



UNIVERSIDAD DE LAMBAYEQUE
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A TRAVÉS DE LA
DEGRADACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN
CHIRIACO, 2018.**

PRESENTADA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

Autor:

Jenny Isabel Chiroque Marchena

Asesora:

Ing. Mg. Sonia Medina Díaz

Línea de Investigación:

Contaminación Ambiental y Biotecnología

Chiclayo – Perú

2018

FIRMA DEL ASESOR Y JURADOS DE TESIS

Mg. Sonia Medina Díaz
ASESOR

MSc. Ing. Ysabel Nevado Rojas
PRESIDENTE

Mg. Luis Fernando Terán Bazán
SECRETARIO

Mg. Marcos Guillermo García Paico
VOCAL

DEDICATORIA

Esta Tesis está dedicada con mucho Amor y Cariño a:

A mis Padres Zacarias y Ricardin, quienes con su amor. Paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir un Sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis tesoros más valiosos de mi vida, mis Hijos Daryl y Zayri, por su apoyo durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento.

(Jenny Chiroque Marchena).

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un sincero agradecimiento, en primer lugar a Dios, por brindarme Salud, Fortaleza y Voluntad para lograr mi gran reto.

A mis padres el Sr. Zacarias Chiroque Morales y la Sra Ricardina Marchena Agurto, por ser los principales motores de nuestros Sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos , valores y principios que nos han inculcado.

A mis hijos Daryl David y Zayri Jennifer Casas Chiroque por su comprensión y aliento para llegar a esta Meta.

A mis Hermanos Ignacio, Juana, Maria, Sugey y William por brindarme un granito de arena para culminar mi Carrera.

A mi Asesora la Mg. Sonia Medina Diaz, quien me ha guiado con su paciencia y aporte para la culminación de este Trabajo de Investigación.

A todos los Docentes, en especial al Lic. Nelson Espinoza Orrego y Félix Herrera Cadillo, por haber compartido sus conocimientos, a lo largo de la preparación de nuestra profesión.

(Jenny Chiroque Marchena).

INDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

| | |
|--|----|
| I. INTRODUCCIÓN | 12 |
| II. MARCO TEÓRICO | 14 |
| 1. Antecedentes Bibliográficos | 14 |
| 2. Bases Teóricas | 15 |
| 2.1. Caracterización de subproductos de biomasa lignocelulósica | 15 |
| 2.1.1. Composición de materiales lignocelulósicas | 15 |
| 2.2. Clases de microorganismos levadura, bacterias y hongos | 16 |
| 2.2.1. Bacterias empleadas en la fermentación | 17 |
| 2.2.2. Levaduras empleadas en la fermentación | 17 |
| 2.3. Biocombustibles | 18 |
| 2.4. Biocombustibles de fuentes lignocelulósicas | 20 |
| 2.4.1. Estudio del material lignocelulósico | 20 |
| 2.5. Procesos de producción de bioetanol | 26 |
| 2.6. Procesos de producción de etanol a partir de la biomasa lignocelulósica | 27 |
| 2.6.1. Equipo de extracción continua con soxhlet | 29 |
| 2.7. Parámetros de producción de alcohol | 31 |
| 2.8. Usos del alcohol | 32 |
| 2.9. Etapas fermentativas del alcohol y parámetros | 30 |
| 2.9.1. Etapas fermentativas del alcohol | 32 |
| 2.9.2. Parámetros de la fermentación alcohólica | 33 |
| 2.10. Degradación de residuos sólidos orgánicos | 35 |
| 2.11. Diagrama de bloques del proceso | 36 |
| 2.12. Descripción del centro poblado de Chiriaco | 37 |
| 2.12.1. Aspectos generales | 37 |
| 2.12.2. Aspectos ambientales | 38 |
| 2.12.3. Aspectos sociales y económicos | 39 |
| 2.12.4. Caracterización de residuos sólidos de Chiriaco | 39 |
| 3. Definición de términos básicos | 40 |

| | |
|---|----|
| 3.1. Residuos sólidos orgánicos | 40 |
| 3.2. Bioetanol | 40 |
| 3.3. Capacidad de producción | 41 |
| 4. Hipótesis | 41 |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | 42 |
| 1. Variables y operacionalización | 42 |
| 2. Tipo de estudio y diseño de investigación | 42 |
| 3. Población y muestra en estudio | 42 |
| 3.1. Población | 42 |
| 3.2. Muestra | 42 |
| 3.3. Muestreo | 43 |
| 3.4. Descripción de la muestra a seleccionar | 43 |
| 4. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos | 43 |
| 4.1. Metodología | 43 |
| 4.1.1. Trabajo de campo | 43 |
| 4.1.2. Trabajo de laboratorio | 43 |
| 4.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 46 |
| 5. Procesamiento de datos y análisis estadístico | 46 |
| IV. RESULTADOS | 47 |
| 4.1. Preparación de residuos sólidos orgánicos | 47 |
| 4.2. Obtención de glucosa y bioetanol | 48 |
| 4.2.1. Obtención de glucosa | 48 |
| 4.2.2. Obtención de bioetanol | 49 |
| 4.3. Rendimiento y potencial de producción de bioetanol de RR.SS orgánicos en Chiriaco-Imaza | 51 |
| 4.3.1. Rendimiento en el proceso de producción de bioetanol | 51 |
| 4.3.2. Potencial de producción de bioetanol a partir de RR.SS orgánicos en Chiriaco-Imaza | 52 |
| V. DISCUSIÓN | 53 |
| VI. CONCLUSIONES | 55 |
| VII. RECOMENDACIONES | 56 |
| VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 57 |
| IX. ANEXOS | 60 |

INDICE TABLAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | Propiedades principales de la gasolina y del etanol | 32 |
| Tabla 2 | Cantidad de viviendas en el distrito | 40 |
| Tabla 3 | Operacionalización de variables | 43 |
| Tabla 4 | Descripción de tratamientos y repeticiones | 47 |
| Tabla 5 | Peso húmedo y peso seco de las muestras procesadas | 48 |
| Tabla 6 | Contenido de glucosa y otros azúcares reductores fermentables en las muestras | 49 |
| Tabla 7 | Bioetanol obtenido de las muestras procesadas | 50 |
| Tabla 8 | Análisis de varianza | 51 |
| Tabla 9 | Rendimiento en porcentaje (%) del proceso de obtención de bioetanol | 52 |
| Tabla 10 | Potencial de producción de bioetanol a partir de residuos sólidos orgánicos en Chiriaco – Imaza | 53 |

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Tipos de biomasa | 18 |
| Figura 2 | Unidad de celobiosa | 21 |
| Figura 3 | Regiones de las fibras elementales | 21 |
| Figura 4 | Composición de la hemicelulosa | 22 |
| Figura 5 | Estructura molecular de la lignina | 24 |
| Figura 6 | Componentes típicos de los desechos agrícolas | 25 |
| Figura 7 | Etapas de la Fermentación alcohólica | 33 |
| Figura 8 | Vista Satelital del Distrito de Imaza | 37 |
| Figura 9 | Peso húmedo y peso seco de las muestras procesadas | 47 |
| Figura 10 | Contenido de glucosa y otros azúcares reductores fermentables en las muestras | 49 |
| Figura 11 | Bioetanol obtenido de las muestras procesadas | 50 |
| Figura 12 | Proceso de obtención de bioetanol | 52 |

RESUMEN

El aprovechamiento no convencional de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y en particular, para las condiciones de América Latina en donde más del 50% de los RSU corresponden a residuos de características orgánicas, termina siendo una posibilidad para agregar valor, generar crecimiento económico y crear condiciones vinculadas al aprovechamiento de residuos. Además, al tener en cuenta que los materiales lignocelulósicos son considerados aptos para la producción de etanol de segunda generación, y aprovechando el potencial de la biotecnología que ofrece diversas opciones para la generación de energías renovables, se busca abordar la producción de bioetanol a partir de procesos biológicos de metabolización de la materia orgánica mediante fermentación. Es por ello, que se plantea el objetivo de determinar la capacidad de producción de bioetanol a través de la degradación de residuos sólidos orgánicos en Chiriaco.

La metodología consistió en obtener las muestras de residuos vegetales y de cocina para su posterior procesamiento en laboratorio. La secuencia de procesos para la obtención de etanol a nivel de laboratorio, fue la siguiente: pretratamiento, preparación de inóculo microbiano e inoculación, determinación de la glucosa formada, fermentación de la glucosa, destilación para obtener el alcohol etílico. Se alcanzaron resultados superiores en humedad, contenido de glucosa y otros azúcares reductores, así como en cantidad de bioetanol, y rendimiento en los residuos vegetales comparados con los residuos de cocina y el testigo. El ANVA realizado confirma esta superioridad, y confirma que la misma es estadísticamente válida.

En conclusión, es técnicamente factible la producción de etanol a partir de estos residuos, sin embargo, es necesario abordar con mayor profundidad las condiciones óptimas para cada proceso con el fin de implementar dicha tecnología a nivel industrial.

Palabras clave: residuos domésticos orgánicos, bioetanol.

ABSTRACT

The unconventional use of the Urban Solid Waste (RSU), and in particular, for the conditions of Latin America where more than 50% of the RSU correspond to waste of organic characteristics, ends up being a possibility to add value, generate economic growth and create conditions linked to the use of waste. In addition, bearing in mind that lignocellulosic materials are considered suitable for the production of second generation ethanol, and taking advantage of the potential of biotechnology that offers various options for the generation of renewable energies, the aim is to address the production of bioethanol from processes biological metabolism of organic matter through fermentation. For this reason, the objective of determining the production capacity of bioethanol through the degradation of organic solid waste in Chiriaco is proposed.

The methodology consisted of obtaining the samples of vegetable and kitchen waste for further processing in the laboratory. The sequence of processes for obtaining ethanol at the laboratory level was as follows: pretreatment, preparation of microbial inoculum and inoculation, determination of the glucose formed, fermentation of glucose, distillation to obtain ethyl alcohol. Higher results were achieved in humidity, glucose content and other reducing sugars, as well as in the amount of bioethanol, and yield in vegetable waste compared to kitchen waste and control. The ANVA performed confirms this superiority, and validates that it is statistically valid.

In conclusion, it is technically feasible to produce ethanol from these residues, however, it is necessary to address in greater depth the optimal conditions for each process in order to implement this technology at an industrial level.

Key words: organic waste, bioethanol.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de proteger el ambiente, preservar los recursos tanto renovables como no renovables y maximizar el potencial de uso de productos agrícolas, y en especial de los subproductos que estos generan al someterlos a distintos procesos agroindustriales, cuya disposición final es un gran problema ambiental, nos ha llevado a la generación de alternativas energéticas distintas a las ya convencionales obtenidas principalmente de la explotación del petróleo, a través de uso de materias primas naturales dando lugar a los llamados biocombustibles dentro de los cuáles destaca el bioetanol.

De estos subproductos o residuos en su mayoría corresponden a biomasa lignocelulósica rica en polímeros de celulosa y hemicelulosa entre 75-80%, los cuales pese a su dificultosa degradación, es posible mediante procesos químicos, físicos y/o biológicos desdoblarlos a azúcares monosacáridos para su posterior conversión a etanol. Las apuestas en investigación están dirigidas al estudio e incursión de pretratamientos viables tanto en proceso como económicamente para este tipo de materias primas, y el uso de microorganismos, hongos y/o bacterias modificadas, combinadas, etc., para la potencialización de estas en la fermentación de azúcares y posterior obtención de bioetanol. La producción podría realizarse a partir de desechos agrícolas, forestales, industriales o municipales. Las materias primas ricas en celulosa, como los desechos agrícolas y forestales son las más abundantes y económicas.

El bioetanol se presenta como una alternativa atractiva para el reemplazo del petróleo, es un alcohol y su mayor parte se fabrica convirtiendo los almidones en azúcares, los azúcares se convierten por fermentación en etanol, el que luego es destilado en su forma final. Además, La demanda de etanol en el Perú en el 2013 fue de aproximadamente 390 mil litros al día y la oferta peruana fue de 375 mil litros al día. Es decir, que aun si se hubiera utilizado todo el etanol que se produce en el país; hubiera quedado parte de la demanda insatisfecha. Esto deja en claro que el país debe promover mayor inversión en proyectos de etanol; con el principal objetivo de cubrir la demanda nacional ofreciendo un precio competitivo con respecto al mercado mundial (OSINERMIN, 2014).

Los diferentes biocombustibles han ganado un lugar en la agenda ambientalista de principios de siglo, pues sus probados beneficios (reducción de al menos el 27% en la

emisión de monóxido de carbono) los sitúan, al lado de otras fuentes alternativas de energía, como el gas, en la mira de los planificadores de modelos de desarrollo sostenibles.

El aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos es otra alternativa de producción de etanol a partir de la degradación de la misma, realizando los procesos de fermentación y destilación para la obtención de bioetanol; debido al porcentaje de azúcares reductores que contiene esta pulpa. De esta manera, los residuos sólidos orgánicos competirán muy favorablemente con el maíz, remolacha, caña de azúcar, entre otros, con una ventaja adicional ya que los residuos son desechos que se convierten en abono orgánico en el mejor de los casos. En este proceso, se tiene una doble consecuencia: un efecto ecológico y otro ambiental porque se eliminan los desechos y a su vez se utiliza para producir energía. Y basándose en los volúmenes de generación de residuos en Chiriaco, se puede observar una potencial fuente de desechos orgánicos para ser utilizados en la obtención de bioetanol que puede ser una solución eficiente para disminuir el daño al ambiente.

