

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La escasez y encarecimiento del petróleo, junto con un aumento de las regulaciones medioambientales, actúan de forma sinérgica para promover el desarrollo de nuevos materiales y productos más compatibles con el medioambiente e independientes de los combustibles fósiles. En este contexto, los bioplásticos se ajustan perfectamente a las nuevas necesidades e inquietudes industriales y sociales (Guillen, 2010).

La obtención de productos químicos y nuevos materiales a partir de fuentes renovables no es una idea nueva. Sin embargo, el reto está en desarrollar la tecnología necesaria, en adaptar los productos y procesos en aplicaciones reales, y competitivas que supongan una verdadera revolución, se transformen en una realidad en el mercado (UNAN, 2010).

Los bioplásticos constituyen en la actualidad un campo de interés creciente en sectores industriales diversos (envase, automoción, alimentación, sector eléctrico-electrónico, construcción, medicina, textil, etc.). Este interés está íntimamente relacionado con la tendencia globalmente extendida, de sustitución de los materiales procedentes de fuentes fósiles por otros procedentes de fuentes renovables y sostenibles. Sin embargo, son precisamente las aplicaciones lo que motiva las definiciones y tipologías de bioplásticos que se conocen (UNAN, 2010).

Todos los polímeros naturales basados en carbono, como el almidón, celulosa, lignina, etc., y los monómeros en los que están basados son biodegradables. Sin embargo, estos plásticos basados en monómeros procedentes de fuentes de materias primas renovables pueden perder la biodegradabilidad por una modificación química, como es la polimerización (Valero, 2013).

Asimismo, se debe tener en cuenta que las propias formulaciones de los bioplásticos, requieren para su procesabilidad de aditivos o modificantes que pueden ser de origen sintético, lo que implica que no en todos los casos es posible fabricar bioplásticos basados al 100% en materias primas renovables (REMAR, 2011).

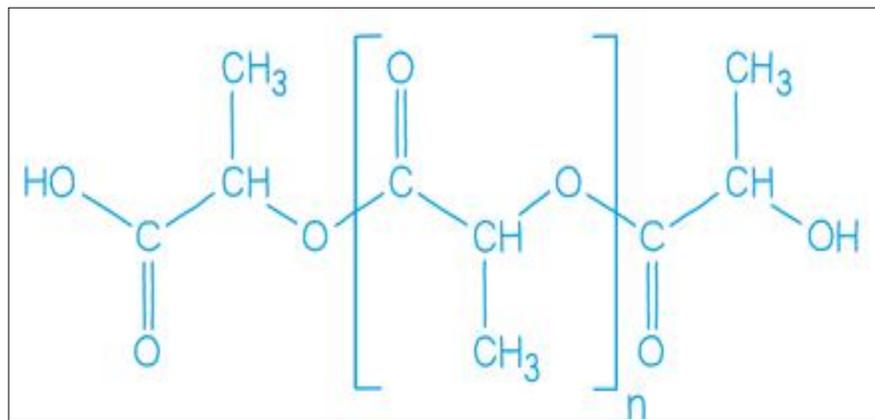
El bioplástico, fabricado a partir de almidón de cascara de plátano comparte características similares con los elaborados a través de derivados de petróleo. La mayor diferencia entre el plástico que actualmente se fabrica con base en almidón, es que es completamente biodegradable y no tóxico, una vez degradado puede usarse incluso como material de compostaje (abono). Esta ventaja proviene, precisamente, en el origen vegetal de la materia prima, lo que reduce nuestra dependencia del petróleo, que desde décadas domina nuestra sociedad. Los productos que hacen posible la creación de plástico biodegradable son, además de la cáscara de plátano, la fécula de maíz (Lemos, 2000).

1.2 Definición bioplásticos

Los plásticos biodegradables se degradan por el fenómeno de la mediación celular (micro organismos, bacterias, enzimas, hongos...). Un material es biodegradable cuando la degradación es el resultado de la acción de los microorganismos y el material es en última instancia convertido en agua, dióxido de carbono, metano y biomasa. Actualmente estos plásticos están basados en recursos naturales. Los plásticos biodegradables son por lo general poliésteres, en los que los enlaces éster son hidrolizados en presencia de agua. La reacción rompe el enlace éster y descompone el plástico en sus monómeros fundamentales. El almidón es la materia prima principal para la fabricación de bioplásticos, sin los aditivos adecuados (plastificantes) no tiene las propiedades necesarias para trabajar como termoplástico, los plastificantes incrementan la flexibilidad del almidón debido a su habilidad para reducir la interacción de los enlaces de hidrógeno, además de aumentar el espacio molecular (Mali, 2005). De cierto modo, la ventaja que ofrecen los bioplásticos es que preservan fuentes de energía no renovables como el petróleo y disminuyen el problema cada vez más difícil del manejo de desechos. En la actualidad, las industrias se encuentran empeñadas en convertir estas nuevas tecnologías en productos útiles, hechos a base de plásticos inofensivos para el ambiente (REMAR, 2011).

En cuanto a los métodos de producción comercial, los bioplásticos se pueden procesar mediante tecnologías aplicadas a los plásticos convencionales tales como la extrusión, inyección, soplado o termoformado. Sin embargo, aunque cada familia de materiales tiene sus peculiaridades, todos tienen en común su tendencia a hidrolizarse, limitada resistencia térmica y sus bajas temperaturas de proceso. Estos aspectos son importantes a la hora de procesar estos materiales con vistas a evitar la alteración de la cinética de degradación de los mismos, ya en las etapas de fabricación (REMAR, 2011).

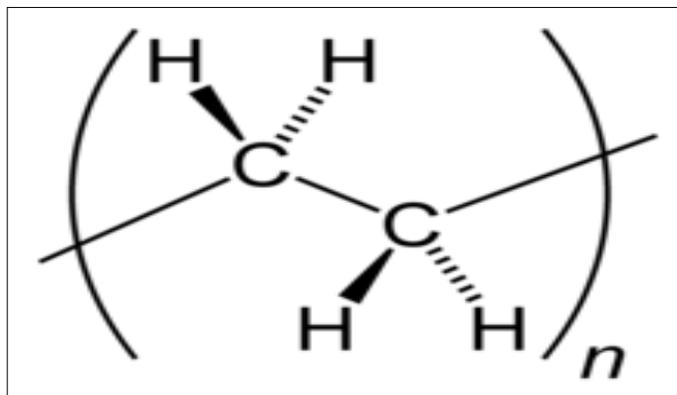
En la figura N° 1-1 se muestra la estructura química del bioplásticos PLA (Ácido Poliláctico)



Fuente: REMAR, 2011.

Figura N° 1-1: Estructura química del PLA

En la figura N° 1-2 se muestra la estructura química de un plástico convencional PEBD (Polietileno).



Fuente: REMAR, 2011.

Figura N° 1-2: Estructura química del PEBD

1.3 Tipos de bioplásticos

Grupo 1: Bioplásticos procedentes de recursos renovables. Comprenden tanto los bioplásticos cuyos monómeros proceden de la biomasa (almidón y celulosa), como aquellos cuyos monómeros son producidos mediante la fermentación de recursos renovables, aunque el proceso de polimerización posterior sea por vía química convencional (REMAR, 2011).

Grupo 2: Bioplásticos sintetizados por vía biotecnológica. Existen dos vías biotecnológicas para la producción de bioplásticos. La primera consiste en la obtención biotecnológica de los monómeros y polimerización posterior por vía química. Otra vía es la síntesis integral de los bioplásticos mediante procedimientos biotecnológicos, fundamentalmente por fermentación microbiana (REMAR, 2011).

Los Bioplásticos proceden total o parcialmente de fuentes renovables (almidón, celulosa). En la tabla N° I-1 se muestra como se desglosan los 2 grupos principales de bioplásticos en la actualidad (REMAR, 2011).

Tabla N° I-1

Bioplásticos procedentes de fuentes renovables

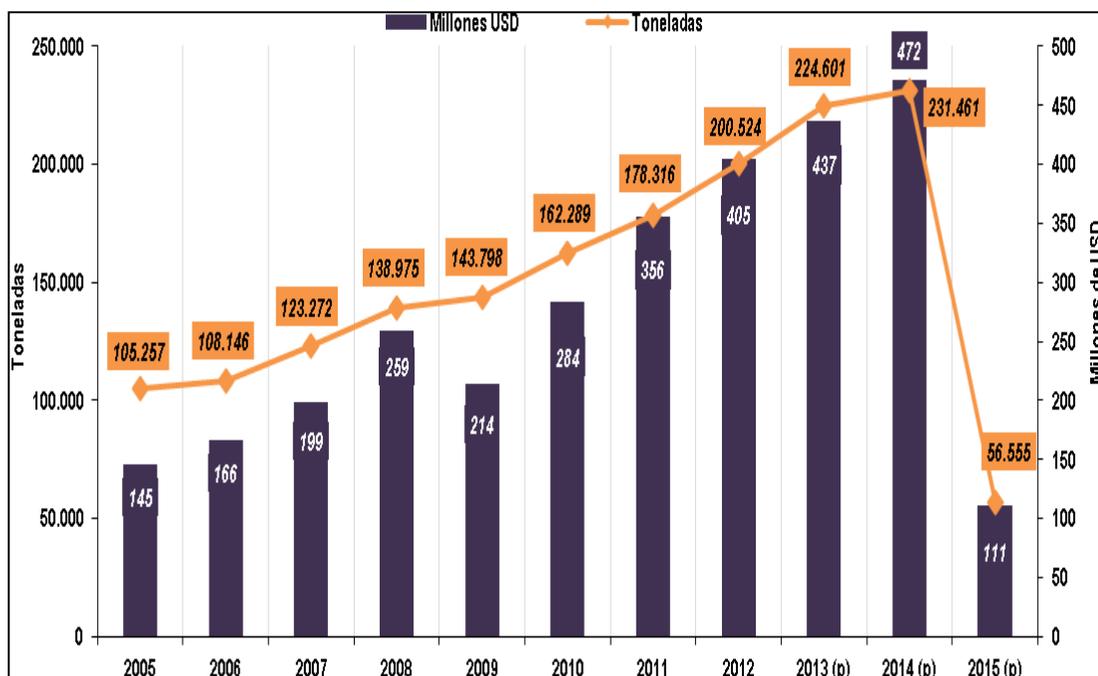
Tipo de bioplástico	Tipo de polímero	Grupo	Método de Obtención
Polímero basado en almidón	Polisacárido	1	Por modificación de polímero natural
Ácido Poliláctico (PLA)	Poliéster	1	Polimerización del monómero(Ácido láctico)
PolitrimetilenTereftalato (PTT)	Poliéster	1	Petroquímico
Polibutilen Tereftalato (PBT)	Poliéster	1	Petroquímico
Polibutile Succinato (PBS)	Poliéster	1	Petroquímico
Polihidroxialcanoatos (PHA)	Poliéster	2	Fermentación genéticamente modificadas
Poliuretanos (PURs)	Poliuretano	2	Fermentación química de aceites
Nylon 6	Poliamidas	1	Fermentación
Nylon 66	Poliamidas	1	Fermentación
Nylon 69	Poliamidas	1	Transformación química del Ácido oleico
Polímeros de celulosa	Polisacárido	2	Fermentación bacteriana

Fuente: REMAR, 2011.

1.4 Identificación del problema a resolver

En los últimos diez años las importaciones de plásticos al país se triplicaron y sumaron poco más de 2900 millones de dólares, por la compra de 1.6 millones de toneladas, según un informe del Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE), alcanzando el máximo histórico la gestión pasada, tanto en términos de valor como en volumen. Estas importaciones en 2005 eran 145 millones de dólares y hasta el 2014 subieron a 472 millones de dólares, es decir, estas compras se incrementaron poco más de tres veces (IBCE, 2015).

