferentes fuentes, provenientes de distintas revistas científicas, con un enfoque al tema de producción de enzimas a partir de RAIS; al igual que los métodos para la producción y obtención de éstas.

**Estrategia de búsqueda:** La búsqueda se basó en encontrar estudios previos, que ayudarán a cumplir con los objetivos de la investigación actual y se tomó como límite de la lengua de los estudios en inglés y español, mediante la revisión sistemática en las bases de datos: Elsevier, REDALyC, Springer, ACS Publications, SciELO, bidiUAM, Academic Search Complete de artículos, libros y trabajos de investigación académica, dentro de los últimos 15 años. En algunas de las investigaciones presentadas se optó por analizar sus propias referencias bibliográficas con el objetivo de rescatar algunos otros estudios potenciales respecto al tema

**Criterios de inclusión y exclusión:** para la obtención de la información recopilada se incluyó todo tipo de documento que contuviera algunos descriptivos como los siguientes: “Enzyme, agribusiness, obtaining enzymes, biotechnology process, solid culture, liquid culture, agroindustrial waste”. Se excluyeron aquellos artículos a los cuales no se tuvo acceso completo al texto, que no tuvieron relación con los objetivos de la revisión y que no presentaron información sobre la importancia y producción de enzimas a partir de residuos agroindustriales.

**Extracción de datos:** Para proceder a la selección se revisaron los abstracts y en caso necesario los artículos completos con el fin de decidir si la información que contenían estaba o no relacionada con los objetivos de este estudio.

En total se utilizaron 65 artículos de difusión científica para construir el presente reporte.

**Análisis de datos:** la información recabada se procedió a estructurar en 4 subapartados: el primero, dedicado a la importancia biotecnológica de las enzimas; el segundo, para la Identificación y descripción de enzimas de importancia industrial, y los últimos dos, con la finalidad de conocer importancia de los RAIS y su papel en la producción de enzimas y comparar métodos de producción y obtención de enzimas a partir de estos, respectivamente.

En la tabla 1 se presenta el cronograma que se siguió para permitir cumplir en tiempo y forma con los objetivos planteados en este trabajo de investigación.

**TABLA 1. CALENDARIO DE ACTIVIDADES**

<b>Actividad</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>
Redacción y entrega de protocolo de SS	X					
Búsqueda bibliográfica sobre la importancia biotecnológica de las enzimas	X	X				
Identificación y descripción de enzimas de importancia industrial		X	X			
Análisis de la importancia de los RAIS y su papel en la producción de enzimas			X	X		
Comparación de métodos de producción y obtención de enzimas a partir de RAIS					X	X
Revisión y entrega del escrito del proyecto de SS						X

## **6. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **6.1. IMPORTANCIA BIOTECNOLÓGICA DE LAS ENZIMAS**

Las enzimas, como catalizadores biológicos, poseen una serie de características muy interesantes para la Industria: tienen una elevada especificidad, trabajan en condiciones suaves, son fácilmente accesibles y no alteran el medio ambiente. Por todas estas razones, estos biocatalizadores se están utilizando en la industria alimentaria, de detergentes, productos químicos, farmacéuticos y de diagnóstico. El empleo de enzimas en la industria no es nuevo, este se asocia a procesos tradicionales en algunos casos con una vigencia de cientos de años. Los biocatalizadores se utilizan en algunas industrias como la licorera, panadera, láctea, entre otras.

Los procesos industriales que involucran la transformación de sustratos mediante el tratamiento químico han migrado durante las últimas décadas hacia el uso de biocatalizadores que generan mayor velocidad de proceso con menor impacto negativo en el ambiente. Las enzimas tienen ventajas sobre los tratamientos químicos, ya que son catalizadores altamente específicos y trabajan en condiciones de reacción moderadas, lo cual se traduce en una menor generación de residuos y subproductos, así como en un menor consumo de energía. Por lo tanto, las enzimas pueden utilizarse en el pretratamiento de los residuos, la extracción de compuestos e incluso en la modificación y síntesis de nuevas moléculas a partir de los compuestos bioactivos.

Los compuestos bioactivos son moléculas que en el cuerpo humano tienen beneficios para la salud, como la prevención de cáncer y enfermedades del corazón, por lo que son de interés para diferentes industrias. Es indiscutible el interés que ha despertado durante las últimas décadas el uso de estos catalizadores en diferentes procesos industriales. En gran medida, gracias a los grandes avances que ha tenido la biotecnología en áreas como la microbiología industrial, la biología molecular, la ingeniería de proteínas y la ingeniería enzimática. Estas técnicas han centrado su atención en la producción eficiente de biocatalizadores que al mismo tiempo que conserven su alta quimio-, regio- y estereoselectividad, mejoren su estabilidad,

puedan ser reutilizadas y sean compatibles con tecnologías sustentables y procesos ambientalmente más limpios (*Puri et al., 2012*).

Los procesos enzimáticos son útiles en la industria, en la investigación e incluso en los productos de uso diario en nuestra vida debido a que las enzimas son catalizadores naturales selectivos y muy eficientes, además de que son amigables con el medioambiente. Algunos de los ejemplos de las múltiples aplicaciones de las enzimas se dan tanto en la producción de antibióticos como también en productos alimenticios, detergentes o aditivos. La investigación y el desarrollo tecnológico en áreas como la biología molecular, biomedicina, biotecnología y genética serían imposibles sin la utilización de enzimas u otras proteínas (*Singh et al., 2016*), los cuales traen como ventajas implementar procesos amigables con el ambiente, además de un alto rendimiento de producto y su producción estereoselectiva.

## **6.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ENZIMAS DE IMPORTANCIA INDUSTRIAL**

Las enzimas son catalizadores biológicos, es decir, proteínas que tienen la capacidad de acelerar ciertas reacciones químicas. En los últimos años su uso en gran cantidad de industrias ha adquirido gran relevancia. La enzimología, o ciencia encargada del estudio de las enzimas, siempre será un tema de actualidad en la biotecnología, esta ciencia ha experimentado grandes avances al igual que sus aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, de detergentes, panadería y papelera, entre otras. Los procesos catalizados por enzimas en la industria son cada día más numerosos, ya que presentan ventajas frente a los catalizadores no biológicos.

Es importante recordar que las enzimas son proteínas y dentro de estas se encuentran en el grupo de proteínas globulares, las cuales pueden ser de distintos tamaños, al formar parte de este grupo las enzimas están formadas por secuencias de aminoácidos (estructura primaria) que determinan a su vez la estructura secundaria, terciaria y cuaternaria de la misma. Son estas estructuras las que finalmente determinarán las propiedades de la enzima, su especificidad y su efectividad como catalizador (*Almudena, 2019*).

La utilización de células o enzimas ha demostrado su eficacia en la síntesis de fármacos,

herbicidas, insecticidas y otros productos químicos, en la producción de biocombustibles alternativos al petróleo, o en la industria textil y de detergentes, entre otros muchos ejemplos. Ello se debe a que representan una alternativa más eficiente y a la vez más ecológica a la química sintética tradicional, ya que los procesos que catalizan transcurren a través de reacciones en medios más respetuosos con el medio ambiente y bajo condiciones de pH y temperatura suaves con mayores rendimientos ya que son procesos regio y estereoselectivos y con menor costo económico.