El problema de generación de residuos sólidos a lo largo del tiempo se ha ido tornando más agudo, generando grandes volúmenes de residuos orgánicos los cuales podrían ser utilizados para obtener biocombustibles; pero ¿es posible obtener bioetanol a través de la degradación de residuos sólidos orgánicos de Chiriaco, utilizando una tecnología microbiana?, , para lograr esto nos hemos planteado como objetivo determinar la capacidad productiva de bioetanol a partir de los sólidos orgánicos en Chiriaco, utilizando como metodología la degradación microbiana.

II. MARCO TEÓRICO

1. Antecedentes Bibliográficos

Para el caso de la cascarilla de arroz, a nivel mundial la FAO reporta una producción de 607.000.000 Tm (Méndez, 2005) de arroz paddy en el año 2004, de los cuáles Colombia aportó 2.720.9081Tm (MADR y Agrocadenas, Arroz, 2005). Tomando en cuenta que la cascarilla representa un valor promedio del 20% del peso del grano (Ahumada y Rodríguez, 2006), se tendría una generación de residuo de 134.000.000 Tm y 544.182 Tm, a nivel mundial y de Colombia, respectivamente. Para el caso del departamento del Tolima anualmente se producen 152.622 Tm de cascarilla de arroz (Corporación C, 2006).

En cuanto a los subproductos de la industria de jugos cítricos (bagazo y cáscara), la FAO reporta que para el 2004 se tuvo una producción mundial de cítricos de 102,239,670 Tm (Bruno, 2008), de las cuáles Colombia aportó 305.000 Tm (MADR & Agrocadenas, Cítricos, 2005) y el Tolima 144.550 Tm (Corporación C, 2006); de esta cantidad de acuerdo a (Mamma et al., 2008), y suponiendo que el 50% de la producción total mundial, nacional y departamental se destine para esta industria se obtendría una generación de desechos de 25.559.918 Tm, 76.250 Tm, y 36.138 Tm respectivamente.

En lo que respecta a la agroindustria panelera, Colombia es el segundo productor mundial después de la India. En 1998 se cultivaron en Colombia 226.000 hectáreas, con una producción de 105.95 Tm de caña/Hectarea (Asocaña, 2007), es decir un total de 23.944.700 de Tm de caña los cuáles según Corpoica, et al. (1998), debieron arrojar 9.577.88 Tm de bagazo. Para el caso del departamento del Tolima en 2006 se produjeron 101516,39 Tm de caña (Corporación C, 2006), es decir 40.6 Tm de bagazo.

Debido a la tendencia mundial de buscar fuentes de energías renovables y no contaminantes, la empresa IMECAL S.A., junto con las empresas CIEMAT y FORD deciden incursionar en opciones alternativas de combustibles. En el año 2003 en l'Alcudia (valencia) nace el PROYECTO PERSEO, que consiste en generar bioetanol a partir de residuos orgánicos de la basura; a las empresas les pareció atractivo que la materia prima es de coste cero debido a que supone la retirada de un material de elevado impacto medio ambiental (Patrón y Rodríguez, 2014).

Después de un arduo trabajo por parte de científicos en diferentes áreas (biología, microbiología, química, ingeniería, entre otros) se finaliza la fase de laboratorio con resultados positivos obteniendo un proceso capaz de transformar los residuos orgánicos en la basura a bioetanol. En el año 2006 se construyó la planta piloto de demostración a nivel semi-industrial del proceso en las instalaciones de IMECAL S.A., con una capacidad para procesar 70 toneladas de residuos orgánicos por día (Patrón y Rodríguez, 2014).

La planta de demostración PERSEO tiene una capacidad de procesado en fermentación de hasta 70 tm/d de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (correspondiente a unas 140 toneladas de residuos sólidos urbanos), tratándose de una de las mayores plantas pilotos experimentales a nivel mundial¹⁰. La planta tiene la función de validar y demostrar el proceso de producción de bioetanol y su rentabilidad a escala semi-industrial, impulsando el desarrollo de un proceso de obtención de bioetanol tanto técnica, como económicamente viable y competitivo (Patrón y Rodríguez, 2014).

El trabajo de Arellano (2015) tuvo como objetivo generar bioetanol a partir de los residuos de la cáscara de *Jatropha curcas* y del *Pennisetum sp* sometidos a hidrólisis enzimática. La mayor concentración de etanol obtenida fue de 10.27 g/L a partir de las fibras pretratadas con álcali provenientes de la hidrólisis enzimática del *Pennisetum sp*, y 1.53 g/L de etanol para la cáscara de *Jatropha curcas*.

2. Bases Teóricas

2.1 Caracterización de subproductos de biomasa lignocelulósicos

2.1.1 Composición de materiales lignocelulósicos.

Compuestos principalmente de tres tipos diferentes de polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina (Fengel y Wegener, 1984), envueltos en una compleja estructura. Este tipo de materiales son los más abundantes en la naturaleza.

2.1.1.1 Celulosa.

Está conformada por subunidades de D-glucosa, unidas por b-1,4 glicosídicos (Fengel y Wegener, 1984), monosacárido de gran importancia en la fermentación. La celulosa posee dos estructuras una cristalina

(organizada) y otra amorfa. Las cepas de celulosa son “empaquetados” denominados fibrillas de celulosa. Estas fibrillas de celulosa son en su mayoría independientes y débilmente vinculados a través de uniones de hidrógeno (Laureano-Pérez et al., 2005).

2.1.1.2 Hemicelulosa.

Carbohidrato complejo y heterogéneo ya que su estructura posee diferentes polímeros como pentosas (como xilosa y arabinosa), hexosas (como manosa, glucosa y galactosa), azúcar y ácidos, entrelazadas entre sí glucosídicamente. Muchas de ellas, en la degradación hidrolítica, dan, junto a glucosa, manosa, galactosa, etc (Palacio, 1956). La hemicelulosa sirve de conexión entre la lignina y las fibras de celulosa y da toda la rigidez a la red de celulosa, hemicelulosa y lignina (Laureano-Pérez et al., 2005).

2.1.1.3 Lignina.

Heteropolímero amorfo que consta de tres diferentes unidades de fenilpropano (p-coumaril, coniferil y sinapil alcohol) que se mantienen unidos por diferentes enlaces. El heteropolímero amorfo no es soluble en agua y ópticamente inactivo; todo esto hace que la degradación de la lignina sea muy complicada (Fengel y Wegener, 1984).

2.2 Clases de microorganismos levadura, bacterias y hongos

Las investigaciones desarrolladas sobre este tema se han dirigido a la solución de distintas problemáticas. Por un lado se encuentra la capacidad natural de acción del microorganismo empleado (velocidad de procesamiento, temperatura óptima de trabajo, tipos de sustrato a emplear, entre otros factores), y el análisis de los inconvenientes que genera en la biomasa y en las etapas posteriores del proceso el tipo de pre-tratamiento dado a la biomasa y específicamente a su estructura. Por lo cual han recurrido a diferentes técnicas de mejoramiento de cepas (etanogénicas, termotolerantes, etc.), y al uso de distintas clases de microorganismos como bacterias, levaduras y hongos.

2.2.1 Bacterias empleadas en la fermentación.

Se han empleado bacterias de los géneros *Clostridium* (*sporogenes*, *indolicus*, *sphnoides*, *saccharobutyricum*, *Thermohydrosulfuricum* y *Thermocellum*), que degradan grandes cantidades de celulosa y otros polisacáridos. Otras bacterias empleadas son: *Zimomonas mobilis*, *Erwinia amilovora*, *Spirocheta aurantia*, *Streptococcus lactis*, *Spirocheta litorales* y *Spirocheta stenostrepta*, con resultados satisfactorios en cuanto a productividad. Igualmente, se han empleado bacterias modificadas genéticamente para la degradación tanto de hexosas como de pentosas, y con características de resistencia. Al respecto Patrouilleau et al. (2007, pág. 24) señalan las ventajas de emplear “la cepa bacteriana de la especie *Escherischia coli*, desarrollada y patentizada por la Universidad de Florida (EUA), que fermenta ambos tipos de azúcares; introducción de operones que codifican enzimas para la asimilación de xilosa y de la ruta de las pentosas fosfato en *Zymomona mobilis* (Zhang et al., 1995)”.

2.2.2 Levaduras empleadas en la fermentación.

Aunque más lentas en la ejecución del proceso de fermentación, las levaduras son los microorganismos de mayor uso en la producción de etanol, debido a su productividad, baja producción de inhibidores y facilidad de separación después de la fermentación. En dichos procesos se emplean levaduras de los géneros *Candida* (*seudotropicalis*), *Saccharomyces* (*ceresviceae*, *ellipsoideus*, *anamensisi*, *carlsbergensis*) y *Kluyveromyces marxianus* y *fragilis* (Krishna et al., 2001), que además de altas eficiencias, son capaces de trabajar a temperaturas superiores a los 40°C. Otras son *Candida bytyrii*, *Pichia stipitis*, *Schizosaccharomyces pombe* y *Pichia membranaefaciens*. Al igual que con las bacterias se han desarrollado investigaciones en las cuales se han modificado de alguna forma las especies originales de levadura. Una de dichas investigaciones dio lugar al desarrollo, en la Universidad Nacional de Colombia (2007), de una cepa de la especie *Kluyveromyces marxianus*, obtenida por mutagénesis química y posterior selección, capaz de fermentar la glucosa con buenos rendimientos, y otra ha sido citada por Patrouilleau et al. (2007, Pág. 24), quien señala “la introducción de plásmidos con genes de xilosa reductasa y xilitol deshidrogenasa

de *P. stipitis* en *Saccharomyces* spp. Para la co-fermentación eficiente de glucosa y xilosa”.

2.3 Biocombustibles

Se entiende por biocombustible aquellos combustibles que se obtienen de biomasa. El término biomasa, en el sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (el estiércol); el concepto de biomasa comprende productos tanto de origen vegetal como de origen animal. En la actualidad se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se origina a partir de la materia prima orgánica formada por vía biológica. Quedan por tanto fuera de este concepto los combustibles fósiles o los productos orgánicos derivados de ellos, aunque también tuvieron su origen biológico en épocas remotas. Hoy en día se pueden diferenciar distintos tipos de biomasa (Salinas y Gasca, 2009).

Figura 1. Tipos de biomasa

| Tipo de biomasa | Características |
|-----------------------------|---|
| Biomasa primaria | Es la materia orgánica formada directamente de los seres fotosintéticos. Este grupo comprende la biomasa vegetal, incluido los residuos agrícolas y forestales. |
| Biomasa secundaria | Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria. La constituyen la materia fecal o la carne de los animales |
| Biomasa terciaria | Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, por ejemplo los restos y deyecciones de los animales carnívoros que se alimentan de herbívoros. |
| Biomasa natural | Es la que producen los ecosistemas silvestres; 40% de la biomasa que se produce en la tierra proviene de los océanos. |
| Biomasa residual | La que se puede extraer de los residuos agrícolas y forestales, y de las actividades humanas. |
| Cultivos energéticos | Recibe esta denominación cualquier cultivo agrícola cuya finalidad sea suministrar la biomasa para producir biocombustibles. |

Los biocomponentes actuales proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas. El empleo de estos biocombustibles tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que sobrecalientan la superficie terrestre y aceleran el cambio climático. El uso de la biomasa para consumo energético reduce las emisiones de CO² en la atmósfera a diferencia del uso de hidrocarburos, lo que permite disminuir el impacto negativo que se tiene por parte de los combustibles fósiles sobre el cambio climático (Álvarez, 2009).

Los biocombustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo de los combustibles fósiles tradicionales, como el petróleo y el carbón; este tipo de combustible se encuentra casi siempre en forma líquida y se usa para accionar los motores de combustión del transporte terrestre. Los biocombustibles más desarrollados y usados son el bioetanol y el biodiesel; otras alternativas son el biopropanol y el biobutanol, que son hasta ahora menos populares (Friedmann y Penner, 2009).

El bioetanol es un biocombustible de origen vegetal que se produce a partir de la fermentación de materia orgánica rica en azúcar así como de la transformación en azúcar del almidón; como fuente de glucosa se utilizan materiales muy diversos. Grano de maíz, caña de azúcar, celulosa de la madera, sorgo, patatas, trigo e incluso residuos vegetales ricos en fibras son los materiales más comúnmente empleados. El bioetanol se utiliza en motores de explosión como aditivo o sustitutivo de la gasolina. La producción de bioetanol se basa en un proceso bien conocido: la fermentación alcohólica (Gracia, 2008).

De esta forma, los biocombustibles aparecen como una fuente de energía alternativa que puede usarse en el caso de que los precios de los hidrocarburos se eleven demasiado o en un horizonte de largo plazo en que se agoten. Una segunda finalidad en su uso es que contribuyen a frenar el calentamiento global, ayudando a reducir las emisiones de CO₂. Sin embargo, los cultivos energéticos de maíz, caña de azúcar, sorgo o soya, implican darle un uso alternativo al alimentario y esto es lo que ha generado una gran polémica (Salinas y Gasca, 2009).