En términos de volumen en 2005 se registró 105258 toneladas y en 2014 fueron 231461 toneladas. Este aumento se dio por el crecimiento de las importaciones de plásticos en formas no primarias y artículos de materiales plásticos. En la figura N° 1-3 se observa la importación de plásticos en Bolivia, periodo 2005 – 2014 y avance al primer trimestre del 2015, expresado en millones de dólares americanos y toneladas (IBCE, 2015).



Fuente: INE, 2015.

Figura N° 1-3: Importaciones de plásticos a Bolivia

Los principales exportadores de plástico al país en la gestión del 2014 se muestran en la figura N° 1-4, los valores expresados en millones de dólares americanos.

PAÍS	VALOR
Brasil	114.653.434
Perú	63.061.492
China	53.039.289
Estados Unidos	46.677.164
México	40.462.130
Argentina	38.358.645
Colombia	30.850.693
Chile	14.018.692
Corea del Sur	11.913.368
Taiwán	11.190.982
Restos	47.768.067
TOTAL IMPORTADO	471.993.956

Fuente: INE, 2014.

Figura N° 1-4: Países importadores de plásticos a Bolivia

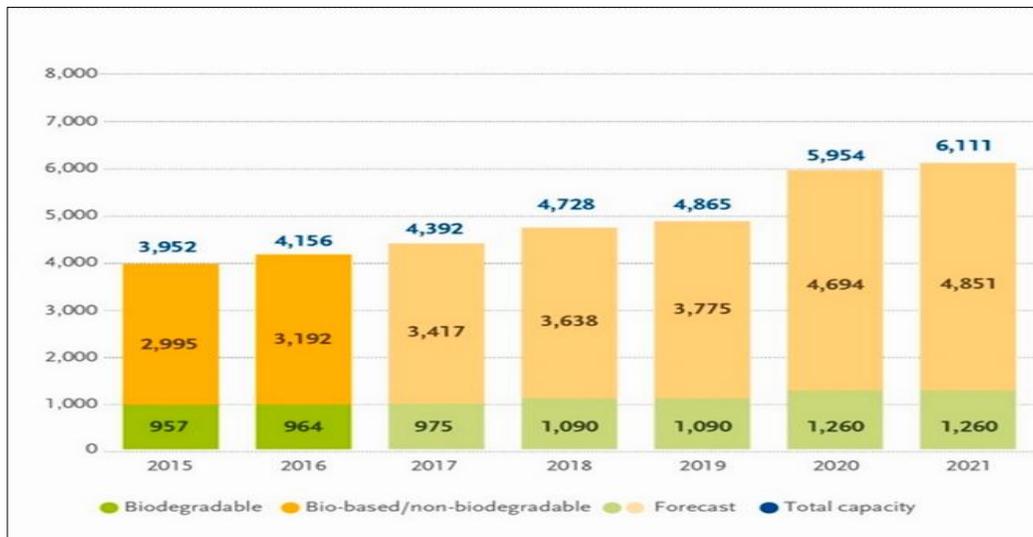
Durante la gestión 2014, las importaciones de plásticos provinieron principalmente del Brasil (24%), seguido de Perú (13%), China (11%) y Estados Unidos (10%). Estas compras tuvieron como origen un total de 100 países (IBCE, 2015).

1.5 Producción mundial de bioplástico

Según European Bioplastics en la actualidad, los bioplásticos representan cerca del 1% de los aproximadamente 300 millones de toneladas de plástico que se producen anualmente. Sin embargo, a medida que aumenta la demanda y surgen materiales, aplicaciones y productos más sofisticados, el mercado va creciendo entre (20– 100) % por año (European Bioplastics, 2016).

Según los últimos datos de mercado compilados por European Bioplastics, se prevé que la capacidad de producción mundial de bioplásticos crecerá un 50 % en el mediano plazo, alrededor de 6,1 millones de toneladas en 2021 (European Bioplastics, 2016).

En la figura N° 1-5 muestra la producción mundial de bioplásticos en toneladas y un estimado para los futuros años.



Fuente: European Bioplastics, 2016.

Figura N° 1-5: Producción mundial de bioplásticos

Finalmente se observa en la figura N° 1-5 la tendencia al crecimiento ascendente en la producción de bioplástico en los últimos años.

Estos incrementos aseguran que el producto tendrá una demanda a futuro según datos estadísticos (European Bioplastics).

En Bolivia no existe producción de ningún tipo de plásticos biodegradables, ni producción de plásticos derivados del petróleo, por lo que se recurre al mercado internacional para adquirir en grandes cantidades esta materia prima, plásticos derivados del petróleo (IBCE, 2015).

1.6 Justificación

2. El consumo de plásticos convencionales obtenidos de fuentes fósiles está ocasionando graves problemas ambientales: Todo producto industrial, doméstico, alimenticio, medicinal, etcétera, se empaqueta en plástico. Fuera de esto no solo las ciudades sufren la contaminación, los océanos sufren consecuencias devastadoras por el desecho de los plásticos, aproximadamente el 80% de la basura encontrada en ellos proviene de la tierra y en su mayoría son plásticos (Liñan, 2015), su disposición final genera acumulación en los rellenos sanitarios por su característica de no biodegradabilidad y además su cuestionable proceso de reciclaje (Navia, 2014) por lo que el estudio de la elaboración de sustitutos para el plástico ha ido aumentando en los últimos 10 años, no solo por el aumento de las legislaciones ambientales en muchos países sino también por la conciencia verde. (García, 2015).
3. La producción creciente de derivados del petróleo y el aumento en el precio de este recurso no renovable, ha hecho que en los últimos siglos se demande un producto sustituto y menos contaminante, muchos estudios se han realizado para disminuir las consecuencias negativas del uso del plástico, desde alterar su composición hasta utilizar otros productos similares como nuevas alternativas de tratamiento y tecnología, es así como nacen los bioplásticos.
4. En Bolivia se genera al año 1,7 millones de toneladas de basura entre ellas botellas de plástico, cáscaras de frutas, papeles, bolsas y otros son parte de estas cifras de residuos sólidos que los bolivianos producimos cada año, del cual apenas se reciclan 49640 toneladas anuales (2,8%). Del total de residuos sólidos que se generan anualmente en Bolivia (1,7 millones de toneladas), 55,2% son

residuos orgánicos, 22,1% son desechos reciclables (papel, plástico, vidrios, metales) y el restante 22,7% es basura no reciclable (IBCE, 2015).

5. El consumo plátano en el país genera gran cantidad de residuos que contaminan el medio ambiente, que se convierten en un problema sanitario que ayuda a la proliferación de insectos, hongos, bacterias y olores de descomposición. Por otra parte, si no se controla la eliminación de residuos biodegradables, se puede causar varios problemas adicionales, entre ellos la liberación generalizada de gases de efecto invernadero que afectan la salud de la población por el fortalecimiento de los agentes patógenos humanos.

6. La presente investigación pretende aprovechar de manera óptima la cáscara de plátano debido a la presencia de almidón en esta, además de ser un desperdicio orgánico que será transformada en un plástico biodegradable, el cual solo tiene 90 días de vida, a comparación con el plástico convencional que se genera a partir del petróleo que tiene una vida de hasta 200 años, debido al corto tiempo de vida que presenta este material para descomponerse, se pretende tener un planeta menos contaminado y más limpio, también poder contar con una mejor calidad de vida, ya que los plásticos generan mucha contaminación del suelo, aguas y aire.

1.7Objetivos:

1.7.1 Objetivo general

Obtener plástico biodegradable a partir de la cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) variedad Cavendish, mediante una hidrolisis ácida.

1.7.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la materia prima (cáscara de plátano variedad cavendish) con la finalidad de conocer sus propiedades fisicoquímicas.
- Determinar las propiedades mecánicas del producto obtenido, como el módulo de elasticidad y la resistencia, con el objetivo de identificar si el producto es de buena calidad.
- Ejecutar la fase experimental del proceso de obtención de plástico biodegradable de la cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) variedad cavendish (escala laboratorio).
- Realizar balance de materia y energía, en el proceso de la obtención de bioplástico.
- Determinar el costo de obtención (escala laboratorio) de bioplástico a partir cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) variedad cavendish.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Historia del plátano

Los plátanos son nativos del sudeste de Asia, donde han sido cultivados desde hace miles de años. Se cree que los plátanos fueron introducidos en África en tiempos prehistóricos (Crane & Balerdi, 1998).

Evidencias recientes sugieren que los plátanos fueron introducidos en el Nuevo Mundo (Ecuador) alrededor del año 200 A.C. por inmigrantes provenientes del sudeste asiático (Crane & Balerdi, 1998).

Los plátanos constituyen una fuente importante de alimentos en parte de África, sur de India y en toda América tropical, esto se debe a la estabilidad y relativa facilidad de producción de este fruto y el alto valor nutritivo del mismo (Crane & Balerdi, 1998).

El plátano llegó a América en el año 1516, donde le cambiaron el nombre a banano, convirtiéndose en uno de los alimentos básicos de los países tropicales y caribeños. El banano en Bolivia es originario de la amazonia subtropical, en sus variedades originales, criollas es un producto abundante en la zona del alto Beni, Caranavi y el Chapare donde toda la producción es orgánica (S.N.A.G., 2009).

2.2 Taxonomía de la planta de plátano

El nombre científico *Musa paradisiaca* y los nombres comunes *banano*, *banana*, *plátano*, *cambur*, *topocho* y *guineo* hacen referencia a un gran número de plantas herbáceas del género *Musa*, tanto híbridos obtenidos horticulturalmente a partir de especies silvestres ***Musa acuminata*** y ***Musa balbisiana*** como cultivares genéticamente puros de estas especies. Cuenta con prioridad, y sigue siendo usado tanto en su forma original como en la modificada ***Musa paradisiaca***, que indica que se trata de un híbrido para designar genéticamente a estas variedades (Ecured, 2016). La tabla N° II-1 muestra la taxonomía del plátano (***musa paradisiaca***).

Tabla N° II-1

Taxonomía del Plátano (musa paradisiaca)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Musaceae
Género	Musa
Especie	<i>Musa paradisiaca</i>

Fuente: Ecured, 2016.

2.3 Morfología de la planta de plátano

El plátano es una herbácea perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3,5-7,5 m de altura, terminado en una corona de hojas (Crane & Balerdi, 1998).

2.3.1 La planta de plátano

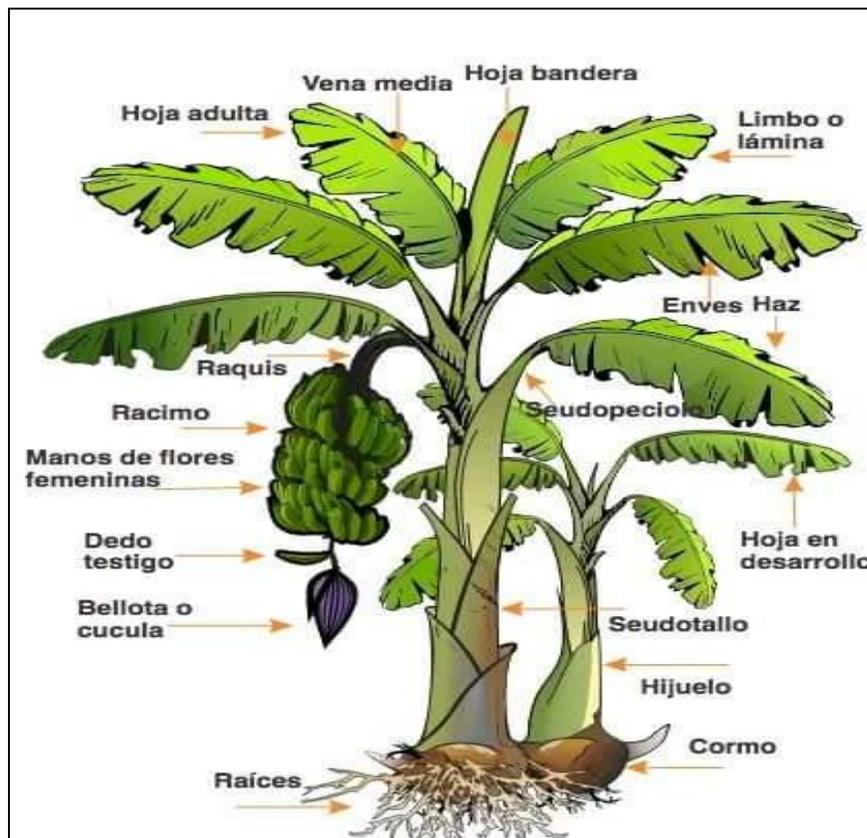
La planta de plátano consiste de uno o más falsos tallos: sus partes erectas se asemejan a troncos, tienen un rizoma subterráneo y un sistema de raíces fibrosas. El falso tallo constituye el tronco funcional que sostiene a las hojas, flores y frutos (Crane & Balerdi, 1998).