Actualmente, las enzimas o biocatalizadores pueden ser clasificados en dos grandes categorías según su actividad y los volúmenes en que se producen. El primer grupo está compuesto por aquellas enzimas que tienen gran actividad biológica y por lo tanto sus volúmenes de producción son menores, por ejemplo, aquellas enzimas utilizadas en la industria farmacéutica y de análisis clínicos. En el segundo grupo se encuentran las enzimas que cuentan con menor actividad biológica y sus volúmenes de producción y aplicación son mayores, en este segundo grupo donde se encuentran las enzimas con mayor aplicación en diferentes procesos industriales, como en la obtención o tratamiento de alimentos, bebidas, textiles, residuos biodegradables, remediación ambiental, etc.

Los biocatalizadores se usan en industrias como la licorera, panadera, láctea, textilera, de aplicaciones ambientales, de producción de detergentes, entre otras. Las enzimas llamadas industriales se utilizan frecuentemente para mejorar procesos, por ejemplo, para facilitar el empleo de nuevos tipos de materias primas o las propiedades físicas de un material con el objeto de poder procesarlo más fácilmente, ya sea aumentando su solubilidad o disminuyendo su viscosidad de forma que se facilite su transporte durante el procesado (*Castellanos et al., 2006*).

Hay numerosas aplicaciones, así en la industria textil, cuero, aditivos en piensos (para mejorar la digestión), farmacéutica (diversos medicamentos para dispepsias: *pancreatina, renina, pepsina, tripsina, catalasa, lipasa*, etc.; pomadas para traumatismos: *hialuronidasa*; o para hematomas: *estreptoquinasa*, etc.), y en cosmética (*papaína* en depilatorios, etc.).

### 6.2.1. Uso de enzimas en la fabricación de alimentos

En la fabricación de queso, por ejemplo, se utiliza la enzima renina para producir la coagulación de las proteínas de la leche (caseína), que luego se trata para convertirla en queso. Si bien, originariamente, esta enzima era extraída del cuajo de terneros, hoy en día se está utilizando enzima quimosina de origen recombinante. Otra de las enzimas ampliamente utilizadas es la lactasa, que transforma la lactosa (un azúcar) en una mezcla de sus monómeros glucosa y galactosa con un sabor más dulce. Así, se refina el producto y se concentra en una especie de jarabe con un sabor parecido al de la miel, ya ampliamente utilizado en el sector de confitería industrial (*Rendueles et al., 2014*).

La renina también conocida como quimosina, es una enzima proteasa aspártica encontrada en el cuajo. Es producida por las vacas en el abomaso. La quimosina es producida por las células principales en el estómago de bebés y niños con el fin de cuajar la leche que toman, garantizando así una mayor y mejor absorción. La quimosina es particularmente útil en la preparación del queso, mientras que las fuentes de quimosina natural incluyen estómagos de ternero, estómagos de bovino, estómagos de cabra, estómagos de porcinos, entre otros. La quimosina comercial se obtiene básicamente a partir del cuarto estómago de los terneros alimentados con leche. La quimosina bovina se puede producir de forma alternativa mediante ADN recombinante en *Escherichia coli*, *Aspergillus niger var. awamori* y *Kluyveromyces lactis*; estas variedades se agrupan bajo el nombre de quimosinas producidas por fermentación (FPC, por sus siglas en inglés) (*Cano V., 2015*).

La lactosa no sólo es una fuente de energía, sino que posee un valor nutritivo especial para los niños. Tradicionalmente, se ha considerado que la lactosa favorece la retención de Ca, por lo que estimula la osificación y previene la osteoporosis. Actúa interaccionando con las vellosidades intestinales, sobre todo a nivel del fleo, incrementando su permeabilidad al calcio. Cataliza la hidrólisis de la lactosa en glucosa y galactosa, desde los extremos de los restos de galactosa; siendo los dos monosacáridos resultantes más dulces y más fácilmente asimilables.

Como la lactosa es de menor solubilidad que los otros azúcares, tiene tendencia a cristalizar en concentrados de leche y de suero lácteo. Esta cristalización va acompañada de una

desestabilización del complejo de Caseinato de calcio, lo que conduce fácilmente en el almacenamiento frío de leches condensadas, helados de leche y de crema y concentrados de suero lácteo a floculaciones, con formación de sedimentos granulosos o arenosos. Esto se puede evitar -obteniendo productos suaves al paladar- si se hidroliza por lo menos el 20% y hasta el 50% de la lactosa presente mediante la adición de lactasa. Otra aplicación tecnológica de la lactasa es en la elaboración de leches deslactosadas, destinadas a la alimentación infantil y de adultos que presentan una intolerancia a la lactosa por déficit de su lactasa intestinal (Bello A., 2009).

### **6.2.2. Uso de enzimas en la industria textil**

En la fabricación de telas, se realiza en proceso llamado lavado enzimático. En éste se realiza la biopreparación del algodón en rama utilizando ciertas enzimas. Así, se remueven del algodón solamente los componentes necesarios y se evita o se reduce el daño causado a la celulosa, utilizando, además, condiciones de proceso más favorables para los operarios, las máquinas y el medio ambiente. Entre las enzimas utilizadas en la industria textil se pueden nombrar: *Proteasa*, usada en el tratamiento de fibras proteicas (seda y lana); *Catalasa*, para la eliminación de peróxido de hidrógeno después del blanqueado y antes del teñido; *Lacasa*, en la oxidación enzimática del índigo; *Peroxidasa*, en la oxidación enzimática de colorantes reactivos no fijados y *Lipasa* para el desengrasado (Bello A., 2009).

Las *lacasas* son enzimas capaces de decolorar el índigo, por tanto, son apropiadas para emplearse en los procesos de acabado del denim en compañía de un mediador en medio acuoso. La lacasa es una enzima perteneciente al metabolismo secundario de los hongos y lleva a cabo reacciones oxidativas. Estas poseen una alta capacidad para oxidar compuestos, tanto aromáticos orgánicos, como los compuestos fenólicos (orto y para – difenoles), aminas aromáticas, fenoles metoxisustituidos, diaminas, bencenotioles, iones metálicos ( $Mn^{+2}$ ), compuestos organometalicos, entre otros (Maijala et al., 2012). La *lacasa* oxida al mediador generando radicales libres que a su vez oxidan el índigo. Las peroxidases como *Manganeso-peroxidasa* y *lignin-peroxidasa*, son también enzimas capaces de degradar el índigo, por su actividad inespecífica sobre compuestos de estructura polifenólica. A diferencia de las lacasas,

requieren de peróxido de hidrógeno para iniciar la reacción de oxidación (*Montazer M. et al., 2010*). Además, son utilizadas para procesos de blanqueamientos de pulpas, y bioremediación (*Camacho et al., 2017*); así como también deslignificación de biomasa lignocelulósica (*Rodríguez et al., 2003*).

### **6.2.3. Uso de enzimas en la industria de detergentes**

Las enzimas empleadas en detergentes se encuentran disponibles en forma líquida y granular. Éstas actúan sobre los materiales que constituyen las manchas, facilitando la remoción de estos y de forma más efectiva que los detergentes convencionales. Entre las enzimas utilizadas se pueden encontrar: *proteasas*.

Las *amilasas* provenientes de *Bacillus licheniformis*, que degradan el almidón, sacando manchas de chocolate y papa, entre otros.

Las amilasas son empleadas en el procesamiento del almidón, para hidrolizar los enlaces y obtener productos de bajo peso molecular como glucosa, maltosa y unidades de maltotriosa. Son de gran importancia para la biotecnología porque constituyen aproximadamente el 25 % del mercado de enzimas industriales (*Monteiro et al., 2010*). Además, son el segundo tipo de enzimas más utilizadas en la formulación de los detergentes, porque mejoran la capacidad para eliminar las manchas difíciles y hacen que el detergente sea ambientalmente seguro. Estas enzimas degradan los residuos de alimentos ricos en almidón tales como papas, salsas, natillas, chocolates para obtener dextrinas y otros oligosacáridos más *pequeños* (*Corrêa, et al., 2011; Gurung et al., 2013*).