2.4 Biocombustibles de fuentes lignocelulósicas

2.4.1 Estudio del material lignocelulósico.

a. Definición

La lignocelulosa es un sustrato complejo, formado por una combinación de polisacáridos de la celulosa y lignina. Es el principal componente de la pared celular de las plantas, cuyas proporciones varían en función del tipo de biomasa (Cuervo, et al, 2011).

Este tipo de material presenta un elevado potencial para la producción de bioetanol debido a su alto contenido de celulosa, y está presente en residuos agrícolas y forestales, tales como: caña de azúcar, algodón, bambú, cáscara de arroz, maíz, trigo, cebada, plátano, entre otros (Barba, 2014).

b. Composición

El material lignocelulósico está constituido por polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y pectinas), compuestos fenólicos (lignina) y compuestos minoritarios (minerales, lípidos y proteínas).

b.1. Polisacáridos. Los polisacáridos están compuestos por carbohidratos de alto peso molecular (celulosa y hemicelulosa), que representan entre el 60 y 80% del total del material lignocelulósico (Oliva, 2013).

Celulosa: Es un homopolímero lineal de elevado peso molecular, constituido por cadenas lineales de celobiosa1 (D-glucopiranosil- β -1,4-D-glucopiranososa); presenta entre 200 y 10 000 unidades de glicosídicas en celulosa nativa, aunque este número varía según el tipo de material lignocelulósico. El enlace glicosídico se forma por la reacción del grupo –OH hemiacetálico del carbono anomérico de la β -D-glucopiranososa con el grupo –OH del carbono 4 de otra β -Dglucopiranososa (Barroso, 2010).

Figura 2. Unidad de celobiosa

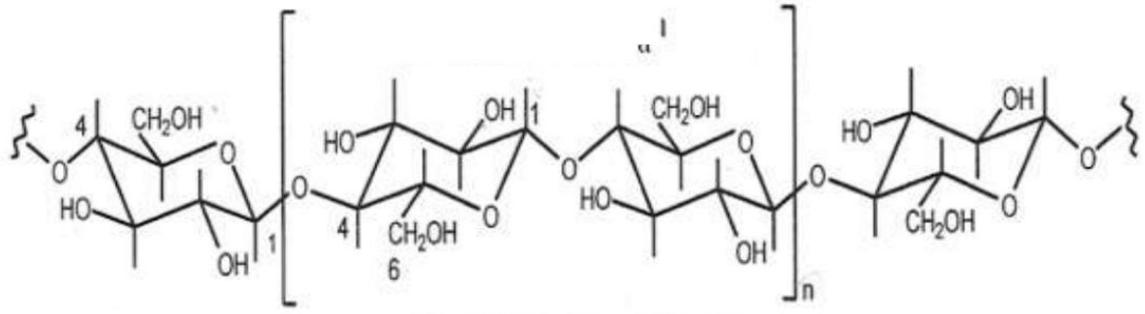
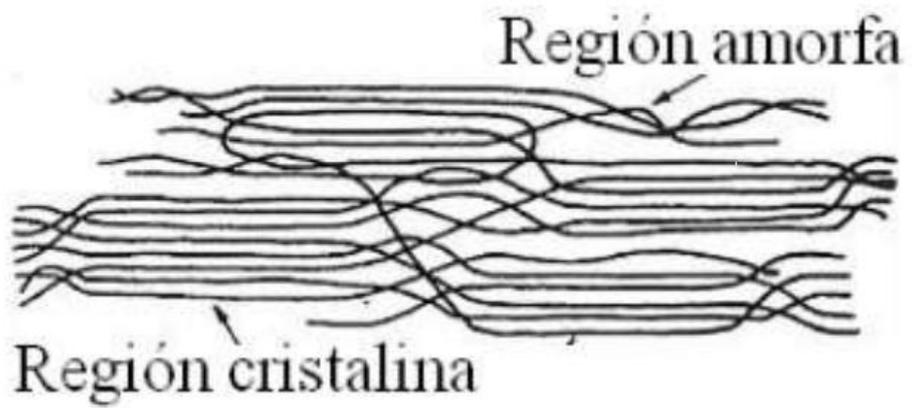


Figura 3. Regiones de las fibras elementales

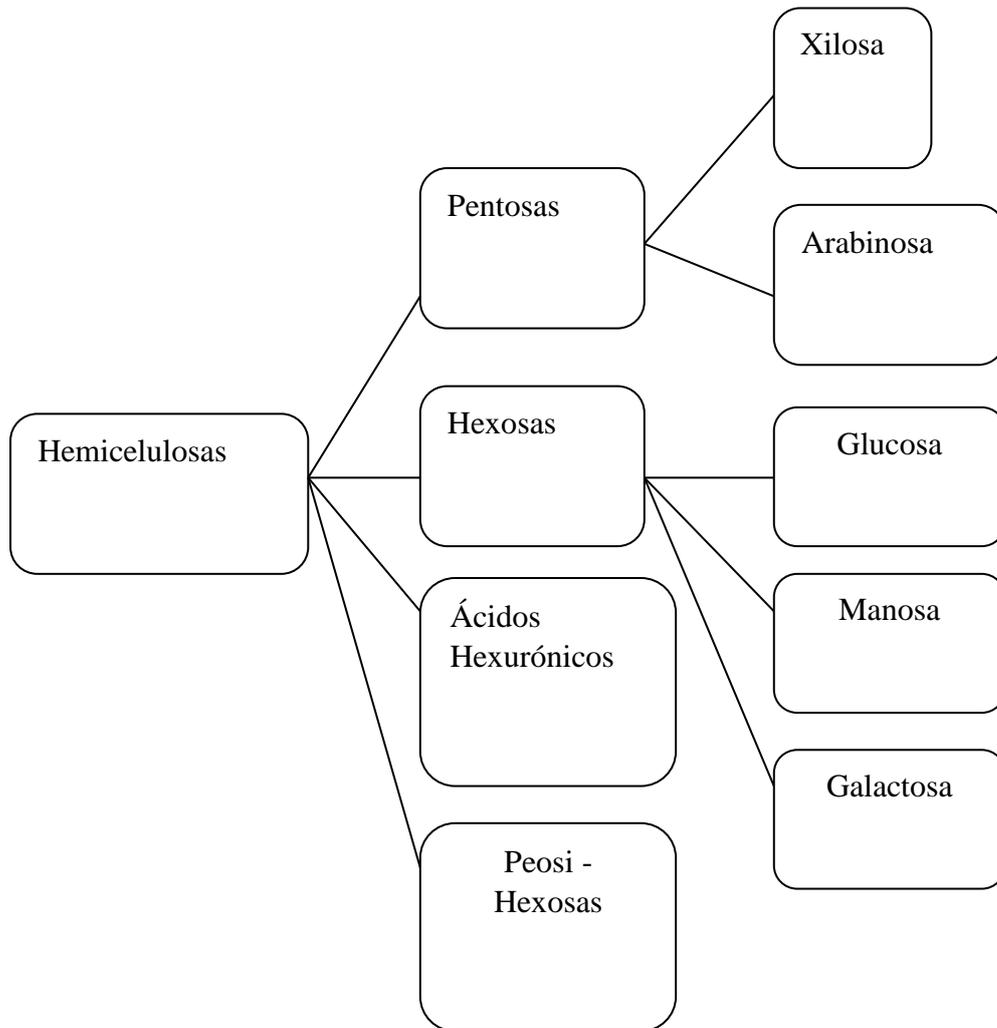


Desde un punto de vista macro, cada una de las hebras de celulosa está enlazada a otras, mediante puentes de hidrógeno, formando una estructura supramolecular semi cristalina, dándole características de insolubilidad. El hecho de que los grupos –OH salgan lateralmente, permitiendo las uniones inter e intramoleculares da lugar a las fibras elementales o misceláneas, las cuales poseen zonas amorfas que le confieren elasticidad y zonas de estructura cristalina que le confieren la resistencia a la celulosa. La presencia de regiones amorfas permite una mejor penetración de reactivos químicos.

- **Hemicelulosa:** La hemicelulosa está constituida por polímeros de unidades de anhidro azúcares, unidos por enlaces glucosídicos.

Estos polímeros están constituidos por cinco monosacáridos: glucosa, manosa, galactosa, xilosa y arabinosa. Además de monómeros, la hemicelulosa presenta derivados de las osas como los ácidos hexurónicos y deoxi-hexosas (ver Figura 4).

Figura 4. Composición de la hemicelulosa



Las hemicelulosas pueden ser clasificadas de acuerdo a su estructura, en diferentes polisacáridos: xilanos, mananos, β -glucanos y xiloglucanos.

Los xilanos son el principal componente de la hemicelulosa, y representa alrededor del 20- 30% del residuo agrícola. Son heteropolímeros, formados por una cadena de xilasas unidas por medio de un enlace β -1,4-glucosídico, uniéndose a pequeñas cadenas de carbohidratos.

Los xiloglucanos consisten en una cadena principal de β - (1,4)-D-glucopiranosas. Hasta un 75% de las unidades de glucopiranosas pueden estar ramificadas con un monosacárido u oligosacárido; este grado de ramificación determina el grado de bioconversión de este tipo de hemicelulosa. La función principal de la hemicelulosa es mantener una interacción con la celulosa y lignina, para proporcionar rigidez a la pared celular (Prinsen, 2010).

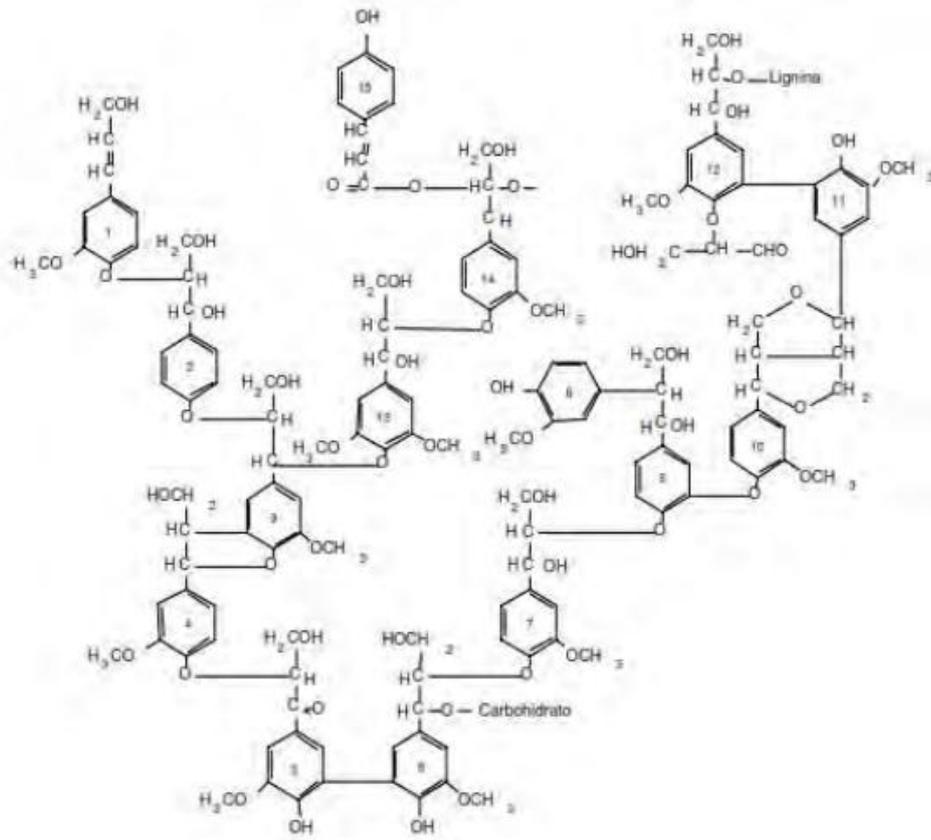
b.2. Lignina: La lignina es un polímero tridimensional amorfo altamente ramificado, formado por la polimerización deshidrogenativa de unidades de fenilpropano ligadas por diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada.

Se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato) del que existen muchos polímeros estructurales (ligninas); además es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce.

Proporciona rigidez a la pared celular, creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. Los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular (Oliva, 2013).

- Estructura química de la lignina: La molécula de lignina es una macromolécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). Es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogeneidad (ver Figura 4). Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina; sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan una “aproximación” de dicha estructura.