2.3.2 Las hojas de la planta de plátano

Las hojas del plátano están formadas por una estructura tubular llamada vaina, un peciolo grueso y un limbo o lámina. Un grupo de numerosas vainas se disponen concéntricamente y de forma muy apretada para formar los falsos tallos, los cuales pueden poseer hasta 40 vainas durante su vida (Crane & Balerdi, 1998).

2.3.3 Las raíces de la planta de plátano

Un gran número entre (200 y 500) raíces fibrosas salen del rizoma. En los suelos fértiles, bien drenados y profundos las raíces se pueden extender 5 pies (1.5 m) en profundidad y hasta 16 pies (4.9 m) lateralmente (Crane & Balerdi, 1998). En la figura N° 2-1 se observa las partes de una planta de plátano.



Fuente: Promusa, 2015.

Figura N° 2-1: Partes de una planta de plátano

2.3.4 Las flores de la planta de plátano

Las inflorescencias emergen del centro de los falsos tallos entre los (10 – 15) meses de haberse sembrado, es este momento, de 26 a 32 hojas deben haber surgido. Las flores se disponen en forma de espiral a lo largo del eje de la inflorescencia en grupos de 10

a 20 y están cubiertas por brácteas (hojas modificadas) carnosas de color púrpura-verdoso. Las brácteas se caen a medida que el desarrollo de las flores progresa. Las primeras flores que emergen son femeninas (Crane & Balerdi, 1998).

En las variedades comestibles, los ovarios crecen rápidamente sin polinización y se transforman en grupos de frutos llamados “manos” (Crane & Balerdi, 1998). Se muestra en la figura N° 2-2.



Fuente: Casavilla, 2011.

Figura N° 2-2: Flor de la planta de plátano

2.3.5 El fruto de la planta de plátano

El fruto tarda entre (80 y 180) días en desarrollarse por completo. En condiciones ideales fructifican las flores femeninas, éstas adoptan una apariencia dactiliforme que lleva a que se denomine mano a las hileras en las que se disponen. Por espiga puede llegar a haber entre (5 y 20) manos, aunque normalmente se trunca la misma de forma parcial para evitar el desarrollo de frutos imperfectos. En total cada espiga puede llegar a producir de 300 a 400 frutos, pesando más de 50 Kg. El fruto es una falsa baya epígina

de 7 a 30 cm de largo y de diámetro de hasta 5 cm, que forma un racimo compacto. Está cubierto por un pericarpio coriáceo verde en el ejemplar inmaduro y amarillo intenso, rojo o bandeado verde y blanco al madurar.

La pulpa es blanca a amarilla, rica en almidón y azúcares; en los plátanos puede resultar algo astringente o gomosa por su contenido en látex y farinoso (Crane & Balerdi, 1998). Que se observa en la figura N° 2-3.



Figura N° 2-3: Frutos de la planta de plátano

Fuente: Elaboración propia, 2019

2.4 Producción de mundial de plátano

Los plátanos son cultivos perennes que crecen con rapidez y pueden cosecharse durante todo el año. En el año 2000, se cultivó una superficie aproximada de 9 millones de hectáreas. El promedio de la producción mundial en 1998 – 2000 fue de 92 millones de toneladas anuales y en 2001 se estimó en 99 millones de toneladas.

Estas cifras son una aproximación, ya que la mayor parte de la producción mundial de plátano, casi el 85%, procede de parcelas relativamente pequeñas y huertos familiares en donde no hay estadísticas.

En muchos países en desarrollo, la mayoría de la producción de plátano se destina al autoconsumo o se comercia localmente, desempeñando así una función esencial en la seguridad alimentaria (FAO, 2001).

Se estima que la producción mundial de plátano creció un 30% en los años noventa, no es posible determinar el valor exacto del cultivo porque solo la séptima parte de los plátanos producidos llegan al mercado internacional. El valor total del comercio internacional del plátano oscila entre (4500 y 5000) millones de dólares USD. anuales (FAO, 2001).

Para el año 2011, la producción de plátanos en el mundo fue de aproximadamente 145,4 millones de toneladas. En la tabla N° II-2 se observa los países que son mayores productores de plátano a nivel mundial (Agri-Food Bussines Development Centre, 2012).

Tabla N° II-2

Mayores productores de plátano a nivel mundial

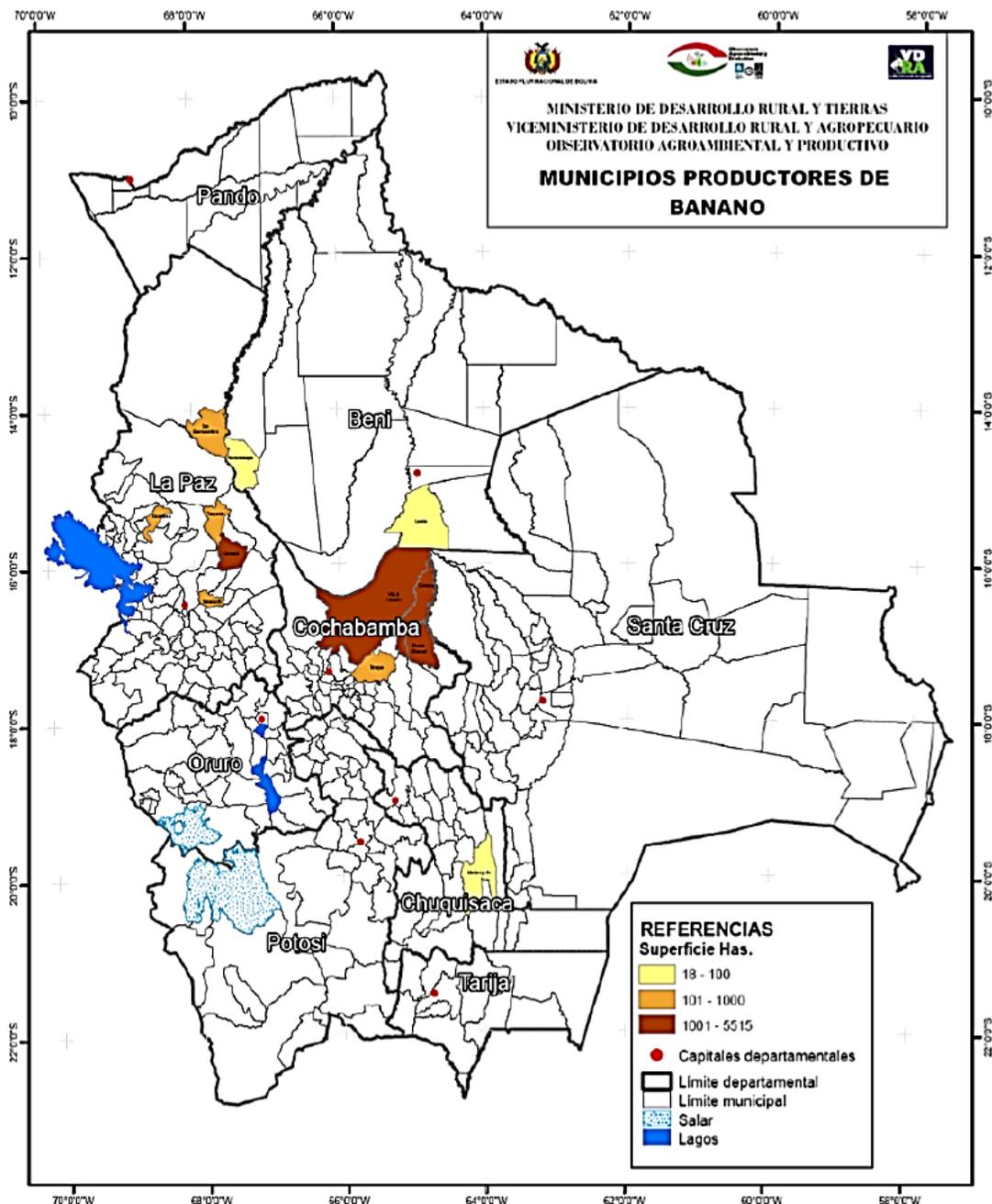
País	Millones de toneladas	Porcentaje del total mundial
India	29,7	20%
Uganda	11,1	8%
China	10,7	7%
Filipinas	9,2	6%
Ecuador	8,0	6%
Brasil	7,3	5%
Indonesia	6,1	4%
Colombia	5,1	4%
Camerún	4,8	3%
Tanzania	3,9	3%
Resto	49,6	34%
Total mundial	145,4	100%

Fuente: A.F.B.D.C., 2012.

2.4.1 Producción de plátano en Bolivia

En Bolivia actualmente existen 61135 hectáreas de plátano cultivadas, la zona de mayor producción es el trópico de Cochabamba (Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería), cubriendo el mercado regional, nacional, y el mercado internacional en pequeña escala (IBCE, 2008).

En la región de Caranavi y adyacentes (Yungas – La Paz), actualmente, existen 600 hectáreas de producción orgánica de este cultivo, de los cuales el 85% tiene como principal mercado el desayuno escolar a las ciudades de La Paz y El Alto y el 15% restante el mercado nacional (IBCE, 2008). En la figura N° 2-4, se puede observar las regiones geográficas donde se produce plátano en Bolivia.



Fuente: SENASAG, 2014.