Las amilasas se clasifican de acuerdo con el tipo de hidrólisis que realizan sobre la molécula de almidón y son:

- $\alpha$ -amilasa: Es la enzima de mayor relevancia industrial. Es una endoenzima que hidroliza al azar los enlaces  $\alpha$ -1,4 glucosídicos de las moléculas de amilos y amilopectina para obtener maltosa, maltotriosa y oligosacáridos de varios tamaños (*Irfan, et al., 2012*).
- $\beta$ -amilasa: Es una exoenzima que rompe los enlaces  $\alpha$ -1,4 glucosídicos en la parte externa del almidón, separa unidades de maltosa de los extremos no reductores de la cadena por hidrólisis alterna. Su acción es progresiva y se detiene cuando alcanza una

ramificación porque no puede hidrolizar los enlaces  $\alpha$ -1,6 de la amilopectina y el glucógeno, lo que da lugar a la formación de  $\beta$ -dextrinas limitantes. Estas enzimas atacan la amilosa solo desde un extremo a la vez, por lo que son menos efectivas que las  $\alpha$ -amilasas (*Anto et al., 2006*).

- Glucoamilasa: Es una enzima de acción externa que hidroliza los enlaces  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 de los extremos no reductores, para producir como único producto final glucosa, a partir de almidón y polímeros relacionados, sin embargo, esta enzima es incapaz de hidrolizar por completo el almidón a glucosa (*Anto et al., 2006*).
- Pululanasa: Es una enzima desramificante que actúa sobre los enlaces  $\alpha$ -1,6 de la amilopectina, que libera como único producto la maltosa. Son utilizadas para mejorar la sacarificación, ya que elevan el rendimiento de la liberación de glucosa (*Carrera, 2003*).

Las lipasas son enzimas que rompen los lípidos por hidrólisis, sacando manchas de grasa y aceite. Estas enzimas importantes en los sistemas biológicos. Se obtienen de microorganismos y también de plantas y animales. Desde un punto de vista fisiológico, estas enzimas catalizan las reacciones de catabolismo de triglicéridos en ácidos grasos y glicerol. Sin embargo, según las condiciones operativas (en ausencia de agua), las lipasas son capaces de catalizar otras reacciones industrialmente muy usadas, como las reacciones de transesterificación. La producción de lipasas constituye en la actualidad un creciente mercado internacional que resulta muy atractivo para la industria biotecnológica cubana. A esto contribuye su amplia aplicación en la elaboración de detergentes y la gran versatilidad de estas enzimas en la síntesis orgánica. Dentro de éstas se destacan las reacciones de transesterificación, de renovado interés actual para la industria de biocombustibles (*Sharma, et al., 2001*).

Las *celulasas* son un grupo muy diverso de enzimas que catalizan la hidrólisis de los enlaces glucosídicos B-1-4, que mantienen unida la cadena de celulosa. Estas enzimas pueden clasificarse según su actividad, en *endoglucanasas*, *exoglucanasas* y *B-glucosidasas*. La mayoría de las celulasas tienen una estructura modular que contiene varios dominios estructuralmente independientes, un módulo catalítico y varios dominios adicionales, siendo los más comunes los módulos de unión a carbohidratos. Debido a su capacidad de estas enzimas para degradar o modificar la celulosa, las celulasas tienen un amplio rango de aplicaciones y

son actualmente una de las enzimas industriales más utilizadas (Cerde L., 2016).

Las *celulasas* producidas por el hongo *Humicola insolens* son utilizadas para remoción de suciedad, y para restaurar la suavidad y color de fibras de algodón (Rendueles et al., 2014).

#### **6.2.4. Enzimas utilizadas en la industria del papel**

Al igual que en el tratamiento de telas, en la fabricación de papel, se utilizan las enzimas *celulasas* para degradar la celulosa, componente principal de la madera. Además de la celulosa, la madera contiene lignina, un compuesto que debe ser eliminado (Rendueles et al., 2014).

En la industria papelera el uso de estas enzimas va en aumento debido a su alto potencial para disminuir los costos de producción y para lograr un impacto medioambiental reducido. Estas enzimas pueden contribuir a reducir el uso de productos químicos y de energía, también tienen aplicación en el reciclado del papel para el destinado de fibras, su principal beneficio es la disminución del uso de álcali requerido, la reducción de la contaminación ambiental y la mejora de las propiedades ópticas y resistencia de las fibras (Bajpai, 2010).

#### **6.2.5. Aplicación de las enzimas en análisis clínicos**

Las enzimas se emplean como reactivos estándar en los laboratorios para el diagnóstico de enfermedades, para el control y el seguimiento de enfermedades y de la respuesta del paciente hacia la terapia seguida, y para la identificación y control de la concentración de drogas o sus metabolitos en la sangre u otros fluidos corporales. Las técnicas de inmunoanálisis enzimático (ELISA) representan un nuevo e importante avance al asociar anticuerpos específicos a enzimas como la *peroxidasa* o la *galactosidasa* cuya unión genera una reacción colorimétrica (se observa color) proporcional a la extensión de unión del anticuerpo (Bello A., 2009).

Las *peroxidases* son enzimas que catalizan la oxidación-reducción de  $H_2O_2$  y una gran variedad de donadores de hidrógeno. Se encuentran ampliamente distribuidas en plantas, animales y microorganismos las cuales están divididas en tres superfamilias basadas en su estructura y propiedades catalíticas. Debido a que la peroxidasa es relativamente estable a altas temperaturas y su actividad puede medirse fácilmente con simples reacciones cromogénicas,

es empleada como una enzima modelo en el estudio de estructura de proteínas, reacciones y función de enzimas así como varias aplicaciones biotecnológicas (*Hiraga et al., 2001*).

#### **6.2.6. Uso de enzimas como productos médicos y farmacéuticos**

A diferencia de otros usos industriales para las enzimas, las aplicaciones médicas y farmacéuticas de estas requieren generalmente pequeñas cantidades de enzimas muy purificadas. Esto se debe a que, si el destino de una enzima o de un producto obtenido por métodos enzimáticos es su administración a un paciente, resulta evidente que el preparado debe contener las menores cantidades posibles de material extraño para evitar probables efectos secundarios.

El estudio y uso de las enzimas en farmacología y medicina son muy importantes. A nivel de investigación se trabaja mucho en estudiar la funcionalidad o disfuncionalidad de las enzimas en el organismo. La industria derivada de la farmacología enzimática no tiene grandes volúmenes, aunque sí son productos de gran valor añadido. Es una industria que en los próximos años dará lugar a muchos nuevos productos (*Bello A., 2009*).

Algunas de las enzimas más comúnmente utilizadas son las hidrolasas, que incluyen las *lipasas, esterases, acilasas, amilasas, proteasas, etc.* y las *oxidoreductasas*, dentro de las cuales encontramos las *reductasas, monooxigenasas, etc.* Aunque también hay otras enzimas que pueden resultar sumamente interesantes, como por ejemplo las transaminasas.