Figura 5. Estructura molecular de la lignina



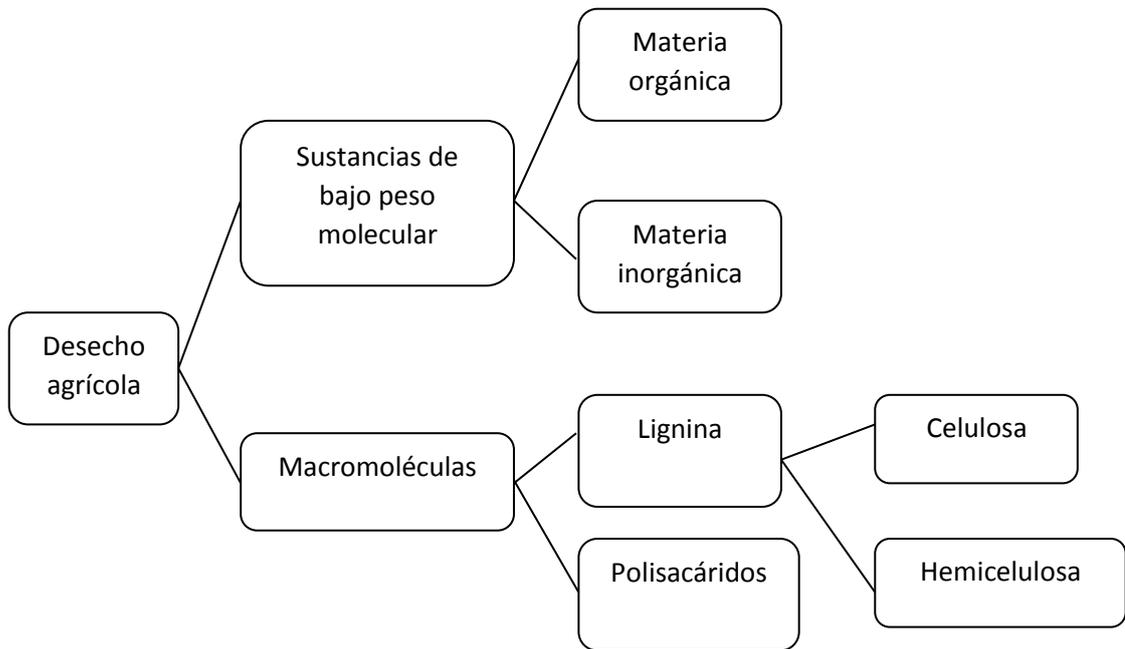
- Propiedades físicas de la lignina: El grado de lignificación afecta notablemente a la digestibilidad de la fibra. La lignina, que aumenta de manera ostensible en la pared celular de la planta con el curso de la maduración, es resistente a la degradación bacteriana, y su contenido en fibra reduce la digestibilidad de los polisacáridos fibrosos. La biodegradación de la lignina puede ser dividida en dos procesos:
 - La separación de las cadenas que están conectadas a las unidades monoméricas, resultando una despolimerización de la lignina.
 - La ruptura de los anillos aromáticos del polímero de lignina.

b.3. Otras sustancias. Entre las diversas sustancias que constituyen los materiales lignocelulósicos se encuentran: compuestos orgánicos, grasas, ceras, alcaloides, proteínas, fenoles simples y complejos, azúcares simples, pectinas, mucílagos, gomas, resinas, terpenos, entre otros. Estas sustancias desempeñan la función de intermediarios metabólicos, reservan la energía, contribuyen al color, olor y a la resistencia al marchitamiento.

c. Características y propiedades de los residuos lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos poseen una alta cantidad de agua, aproximadamente el 80% del peso en fresco.

Figura 6. Componentes típicos de los desechos agrícolas



- La pared celular de las plantas está constituida por el entramado de microfibras ya mencionadas (celulosa, hemicelulosa y lignina).
- La lignina y hemicelulosa se encuentran entretejidas con la celulosa formando una especie de barrera natural lo que dificulta el acceso de enzimas a las largas cadenas de glucanos.
- El principal impedimento tecnológico para la utilización de la biomasa vegetal es la ausencia de una tecnología de bajo costo dirigida a la recalcitrancia de la celulosa.
- La celulosa es el principal componente estructural del material lignocelulósico, con cerca del 50% del material; encargada de dar la alta resistencia a los ataques químicos y a la tracción mecánica, lo que dificulta las operaciones unitarias a las que puede ser sometido el material lignocelulósico.
- Los polisacáridos le confieren al material lignocelulósico un alto contenido energético, por tal motivo en la actualidad se están realizando diversos estudios con el fin de convertir esta biomasa en energía aprovechable para el hombre.

2.5 Procesos de producción de Bioetanol

El bioetanol es un alcohol y su mayor parte se fabrica siguiendo un procedimiento similar al de la cerveza, en el que los almidones son convertidos en azúcares, los azúcares se convierten por fermentación en etanol, el que luego es destilado en su forma final (Rodríguez y Cárdenas, 2009).

El bioetanol es un combustible obtenido del azúcar o almidón de campos de cosechas principalmente de maíz y caña de azúcar, que poco a poco se ha perfilado como un recurso energético que ofrece ventajas ambientales y económicas, siendo potencialmente sostenible comparado con los combustibles fósiles. Sin embargo, se han estudiado diferentes materias primas de las cuales también es posible obtener este combustible. Dentro de los procesos de obtención más comunes de bioetanol son:

- a. Directamente a partir de la biomasa azucarada de productos agrícolas como: Caña de azúcar, Remolacha, Melazas, Sorgo dulce.

- b. Mediante hidrólisis convencional (moderada y enzimática) de biomasa amilácea, productos agrícolas ricos en almidón, tales como: Maíz, Patata, Yuca
- c. Mediante hidrólisis fuerte (ácida o enzimática) de biomasa lignocelulósica, productos agrícolas que contienen celulosa, como son: madera, Residuos agrícolas.

El proceso a partir de almidón es más complejo que a partir de sacarosa porque el almidón debe ser hidrolizado previamente para convertirlos en azúcares. Para ello se mezcla el vegetal triturado con agua y con una enzima y se calienta la papilla obtenida a 120 - 150°C. Luego se cuele la masa, en un proceso llamado escarificación, y se envía a los reactores de fermentación (Castro et al., 2012).

A partir de celulosa es aún más complejo porque primero hay que pre-tratar la materia para que la celulosa pueda actuar con enzimas hidrolizantes. El pre-tratamiento consiste en una combinación de trituración, pirólisis y ataque con ácidos y otras sustancias. A partir de lo anterior se explica por qué el rendimiento del etanol es alto en los procesos de fermentación para la caña de azúcar, medio para el maíz y muy bajos para la madera. Para ello también cabe resaltar que la eficiencia de la caña de azúcar es probada, si bien con una tonelada de remolacha se pueden producir 120 litros de alcohol ó 180 litros con la misma cantidad de yuca, y con la caña apenas 75 litros, la cosecha de ésta es permanente a lo largo del año, mientras la de los otros productos no (Chandel y Singh, 2011).

2.6 Proceso de producción de etanol a partir de la biomasa lignocelulósica

De acuerdo a la estructura de la biomasa lignocelulósica debe ser procesada cada fracción de la misma por separado con el fin de asegurar una conversión eficiente de este tipo de materiales a etanol. La primera fracción de la celulosa está conformada por cadenas de glucosa unidas por enlaces beta y que a su vez se agrupan en estructuras superiores lo cual puede dificultar su conversión a azúcares fermentables. No obstante, en el momento en que se produzcan azúcares más simples se puede fermentar sin problema (Almenares y Serrat, 2008).

La segunda fracción es la hemicelulosa, formada por polímeros de azúcares lo cual la convierte fácilmente como hidrolizable ya que no presenta estructura cristalina; sin

embargo, es un azúcar difícil de fermentar a etanol. Finalmente la tercera fracción de la biomasa es la lignina la cual es un polímero tridimensional ligada por enlaces éster y carbono-carbono (C-C) (Rodríguez y Cárdenas, 2009).

Luego de realizar la separación de la lignina se procede a la hidrólisis mediante el cual se consigue aflorar los azúcares, glucosa y/o fructosa, que formarán parte del mosto azucarado con alto contenido de almidón, además se puede realizar por dos métodos bien sea enzimática o ácida. Los procesos de obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica que utilizan catalizadores ácidos permiten, en condiciones adecuadas de presión y temperatura, una solubilización de la hemicelulosa y la celulosa, quedando prácticamente inalterada la lignina (Almenares y Serrat, 2008).

Los métodos de hidrólisis ácida de la fracción celulósica se agrupa en dos tipos: los que emplean ácidos concentrados y bajas temperaturas y los que utilizan ácidos diluidos a temperaturas más altas. Estos métodos al utilizar ácidos concentrados registran altos rendimientos de hidrólisis. Por otro lado, los procesos de hidrólisis de celulosa utilizando ácidos diluidos, son los más utilizados seguido al proceso de percolación, en el que el ácido pasa a través del material (Oliva, 2013).

En los procesos ácidos se pueden presentar algunos problemas, para ello es necesario utilizar una hidrólisis enzimática. Por lo cual, es ineludible realizar un pretratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante explosión a vapor, que altere la compleja estructura de este tipo de materiales, y de la misma forma facilitando la acción de las enzimas celulolíticas (Rodríguez y Cárdenas, 2009).

Durante este proceso de obtención de etanol a partir de la biomasa lignocelulósica también se pueden utilizar levaduras termotolerantes, especialmente la denominada *Kluyveromyces marxianus* obtenida mediante mutagénesis química, capaz de fermentar la glucosa que proviene de la hidrólisis de la celulosa, con buenos rendimientos (Rodríguez y Cárdenas, 2009). Al emplear esta levadura permite realizar la hidrólisis y la fermentación a 42°C, temperatura cercana al óptimo del complejo celulolítico. Lo cual influye en una reducción importante frente a otras tecnologías debido al tiempo de residencia.

Finalmente, en este proceso se llevan a cabo las dos etapas de fermentación y destilación como se describieron en los pasos de obtención a partir de la caña y del maíz. La deshidratación de etanol se realiza con fines carburantes, proceso más utilizado en el mundo. En el desarrollo de técnicas para deshidratar el etanol se encuentran algunas como la destilación al vacío, azeotrópica y extractiva, entre otras (Rodríguez y Cárdenas, 2009).

Sin embargo, una de las más utilizadas en la industria es la destilación extractiva, a causa de los bajos consumos energéticos que acarrea esta operación acompañados de los competentes costos de inversión inicial y de operación (Oliva, 2013).

2.6.1 Equipo de extracción continua con soxhlet.

El extractor Soxhlet o simplemente Soxhlet (en honor a su inventor Franz von Soxhlet) es un tipo de material de vidrio utilizado para la extracción de compuestos, generalmente de naturaleza lipídica, contenidos en un sólido, a través de un disolvente afín.

El condensador está provisto de una chaqueta de 100 mm de longitud, con espigas para la entrada y salida del agua de enfriamiento. El extractor tiene una capacidad, hasta la parte superior del sifón, de 10 mL; el diámetro interior del extractor es de 20 mm y su longitud de 90 mm. El matraz es de 500 mL capacidad.

Está conformado por un cilindro de vidrio vertical de aproximadamente un pie de alto y una pulgada y media de diámetro. La columna está dividida en una cámara superior y otra inferior. La superior o cámara de muestra sostiene un sólido o polvo del cual se extraerán compuestos. La cámara de disolvente, exactamente abajo, contiene una reserva de disolvente orgánico, éter o alcohol.

Dos tubos vacíos, o brazos, corren a lo largo a un lado de la columna para conectar las dos cámaras. El brazo de vapor corre en línea recta desde la parte superior de la cámara del disolvente a la parte superior de la cámara del sólido. El otro brazo, para el retorno de disolvente, describe dos U sobrepuestas, que llevan

desde la cámara de la muestra el disolvente hasta la cámara de disolvente. El soxhlet funciona cíclicamente, para extraer las concentraciones necesarias de algún determinado compuesto.

Éste funciona de la siguiente forma: Cuando se evapora, el disolvente sube hasta el área donde es condensado; aquí, al caer y regresar a la cámara de disolvente, va separando los compuestos hasta que se llega a una concentración deseada.⁴ Esto puede ocasionar problemas con algunos compuestos, que con los ciclos llevan a la ruptura del balón, como lo es en la extracción del ámbar.

Imagen 1. Extractor soxhlet



2.7 Parámetros de producción de alcohol

El etanol, o alcohol etílico, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_6O , que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto) de dos maneras, básicamente: una primera mediante su uso en mezclas de gasolina y etanol anhidro y una segunda como etanol puro, generalmente anhidro (Rodríguez y Cárdenas, 2009).

Los parámetros de producción de alcohol en el proceso realizado, fueron en condiciones anaeróbicas, con un pH de 5 y una temperatura de $30^{\circ}C$ en un tiempo de 6 días. Además, el proceso no considero movimiento de ningún tipo durante la fermentación.

Tabla 1

Propiedades principales de la gasolina y del etanol

| Parámetros | Unidades | Gasolina | Etanol |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Poder calorífico interior | Kl/kg | 43.500 | 28.225 |
| | KJ/litro | 32.180 | 22.350 |
| Densidad a 15 °C | Kl/litro | 0,72-0,75 | 0,792 |
| Octanaje RON | Kg/litro | 95 | 102-130 |
| Octanaje MON | - | 85 | 89-96 |
| Calos latente de vaporización | - | 330-400 | 842-930 |
| Relación aire/ combustible estequiometrica | Kl/kg | 14,5 | 9,0 |
| Presión de vapor | kpa | Verano:45-60 | 15-17 |
| | | Invierno: 50-80 | |
| Temperatura ignición | °C | 220 | 420 |
| Solubilidad en agua | % volumen | -0 | 100 |

2.8 Usos del alcohol

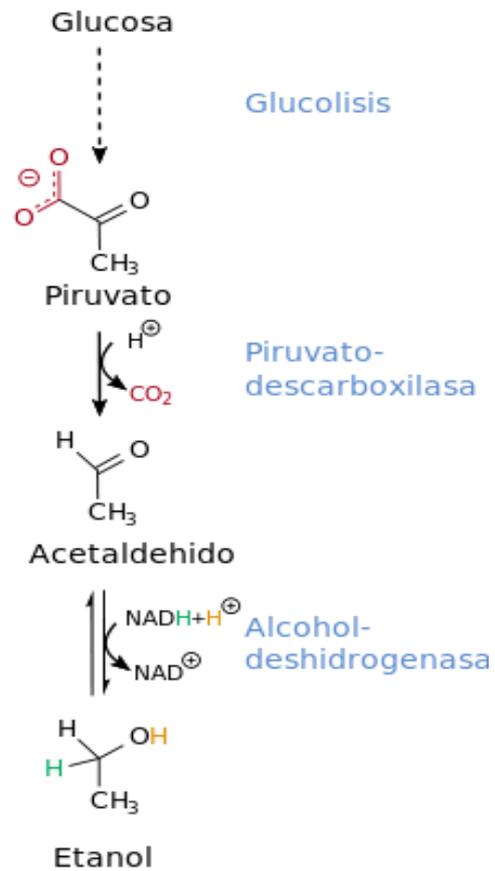
El etanol tiene muchos usos en la industria, pero los principales usos y los más conocidos actualmente son los del etanol como combustible de los vehículos automotores y como ingrediente para las bebidas alcohólicas. Además se usa también en el sector farmacéutico como excipiente de algunos medicamentos y cosméticos (es el caso del alcohol antiséptico 70° GL y en la elaboración de ambientadores y perfumes) (Rodríguez y Cárdenas, 2009).