Figura N° 2-4: Ubicación geográfica de zonas Productoras de plátano en Bolivia

A pesar de notarse un ligero descenso, la producción de plátano en Bolivia se incrementó de manera considerable tras las políticas productivas impuestas por el gobierno para este sector, como la ley N° 144 “Revolución Productiva Comunitaria

Agropecuaria” que definen al cultivo del plátano en calidad de rubro estratégico (SENASAG, 2014). La tabla N° II-3 muestra las cantidades de plátano producidas en el país desde el año 2012 hasta el 2017

Tabla N° II-3

Producción nacional de plátano

Años	Producción (Toneladas)
2012	378155
2013	397721
2014	427426
2015	446000
2016	456857
2017	481840

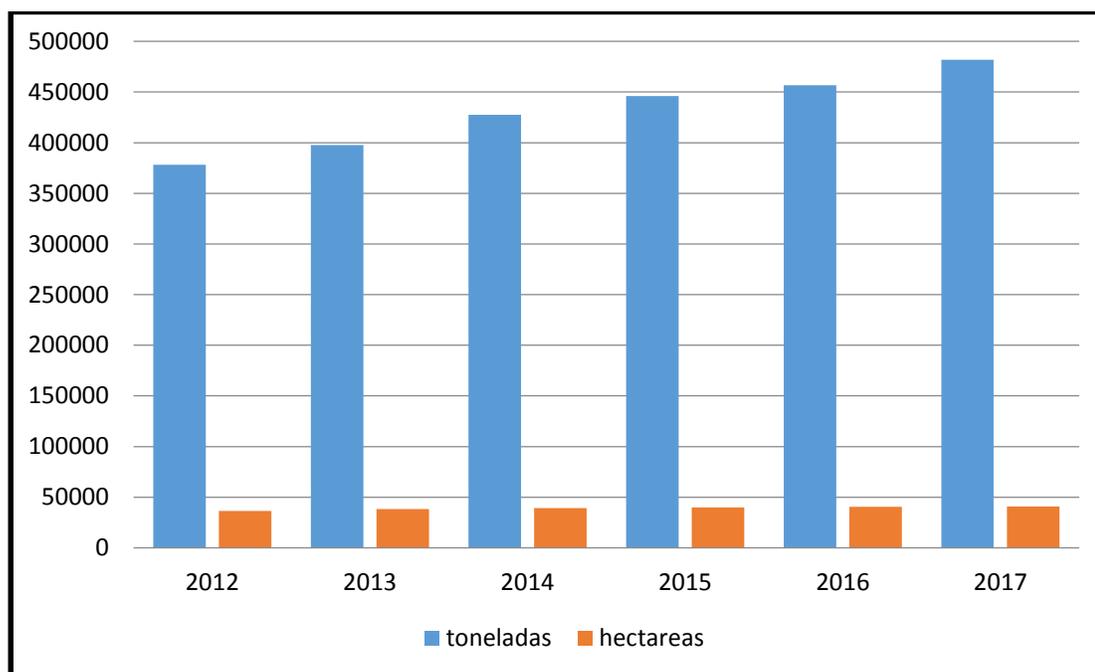
Fuente: INE, 2018.

Se cultivan siete variedades de esta fruta en el país: banano – cavendish, banano – dulce cajita (lady’sfinger), banano – fhia 18, banano – grandnaine, banano – mokotaqui, banano (frenchplantain) (IBCE, 2008).

El 68 % de plátano destinado al mercado nacional ascendió a 228417 toneladas, la porción comestible de un plátano es de aproximadamente 66 gramos por cada 100 gramos de producto fresco, lo que genera un residuo (cáscara) equivalente a 34 gramos, por lo tanto, la cantidad de cáscara de plátano desechadas en 2013 estimada fue de 77661,8 toneladas, cantidad que es menor en la realidad, ya que no se llega a comerciar el plátano en su totalidad (INE, 2018).

En el país, el plátano se encuentra disponible todo el año, se cosechan en estado verde-maduros (madurez fisiológica) pueden o no estar con madurez de consumo al llegar a los mercados de destino, ya que los plátanos se pueden consumir en estado verde-maduro o cuando están completamente amarillos, éstos últimos son los que normalmente se comercializan para consumo (INE, 2018).

La figura N° 2-5 muestra el comportamiento de la producción de plátano, de acuerdo a la superficie cultivada en hectáreas (Ha), toneladas métricas (Tn) y según campaña agrícola entre los años 2012 al 2017.



Fuente: INE, 2018.

Figura N° 2-5: Comportamiento de la producción de plátano en Bolivia

2.4.2 Exportaciones

En 2016, 143028 toneladas fueron exportadas a países como: Argentina, Polonia, Uruguay y Chile; representando el 33 % de la producción nacional en ese año, el resto fue destinado al mercado nacional (TradeMap). Se muestra en la tabla N° II-4, la exportación nacional de plátano en 2016.

Tabla N° II-4

Exportación nacional de plátano en toneladas

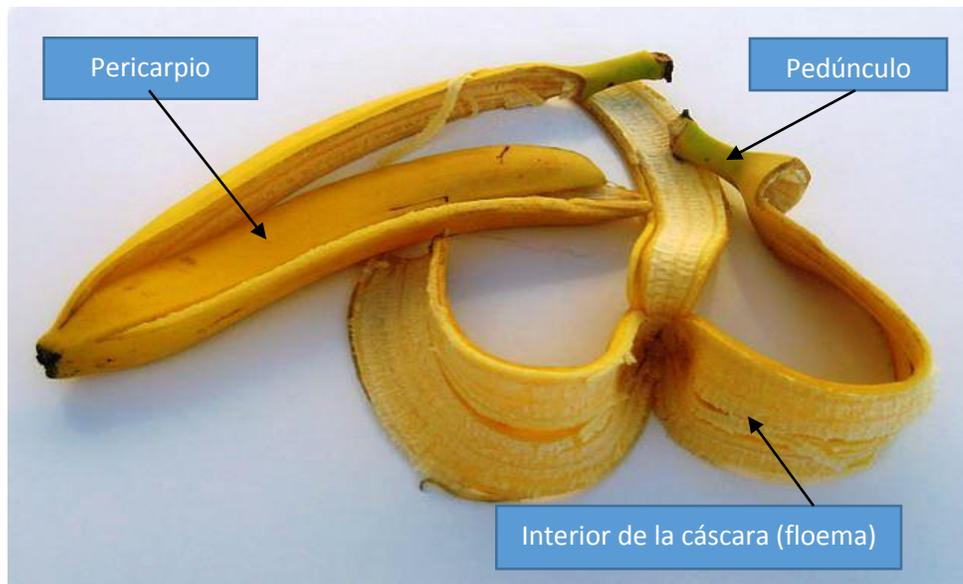
Importadores	Cantidad exportada
Mundo	143028
Argentina	123364
Polonia	11261
Uruguay	7971
Chile	432

Fuente: TradeMap, 2018.

2.5 Cáscara de plátano

El 95% de los residuos del plátano son usados como abono, desconociendo su valor agregado. Desafortunadamente, los residuos que se generan del plátano no son aprovechados de manera eficiente por el agricultor, ya que su producción está destinada a la comercialización o como opción alimenticia para el hogar, por lo que después de usar el fruto se destina lo restante a abono para la cosecha, por medio de su descomposición (Betancurt, 2011). La figura N° 2-6 muestra las partes de una cáscara de plátano.

Los residuos no ayudan a la nutrición del suelo, sino que por el contrario impactan negativamente el medioambiente al generar el crecimiento de diversos microorganismos en zonas donde no deberían crecer, se pueden afectar otros cultivos, acumular agua y formar hongos en lugares inadecuados. En el ámbito industrial, estos residuos se pueden utilizar para la fabricación de etanol y butanol, fibras (empaques, embalajes, artesanías), compostados (abono natural), papel, pectina (Betancurt, 2011).



Fuente: Barradas, 2017.

Figura N° 2-6: Partes de una cáscara de plátano

2.5.1 La cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) como fuente de almidón

Se encuentra cerca de un 70% de almidón en el plátano. Su estado de maduración para la extracción del almidón se debe realizar en estado inmaduro. Este polisacárido tiene variadas y numerosas aplicaciones en diferentes industrias, entre las cuales se pueden mencionar: papel, textil, farmacéutica, adhesivos y alimentos. En esta última, se utiliza como texturizante, espesante, estabilizador, gelificante o para la elaboración de recubrimientos comestibles (Mazzeo, 2008).

2.5.2 Composición química de la cáscara de plátano

Para efectos de este trabajo será utilizado el polímero basado en almidón, ya que, el desarrollo de plástico a partir del almidón presente en las cáscaras de plátano es una de las alternativas sustitutas del petróleo, considerando que Bolivia posee características especiales para su producción, estas cáscaras que son desechadas pueden ser una alternativa ideal (Flores, 2013). La tabla N° II-5 muestra la composición química de la cáscara de plátano por 100 gramos.

Tabla N° II-5

Composición química de la cáscara de plátano

Plátano	Verde	Maduro
Agua	69,58	75,12
Almidón	15,37	4,21
Celulosa	7,54	0,92
Sacarosa	9,36	
Glucosa	0,58	5,19
Dextrosa	1,82	1,76
Gomas	0,67	1,6
Tanino	0,06	0,01
Proteína	2,1	
Ceniza	0,76	0,76

Fuente: Flores, 2013.

2.6 Almidón

En la naturaleza el almidón ocupa el segundo lugar en abundancia después de la celulosa. Es el producto de la fotosíntesis, se almacena en los amiloplastos de las células vegetales (Martin & Smith, 1995) y se extrae de diferentes fuentes, lo cual genera diferentes propiedades según el uso de este, ya que para la elaboración de algunos productos se requiere tipos específicos de almidón. Las fuentes industriales más importantes de almidón son el maíz, trigo, papa, tapioca y arroz (Bastioli, 2005).

El almidón es versátil por su variedad de usos, también es uno de los ingredientes más importantes a nivel industrial. Su uso de remonta a la época de los egipcios en la cual, este fue utilizado para la elaboración de papiro y adhesivos (Dziedzic & Kearsley, 2003). Casi todas las grandes industrias han encontrado algún uso para el almidón. En la industria alimentaria, el almidón se usa para impartir una amplia gama de propiedades funcionales y es probablemente el hidrocoloide más utilizado (Rudrapatnam, 2005).

Puede servir como espesante, encapsulador de sabor, agente de relleno, en productos de panadería, etc. El almidón también se utiliza en la producción de jarabes. Los usos del almidón en la industria no alimentaria son numerosos: los mayores usos incluyen a la industria de textiles, papel, cosméticos, plásticos, farmacéutica e industria de adhesivos. En la manufactura de utensilios de comida rápida y como empaque ha ido ganando atención (Rahul, 2005).

2.6.1 Características del almidón

El almidón se presenta como polvo blanco fino, insípido, constituido por granos característicos microscópicamente. Es insoluble en agua fría; en agua caliente se hincha formando engrudo; se tiñe de azul a azul violeta con solución de lugol y da glucosa como producto final de la hidrólisis total (León & Leskek, 2009).

2.6.2 Estructura y composición química general del almidón

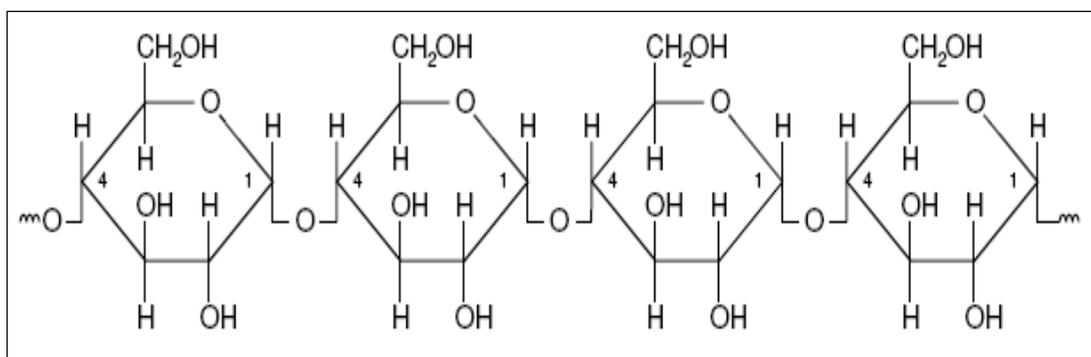
El almidón consiste de gránulos, parcialmente cristalinos e insolubles en agua a temperatura ambiente y son la principal forma de almacenamiento de energía de las plantas. De acuerdo a su fuente botánica pueden ser de diversa forma y tamaño, la forma puede ser redonda, elíptica, ovalada, lenticular o poligonal. El tamaño de los gránulos de almidón de arroz y amaranto son los más pequeños, con aproximadamente 1-3 um y los más grandes son los de papa y tapioca con un diámetro aproximado entre (50-100) um (Hoover, 2001).