Las oxidorreductasas son enzimas que catalizan reacciones redox. Son las más empleadas por su papel en procesos de fermentación. Su uso más habitual incluye tanto la reducción de dobles enlaces como el proceso reversible de oxidación tanto de alcoholes como de aminas, extendiéndose a muchos otros procesos selectivos de oxigenación de enlaces C-H no activados, compuestos aromáticos o heteroátomos entre otros. La mayoría de estas enzimas requieren el uso de cofactores redox como el NAD(P), FMN o FAD o sus formas reducidas (*Magano et al., 2012*).

Las *transferasas* como su propio nombre indica catalizan la transferencia de grupos funcionales

como el metilo, cetonas, aldehídos, glicosílicos etc. Sin lugar a dudas han llegado a su pleno apogeo con el desarrollo de reacciones de transferencia de grupos amino. En este campo las aminotransferasas, y dentro de ellas las transaminasas han liderado una corriente científica que ha permitido la implementación de procesos biocatalíticos en numerosas empresas químicas y biotecnológicas al convertir cetonas en aminas enantioméricamente puras con excelentes rendimientos (*Kroutil et.al., 2013*).

Las *hidrolasas* son los biocatalizadores más empleados al permitir no solo la hidrólisis de numerosas clases de moléculas orgánicas (ésteres, carbonatos, epóxidos, nitrilos, amidas), sino también los procesos reversibles de síntesis al sustituir el nucleófilo empleado, el agua, por otros como alcoholes, aminas, amoniaco, hidracinas, tioles o perácidos. Para su correcta actuación no necesitan la adición de cofactores, lo que simplifica el desarrollo de los procesos y rebaja su coste (*Ghanem et.al., 2007*).

Las *liasas* son biocatalizadores altamente selectivos que catalizan entre otros la formación de enlaces carbono-carbono y carbono-heteroátomo. Su mecanismo difiere de aquellos de hidrólisis y oxidación, al ocurrir a través de una secuencia de adición-eliminación que permite en algunos casos la creación de varios centros estereogénicos en un solo paso de reacción como ocurre en ciertas reacciones catalizadas por *aldolasas*. Tanto las isomerasas como las ligasas poseen una gran versatilidad y aplicabilidad. Por un lado las isomerasas catalizan reacciones de racemización, epimerización e isomerización, y han sido empleadas en transformaciones de azúcares. Por otro lado, las *ligasas* están involucradas en procesos de unión de dos moléculas con la concomitante hidrólisis del enlace de un grupo difosfato o trifosfato del ATP (*Windle, et.al., 2014*).

La lipasa de *Rhizomucor meihei* se utiliza como biocatalizador en la síntesis de miristato de isopropilo, palmitato de isopropilo y 2-etilhexilpalmitato, que se emplean como emolientes en protectores solares o aceites de baño. La utilización de esta enzima hace que se obtengan productos de síntesis de mayor calidad, por lo que requieren menos refinamiento (*Hasan et al, 2006*).

### 6.2.7. Enzimas en fase orgánica

Se utilizan sobre todo *hidrolasas* (más concretamente *lipasas* y *proteasas*) para realizar síntesis orgánicas en condiciones suaves de operación. Una de las ventajas de estos procesos es que presentan quimio y enantioselectividad. El trabajar en disolventes orgánicos facilita en algunos casos la biocatálisis cuando se quieren producir reacciones desfavorables en agua, la supresión de reacciones colaterales inducidas por agua o la recuperación de las enzimas por ser insolubles en disolventes orgánicos (*Rendueles et al., 2014*).

### 6.3. IMPORTANCIA DE LOS RAIS Y SU PAPEL EN LA PRODUCCIÓN DE ENZIMAS

Los residuos agroindustriales son un gran problema ambiental ya que representan un importante desecho de una gran variedad de industrias, principalmente las del sector alimenticio. Generalmente, estos residuos son vertidos al ambiente, lo que conlleva a la contaminación ambiental, principalmente de los cuerpos de agua y suelos. Algunos usos dados a este tipo de residuos son, por ejemplo, utilizarlos como alimento para ganado. Sin embargo, esta estrategia sólo resuelve de manera parcial el problema, ya que el volumen en que son generados estos residuos es mayor que el de su demanda como alimento. Por lo anterior, hoy en día, los RAIS representan un gran potencial para ser empleados en procesos de base biotecnológica, debido a su bajo costo y su composición nutricional, ya que representan una fuente importante de carbono, nitrógeno y minerales, que pueden ser utilizados como sustrato para el crecimiento de los microorganismos y la producción de compuestos de alto valor agregado derivados de su metabolismo, como el caso de las *lipasas*. De esta manera, se contribuye a la resolución de problemáticas de contaminación ambiental causados por la disposición de estos residuos; además, se reduce la emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente.

Al paso de los años, se han definido criterios de selección de los residuos para ser aprovechados con fines biotecnológicos, algunos de ellos son:

- Que el principal componente del residuo pueda ser utilizado como sustrato para la

producción fermentativa de insumos de procesos industriales, o bien, que el material pueda ser sometido a extracciones para recuperar alguno de sus componentes que tenga un mercado demandante.

- Que el residuo esté disponible localmente y en las cantidades necesarias para asegurar la fabricación de un producto de interés.
- Que no tenga otras aplicaciones o usos que compitan con el proceso que se pretende promover.
- Que no requiera pretratamiento, y en caso de requerirlo, que éste sea sencillo y económico.
- Que la disponibilidad del residuo permita planificar el proceso para el cual se va a utilizar.
- Que sea estable, es decir, que no se descomponga fácilmente bajo las condiciones ambientales del sitio donde se genera.
- Con el marco de referencia anterior, se resumen ejemplos de los diferentes usos que se le han dado a diversos tipos de residuos agroindustriales, con base en la siguiente clasificación: Como sustrato para la producción fermentativa de metabolitos de interés.
- Como sustrato para la generación de bioenergéticos.
- Como mejoradores o acondicionadores de suelo obtenidos mediante composteo.
- Como suplemento alimenticio para animales.

Por otro lado, cuando los residuos no son reutilizados y se abandonan en el lugar donde se generaron, se convierten en contaminantes de suelos y aguas subterráneas. Este tema se aborda después de revisar los diferentes usos de los residuos (*Saval, S., 2012*).

Cuando los RAIS son dispuestos sobre el suelo sin ningún tratamiento previo y permanecen a la intemperie, su descomposición los puede convertir en residuos peligrosos principalmente por la presencia de agentes infecciosos, por el daño que pudieran causar a humanos, animales y a los recursos naturales. Si no se aplicaron medidas de remediación oportunamente el problema de contaminación se convierte en un pasivo ambiental y como consecuencia se puede presentar la dispersión de contaminantes.

Los problemas de dispersión de contaminantes derivados de la disposición de residuos a la

intemperie pueden afectar directamente a los recursos naturales: suelo, agua y aire, además de plantas y animales de los alrededores. El daño que pudieran ocasionar dichos residuos está en función de sus características físicas, químicas y biológicas. Si el residuo contiene carbohidratos, los microorganismos propios del suelo y aquellos presentes de manera natural en el residuo iniciarán su degradación, si por el proceso microbiano que se inicia se generan lixiviados, éstos migrarán en forma vertical hacia el subsuelo y podrían alcanzar los mantos acuíferos; además, los microorganismos presentes podrían ser arrastrados por las corrientes de aire para ser depositados en otros sitios. Si la degradación natural que se inicia es promovida por bacterias anaerobias pudieran generarse malos olores (Saval, S., 2012).