2.9 Etapas fermentativas del alcohol y parámetros

2.9.1 Etapas fermentativas del alcohol.

La fermentación alcohólica es un proceso biológico de fermentación en plena ausencia de aire (oxígeno - O₂), originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidratos de carbono (por regla general azúcares: como por ejemplo la glucosa, la fructosa, la sacarosa, sirve con cualquier sustancia que tenga la forma empírica de la glucosa, es decir, que sea una Hexosa.) para obtener como productos finales: un alcohol en forma de etanol (cuya fórmula química es: CH₃-CH₂-OH), dióxido de carbono (CO₂) en forma de gas y unas moléculas de ATP que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico.

Figura 7. Etapas de la Fermentación alcohólica



2.9.2 Parámetros de la fermentación alcohólica.

La determinación de los parámetros que limitan la glucólisis fermentativa del etanol son complejos debido a la interrelación existente y a la naturaleza de los parámetros intervinientes durante el proceso de fermentación. Algunos de ellos se deben tener en cuenta en la fermentación alcohólica industrial. En las limitaciones que surgen durante el proceso se pueden enumerar algunos de los más importantes como son:

a. Concentración de etanol resultante.

Una de las principales limitaciones del proceso, es la resistencia de las levaduras a las concentraciones de etanol (alcohol) que se llegan a producir durante la fermentación, algunos microorganismos como el *saccharomyces cerevisiae* pueden llegar a soportar hasta el 20% de concentración en volumen.²⁰ En ingeniería bioquímica estos crecimientos se definen y se modelizan con las ecuaciones de crecimiento celular dadas por las ecuaciones de Tessier, Moser y de la ecuación de Monod.

b. Acidez del substrato.

El pH es un factor limitante en el proceso de la fermentación ya que las levaduras se encuentran afectadas claramente por el ambiente, bien sea alcalino o ácido. Por regla general el funcionamiento de las levaduras está en un rango que va aproximadamente desde 3.5 a 5.5 pH. Los procesos industriales procuran mantener los niveles óptimos de acidez durante la fermentación usualmente mediante el empleo de disoluciones tampón. Los ácidos de algunas frutas (ácido tartárico, málico) limitan a veces este proceso.

c. Concentración de azúcares.

La concentración excesiva de hidratos de carbono en forma de monosacáridos y disacáridos puede frenar la actividad bacteriana. De la misma forma la baja concentración puede frenar el proceso. Las concentraciones límite dependen del tipo de azúcar así como de la levadura responsable de la

fermentación. Las concentraciones de azúcares afectan a los procesos de osmosis dentro de la membrana celular.

d. Contacto con el aire.

Una intervención de oxígeno (por mínima que sea) en el proceso lo detiene por completo (es el denominado **Efecto Pasteur**). Esta es la razón por la que los recipientes fermentadores se cierran herméticamente.

e. La temperatura.

El proceso de fermentación es exotérmico, y las levaduras tienen un régimen de funcionamiento en unos rangos de temperatura óptimos, se debe entender además que las levaduras son seres mesófilos. Si se expone cualquier levadura a una temperatura cercana o superior a 55 °C por un tiempo de 5 minutos se produce su muerte. La mayoría cumple su misión a temperaturas de 30 °C.

f. Ritmo de crecimiento de las cepas.

Durante la fermentación las cepas crecen en número debido a las condiciones favorables que se presentan en el medio, esto hace que se incremente la concentración de levaduras.

2.10 Degradación de residuos sólidos orgánicos

La mayoría de microorganismos celulolíticos como *Trichoderma sp*, *Sporotrichum sp*, *Penicillium sp*, y *Aspergillus sp*, son capaces de producir tanto celulasas como xilanasas. La producción microbiana de estas enzimas está sujeta a diferentes mecanismos de regulación que han sido estudiados durante décadas, encontrándose diversas condiciones de elaboración y propiedades finales. Las celulasas son enzimas de acción hidrolítica, derivadas de procesos naturales de fermentación, que presentan un enorme potencial para convertir la lignocelulosa en glucosa y azúcares solubles. Participan en el rompimiento de los enlaces glicosídicos β -1,4 presentes en la celulosa. Una enzima celulasa es una mezcla de diversos componentes enzimáticos, que forman lo

que se denomina un complejo enzimático, que actúa de forma sinérgica en la degradación de la celulosa. Este complejo presenta por lo menos tres actividades diferentes, que a su vez existen en una multiplicidad de formas para llevar a cabo la hidrólisis total de la celulosa (Escalante y Fuentes, 2013).

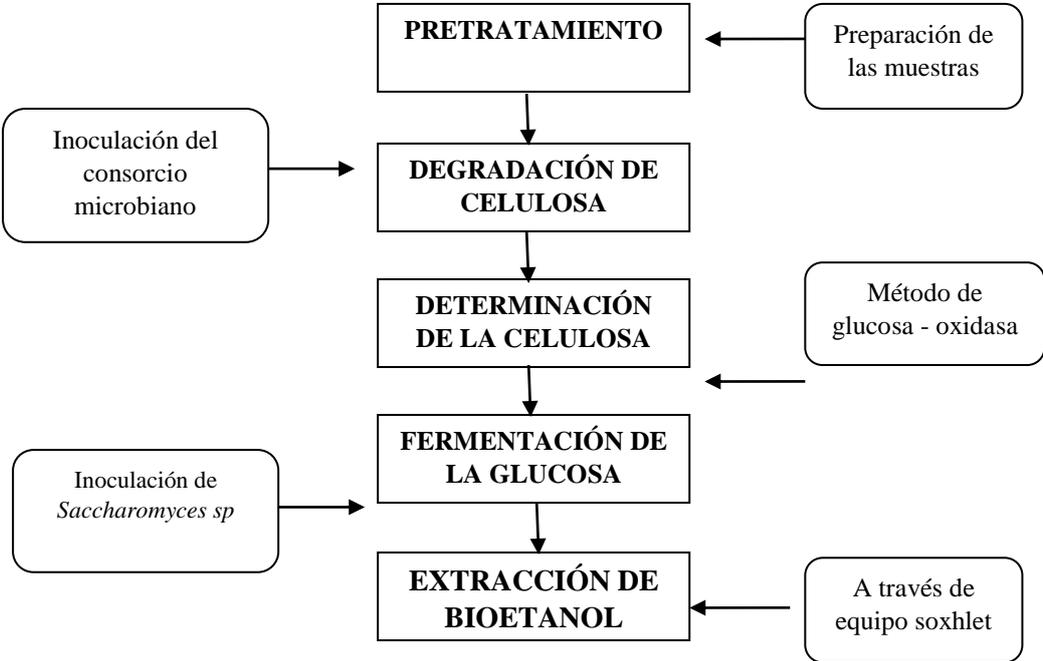
La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que contiene papel, vegetales, alimentos y madera, y sus derivados compostados, se catalogan por su composición como material lignocelulósico. Estos residuos poseen polisacáridos de origen celulósico y hemicelulósico, y una considerable proporción de ligninas. Este material de desecho, generalmente finaliza acumulándose en vertederos. El bioetanol obtenido de éstos residuos tiene las mismas características y composición química que el etanol ya que se trata del mismo compuesto. La diferencia radica en su proceso de producción y la metodología de diseño (Patrón y Rodríguez, 2014).

El aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos genera un alto impacto ambiental positivo en países en vías de desarrollo por lo tanto, la contribución en el manejo de estos residuos para generar productos de valor agregado permitirá generar opciones de aprovechamiento que aporten al desarrollo no dependiente de hidrocarburos de estos países. Los residuos sólidos orgánicos son abundantes en nuestra región latinoamericana, representando la fracción de mayor porcentaje de RSU. Tan solo una mínima parte de ellos es empleada y valorizada; por ello, es vital desarrollar nuevos procesos y crear nuevas cadenas productivas (Martínez, Montoya y Sierra, 2014).

2.11 Diagrama de bloques del proceso

Las fases del proceso para la obtención de bioetanol extraídos de la degradación de los residuos sólidos orgánicos fueron las que se muestran en el siguiente diagrama:

Esquema 1. Diagrama del proceso de obtención de bioetanol



2.12 Descripción del centro poblado de Chiriaco

2.12.1 Aspectos Generales.

a. Ubicación geográfica.

El distrito de Imaza es uno de los seis distritos de la Provincia de Bagua, ubicada en el departamento de Amazonas en el norte del Perú.

Está ubicado entre las coordenadas 5°09'36" latitud sur y 78°17'20" longitud oeste. La capital del distrito de Imaza es Chiriaco.

b. Límites.

El distrito de Imaza limita por el norte y por el este con la provincia de Condorcanqui; por el sur con la provincia de Utcubamba y el distrito de Aramango y por el oeste con el departamento de Cajamarca y en corto trecho con el Ecuador.

2.12.2 Aspectos ambientales.

a. Climatología.

La zona climática a la que pertenece el distrito de Imaza es tropical donde las temperaturas promedio llegan a 30 °C. Está caracterizada por la presencia continua de precipitaciones anuales de unos 3,500 mm con una humedad relativa de 95%.

b. Hidrografía.

El distrito de Imaza está ubicado en una región particular donde las condiciones climáticas e hidrográficas ilustran áreas de diferentes cuencas hidrográficas que se nutren y mantienen su caudal gracias a la masa vegetal ubicada en la cabecera de las cuencas.

El río principal de la región Amazonas es el Marañón, navegable en pequeñas embarcaciones, a partir del puerto de Imacita en el distrito de Imaza. La gran mayoría de los ríos que cruzan el departamento de Amazonas pertenecen a la cuenca del río Marañón, que atraviesa la región con una dirección Norteste.

El río Chiriaco es un afluente del río Marañón, por su margen derecha. El valle del Chiriaco presenta un doblamiento en la parte de Jumbilla. Más al norte este río toma el nombre de río Nieva, y es otro afluente importante. El valle que forma el río Chiraco constituye una zona agropecuaria de gran potencialidad.

2.12.3 Aspectos sociales y económicos.

a. Población.

De acuerdo al INEI Censo 2007, el distrito de Imaza cuenta con una población total de 21409 habitantes, representando la población rural un considerable porcentaje de 87% con 18611 habitantes, mientras que la población urbana cuenta con 2798 habitantes que representa el 13%.

b. Vivienda.

En el distrito de Imaza, existen 4,676 viviendas en total, distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 2
Cantidad de viviendas en el distrito

| Tipo de área | Cantidad de viviendas | Porcentaje |
|---------------------|------------------------------|-------------------|
| Urbano | 655 | 14.01% |
| Rural | 4,021 | 85.99% |
| Total | 4,676 | 100.00% |

Fuente: INEI- Censo Nacional 2007: XI de Población y VI de Vivienda

2.12.4 Caracterización de residuos sólidos de Chiriaco.

La Municipalidad Distrital de Imaza cuenta con un estudio de caracterización de residuos sólidos realizado en el mes de junio del 2016. Dicho estudio determinó que la GPC de residuos sólidos domiciliarios para el distrito es de 0.53 Kg/hab/día con una generación diaria de 2.34 ton/día de residuos sólidos municipales (domiciliarios y comerciales). Este dato refleja la cantidad de residuos sólidos que la municipalidad debe gestionar, tal como lo muestra el Tabla 2.

Es importante mencionar que del total de residuos generados en el distrito de Imaza, el 19.93% son residuos inorgánicos que tienen potencial para ser reutilizados o tienen valor económico en el mercado por ser reciclables.

Existe un porcentaje importante del 70.45% que constituye el porcentaje de residuos orgánicos generados que podrían ser aprovechados para la elaboración de abono orgánico como mejorador de los suelos. Este porcentaje total que suma el 90.39% tiene posibilidades de ser recuperado y solo el 9.61% debe ir a un relleno sanitario.

La capacidad de producción de bioetanol será determinada de acuerdo al rendimiento que se obtenga de etanol, tal y como refiere Martínez, Montoya y Sierra (2014), quienes indican que en 1 Tonelada de residuos orgánicos se pueden obtener 15 litros de bioetanol, refiriéndose a la capacidad de producción de bioetanol a través de residuos sólidos orgánicos generados.

3. Definición de Términos Básicos

3.1 Capacidad de producción: la capacidad de producción determina los factores como tiempo, unidades, recursos que serán utilizados en la transformación de materiales u objetos en un periodo de tiempo determinado, teniendo en cuenta la demanda del mercado, la suficiencia y la disponibilidad de los recursos físicos e intangibles de la empresa.