El granulo de almidón consiste de dos estructuras poliméricas de glucosa denominadas amilosa y amilopectina, además lípidos, proteínas, agua y iones minerales que pueden encontrarse en la matriz del granulo o formar complejos específicos con el polímero de almidón (Dziedzic & Kearsley, 2003). La proporción de amilosa y amilopectina en los almidones, determina las propiedades del mismo.

2.6.2.1 Amilosa

Es un polímero lineal de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1-4). Las unidades de la glucosa se encuentran en la forma de alfa-D-glucopiranososa y tienen la facilidad de adquirir una conformación helicoidal en la que cada vuelta se compone de seis a ocho unidades (León & Leszek, 2006).

También presenta entre un 0.3-0.5 % de enlaces α -D-(1-6) formando ramificaciones (Greenwood, 1990). El interior de la hélice contiene sólo átomos de hidrógeno, y es por tanto lipofílico, mientras que los grupos hidroxilos están situados en el exterior de la hélice. La mayoría de los almidones contienen entre 17 – 25% de amilosa (León & Leszek, 2006). La figura N° 2-7 muestra la estructura química de la amilosa.

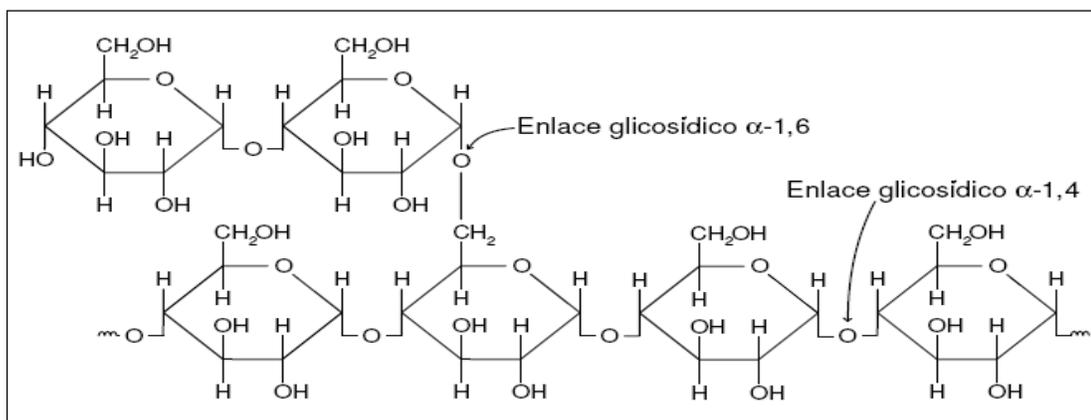


Fuente: Ghanbarzadeh, 2012.

Figura N° 2-7: Estructura química de la amilosa (A)

2.6.2.2 Amilopectina

Es una molécula larga y altamente ramificada, en la cual, las moléculas lineales de D-glucosa están unidas mediante enlaces α -(1-4) que se encuentran interligadas entre un 5-6 % de enlaces glucosídicos α -D-(1-6), formando una estructura muy ramificada. La amilopectina constituye alrededor del 75 a 83% en peso del almidón (León & Leszek, 2006). La figura N° 2-8 muestra la estructura química de la amilopectina.



Fuente: Ghanbarzadeh, 2012.

Figura N° 2-8: Estructura química de la amilopectina (B)

2.6.3 Datos fisicoquímicos de almidón

Se han tomado los requerimientos presentados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), en la documentación del Departamento de Agricultura, tal como se muestra en la tabla N° II-6

Tabla N° II-6

Características fisicoquímicas generales del almidón

Amilosa	17-24 %
Amilopectina	76-83 %
Materia seca en almidón	87-90 %
Humedad	10-13 %
Viscosidad, almidón al 5%, 25 °C y 10 RPM	840 1 1500 Cp
Temperatura de gelatinización, °C	58,5 a 70 °C
Densidad promedio	1560 g/ml
Pulpa	< 0,3%
Cenizas	< 0,12%
Índice de absorción de agua (WAI)	0,82 – 15,52g gel/g muestra
Índice de solubilidad en agua (WSI)	0,27 / 12,32%
Poder de hinchamiento	0,75 – 15,45
Fosfatos	0,61 – 3,6 n mol/mg
Tamaño de grano (% que pasa malla 100)	99%
Acidez	0,0022x10 ⁻³ a 5x10 ⁻³ meq ácido láctico/g almidón
PH	4,5 – 5,5
Nitrógeno total	0,064 %
Azúcares reductores	0,0

Fuente: FAO, 2007

2.7 Clasificación de los polímeros

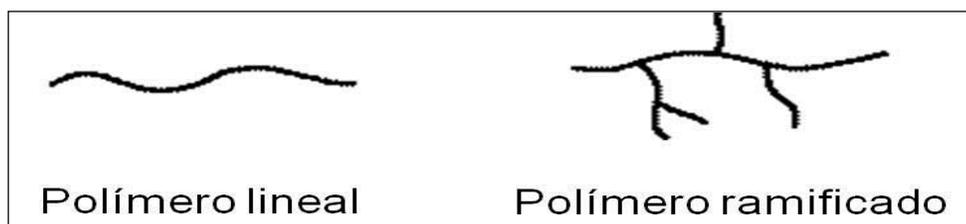
Los polímeros son macromoléculas, formadas por la unión de unidades repetitivas, denominadas **monómeros**, que siguen un patrón determinado, estos polímeros tienen múltiples usos, debido a la gran variedad de sustancias en las cuales están presentes; como alimentos, plásticos, textiles, gomas, entre otros (REMAR, 2011).

2.7.1 Según su forma

Si se toma en cuenta la **forma** del polímero, estos se pueden clasificar en **polímeros lineales** y **polímeros ramificados** (REMAR, 2011).

- Los **polímeros lineales** se origina cuando el monómero que lo forma tiene dos puntos de ataque, de modo que el polímero se forma unidireccionalmente, formando cadenas lineales.
- Los **polímeros ramificados** se forman porque el monómero posee tres o más puntos de ataque, de modo que la polimerización ocurre tridimensionalmente, es decir, en las tres direcciones del espacio. En base a esto es se puede encontrar variadas formas.

La variedad de disposiciones estructurales en los polímeros permiten que estos cuenten con características diversas; de esta manera se puede encontrar que los polímeros lineales son materiales blandos y moldeables, mientras que los polímeros ramificados serán frágiles y rígidos (REMAR, 2011). En la figura N° 2-9 se muestra los tipos de polímeros según su estructura:



Fuente: REMAR, 2011.

Figura N° 2-9: Tipos de polímeros según su forma

2.7.2 Según su origen

Finalmente, si se toma en consideración el origen de los polímeros, se encuentra los **naturales o biopolímeros**, que son aquellos que se encuentran en la naturaleza, formando parte de los seres vivos como la celulosa, el almidón, el caucho, el colágeno, la seda, etc.; y los **sintéticos** que son aquellos fabricados en laboratorios o en procesos de producción en industrias como el nylon, la baquelita, el PVC y el teflón (REMAR, 2011).

Es importante señalar, que tanto polímeros naturales como sintéticos están formados por los mismos componentes, sin embargo, lo que cambia en ellos es el método de obtención (REMAR, 2011).

2.7.3 Según sus propiedades físicas

Por sus propiedades físicas los polímeros, pueden ser plásticos, elastómeros y fibras (REMAR, 2011).

Fibras: Son polímeros naturales y sintéticos compuestos por moléculas alargadas y estiradas, que forman hilos largos, delgados y muy resistentes. Por ejemplo: el algodón, la lana, la seda, el nylon, el poliéster y el dacrón.

Elastómeros: Son polímeros naturales y sintéticos con una gran elasticidad. Por ejemplo: el caucho y el neopreno.

Plásticos: Son polímeros sintéticos que se pueden moldear con ayuda del calor o la presión. Por ejemplo: el poliestireno, el PVC y el plexiglás o acrílico. Los plásticos, a su vez, se clasifican en función de sus propiedades térmicas en **termoplásticos y termoestables**.

Termoplásticos: Son plásticos que se reblandecen a altas temperaturas y se vuelven rígidos por enfriamiento. Pueden fundirse fácilmente una vez formados, y pueden ser remodelados varias veces, debido a que las fuerzas de cohesión entre las cadenas moleculares son débiles. Por eso, se pueden separar con mucha facilidad por acción del

calor. Son solubles en solventes orgánicos. Por ejemplo: el polietileno, el poliestireno, policloruro de vinilo o PVC, el polimetacrilato de metilo o plexiglás. Generalmente, estos polímeros son aquellos que se pueden reciclar, dado que sometido a altas temperaturas se funden, pudiendo cambiar su forma sin modificar su estructura (REMAR, 2011).

Termoestables: Son aquellos plásticos que se moldean solo durante su formación. Al enfriarse, se entrelazan sus cadenas. Esta disposición no permite nuevos cambios de forma mediante calor o presión. Son materiales insolubles, rígidos y duros. Los más importantes son la baquelita y el poliuretano. Por lo general, este tipo de plástico no puede ser reciclado, dado que al someterlos a altas temperaturas la estructura del polímero se modifica totalmente (REMAR, 2011).

2.8 Formación de polímeros

Los **polímeros** se definen como macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena, como se observa en la figura N° 2-10

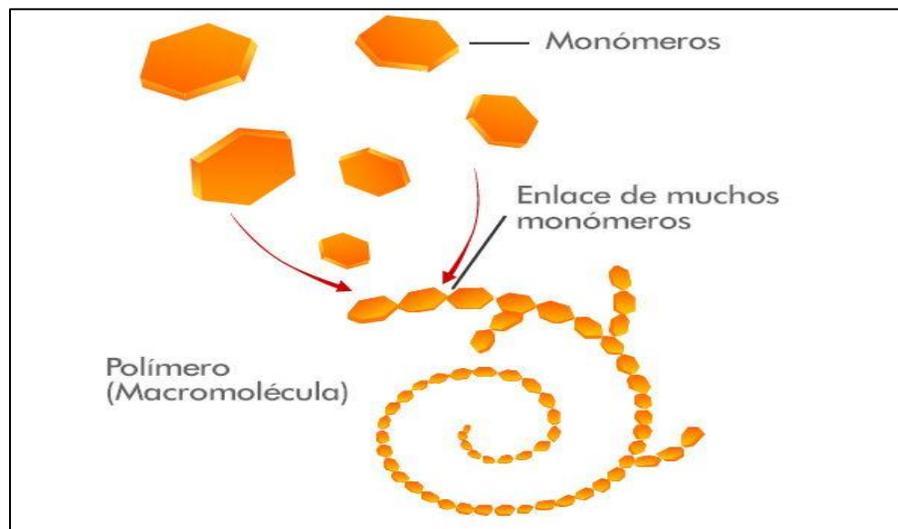


Figura N° 2-10: Pasos para la formación de un polímero
Fuente: REMAR, 2011.

Este proceso se puede llevar a cabo de dos maneras: a través de un **proceso de adición** o de un **proceso de condensación**.

2.8.1 Reacciones de polimerización

La polimerización es el proceso químico, por el cual, mediante el calor, la luz o un catalizador, se unen varias moléculas de un compuesto para formar una cadena de múltiples eslabones de estas y obtener una macromolécula (polímero) (Clayden, 2000).

Existen muchas de estas reacciones y son de distinta clases. Pero todas las polimerizaciones tienen un detalle en común: comienzan con moléculas pequeñas llamadas monómeros, que luego se van uniendo entre sí para formar moléculas gigantes. El proceso de polimerización puede entenderse como un proceso de ensamblaje de unidades monoméricas que se repiten para formar estructuras de mayores dimensiones (Clayden, 2000).