La biotecnología permite la bioconversión de RAIS en productos de interés comercial mediante procesos de extracción directos o de transformación por química o microbiológica. Además del interés económico que ello supone para la producción de productos de mayor valor añadido (enzimas, proteína unicelular, pigmentos, antibióticos, etc.), la utilización de subproductos agroindustriales tiene incidencia en la preservación de la calidad del medio ambiente, al considerar el desarrollo de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales. Las tecnologías actuales deben ser capaces de recuperar, reciclar y dar sustentabilidad a la obtención de ingredientes de alto valor agregado (Galanakis, 2012), los cuales se pueden utilizar en la industria alimenticia o farmacéutica.

Los RAIS pueden ser de origen animal o vegetal, y se pueden dividir en siete grupos: (I) cereales, (II) raíces y tubérculos, (III) plantas oleaginosas, (IV) frutas y verduras, (V) productos cárnicos, (VI) pescados y mariscos y (VII) productos lácteos (Galanakis, 2012). Los principales ingredientes que se extraen de los residuos se presentan en la Tabla 2. En México, los residuos que se obtienen a partir de cultivos principales incluyen maíz, trigo, sorgo, frijol, arroz, soya, caña, cebada y cacahuate, mientras que dentro de los productos secundarios están el algodón cártamo, agave, maguey y café (Valdez-Vazquez et al., 2010).

**Tabla 2.** Principales ingredientes extraídos de residuos industriales (*Galanakis, 2012*).

Origen del residuo	Ingrediente de interés	Origen del residuo	Ingrediente de interés
<i>Cereales</i>	Albúmina, globulina, hemicelulosa, fibras insolubles, arabinosilanos, beta-glucanos, glucosa, arabinosa, galactosa	<i>Frutas y verduras</i>	Hesperidina, limoneno, pectina, fenoles, fibra dietética, tartrato de calcio, beta-caroteno, licopeno, carotenoides, pectina
<i>Raíces y tubérculos</i>	Arabinosilanos, fenoles, ácidos orgánicos	<i>Producto cárnico</i>	Proteínas, hidrolizados de proteínas
<i>Plantas oleaginosas</i>	Fitoesteroles, albúmina, fenoles, pectina	<i>Productos lácteos</i>	Lactosa, beta-lactoglobulina, alfa-lactalbúmina
<i>Pescados y mariscos</i>	Proteínas, lípidos, quitina, quitosano		

Las aplicaciones que se le ha dado a este tipo de residuos se pueden clasificar en cuatro grupos: (I) pretratamiento, extracción y recuperación de compuestos bioactivos e ingredientes alimenticios (fibras dietéticas, pigmentos, pectinas, oligosacáridos, flavonoides, carotenoides, compuestos fenólicos, tocoferoles y vitaminas); (II) producción de enzimas, antibióticos, hongos comestibles, ácidos orgánicos y biocombustibles; (III) producción de alimento para animales y (IV) producción de composta (*Ayala-Zavala et al., 2011; Chandrasekaran et al., 2013; Federici et al., 2009; Galanakis, 2012*). Dentro de estas aplicaciones, las enzimas representan una herramienta muy útil para el pretratamiento, extracción y recuperación de compuestos con alto valor agregado.

### **6.3.1. Residuos agroindustriales para la producción de metabolitos de interés**

Subproductos y residuos provenientes de diferentes agroindustrias, conteniendo cantidades importantes de *celulosa*, *hemicelulosa*, *lignina* y *pectina*, son sustratos atractivos para la producción de enzimas de aplicación industrial, principalmente de aquellas que son inducibles, entre las que destacan: las *celulasas*, las *hemicelulasas*, las *xilanasas* y las *pectinasas*, las cuales marcaron una época en la historia de la biotecnología.

El número de enzimas con aplicación industrial es relativamente pequeño (alrededor de cincuenta), pero de un alto valor comercial y de interés particularmente para las industrias textil, alimentaria, papelera, cuero, vino, zumo de frutas, farmacéutica y el desarrollo de detergentes (*Castellanos et al., 2006*).

## **6.4. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN Y OBTENCIÓN DE ENZIMAS A PARTIR DE RAIS**

### **6.4.1. Fermentación**

Para producir enzimas a partir de microorganismos se pueden utilizar diversos procesos de fermentación siendo los más conocidos la fermentación sumergida (FLS) y la fermentación en estado sólido (FSS). La fermentación sumergida utiliza un exceso de agua libre y en muchas ocasiones, altas concentraciones de oxígeno para nutrir al microorganismo, además es muy utilizada por la industria alimentaria debido a su facilidad de uso a gran escala y la capacidad de controlar varios factores como la temperatura y el pH (*Deckers et al., 2020*). En la fermentación de estado sólido el agua libre es reducida, por tanto, el microorganismo crece sobre la superficie del sustrato (por lo general mezcla de residuos agroindustriales); este tipo de fermentación enfrenta inconvenientes en el control de temperatura y liberación de metabolitos que pudieran limitar la producción de metabolitos de interés, por lo cual requiere un diseño estructural que permita su control.

La fermentación en estado sólido se puede efectuar directamente sobre un gran volumen de residuos agroindustriales y productos agrícolas y a un menor costo en comparación con la fermentación sumergida, pues requiere menor energía y se puede aplicar en grandes

cantidades ya que los sustratos prácticamente no tienen agua libre (*Grande, 2016*). Por otro lado, la fermentación en estado sólido es muy apropiada para el cultivo y reproducción de microorganismos sensibles a la agitación, especialmente aquellos que facilitan la producción de *aflatoxina*, *ocratoxina* y algunas enzimas.

La fermentación en estado sólido resulta muy útil para la producción de enzimas a partir de residuos agroindustriales. En este sentido, es muy interesante cuando el producto crudo de la fermentación se puede usar como fuente para la obtención de las enzimas, por su bajo costo y sencillez técnica. Las enzimas producidas por este tipo de fermentación tienen aplicación en la industria alimentaria, en otro tipo de fermentaciones, en procesos de lixiviación (biolixiviación), biorremediación, en procesos de despulpado, entre otros procesos (*Grande, 2016*).

Entre las enzimas producidas a través de SSF que se encuentran disponibles para las diferentes aplicaciones mencionadas, es importante resaltar las enzimas oxidativas, las cuales se usan para los procesos de biorremediación por su capacidad de degradar un gran número de compuestos tóxicos y recalcitrantes. Hacer estos productos viables comercialmente sólo es posible produciendo enormes cantidades, por lo cual su producción se debe hacer a escala industrial aumentando con ello sus costos de producción considerablemente. Por esa razón, se deben investigar y optimizar estos procesos de producción con el fin de disminuir los costos y facilitar su aplicación, especialmente cuando son adecuados para mejorar las condiciones medioambientales (*Grande, 2016*).

Una de las enzimas de importancia industrial producida por fermentación es la pectinasa, obtenida de la cáscara de algunas frutas empleando *Aspergillus niger* (*Medina y Moreno, 2003*), aunque hay enzimas que se pueden obtener por extracción de fuentes animales o vegetales (*Deckers et al., 2020*); y se extraen de la fruta y a partir de sus residuos.