3.2 Residuos Sólidos orgánicos: Son residuos sólidos aquellas sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido de los que su generador

dispone, o está obligado a disponer, en virtud de lo establecido en la normatividad nacional o de los riesgos que causan a la salud y el ambiente. Todos los restos de verduras (no cocidas), frutas, plantas, árboles, flores, hojas de árboles y plantas, cáscaras de frutas, papas, nueces, huevos, maní y cuescos se pueden reciclar haciendo “compost”: abono ecológico súper nutritivo (Ley N° 27314).

3.3 Bioetanol: El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo o biomasa (Guerra et al., 2008).

3.4 Capacidad de producción: El rendimiento obtenido en (%) en la obtención de Bioetanol a través de la degradación de residuos sólidos en Chiriaco, se llega a la conclusión que los residuos Orgánicos vegetales tienen un rendimiento más uniforme que los restos orgánicos de cocina.

4. Hipótesis

Utilizando una metodología microbiana es posible determinar la capacidad de producción de bioetanol de los residuos sólidos orgánicos de Chiriaco.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Variables y Operacionalización de Variables

- a) **Variable Independiente:** Residuos sólidos orgánicos
- b) **Variable Dependiente:** Bioetanol

La operacionalización de variables se muestra en el siguiente Tabla:

2. Tipo de estudio y diseño de investigación

El diseño de la investigación es experimental, porque se realizó la medida del potencial en la producción de bioetanol de dos tipos de residuos orgánicos domiciliarios aplicándoles métodos biotecnológicos.

3. Población y muestra en estudio

- 3.1 **Población.** todos los residuos orgánicos que se producen en la ciudad de Chiriaco
- 3.2 **Muestra.** residuos sólidos orgánicos domiciliarios que ingresaron al proceso biotecnológico para la producción de bioetanol, 1 kg por repetición.
- 3.3 **Muestreo.** el residuo sólido orgánico domiciliario se obtuvo de tres viviendas que participaron de manera voluntaria de donde se recolectó durante tres días los residuos sólidos que constituyeron al mismo tiempo las repeticiones.
- 3.4 **Descripción de la muestra a seleccionar.** el residuo sólido orgánico domiciliario está constituido por dos tipos:
 - a. *Residuo sólido orgánico domiciliario proveniente de cocina* como por ejemplo: cascará de frutas, verduras y otros, el cual fue lo más fresco posible y no fue afectado por ningún tipo de degradación microbiológica.

Residuo sólido orgánico domiciliario de tipo vegetal diverso, como por ejemplo: restos de pastos, ramas, hojas, etc, el cual fue lo más fresco posible y no fue afectado por ningún tipo de degradación microbiológica

Tabla 3

Operacionalización de variables

| Variable independiente | Criterio | Indicador | Unidad de análisis | Instrumento |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Residuos sólidos orgánicos | Tipo | Peso fresco de residuos orgánicos | Muestras de residuos orgánicos | Biodegradación microbiana |
| Variable dependiente | Criterio | Indicador | Unidad de análisis | Instrumento |
| Bioetanol | Capacidad de producción | Volumen | Muestra de bioetanol obtenido | Destilación |

4. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.1 Metodología

4.1.1 Trabajo de campo.

Se seleccionó el domicilio que voluntariamente aportó los residuos sólidos orgánicos domiciliarios para el presente trabajo de investigación.

De la vivienda seleccionada se recolectó los residuos sólidos orgánicos de los dos tipos durante tres días, lo que al mismo tiempo constituye las repeticiones del experimento; la muestra a recolectar fue de 1 kg por cada tipo de residuo sólido orgánico domiciliario y por día.

Esta muestra obtenida se guardó en un ambiente seco, y se trasladó inmediatamente al laboratorio para su procesamiento.

4.1.2 Trabajo de laboratorio.

a. Pretratamiento

Para la preparación del material lignocelulósico, los residuos orgánicos domiciliarios de ambos tipos fueron seccionados en trozos pequeños utilizando una cuchilla debidamente desinfectada a fin de uniformizar la muestra, la cual se colocó en un recipiente con agua durante 6 días para eliminar parte de la lignina y sobre - hidratar la muestra. Esta muestra hidratada, se decantó y el residuo sólido separado en un recipiente para su posterior tratamiento.

Del residuo sólido ya separado, se obtuvo una muestra de material húmedo de 100 gr, el cual fue colocado en un recipiente de vidrio con capacidad de 1 litro. Del material húmedo se obtuvo una alícuota para determinar el contenido de humedad de la muestra lo que va a servir para los posteriores cálculos. La muestra se esterilizó en autoclave a 115 °C y a 1.5 atm de presión por 15 minutos con la finalidad de eliminar los microorganismos presentes y dejar actuar solamente al

consorcio microbiano celulolítico (hongos). Este, procedimiento se realiza para mejorar las condiciones del acceso de las enzimas en el proceso de degradación de la celulosa.

b. Preparación de inóculo microbiano e inoculación

Se preparó el inóculo del consorcio microbiano en un litro de caldo glucosado. La preparación estuvo a cargo del personal del laboratorio de biotecnología de la Universidad Nacional de Cajamarca Sede-Jaén. La composición microbiana del consorcio se muestra en el anexo 01 (Foto 08). El inóculo se preparó (cultivó) por el lapso de 15 día, luego de los cuales el laboratorio brindó la cantidad necesaria del inóculo para el presente trabajo de investigación. De este inóculo se tomó 150 ml, los cuales se colocaron en condiciones asépticas a las repeticiones de cada tratamiento enrasándolo luego a 250 ml con agua destilada (1050 ml de caldo peptonado necesario), el inóculo se aplicó a las muestras esterilizadas y se puso a incubar por un periodo de siete (07) días a condiciones especiales de 38° en un ambiente aeróbico, por recomendación del laboratorio de biotecnología, el medio se ajustó a un pH de 5, usando para esto KOH 0.1N o NaOH 0.1 N según sea el caso.

c. Determinación de la glucosa formada

Transcurrido el tiempo de la degradación del material lignocelulósico realizada por los microorganismos celulolíticos (inóculo aplicado por un período de 6 días). La mezcla de residuos sólidos con el inóculo se sometió a un baño maría de 60° C por el espacio de 20 min, con el objetivo de detener (acción fungistática) la acción de los microorganismos celulolíticos y dejar listo la suspensión para la siguiente fase de fermentación.

Se separó del recipiente de vidrio toda la suspensión acuosa a un vaso de precipitación, el mismo que se selló con material plástico. De la suspensión se extrajo dos viales de la muestra de 10 ml cada uno (un

vial de respaldo), donde se realizó la cuantificación de glucosa por el método enzimático de glucosa oxidasa.

d. Fermentación de la glucosa

Para la fermentación de la glucosa se utilizó levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*). Primero se activó la levadura colocando 10 g de levadura seca deshidratada comercial en 500 ml de agua mineral esterilizada (no agua destilada), no se utilizó ningún medio activador. Luego este cultivo fue inoculado a las suspensiones separadas de las muestras en una cantidad de 10 ml. Luego de la inoculación, las suspensiones contenidas en los vasos de precipitación, fueron sellados con material plástico para dar las condiciones anaeróbicas necesarias. El pH se mantuvo en 5 mientras que la temperatura de incubación fue de 30°C. El proceso se continuó por un lapso de 06 días.

e. Destilación para obtener el alcohol etílico

La separación del alcohol se realizó por destilación fraccionada en el soxhlet, usando como temperatura de ebullición 78°C. La solución obtenida se volvió a destilar disminuyendo la temperatura 2°C con el objetivo de separar el alcohol etílico del agua que pudo haberse evaporado en el primer proceso. El producto final fue colocado en una probeta para determinar el volumen.

f. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente randomizado con 2 tratamientos y un testigo, y tres repeticiones por tratamiento. La repetición viene a ser cada una de las muestras de residuos sólidos orgánicos domiciliarios que se procesarán.

Tabla 4

Descripción de tratamientos y repeticiones

| N° | Tratamientos | Descripción | Repetición |
|----|--------------|-------------------------|------------|
| 1 | T1 | Restos de cocina | 3 |
| 2 | T2 | Restos vegetales, otros | 3 |
| 3 | T0 | Celulosa | 3 |

4.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los datos fueron recolectados en formatos de acuerdo a la necesidad de la investigación. Los datos son: peso de la muestra, humedad de las muestras, concentración de azúcares, volumen de producción de bioetanol.

5. Procesamiento de datos y análisis estadístico

Los datos fueron tabulados en una Hoja de cálculo para elaborar con ello tablas y gráficos, con estadísticos de tendencia central y dispersión; esta tabla de datos fue utilizada también para realizar el análisis estadístico correspondiente que contempla un análisis de varianza y la prueba de significación de Tukey. El software que se utilizaron son la hoja de cálculo Excel, y el paquete estadístico SPSS.

Los parámetros controlados en la fase fermentativa fueron el tiempo de fermentación, cantidad de levadura y temperatura.

IV. RESULTADOS

4.1. PREPARACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

En la Tabla siguiente se menciona los pesos de la materia orgánica proveniente de los residuos sólidos, los cuales fueron procesados.

Como se puede ver en la Tabla 5, se pesó para todos los casos aproximadamente 100 gramos de material húmedo; sin embargo, luego de obtener su contenido de humedad, los pesos finales secos variaron para cada muestra, siendo un poco más estable para los restos vegetales. Estos pesos secos se utilizarán para calcular el rendimiento final del proceso.

4.2. OBTENCIÓN DE GLUCOSA Y BIOETANOL

4.2.1. Obtención de glucosa.

Luego del análisis para la determinación de presencia de carbohidratos reductores fermentables preferentemente glucosa por el método glucosa oxidasa, posterior a la digestión por parte del consorcio microbiano, se obtuvo los resultados obtenidos de esta determinación los cuales se muestran en la tabla 6.

Como se ve en la Tabla 6 y Figura 10, las muestras que contienen residuos vegetales mostraron mayor concentración de glucosa en el líquido extraído luego de la digestión de las muestras con el consorcio microbiano aplicado. Esta superioridad se puede deber a que las muestras de residuos vegetales contienen mayor contenido de celulosa que las muestras de cocina, y es la celulosa la principal macromolécula de las muestras que por digestión enzimática va a dar como resultado glucosa

4.2.2. Obtención de bioetanol.

El bioetanol producido se obtuvo en dos fases, una de destilación rápida, y otra a través de destilación por arrastre de vapor. Los resultados se muestran a continuación.

En la Tabla 7, se evidencia que la mayor cantidad de alcohol bruto, así como de bioetanol purificado tanto en unidad de volumen como en unidad de masa, es mayor en las muestras de residuos vegetales que en la de residuos de cocina, lo cual tiene una relación directa con el contenido de glucosa obtenido en el Tabla anterior

ANALISIS DE VARIANZA (ANVA) PARA COMPARAR LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL SEGÚN LAS MUESTRAS PROCESADAS

Como se puede ver en el Tabla del Análisis de Varianza, las muestras provenientes de residuos vegetales fueron las que produjeron mayor cantidad de bioetanol. Esto está relacionado porque fueron estas muestras las que tenían mayor cantidad de azúcares reductores fermentables según el análisis procesado.

El ANVA realizado confirma esta superioridad, y valida que la misma es estadísticamente válida.

Tabla 5: *Peso húmedo y peso seco de las muestras procesadas*

| MUESTRA | CÓDIGO | PESO HÚMEDO DE LA MUESTRA (g) | CONTENIDO DE HUMEDAD (%) | PESO SECO DE LA MUESTRA (g) |
|--------------------------------|--------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Vivienda 1, residuos vegetales | V01-RV | 100.01 | 86.53 | 13.47 |
| Vivienda 1, residuos de cocina | V01-RC | 100.04 | 91.54 | 8.46 |
| Vivienda 2, residuos vegetales | V02-RV | 100.09 | 86.31 | 13.70 |
| Vivienda 2, residuos de cocina | V02-RC | 100.03 | 83.65 | 16.35 |
| Vivienda 3, residuos vegetales | V03-RV | 100.06 | 82.49 | 17.52 |
| Vivienda 3, residuos de cocina | V03-RC | 100.11 | 82.87 | 17.15 |
| Pulpa (testigo) | T0 | 100.02 | 90.61 | 9.39 |

Figura 9. Peso húmedo y peso seco de las muestras procesadas

Tabla 6. : *Contenido de glucosa y otros azúcares reductores fermentables en las muestras*

| MUESTRA | CÓDIGO | CONCENTRACIÓN DE GLUCOSA (mg/dl) |
|--------------------------------|--------|----------------------------------|
| Vivienda 1, residuos vegetales | V01-RV | 663 |
| Vivienda 1, residuos de cocina | V01-RC | 521 |
| Vivienda 2, residuos vegetales | V02-RV | 734 |
| Vivienda 2, residuos de cocina | V02-RC | 615 |
| Vivienda 3, residuos vegetales | V03-RV | 710 |
| Vivienda 3, residuos de cocina | V03-RC | 473 |
| Pulpa (testigo) | T0 | 521 |

Tabla 7: *Bioetanol obtenido de las muestras procesadas*

| CÓDIGO | Alcohol bruto obtenido (ml)* | Bioetanol purificado (ml) | Bioetanol purificado (g) |
|--------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| V01-RV | 14.00 | 2.10 | 1.66 |
| V01-RC | 11.00 | 1.65 | 1.30 |
| V02-RV | 15.50 | 2.33 | 1.83 |
| V02-RC | 13.00 | 1.95 | 1.54 |
| V03-RV | 15.00 | 2.25 | 1.78 |
| V03-RC | 10.00 | 1.50 | 1.18 |
| T0 | 11.00 | 1.65 | 1.30 |

Nota:* Se trata del primer destilado rápido, donde sale una mezcla hidroalcohólica, luego esto se ha purificado por destilado fraccionado.