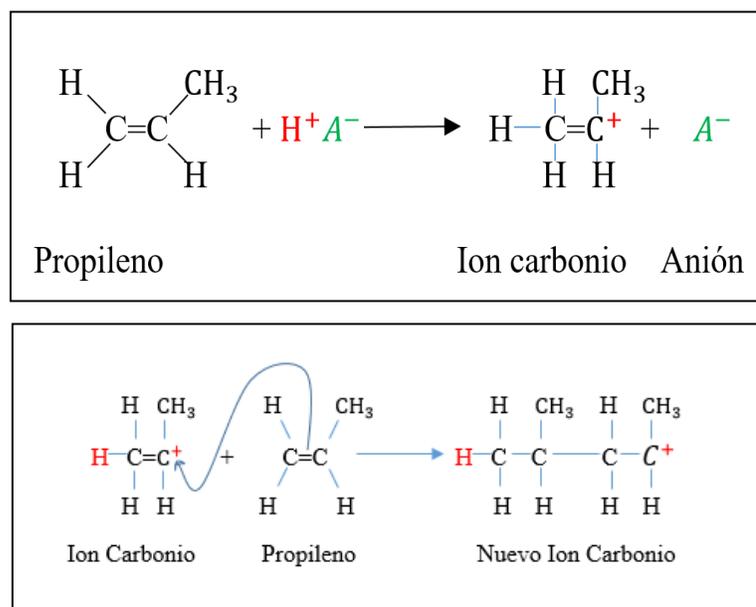
2.8.2.1 Reacciones de condensación

Los polímeros se forman a partir de monómeros polifuncionales a través de diversas reacciones. La unidad repetitiva tiene una forma molecular diferente a la de los monómeros de partida, tras la eliminación o condensación de algún grupo de partida. Se asume que los grupos activos de los extremos de un monómero o cadena polimérica tienen la misma reactividad sin importar la longitud del polímero. Por lo general se pierde una molécula pequeña, como agua o HCl gaseoso, los monómeros iniciales de estas sustancias han de tener al menos dos grupos funcionales, obteniéndose en este caso un polímero con estructura lineal (Greeves, 2000).

Es el caso de la reacción de formación del nylon 66 se parte de dos monómeros que son el ácido hexanodioico adípico y la hexametilendiamina. Para hacer nylon 66 no se necesitan catalizadores, ya que los ácidos catalizan la reacción y uno de los monómeros es precisamente un ácido. La poliamida resultante tiene una estructura lineal. Los nylons también pueden obtenerse a partir de una diamina y un dicloruro de ácido

Terminación: Esta fase se caracteriza por la pérdida de actividad y producción del polímero.

En la figura N° 2-12, se muestra una polimerización catiónica del propileno.



Fuente: CABC, 2015.

Figura N° 2-12: Polimerización catiónica del propileno

2.9 Definición de bioplástico a partir de almidón

El plástico biodegradable es producido con materias primas orgánicas que proceden de fuentes renovables, como la fécula de la papa, camote, yuca, entre otros, que son transformadas en bioplástico a través de una hidrólisis ácida, que al final de su vida útil, al ser eliminado como residuo orgánico, estese descompone en un corto período de tiempo, en presencia de microorganismos; sirviendo de abono orgánico para las plantas (León & Leskek, 2009).

Otro proceso de producción del plástico biodegradable utiliza también microorganismos como es el proceso de fermentación, como sucede en la obtención del ácido láctico para obtener ácido poliláctico que es un plástico biodegradable de

mucha aplicación. El proceso empieza con el almidón que se extrae del maíz, luego los microorganismos lo transforman en una molécula más pequeña de ácido láctico que sirve como base para la elaboración de cadenas poliméricas de ácido poliláctico (PLA). El entrecruzamiento de cadenas de PLA da lugar a la lámina de plástico biodegradable que sirve de base para la elaboración de numerosos productos plásticos no contaminantes. Los plásticos biodegradables producidos a partir de almidón pueden inyectarse, extruirse y termoformarse, tan igual como los plásticos convencionales derivados del petróleo y los productos obtenidos presentan las mismas propiedades características físico-químicas (León & Leskek, 2009).

2.9.1 Polímeros derivados del almidón

Los polímeros derivados de almidón son materiales termoplásticos resultantes del procesado del almidón natural por medios químicos, térmicos o mecánicos. Asimismo, es posible hacer copolímero con otros biopolímero y pueden obtenerse copolímero tan flexibles como el polietileno o tan rígidos como el poliestireno. El almidón es un polisacárido abundante, de bajo coste, renovable y totalmente biodegradable que se encuentra en las plantas. El almidón comercial se obtiene de las semillas de cereales: maíz, trigo, varios tipos de arroz, etc., y de algunas raíces y tubérculos como la patata. El más utilizado para la producción de bioplásticos es el almidón de maíz (León & Leskek, 2009).

2.9.1.1 Almidón termoplastificados

Este plástico es conocido como TPS por sus siglas del inglés (Termoplastic starch). Este es un material renovable que puede incorporarse al suelo como abono orgánico y es compatible con el medio ambiente. El desarrollo y producción de almidón termoplástico biodegradable (Thermoplastic starch, TPS) es importante para reducir la cantidad total de desechos plásticos sintéticos en el mundo (Ruiz, 2006).

Existen plásticos procedentes del petróleo con aditivos que mejoran su capacidad de degradación pero no satisfacen las normas de biodegradabilidad establecidas por los cánones europeos, mientras que los bioplásticos sí lo hacen (Weber & Claus, 2000).

El almidón en general en presencia de un plastificante (agua, glicerina, sorbitol, etc.), temperaturas altas (90 a 180°C), y cizallado, funde y fluye, permitiendo su uso en inyección, extrusión y equipo de soplado, así como funcionan los plásticos sintéticos (Ruiz, 2006).

Con el fin de obtener un almidón termoplástico, es necesario que el almidón mantenga su estructura granular semicristalina y que se comporte de forma similar a un termoplástico fundido, obtenido a través de extrusión de uno o doble tornillo con el uso de energía térmica y mecánica (Ruiz, 2006).

El TPS presenta varios atributos, además de biodegradable es un material renovable, flexible y se acondiciona muy fácilmente a diferentes procesos de termoplastificación usando equipos estándar utilizados en la fabricación de polímeros sintéticos, tales como inyección por moldeo, extrusión por soplado, moldeo por inyección, moldeo por compresión, extrusión de película plana y radiación por moldeo, aunque se ha reportado la utilización de un nuevo método en la preparación de películas de almidón termoplástico usado en el cubrimiento de alimentos (Shanks & Kong, 2011).

2.9.1.2 Propiedades mecánicas, del bioplásticos a partir de almidón

El almidón es muy sensible a la humedad y al contacto con agua lo que limita el rango de sus aplicaciones. En cambio por su estructura polisacárido, ofrece propiedades moderadas de permeabilidad al oxígeno (REMAR, 2011). La siguiente tabla N° II-7 muestra las propiedades mecánicas de los bioplásticos.

Tabla N° II-7

Propiedades mecánicas de los bioplásticos

Densidad	1,2-1,35 (g/cc)
Resistencia a la tracción	35-40 MPa
Elongación	27-900%
Temperatura remblandamiento	65-125 °C
Permeabilidad Vapor Agua	Baja
Temperatura de Fusión	64-110 °C
Biodegradabilidad	100%

Fuente: REMAR, 2011.

2.9.1.3 Definición de las propiedades mecánicas

- **Resistencia:** la resistencia tensil es la fuerza aplicada sobre la muestra, dividida por el área de la misma, $\frac{F}{A} = \text{resistencia}$, tanto la tensión como la resistencia tensil se mide en unidades de fuerza por unidad de área, generalmente N/cm² (Jang, 1994).
- **Módulo tensil:** habilidad que tiene un trozo de material para resistir la deformación. El módulo de expresa generalmente como la relación entre fuerza ejercida sobre la muestra y el grado de deformación conocido como módulo de Young, $Y = \frac{F*L}{A*Ax}$, este es medido en unidades de fuerza N/cm² (Jang, 1994).

2.9.1.4 Propiedades de biodegradabilidad

El almidón es 100% biodegradable, sin embargo, determinados copolímero, en un alto grado de sustitución, pueden afectar a negativamente la biodegradabilidad por interacciones almidón-poliéster que ocurren a nivel molecular (REMAR, 2011). La biodegradabilidad es la capacidad que tienen las sustancias y los materiales orgánicos de descomponerse en sustancias más sencillas debido a la actividad enzimática de microorganismos. Cuando se completa el proceso biológico, se obtiene la

transformación total de las sustancias orgánicas iniciales en moléculas inorgánicas simples como agua, dióxido de carbono y metano. El fenómeno de la biodegradación forma parte del ciclo natural de la vida en la tierra, basado en el carbono (León & Leskek, 2009). La figura N° 2-13, se muestra el proceso de biodegradación de una botella y un tenedor.



Figura N° 2-13: Proceso de biodegradación de una botella y un tenedor
Fuente: Leon&Leskek, 2009.

2.10 Ventajas y desventajas de los bioplásticos

Los bioplásticos como producto que integra el mercado para consumir o para la utilización del mismo, cuenta con ventajas y desventajas (REMAR, 2011).

2.10.1 Ventajas de los bioplásticos

- Los bioplásticos son sintetizados por especies de distintos géneros bacterianos, por lo que su relación de contaminación es menor con respecto a los plásticos convencionales.
- En cuanto a su degradación, esta cumple un papel importante en la conservación bacteriana en condiciones de baja concentración de nutrientes. Su degradación está entre 1 a 6 meses.
- Al ser termoplásticos, poseen propiedades que son similares a las de los plásticos derivados del petróleo.
- Llegan a ser degradados en su totalidad por las bacterias que los producen, y por otras bacterias, hongos y algas.
- Son producidos a partir de recursos renovables.

2.10.2 Desventajas de los bioplásticos

- Siendo numerosas las ventajas de los bioplásticos, la principal desventaja que poseen es el costo de producción y el precio. Este costo de producción y el precio suelen ser mayor que los plásticos derivados del petróleo. Pero, a medida que se observen las ventajas comparativas del bioplástico frente al plástico derivado del petróleo su uso aumentará (REMAR, 2011).

2.11 Obtención de bioplástico a partir de almidón

El proceso de obtener almidón termoplastificado es una modificación que sufre el almidón. Para modificar las características como la resistencia mecánica, flexibilidad que le dan el carácter cristalino al almidón dependen de la relación porcentual entre la amilosa y la amilopectina en la composición del almidón, y así también del grado de

ramificación. Estas características pueden ser mejoradas modificando la estructura del almidón. En la industria existen varios métodos para obtener almidón termoplastificado, el método más empleado es el de uso de extrusor mono husillo o de doble husillo. Se han utilizado 3 métodos a nivel mundial los cuales han servido de punto de partida para el diseño del presente proceso industrial, los mismos que se revisan en los siguientes puntos (Emmerich & Kranenburg, 2000).

2.11.1 Método por extrusión

El invento se refiere a producir un almidón termoplástico biopolimérico sobre la base de materias primas renovables por extrusión en forma de tiras, hilos u otras formas (Emmerich & Kranenburg, 2000).