Una enzima es un compuesto intracelular. La pared celular está compuesta por celulosa, hemicelulosa y pectina. El proceso de disrupción debe realizarse para romper la barrera de modo que, aumente la liberación de contenido intracelular (*D'Hondt et al., 2017*). Hay dos tipos de métodos: físicos o químicos. Los métodos físicos están dirigidos a la alteración de la pared

celular, mientras que los métodos químicos se utilizan principalmente para desestabilizar la membrana celular., los cuales se describen a continuación:

Métodos físicos:

- Molienda: Reduce el tamaño de partícula mediante el uso de bolas, cuchillas, discos o martillos. Existen distintos tipos de molinos comúnmente utilizados en la industria alimentaria. El molino de cuchillas, por ejemplo, es un equipo formado por una cámara de molienda y cuchillas 23 afiladas que realizan un movimiento rotatorio y por el efecto de corte se usa para la trituración y homogeneización de alimentos blandos y semiduros (*M. Z. M. Nor et al., 2015*).
- Molino coloidal: Está constituido por una superficie estacionaria (estator) y una rotativa (rotor) haciendo posible realizar una separación ajustable y permitiendo realizar una molienda fina y la homogeneización de la solución mediante una fuerza centrífuga que la somete a fuerzas de cizalla y turbulencia (*A. N. M. Nor et al., 2016*).
- Equipo Ultrasónico: El ultrasonido es generado por una corriente eléctrica que se transforma mediante transductores, su aplicación en métodos de extracción de enzimas se basa en uso de ondas sonoras de frecuencia superior a 20 kHz formando microburbujas que, al alcanzar un tamaño crítico, implosionan de forma brusca para volver a su tamaño inicial. La energía liberada, así como el choque mecánico, causan ruptura celular por fuerzas de corte y cavitación lo que ocasiona la ruptura de la estructura de las células y permite la salida de las enzimas (*Robles, 2012*).
- Prensa francesa: Durante este proceso las células son forzadas, por presión, a pasar a través de pequeños orificios. La fuerza de corte ejercida sobre el extracto rompe las células de manera uniforme logrando una efectividad de ruptura hasta del 85% (*Cuervo et al., 2005*). Este método permite una disrupción celular y con ello la liberación de enzimas a la solución.

Métodos químicos:

Comúnmente son menos severos que los métodos físicos porque facilitan la purificación de las enzimas al hacer uso de solventes orgánicos que permiten alterar de la pared celular ya que atacan los compuestos hidrofóbicos de las membranas celulares haciéndolas permeables (Aguilar, 2010).

Métodos de purificación: La etapa de purificación es un proceso crucial, que afecta los niveles de pureza del producto final y el costo total de procesamiento. Los métodos de purificación permiten elevar los niveles de pureza del compuesto de interés al minimizar las interferencias.

- Precipitación; Aunque existen métodos más modernos, la precipitación todavía se usa ampliamente. La precipitación produce un producto altamente concentrado, es fácil de aplicar a diferentes escalas, y permite la viabilidad de operación continua a precios aceptables. - Precipitación por punto isoeléctrico: es el proceso mediante el que se llega a un pH en el que la carga neta de una molécula en disolución es cero. - Precipitación con sulfato de amonio: la adición de sulfato de amonio al agua provoca la formación de puentes de hidrógeno, por lo que la proteína pierde su hidratación y comienza a actuar hidrofobicamente formando el precipitado.
- Sistema bifásico acuoso: Los sistemas acuosos de dos fases consisten en un polímero y una sal (o dos polímeros) y se han considerado herramientas muy utilizadas para la extracción y purificación de biomoléculas (Rabelo et al., 2004). Es de bajo costo, rápido, usa polímeros reutilizables, es escalable y puede soportar una alta carga de biomasa en comparación con el resto de los sistemas de separación (Manzoor et al., 2016).
- Filtración por membrana: Aplica el uso de membranas para purificar moléculas sobre la base de la diferencia de tamaño. Incluye microfiltración y ultrafiltración y se considera muy útil para el aislamiento y concentración de enzimas (Cassano et al., 2003).

- **Cromatografía** La cromatografía es un conjunto de técnicas que permite la separación, identificación y determinación de los componentes químicos en las mezclas complejas que se encuentran en una fase móvil la cual se va desplazando a través de una fase estacionaria (papel, gelatina, sílice o alúmina) a diferentes velocidades (*Sgariglia et al., 2010*). Existen dos mecanismos para separar los componentes: adsorción (cromatografía de intercambio iónico, interacción hidrofóbica y de afinidad); nanoadsorción, usa geles de filtración (*De Freitas Coêlho et al., 2014*).

Los residuos de frutas son excelentes sustratos para la producción de enzimas de importancia industrial, como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Métodos de obtención de enzimas a partir de RAIS de frutas.

Tipo de residuo (Sustrato)	Microorganismo	Enzima	Proceso de Extracción	Metodo de purificación	Referencia
Cáscaras de naranja	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Pectinasa</i>	Modo de fermentación sumergida, temperatura: 30°C, pH 5,5, tiempo de fermentación: 5 días	Precipitación con (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y cromatografía de intercambio iónico.	Medina y Moreno, 2003
Cáscaras de guayaba	<i>Aspergillus flavus</i> NFCCI 2364	<i>Fructosiltransferasas</i>	Modo de fermentación en estado sólido, se realizó en matraces de 250 mL, se agrega 5g de sustrato con 0,1 g/gds de extracto de levadura con 5 ml de agua destilada Inoculación: 1x10 <sup>7</sup> de esporas en condiciones asépticas temperatura: 25°C – 35°C, tiempo de fermentación: 24 h – 144 h	Método utilizado descrito por (Ganaie et al., 2013) que involucra agregar 250 uL del sustrato con la enzima a 750 uL de sacarosa al 60% (p/v) y 0,1 M de tampón citrato (pH 5,5) en un baño de agua a 55 °C por 10min. La actividad enzimática fue estimada al determina la cantidad de glucosa liberada usando un kit GOD/POD de 505 nm en un espectrofotómetro.	Ganaie et al., 2017
Cáscaras de mango					
Cáscaras de maracuyá					
Cáscaras de naranja	<i>Pencillium oxalicum</i> PJ02	<i>Pectinasas</i> <i>Exopectinasa</i> <i>Endopectinasa</i> <i>Xilanasa</i>	Modo de fermentación sumergida, temperatura 35°C, pH 5,2, tiempo de fermentación: 3 días	Precipitación y centrifugación	Jumbo, 2021
Copra de Coco y Salvado de trigo	<i>Trichoderma reesei</i> TISTR3080	<i>Celulasa</i>	Modo de fermentación en estado sólido, temperatura: 30 °C, tiempo de fermentación: 7 días Salvado de trigo como fuente de nitrógeno para aumentar el crecimiento de los hongos y mejorar la producción de celulasas	Mezcla de 4g del extracto en 100 mL del tampón de acetato de sodio (0,05 M; pH: 6,5), agitado por 30 min. La solución fue recogida en Papel filtro Whatman N°1 y la actividad determinada usando por el método colorimétrico.	Kittanan et al., 2018
Cáscaras de plátano	<i>Trichoderma Viridi</i> GIM	<i>Celulasas</i> <i>Carboximetilcelulosa</i> <i>B-glucosidas</i>	Modo de fermentación en estado sólido, contenido de humedad del 50%, temperatura: 30 ° C, tiempo de fermentación: 144 h	Papel filtro Whatman N°1, 1% de carboximetilcelulosa sódica y celobiosa al 1% en tampón citrato 0,05 M (pH 4,8) como sustrato. La reacción se llevó a cabo a 50°C durante 30 min.	Sun et al., 2011

## 7. CONCLUSIONES

Los residuos agroindustriales son de naturaleza orgánica y pueden clasificarse de acuerdo con su origen, los más utilizados son aquellos que provienen de frutas, sin embargo, estos se generan en grandes cantidades y dentro de las diferentes industrias. Los productos de mayor interés industrial obtenidos a partir de RAIS son las enzimas, debido a su relevancia en la industria. A partir de los RAIS se pueden obtener enzimas que atiendan perfectamente a las necesidades actuales, y que permitan optimizar los procesos sintéticos ofreciendo muchas posibilidades a nivel industrial, reduciendo costos y aportando a la disminución de los daños que causan estos residuos. Dentro de la industria farmacéutica, la biocatálisis resulta realmente interesante, ya que ofrece las herramientas para desarrollar procesos que permiten mejorar tanto el rendimiento como la estereoselectividad de los principios activos, resultando en un proceso económicamente viable y más amigable con el medioambiente.