Tabla 8: *Análisis de varianza*

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|---------|--------------|----------------------|
| Entre grupos | 0.3790 | 2 | 0.1895 | 13.9143 | 0.005579596 | 5.1433 |
| Dentro de los grupos | 0.0817 | 6 | 0.0136 | | | |
| Total | 0.4607 | 8 | | | | |

$\alpha = 0.05$



Figura 10. Contenido de glucosa y otros azúcares reductores fermentables en las muestras

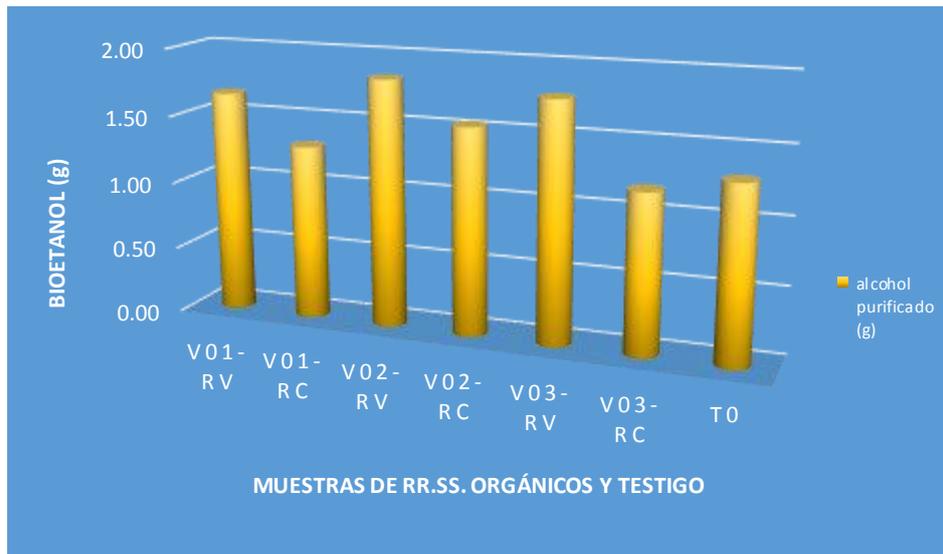


Figura 11. Bioetanol obtenido de las muestras procesadas

4.3. RENDIMIENTO Y POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE RRSS ORGÁNICOS EN CHIRIACO – IMAZA

4.3.1. Rendimiento en el proceso de producción de bioetanol.

El rendimiento se expresa entre la producción de bioetanol expresado en peso y el peso seco de la muestra procesada.

El rendimiento representa en la verdadera producción obtenida, en la gráfica se puede ver que el rendimiento si bien es mayor en el caso de los residuos sólidos orgánicos de restos de cocina, esto a su vez es solo en un caso, mientras que el rendimiento de residuos sólidos orgánicos de restos vegetales, tiene un rendimiento más uniforme. En esta gráfica también se muestra la superioridad del testigo en cuanto a la producción de bioetanol, esto se debe sobre todo a que la muestra utilizada como testigo es pulpa de madera purificada, la cual es mucho mayor en la concentración de celulosa.

4.3.2. Potencial de producción de bioetanol a partir de RR.SS. orgánicos en Chiriaco – Imaza.

Se tomó como base el estudio de Caracterización de los Residuos Sólidos Domiciliarios de Chiriaco del año 2016 para determinar el potencial de producción de bioetanol por día. Para esto la cantidad de residuos sólidos orgánicos fueron descontados solo para las muestras procesadas en la investigación.

Los resultados se muestran a continuación

Tabla 9
Rendimiento en porcentaje (%) del proceso de obtención de bioetanol

| Código | Alcohol Purificado (G) | Peso seco de la muestra (G) | Rendimiento (%) |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| V01-RV | 1.66 | 13.47 | 12.30 |
| V01-RC | 1.30 | 8.46 | 15.39 |
| V02-RV | 1.83 | 13.70 | 13.39 |
| V02-RC | 1.54 | 16.35 | 9.41 |
| V03-RV | 1.78 | 17.52 | 10.13 |
| V03-RC | 1.18 | 17.15 | 6.90 |
| T0 | 1.30 | 9.39 | 13.87 |

Tabla 10.
Potencial de producción de bioetanol a partir de residuos sólidos orgánicos en Chiriaco – Imaza

| TIPO DE RESIDUOS SÓLIDO | RENDIMIENTO (%) | PRODUCCIÓN DIARIA RR.SS. CHIRIACO (kg) | OBTENCIÓN TEÓRICA DE BIOETANOL (kg) | OBTENCIÓN TEÓRICA DE BIOETANOL (L) |
|--------------------------------|------------------------|---|--|---|
| RESIDUOS VEGETALES | 11.94 | 571.02 | 21.58 | 27.35 |
| RESTOS DE COCINA | 10.57 | 0.40 | 0.01 | 0.02 |
| TOTAL | | 571.42 | 21.59 | 27.36 |

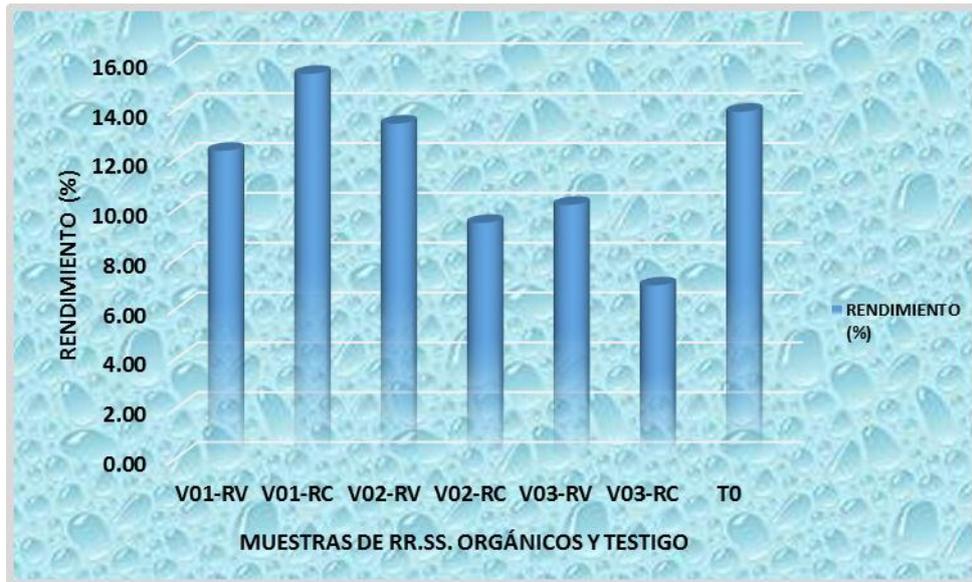


Figura 12. Proceso de obtención de bioetanol

V. DISCUSIÓN

De acuerdo a la humedad, se observan los pesos que fueron utilizados en cada una de las muestras, tanto de residuos vegetales y residuos de cocina así como de sus repeticiones. Así mismo se evidencia que los contenidos de humedad en todos los valores del Tabla 6 superan el rango de 80%; esto coincide con los valores reportados por Word Press (2015) quien señala un rango de 60% a 90% para los residuos vegetales (mezclados) y residuos agrícolas (mezclados). De igual manera Rodríguez y Cárdenas (2015), reportaron valores de 71% a 85% de humedad en cada una de las muestras de residuos orgánicos que evaluaron para la producción de bioetanol a partir de la degradación de la pulpa de café.

Es así que Rodríguez y Cárdenas (2009), sugieren para la elaboración de etanol a partir de pulpa de café, ésta se debe realizar a través de la deshidratación y molienda de esta, debido a que la pulpa llega con un porcentaje de humedad aproximadamente de 94%, lo cual puede generar una degradación rápida y respecto al tamaño inicial de la pulpa es de 3 cm; por lo que no existiría el contacto suficiente del sustrato con los microorganismos necesarios para la producción de etanol.

Comparando los datos obtenidos de la concentración de glucosa y otros azúcares reductores fermentables en las muestras con los resultados obtenidos por Malagón et al (2017), quien obtuvo un valor de 208 mg/dl, podemos inferir que se obtuvo mayor cantidad de glucosa en la presente investigación. Sin embargo al comparar nuestros resultados con los que reporta Cortés et al (2015) quienes obtuvieron valores de 3077 mg/dl, los valores que hemos obtenido son muy inferiores.

Analizando la obtención de bioetanol producido, se evidencia la superioridad de los residuos vegetales frente a los residuos de cocina. El ANVA realizado confirma esta superioridad, y valida que la misma es estadísticamente válida.

Además, tomando en cuenta las sugerencias de Rodríguez y Cárdenas (2009), se describe que, el proceso que cumple con las expectativas de la obtención de alcohol puro es la hidrólisis ácida simple, y a partir de ello se debe realizar una etapa experimental donde se utilice 1.5 Kg de pulpa para producir 250 ml de etanol.

El rendimiento en el proceso de producción de bioetanol obtenido varía en un porcentaje promedio de 12%, afirmando un rendimiento superior al obtenido por Escalante y Fuentes (2013) quienes determinaron un rendimiento de 7.8% en la obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura.

Como puede observarse en el Tabla 08, y tomando en base el rendimiento obtenido en la presente investigación, y la producción de residuos sólidos de la localidad de Chiriaco, se puede producir diariamente un volumen significativo de alcohol tipo bioetanol; sin embargo, esto demandará la construcción de infraestructura adecuada e insumos necesarios. Situación similar establecen Martínez, Montoya y Sierra (2014), quienes indican que en 1 Tonelada de residuos orgánicos se pueden obtener 15 litros de bioetanol.

VI. CONCLUSIONES

- Se realizó el procesamiento de hidrólisis o digestión enzimática de restos lignocelulósicos provenientes de residuos sólidos orgánicos de origen domiciliario, utilizando un consorcio microbiano.
- El proceso de digestión generó azúcar reductora fermentable como glucosa, la cual hace posible el proceso de fermentación para obtención de alcohol.
- Se obtuvo bioetanol en rendimientos de 11.94% para residuos vegetales y 10.57% para residuos de cocina, los cuales son relativamente bajos pero aceptables. El bioetanol fue purificado por destilación fraccionada.
- Se determinó 27.35 L y 0.02 L como potencial teórico de producción de bioetanol a partir de residuos vegetales y de cocina, respectivamente; considerándose como el potencial de producción de bioetanol a partir de sólidos orgánicos domiciliarios de la localidad de Chiriaco,

VII.RECOMENDACIONES

- Investigar la producción de bioetanol con otros consorcios microbianos para digerir los residuos sólidos orgánicos de origen domiciliario.
- Ensayar procesos de purificación del bioetanol obtenido en el proceso de sacarificación y posterior fermentación enzimática.
- Proponer como una alternativa al manejo de los residuos sólidos orgánicos la obtención de bioetanol por medios enzimáticos a los gobiernos locales.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chandel, A.K. y Singh, O.V. 2011. Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of “Biofuel”. *App Microbiol Biotechnol.* 89: 1289-1303
- Oliva, J. M., 2013. Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*. Tesis Doctoral Universidad de Alcalá de Henares.
- Word Press, 2015. Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los RSU. En línea. https://aulagaasociacion.files.wordpress.com/2015/03/4_propiedades_rsu.pdf
- OSINERMING. 2014. Biocombustibles. Recuperado de OSINERGMIN: <http://www.osinerg.gob.pe>
- Salinas C, E; Gasca Q, Víctor. 2009. Los biocombustibles. *El Cotidiano*, núm. 157, septiembre-octubre, 2009, pp. 75-82. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Distrito Federal, México.
- Álvarez M. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Maestría en Ingeniería Energética, Posgrado de Ingeniería, UNAM. 359 p.
- Gracia, C. 2008. Biocombustibles. Bioetanol. Disponible en http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/Cap%C3%ADtulo%204_Bioetanol.pdf
- Friedmann A y Penner R. 2009. Biocombustibles. Alternativa de negocios verdes. Paraguay.
- Ley 27314 Ley General de Residuos Sólidos. Disponible en <http://www3.vivienda.gob.pe/grd/normas/NormasEstadoGRD/01%20Ley%20GRD%20-%20Estado/01%20Ley%20N%C2%B0%2027314%20-%20Ley%20General%20de%20Residuos%20Sólidos.pdf>
- Guerra F, Mallén C, Struck A, Varela T. 2008. Producción de bioetanol. Laboratorio de Procesos de Separación. México.
- PIGARS – Bagua. Plan Integral de Gestión Ambiental y Residuos sólidos. 2009. Extraído de: Boletín de Indicadores Ambientales de Amazonas 2010.
- Bruno, Yanil. 2008. Cítricos: situación y perspectivas. [Documento WWW]. http://www.mgap.gub.uy/opypa/ANUARIOS/Anuario07/docs/14_Citricos_situacion_perspect.pdf