El extrusado puede ser procesado en granulado, de tal manera que a la salida de la extrusora el almidón modificado caliente se corta en pedazos granulares con una cuchilla giratoria. Durante la etapa de extrusión el almidón se desintegra por efecto de la presión y temperatura. Normalmente es suficiente un contenido de agua de 10 a 20%, y opcionalmente pueden ser añadidos disolventes y plastificantes. La masa plástica de almidón caliente está sujeta a esfuerzos mecánicos y físico químicos por las condiciones de reacción en el extrusor y a la alta tensión de cizallamiento, es decir, como efecto indeseado se da una descomposición molecular inevitable del polímero de almidón. Como resultado se reduce la resistencia de la película de almidón extruida. El extrusor de doble tornillo sufre un desgaste superior debido a la alta viscosidad y pegajosidad del almidón desestructurado. Por lo tanto las piezas del extrusor de tornillo a utilizar deben ser altamente resistentes al desgaste, aunque los costos de éste sean altos, lo cuales una desventaja para este proceso (Emmerich & Kranenburg, 2000)

2.11.2 Método termo mecánico

La primera etapa para la preparación del almidón termoplástico es la mezcla del almidón con agua en proporciones que dependen de la calidad de plástico que se quiere

obtener. Una vez logrado una buena disolución del almidón, en 20 minutos aproximadamente, se somete a calentamiento hasta lograr una completa gelatinización. Aquí el almidón se hincha formando una pasta viscosa. Aquí se añade un plastificante que en el mejor de los casos puede ser glicerol o sorbitol (Yu & Gao, 1996).

En algunos casos se puede agregar una mezcla de diferentes polioles (sorbitol más manitol). Se continúa la mezcla hasta lograr una completa dispersión homogénea. El procesamiento térmico mecánico rompe los gránulos de almidón semicristalino. Como la temperatura de fusión del almidón puro es sustancialmente mayor que su temperatura de descomposición hay una necesidad para usar plastificante, tal como el agua. Bajo la influencia de la temperatura y la fuerza cizalla, la rotura de la estructura cristalina de los gránulos se transforma en una fase continua de polímero. (Lorcks, 2000). Para darle plasticidad se agrega glicerol o polietilenglicol. Para mejorar las propiedades mecánicas se incluye celulosa como emulsificante (Yu&Gao, 1996). Así también, el uso de insuficiente cantidad de plastificante da como resultado destrucción incompleta de la estructura cristalográfica del almidón (Lorcks, 2000).

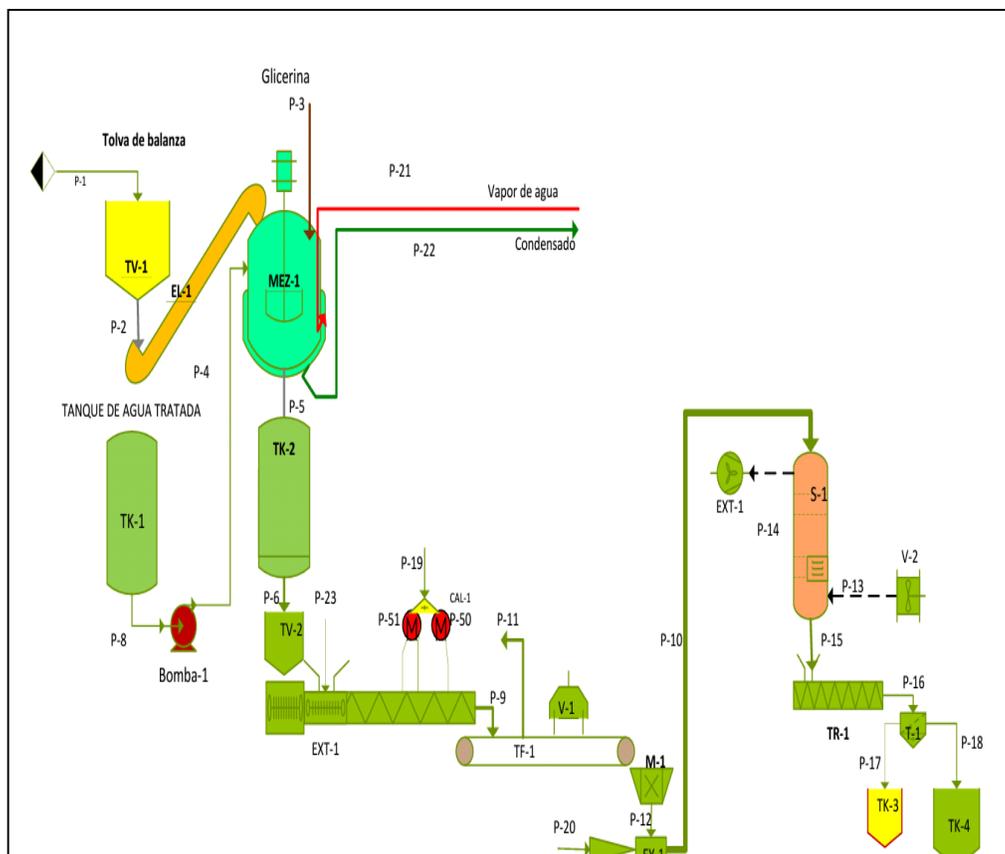
2.11.3 Método brasileño

Un método de obtención de bioplástico a partir de harina de yuca, ha sido desarrollado en Brasil, pero que utiliza para la reacción de reticulación una solución de epiclorhidrina que es una sustancia con muy buenas propiedades reticulantes haciendo al material más resistente y que da mayor rigidez a las moléculas, ya que forma enlaces cruzados, pero es una sustancia cancerígena, motivo por el cual no considero que debería utilizarse ya que en muchos casos el bioplástico está en contacto con alimentos y dada la variedad de condiciones a las que son expuestas, existe el riesgo de contaminar, y como tal pierde la razón de ser del bioplástico que se quiere obtener (Tapia, 2011).

Cabe destacar que la reticulación es una reacción química presente en la química de los polímeros e implica la formación de una red tridimensional formada por la unión de las diferentes cadenas poliméricas (Tapia, 2011).

2.11.4 Diagrama del proceso industrial de obtención de bioplástico de almidón

En la figura N° 2-14 se puede observar el proceso de obtención de bioplástico a partir de almidón a nivel industrial.



Fuente: CHERO, 2014.

Figura N° 2-14: Proceso industrial para producir bioplástico de almidón

En la tabla N° II-8 se muestra por código cada uno de los equipos utilizadas en este proceso de obtención de bioplástico a partir de almidón.

Tabla N° II-8***Equipos industriales para la fabricación de bioplástico de almidón***

Bomba-1	B-1	Tamiz	T-1
Bomba Neumática	BN-1	Tanque de agua tratada	TK-1
Calentador	CAL-1	Tanque tampón	TK-2
Eyector 1	EY-1	Tolva de balanza	TV-1
Elevador de tornillo	EL-1	Alimentación al extrusor	TV-2
Extrusor	EXT-1	Transportador de faja	TF-1
Mezclador	MEZ-1	Ventiladores	V-1,2
Molino	M-1	Contenedor sub producto	TK-3
Secador	S-1	Contenedor producto final	TK-4

Fuente: Chero, 2014.

2.12 Etapas para la producción de bioplástico de almidón

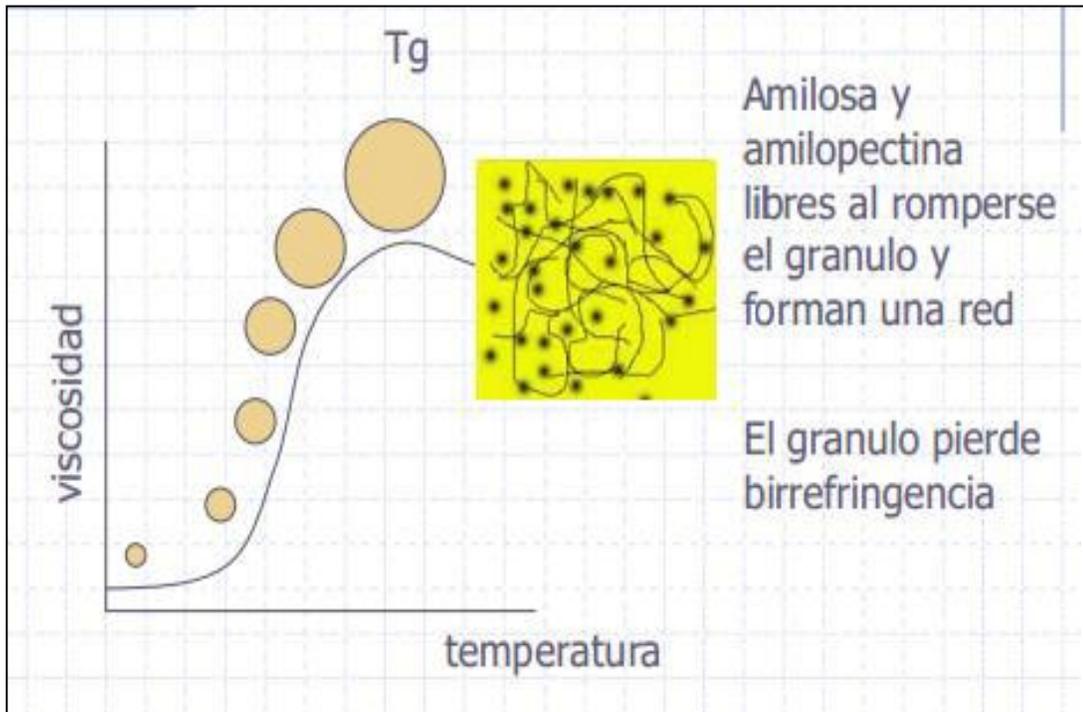
El almidón tiene una organización granular especial, las macromoléculas son orientadas principalmente de acuerdo al eje radial. La ultra estructura es obtenida por enlaces de hidrógeno inter macro moleculares, entre grupos hidroxilos, con la participación de moléculas de agua. La amilosa y las regiones ramificadas de la amilopectina forman la zona amorfa en el gránulo (Hernández, 2008).

La amilopectina es el componente cristalino dominante del almidón natural con organizaciones de doble hélice, pero también se puede encontrar co-cristalización con la cristalización de la amilosa y hélices simples entre amilosa y lípidos o ácidos grasos libres (Hernández, 2008).

2.12.1 Gelatinización

El almidón en su estado nativo es insoluble en agua. Se calienta el almidón en presencia de agua y se produce imbibición o incorporación de agua en el gránulo. A medida que el calentamiento continúa, los gránulos de almidón captan más agua irreversiblemente y se hinchan (Omar, 2010).

En la figura 2-15, se encuentran algunas cadenas cortas de amilosa que salen de los gránulos. Este proceso se llama gelatinización del almidón.



Fuente: Omar, 2010

Figura N° 2-15: Gelatinización del almidón

A medida que el almidón sale de los gránulos la mezcla se convierte en una solución, que es un sistema de dos fases, una líquida continua y una sólida dispersa.



El proceso de gelatinización conlleva una pérdida de la estructura cristalina ordenada del almidón. Como continuación de la gelatinización del almidón se produce la formación de una pasta con el calentamiento continuado.

2.12.2 Etapas de gelatinización del almidón

- La temperatura de gelatinización se alcanza entre 52-65°C según el tipo de almidón. Se ha determinado que el contenido de amilosa en el almidón es 17.6%, que varía muy poco entre almidones procedentes de distintas fuentes, y el rango de temperatura de gelatinización varía entre 58.5 a 70°C (Ojeda, 2000).
- La energía cinética de las moléculas de agua caliente rompen los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón.
- A medida que se forman puentes de hidrógeno el agua es capaz de penetrar aún más en el gránulo de almidón y tiene lugar el hinchamiento. Debe haber suficiente agua para entrar y agrandar el gránulo.
- El hinchamiento del gránulo aumenta conforme aumenta la temperatura.
- A medida que se agrandan los gránulos eliminan amilosa y posiblemente amilopectina.
- A medida que gelatiniza la pasta se vuelve más espesa, viscosa y resistente al flujo.

2.12.3 Factores para obtener una gelificación de alta calidad

Agitación: La agitación excesiva después de completar la gelatinización puede romper los gránulos y en consecuencia hace más fluida la mezcla (Jianping, 1997).