El escalamiento de los procesos de obtención de compuestos de interés industrial a partir de RAIS es difícil y la mayoría de los estudios llevados a cabo han sido a nivel laboratorio y piloto. El adecuado aprovechamiento de estos permite dejar de verlos como un problema y convertirlos en una solución, disminuyendo los efectos negativos que estos causan al medio ambiente y generando productos de interés industrial.

## 8. OBJETIVOS Y METAS ALCANZADAS

- Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica extensa que permitió conocer la importancia biotecnológica de las enzimas en general.
- Se pudo identificar y describir algunas enzimas de mayor relevancia industrial.
- Se analizó la importancia de los residuos agroindustriales (RAIS), así como su papel en la producción de enzimas de interés industrial.
- Se logró conocer y comparar los métodos de producción y obtención de enzimas a partir de RAIS.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. A. Ghanem, *Tetrahedron*, 2007, 63, 1721-1754
2. Aguilar, N. (2010). Modelo cinético de la hidrólisis del residuo de cosecha cañero. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(2), 5–18. <https://doi.org/10.18359/RCIN.274>
3. Anto, H., Trivedi, U. y Patel, K. (2006). Glucoamylase production by solid-state fermentation using rice flake manufacturing waste products as substrate. *Bioresource Technology*
4. Arroyo, M.; Acebal, C. y de la Mata, I. (2014). "Biocatálisis y biotecnología". *Arbor*, 190 (768): a156. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2014.768n4010>
5. Ayala Zavala J.F., *et al.* 2011. "Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives". *Food Research International* [en línea]. Vol. 44, no. 7, pp. 1866–1874.
6. Ayala-Zavala, J.F., *et al.* 2011. "Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives". *Food Research International* [en línea]. Vol. 44, no. 7, pp. 1866–1874.
7. Bajpai, P.K (2010): Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes. *BioResources*,5,1311-1325.
8. Bello A. (2009). Producción de enzimas en la industria láctea (Lactosa y Renina). abril 15,2022, de Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD Sitio web: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/1539>
9. Berg, J. M., Tymoczko, J. L., y Stryer, L. (2002). Aspartate transcarbamoylase is allosterically inhibited by the end product of its pathway. En *Biochemistry* (5a ed., sección 10.1). New York, NY: W. H. Freeman.
10. Berg, M., Stryer, L. & Tymozko J. (2007). *Bioquímica*. Barcelona: Reverte, S. A.
11. Botella, C., Ory, I., Webb, C., Cantero, D. y Blandino, A. (2005) Hydrolytic enzyme production by *Aspergillus awamori* on grape pomace. *Biochem. Eng. J.* 26(2–3), 100-106.
12. C. L Windle, M. Müller, A. Nelson, A. Berry, *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 2014
13. Camacho R, Gerardo J, Navarro K & Sánchez J (2017) Producción de enzimas ligninolíticas durante la degradación del herbicida paraquat por hongos de la pudrición blanca. *Revista Argentina de Microbiología.* 49(2):89- 196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.004>
14. Cano V. (2015). Extracción y caracterización fisicoquímica de quimosina bovina para producción de cuajo, sometido a variación térmica y de pH, a escala laboratorio. Universidad de San Carlos de Guatemala Sitio web: <https://core.ac.uk/download/pdf/35293616.pdf>
15. Carrera, J. (2003). Producción y aplicación de enzimas industriales. *Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias*.
16. Casas Godoy, Leticia, Georgina Coral Sandoval Fabián "Enzimas en la valorización de residuos agroindustriales" *Revista Digital Universitaria* [en línea]. 1 de noviembre de 2014, Vol. 15, No.12 Disponible en Internet: <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art95/index.html>
17. Casas Godoy, Leticia, Georgina Coral Sandoval Fabián "Enzimas en la valorización

- de residuos agroindustriales" Revista Digital Universitaria [en línea]. 1 de noviembre de 2014, Vol. 15, No.12. Disponible en Internet: <<http://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art95/index.html>> ISSN: 1607-6079.
18. Cassano, A., Drioli, E., Galaverna, G., Marchelli, R., Di Silvestro, G., & Cagnasso, P. (2003). Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes. *Journal of Food Engineering*, 57(2), 153–163. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00293-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00293-5)
  19. Castañeda Maria. (2019). Enzimas de interés biotecnológico. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional La plata.
  20. Castañeda Sandoval, Laura Margarita, & Aceves Diez, Angel Emilio (2012). Producción biotecnológica de lipasas microbianas, una alternativa sostenible para la utilización de residuos agroindustriales. *Vitae*, 19(3), <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169825291001>
  21. Castañeda, M. T. (2016). Obtención, caracterización y aplicación de un biocatalizador para la reducción del contenido de fenilalanina en hidrolizados proteicos (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata)
  22. Castellanos, Óscar, Ramírez, Diana C., & Montañez, Víctor Mauricio. (2006). Perspectiva en el desarrollo de las enzimas industriales a partir de la inteligencia tecnológica. *Ingeniería e Investigación*, 26(2), 52-67.
  23. Cerda Mejía, L. A. (2016). Enzimas modificadoras de la pared celular vegetal. Celulasas de interés biotecnológico papelero.
  24. Cerda Mejía, L. A. (2016). Enzimas modificadoras de la pared celular vegetal. Celulasas de interés biotecnológico papelero.
  25. Chandrasekaran, M. and Bahkali, A.H. "Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera*) fruit processing by-products and wastes using bioprocess technology - Review. *Saudi journal of biological sciences*. 2013, Vol. 20, no. 2, pp. 105–20.
  26. Corrêa, T., Moutinho, S., Martins, Meire y Martins, Marco. (2011). Simultaneous  $\alpha$ -amylase and protease production by the soil bacterium *Bacillus* sp. SMIA-2 under submerged culture using whey protein concentrate and corn steep liquor: compatibility of enzymes with commercial detergents. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 31(4), 843- 848.
  27. D'Hondt, E., Martín-Juárez, J., Bolado, S., Kasperoviciene, J., Koreiviene, J., Sulcius, S., Elst, K., & Bastiaens, L. (2017). Cell disruption technologies. *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products*, 133–154. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00006->
  28. Da Silva, C. A., Baker D., Shepherd A W Jenane Ch. y Miranda da Cruz S. (2013). *Agroindustrias para el desarrollo*. Roma: FAO. (2016).
  29. De Freitas Coêlho, D., Silveira, E., & Tambourgi, E. B. (2014). Purification Processes and Market Potential of Bromelain in Brazil. *J. Chem. Chem. Eng*, 8, 882–888. <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2014.09.007>
  30. Deckers, M., Deforce, D., Fraiture, M.-A., & Roosens, N. H. C. (2020). Genetically Modified Micro-Organisms for Industrial Food Enzyme Production: An Overview. *Foods* 2020, Vol. 9, Page 326, 9(3), 326. <https://doi.org/10.3390/FOODS9030326>
  31. Enzimas. McKee T, & McKee J.R.(Eds.), (2016). *Bioquímica. Las bases moleculares de la vida*, 5e. McGraw Hill.
  32. Escandón-Guichard, J. y Pineda-Domínguez, D. (2014). *El comercio exterior*