- Asocaña. 2007. Informe Anual 2006–2007. Tabla 7. Indicadores agrícolas de cosecha de caña de azúcar 1980 – 2006. [Documento WWW]. URL. http://www.asocana.org/VerImagen.aspx?url=http://www.asocana.org/informes/i2006_2007/Tabla7.jpg
- MADR 2005. La cadena de cítricos en Colombia una mirada global de su estructura y dinámica. 1991-2005. [Documento PDF]. URL. Disponible en: http://www.agrocadenas.gov.co/citricos/documentos/caracterizacion_citrico
- Mamma, D., Kourtoglou, E., y Christakopoulos, P. (2008). Fungal multienzyme production on industrial by-products of the citrus-processing industry. *Bioresource Technology*. 99, 2373–2383.
- Corporación Colombia Internacional. 2006. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Cultivos transitorios por municipio. Tolima 2006. Gobernación del Tolima.
- Corpoica, Cajarville C, Britos A, Caramelli A, Antúnez M, Zanoniani R, Boggiano P, Repetto JL. 1998. Variación en la concentración de sólidos solubles durante el día, en tres pasturas en época seca en el valle medio del río Sinú. *Cienc. Tecnol. Agropecu., Mosquera (Colombia)*, 16(2):181-188.
- Patrón, A y Rodríguez, A. 2014. Diseño de un bioreactor para la producción de bioetanol a partir de desechos orgánicos a escala de laboratorio. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Autónoma del Caribe.
- Cuervo, L; Folch, J; Estela, R. 2011. Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. Centro de Investigación en Biotecnología, UAEM. Instituto de Biotecnología, UNAM. Av. Universidad. Col. Chamilpa, Cuernavaca, Mor. 62209, México. reqc@ibt.unam.mx
- Arellano, C. 2015. Obtención de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos sometidos a hidrólisis enzimática. Tesis Post Grado. Universidad Veracruzana.
- Barba Pacheco, C. 2014. Síntesis de carboximetilcelulosa a partir de pastas de plantas anuales. Proyecto de titulación. Universitat Rovira I Virgili. Tarragona.
- Barroso Casillas, M. (2010). Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería. Proyecto de titulación. Universidad de Madrid. Madrid.
- Prinsen, P. (2010). Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. Tesis magistral. Universidad de Sevilla. Sevilla.

- Cortes, W; Ibla, J; Calderón, L; Herrera, A. 2015. Cuantificación de azúcares reductores en las cáscaras de naranja y banano. DOI: 10.18270/rt.v12i2.772
- Castro, C; Beltrán, L y Ortiz, J. Ra Ximhai, 2012. Septiembre - diciembre, año/Vol. 8, Número 3. Universidad Autónoma Indígena de México - Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 93-100.
- Rodríguez, E y Cárdenas, V. 2009. Evaluación de la producción de bioetanol a partir de la degradación de la pulpa de café. Universidad De La Salle. Bogotá D.C 2009.
- Escalante, J. y Fuentes, H. 2013. Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura. Tesis de pregrado en Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú.
- Martínez, J; Montoya, N; Sierra, M. 2014. Energía del futuro: Bioalcoholes a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Pp. 64-81.
- Malagón, M; Inés, A; Lache, A; Santos, J; Zabala, D. 2017. Producción de bioetanol a Partir de diferentes mezclas de los residuos orgánicos generados en una empresa alimentos. Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 10 n° 1: 47-59.
- Almenares, J y Serrat, M. 2008. Aspectos tecnológicos generales para la conversión a etanol de la biomasa lignocelulósica. Tecnología Química, vol. XXVIII, núm. 3, septiembre-diciembre, 2008, pp. 63-70 Universidad de Oriente Santiago de Cuba, Cuba.

IX. ANEXOS

ANEXO 01. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS DEL DISTRITO DE IMAZA

| Tipo de residuos sólidos | Composición de Residuos Sólidos Domiciliaria | | | | | | | | Composición porcentual |
|--|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|------------------------|
| | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 5 | Día 6 | Día 7 | | |
| | Kg | Kg | Kg | Kg | Kg | Kg | Kg | Kg | % |
| 1. Materia Orgánica ¹ | 151.70 | 113.55 | 150.00 | 134.20 | 153.25 | 154.50 | 145.85 | 1003.05 | 70.31% |
| 2. Madera, Follaje ² | 0.55 | | 0.20 | | 0.30 | 0.55 | 0.35 | 1.95 | 0.14% |
| 3. Papel ³ | 1.50 | 1.15 | 3.80 | 0.50 | 4.70 | 3.55 | 2.05 | 17.25 | 1.21% |
| 4. Cartón | 7.50 | 4.50 | 5.60 | 4.65 | 7.50 | 5.75 | 2.50 | 38.00 | 2.66% |
| 5. Vidrio | 0.80 | 1.35 | 3.00 | 2.20 | 3.50 | 1.55 | 3.50 | 15.90 | 1.11% |
| 6. Plástico PET ⁴ | 5.10 | 2.50 | 6.20 | 2.85 | 3.60 | 2.25 | 2.50 | 25.00 | 1.75% |
| 7. Plástico Duro ⁵ | 9.85 | 9.10 | 8.80 | 5.35 | 6.87 | 3.55 | 3.00 | 46.52 | 3.26% |
| 8. Bolsas | 5.00 | 4.65 | 10.00 | 3.40 | 12.70 | 5.75 | 3.80 | 45.30 | 3.18% |
| 9. Tetrapak | 0.25 | 1.05 | 1.00 | 0.05 | 0.30 | 0.25 | 0.30 | 3.20 | 0.22% |
| 10. Tecnopor y similares ⁶ | | 0.35 | 0.20 | 0.85 | 0.70 | 0.30 | 0.35 | 2.75 | 0.19% |
| 11. Metal | | 2.30 | 0.60 | 0.35 | | | 0.20 | 3.45 | 0.24% |
| 12. Telas, textiles | 2.35 | 1.60 | 9.00 | 3.85 | 3.10 | 0.55 | 3.80 | 24.25 | 1.70% |
| 13. Caucho, cuero, jebe | 0.55 | 1.30 | 1.40 | 1.60 | 1.75 | 0.25 | 2.35 | 9.20 | 0.64% |
| 14. Pilas | 0.45 | 0.35 | 0.20 | 0.60 | 0.08 | 0.25 | 0.60 | 2.53 | 0.18% |
| 15. Restos de medicinas, etc ⁷ | | 0.85 | 0.60 | 0.46 | 0.01 | | | 1.92 | 0.13% |
| 16. Residuos Sanitarios ⁸ | 18.75 | 12.30 | 20.60 | 9.65 | 11.45 | 15.35 | 16.25 | 104.35 | 7.32% |
| 17. Residuos Inertes ⁹ | 2.75 | | 0.80 | | 0.10 | | 2.90 | 6.55 | 0.46% |
| 18. Envolturas | 4.25 | 4.65 | 2.20 | 3.40 | 2.90 | 1.30 | 2.90 | 21.60 | 1.51% |
| 19. Latas | 4.20 | 3.40 | 5.00 | 3.50 | 4.55 | 2.95 | 4.30 | 27.90 | 1.96% |
| 20. RAEE | 0.30 | 0.30 | 2.40 | 0.20 | 0.30 | | 0.55 | 4.05 | 0.28% |
| 21. Huesos | | | | 0.40 | | | | 0.40 | 0.03% |
| 22. Otros | 0.50 | | 9.80 | | 3.60 | 3.20 | 4.30 | 21.40 | 1.50% |
| Total | | | | | | | | 1426.52 | 100.00% |
| (1) Considera restos de alimentos, cáscaras de frutas y vegetales, excrementos de animales menores, y similares. | | | | | | | | | |
| (2) Considera ramas, tallos, raíces, hojas y cualquier otra parte de las plantas producto del clima y las podas. | | | | | | | | | |
| (3) Considera papel blanco tipo bond, papel periódico otros. | | | | | | | | | |
| (4) Considera botellas de bebidas, gaseosas. | | | | | | | | | |
| (5) Considera frascos, bateas, otros recipientes. | | | | | | | | | |
| (6) Si es representativo considerarlo en este rubro, de lo contrario incorporarlo en otros. | | | | | | | | | |
| (7) Considera restos de medicina, envases de pintura, plaguicidas y similares. | | | | | | | | | |
| (8) Considera papel higiénico, pañales y toallas higiénicas. | | | | | | | | | |
| (9) Considera, tierra, piedras y similares. | | | | | | | | | |
| (10) El rubro "otros" debe ser el más pequeño posible, procurando identificar sus componentes. | | | | | | | | | |

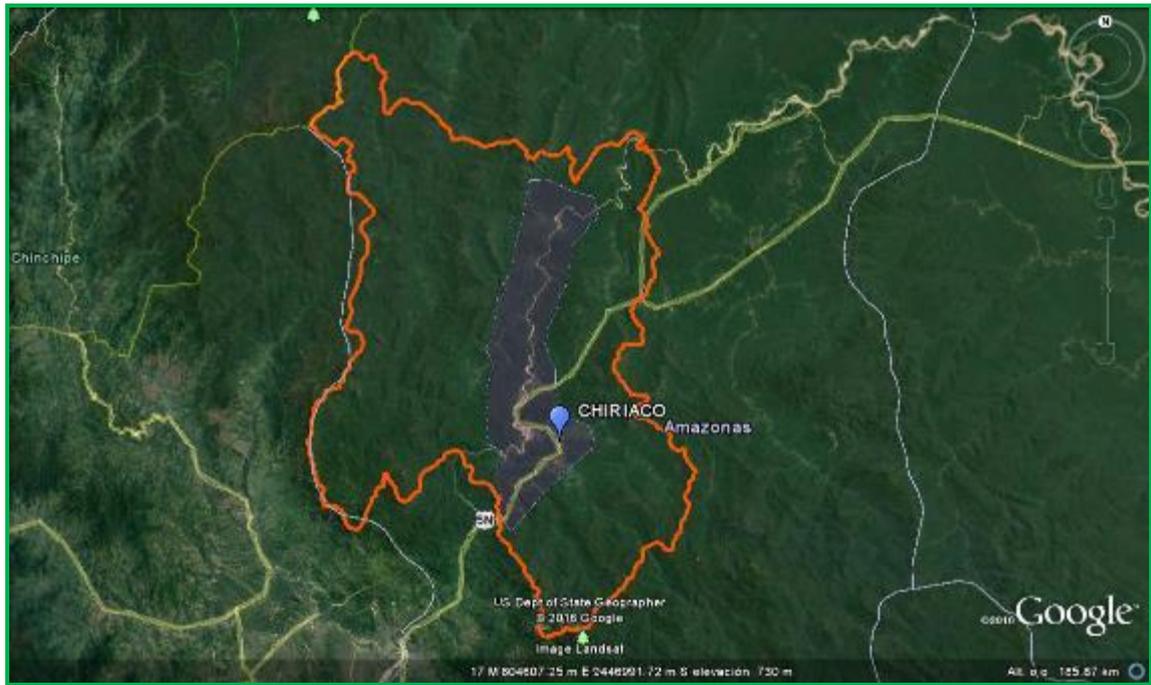


Figura 8. Vista Satelital del Distrito de Imaza

Fuente: Google Earth

ANEXO 02. ARCHIVO FOTOGRÁFICO



Foto 1. Recolección de muestra de residuos vegetales



Foto 2. Recolección de muestra de residuos de cocina



Foto 3. Obtención del total de muestras



Foto 4. Preparación de las muestras



Foto 5. Almacenamiento de muestras



Foto 6. Traslado al laboratorio

Foto 7. Esterilización en autoclave



Foto 8. Hongos celulíticos



Foto 9. Distribución del inóculo en cada una de las muestras

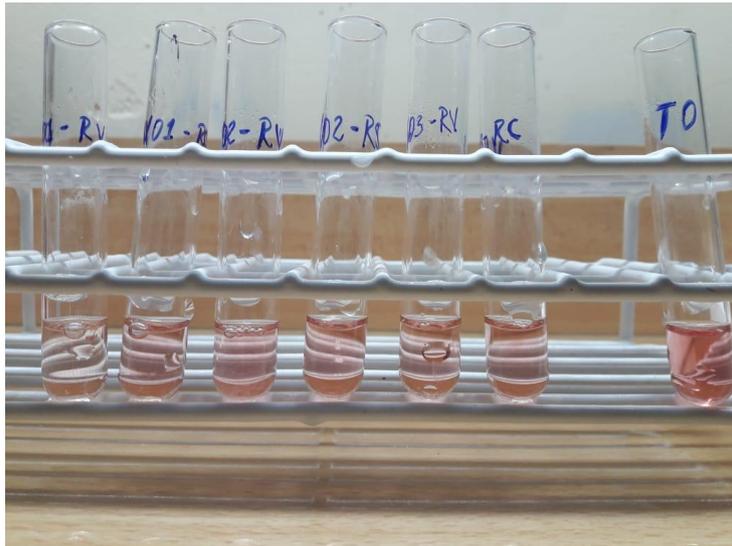


Foto 10. Determinación de la glucosa formada



Foto 11. Fermentación de la glucosa



Foto 12. Proceso de extracción de bioetanol



Foto 13. Obtención de etanol en residuos vegetales



Foto 14. Obtención de etanol en residuos e cocina