- agroindustrial mexicano y sus estrategias de exportación. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (200).
33. Fanchini, C. R., Temer, B., Teixeira, M. C. y Cano. E. (2010) Production of xylanolytic enzymes by *Penicillium janczewskii*. *Biores. Technol.* 101(11), 4139-4143.
  34. Ganaie, M. A., Soni, H., Naikoo, G. A., Santos Oliveira, L. T., Rawat, H. K., Mehta, P. K., & Narain, N. (2017). Screening of low cost agricultural wastes to maximize the fructosyltransferase production and its applicability in generation of fructooligosaccharides by solid state fermentation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 118, 19–26. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2017.01.006>
  35. Grande Tovar, Carlos David. *Valoración biotecnológica de residuos agrícolas y agroindustriales / Carlos David Grande Tovar-Cali: Editorial Bonaventuriana, 2016* 180 p.
  36. Hasan F., Shah A. A., Hameed A. Industrial applications of microbial lipases. *Enzyme and Microbial Technology*. 2006; 39:235-251
  37. Hiraga S, Sasaki K, Ito H, Ohashi Y, Matsui H “A large family of class III plant peroxidases”. *Plant Cell Physiol.* 42,462-468, 2001
  38. Irfan, M., Nadeem, M. y Syed Q. (2012). Media optimization for amylase production fermentation of wheat bran by fungal strains. *Journal of Cell and Molecular Biology*, 10(1), 55-64.
  39. J. Magano, J. R. Dunetz, *Org. Process Res. Dev.*, 2012, 16, 1156-1184.
  40. Jimenez Rosales, Angélica. Los retos actuales en la ingeniería de proteínas. *Ciencia ergo-sum*, [S.l.], v. 26, n. 3, oct. 2019. ISSN 2395-8782. Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/10899>
  41. Jumbo B. (2021). Estudio de los métodos de recuperación de enzimas de residuos agroindustriales de frutas tropicales., Universidad Central del Ecuador.
  42. Kittanan, T., Nareerat, L., Sawwanit, K., & Teerin, C. (2018). Uses of copra waste and wheat bran for cellulase production by *trichoderma reesei* in solid state fermentation. *ACM International Conference Proceeding Series*, 56–59. <https://doi.org/10.1145/3180382.3180392>
  43. Maijala P, Mattinen M, Nousiainen P, Kontro J, Asikkala J, Sipilä J, Viikari L (2012) Action of fungal laccases on lignin model compounds in organic solvents. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*
  44. Manzoor, Z., Nawaz, A., Mukhtar, H., & Haq, I. (2016). Bromelain: Methods of Extraction, Purification and Therapeutic Applications. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 59(0). <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2016150010>
  45. MEJÍAS-BRIZUELA, Nildia, OROZCO-GUILLEN, Eber, y GALÁAN-HERNÁNDEZ, Néstor. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales* 2016
  46. Montazer M & Maryan A. S., “Influences of Different Enzymatic Treatment on Denim Garment”, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 160, no 7, pp. 2114– 2128, 2010.
  47. Monteiro, P., de Oliveira, P. y Magalhães. (2010). Application of microbial  $\alpha$ -amylase in industry - a review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41, 850- 861.
  48. Nor, A. N. M., Aznan, T. N. T., & Illias, R. M. (2016). Bromelain: from production to commercialisation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(5), 1386–

1395. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8122>
49. Nor, M. Z. M., Ramchandran, L., Duke, M., & Vasiljevic, T. (2015). Characteristic properties of crude pineapple waste extract for bromelain purification by membrane processing. *Journal of Food Science and Technology*, 52(11), 7103–7112. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1812-5>
  50. Pinelo, M., Arnous, A. and Meyer, A.S. "Upgrading of grape skins: significance of plant cell-wall structural components and extraction techniques for phenol release". *Trends in Food Science & Technology*. 2006, Vol. 17, no. 11, pp. 579– 590.
  51. Puri, M., Sharma, D. and Barrow, C.J. "Enzyme-assisted extraction of bioactives from plants". *Trends in biotechnology* [en línea]. 2012, Vol. 30, no. 1, pp. 37–44.
  52. RAMÍREZ Ramírez, Joaquín, Marcela Ayala Aceves "Enzimas: ¿qué son y cómo funcionan?" *Revista Digital Universitaria* [en línea]. 1 de noviembre de 2014, Vol. 15, No.11 [Consultada:]. Disponible en Internet: <<http://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art91/index.html>> ISSN: 1607-6079
  53. Ramírez Ramírez, Joaquín, Marcela Ayala Aceves "Enzimas: ¿qué son y cómo funcionan?" *Revista Digital Universitaria* [en línea]. 1 de noviembre de 2014, Vol. 15, No.11 Disponible en Internet: <<http://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art91/index.html>> ISSN: 1607-6079.
  54. Rendueles, M.; Díaz, M. (2014). "Biotecnología industrial". *Arbor*, 190 (768): a155.
  55. Robles, L. . (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos
  56. Rodríguez S, Fernández M, Bermúdez R & Morris H (2003) Tratamiento de efluentes industriales coloreados con *Pleurotus* sp. *Revista Iberoamericana de Micología*. 20(4):164-168. <https://pdfs.semanticscholar.org/0722/94b4bd6f085f1d9d52892249a205f9bf4b34.pdf>
  57. Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-46.
  58. Scopes, R. K. (1994). *Protein Purification: Principles and Practice* (Springer Advanced Texts in Chemistry) By Robert K. Scopes - Documentos de Google (3er ed.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2333-5>
  59. Sgariglia, A. M., Soberón, J. R., Sampietro, D. A., & Vattuone, M. A. (2010). Cromatografía: conceptos y aplicaciones. *Revista Arakuku*, 1(2), 1–6. [www.csnat.unt.edu.ar/academica/publicaciones/revista-arakuku](http://www.csnat.unt.edu.ar/academica/publicaciones/revista-arakuku)
  60. SHARMA, R., CHISTI, Y., y BANERJEE, U.C. "Production, purification, characterization, and applications of lipases ". *Biotechnology Advances*. 2001, vol. 19, p. 627–662.
  61. Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., & Mehta, P. K. (2016). Microbial enzymes: Industrial progress in the 21st century. 3 *Biotech*. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8>
  62. Sun, H., Li, J., Zhao, P., & Peng, M. (2011). Banana peel: A novel substrate for cellulase production under solid-state fermentation. *African Journal of Biotechnology*, 10(77), 17887–17890. <https://doi.org/10.4314/ajb.v10i77>
  63. Valdez Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. and Hernández-Santiago, C. "Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2010, Vol. 14, no. 7, pp. 2147–2153.
  64. W. Kroutil, E.-M. Fischereder, C. S. Fuchs, H. Lechner, F. G. Mutti, D. Pressnitz, A.

- Rajagopalan, J. H. Sattler, R. C. Simon, E. Sirola, Org. Process Res. Dev. 2013, 17, 751-759
65. WADHWA, M.; BAKSHI, M. P. S.; MAKKAR, H. P. S. 2013. Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products. (H. Makkar, Ed.) (p. 68). Roma

**Vo. Bo. DE LOS ASESORES**



---

**DRA. LUZ MARÍA ZENIT TOVAR CASTRO**



---

**DR. JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RUIZ**