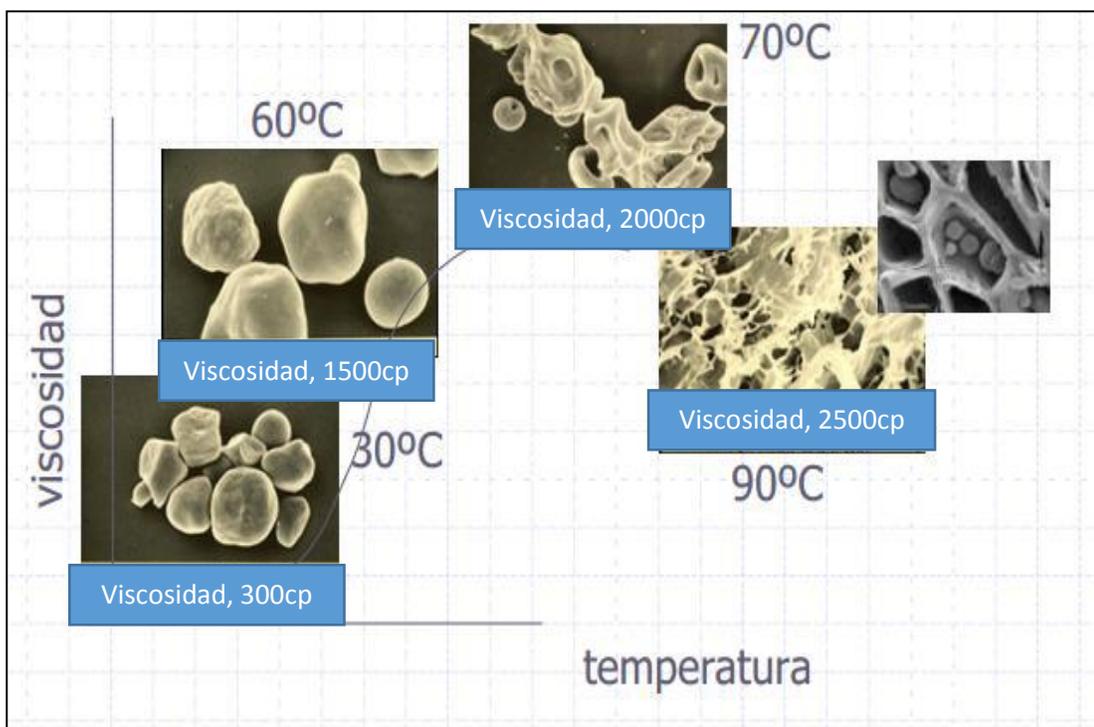
Temperatura: Para los diferentes tipos de almidones (papa, yuca, oca, maíz y plátano) la temperatura de gelificación varía entre 52-70 °C (Jianping, 1997).

Tiempo de calentamiento: A mayor tiempo de calentamiento la mezcla es menos espesa debido a la rotura de los gránulos de almidón (Jianping, 1997).

Gelificación: Para que un almidón nativo pueda procesar y formar un material bioplástico, es necesario romper y fundir la estructura semicristalina original. Existen

varios métodos para elaborar TPSs. La estabilidad, transformación y las propiedades físicas de los TPSs dependen de la naturaleza de las zonas amorfas y cristalinas presentes en la estructura del granulo. Se ha comprobado que la utilización de agua durante la fabricación del TPS es indispensable para conseguir una correcta gelatinización y desestructuración del almidón (Jianping, 1997).

La figura 2-16 muestra el proceso de la cinética de gelificación de gránulos de almidón, que varían a medida que la temperatura aumenta.



Fuente: Jianping, 1997.

Figura N° 2-16: Cinética de gelificación del almidón

En resumen, la transformación del almidón granular está influenciada por la temperatura y el contenido de plastificante.

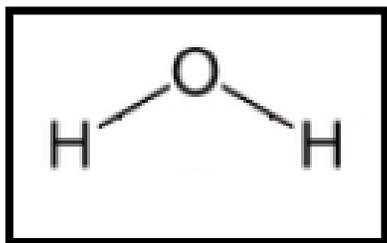
2.13 Plastificantes para elaboración de bioplástico a partir de almidón

A continuación se detalla la función de cada uno de los plastificantes más usados en la elaboración de plástico termoplastificado (TPS).

2.13.1 Agua destilada

Debe ser libre de impurezas e iones. El oxígeno es más electro negativo que el hidrógeno y atrae con más fuerza a los electrones de cada enlace covalente. El resultado de esta diferencia de electronegatividades provoca que la molécula de agua, aunque tiene una carga total neutra, presente una distribución asimétrica de sus electrones, lo que la convierte en una molécula polar, alrededor del oxígeno se concentra una densidad de carga negativa. El ángulo entre los enlaces H-O-H es de $104^{\circ}5'$,

(Shanks& Kong, 2008).

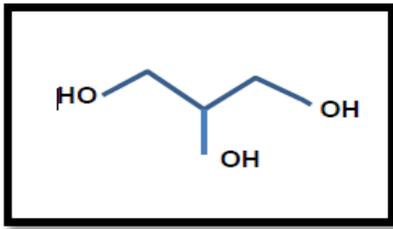


Es utilizada comúnmente como un plastificante para lograr la desestructuración del almidón en las mezclas utilizadas para obtener almidones termoplásticos. Es el plastificante natural más económico, y por este motivo es el de más fácil acceso. Es un plastificante efectivo del almidón por su compatibilidad (Shanks& Kong, 2008).

2.13.2 Glicerol o glicerina

El glicerol es un alcohol con tres grupos hidroxilo. Estos grupos hidroxilos le permiten ser soluble en agua. Tiene un aspecto de líquido incoloro y viscoso, no es tóxico para la salud, lo que le permite ser un buen lubricante para todo tipo de máquinas alimenticias (Shanks& Kong, 2008).

Su fórmula molecular es $C_3H_8O_3$ y su estructura es:

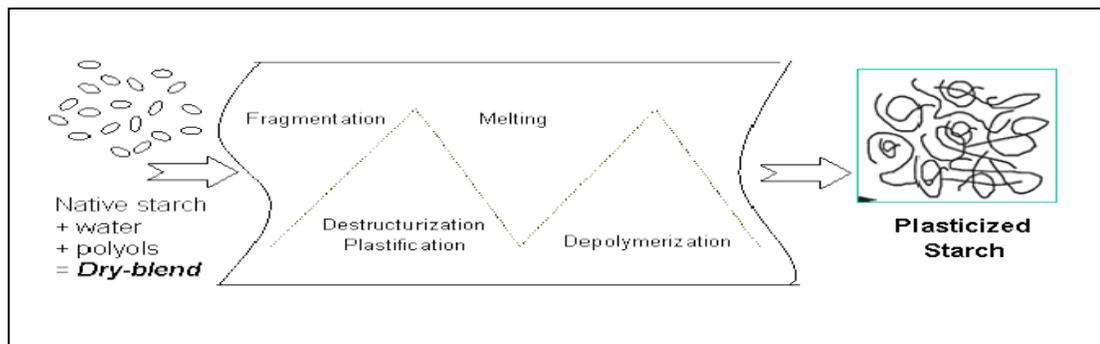


Junto con el agua destilada, el glicerol es el plastificante más comúnmente utilizado en los diferentes estudios que se han realizado sobre la fabricación de polímeros termoplásticos a partir del almidón. Las mezclas que contienen glicerol tienen un aspecto morfológico suave y uniforme. Este componente presenta gran utilidad para la retrogradación de los productos termoplastificados y su acción como lubricante facilita la movilidad de las cadenas poliméricas del almidón (Shanks& Kong, 2008).

Además, reduce significativamente la resistencia a la tracción si su contenido en peso en la mezcla está por encima del 15%. Para contenidos superiores al 25% en peso de glicerol, se aprecia un cierto grado de mejora en la capacidad elástica del material (Shanks& Kong, 2008).

2.11.3 Ácido acético

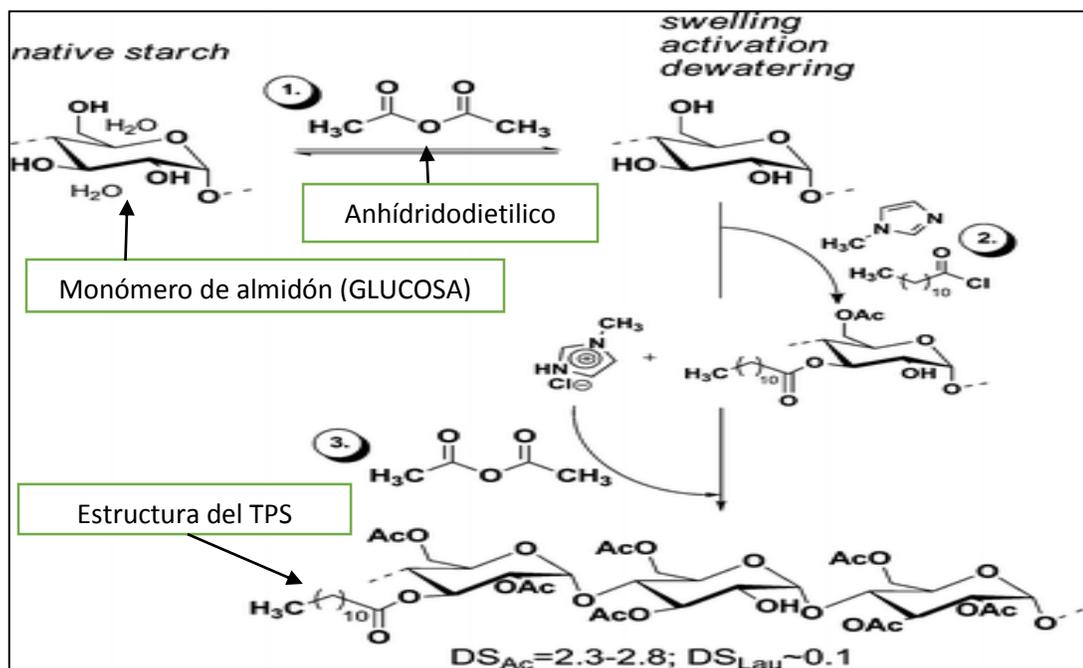
El ácido acético tiene la función de dar propiedad a todos los elementos mezclados, por ejemplo en esta técnica la hidrólisis acida para la obtención del bioplástico, el ácido acético ayuda a que las ramificaciones de la amilopectina se corten y sea una molécula más lineal como la amilosa, y de esta manera el plástico no será quebradizo ni débil (Shanks &Kong, 2008).En la figura N° 2-17, se observa las etapas para la producción de bioplástico termoplastificado a partir de almidón.



Fuente: Omar, 2010.

Figura N° 2-17: Etapas en la producción de almidón termoplastificado

En la figura 2-18 se puede observar en mecanismo de reacción para la obtención de bioplástico a partir de almidón.



Fuente: Omar, 2010.

Figura N° 2-18: Mecanismo de reacción del almidón en la obtención de plástico termoplastificado (TPS)

2.13.4 Composición de insumos para la elaboración de bioplástico de almidón

En la tabla N° II-9 se observa las cantidades de los insumos y aditivos utilizados para la elaboración de bioplástico de almidón (TPS) a escala industrial.

Tabla N° II-9

Insumos y aditivos para elaboración de bioplástico de almidón

INSUMOS	Peso (kg)	Porcentaje
almidón	1000	70 %
agua	171.4	12 %
glicerina	257.1	17%
ADITIVOS	Peso (kg)	Porcentaje
Ácido acético	14.3	1 %

Fuente: Chero, 2015.

CAPÍTULO III
PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

El trabajo experimental de la obtención de “bioplástico a partir de la cáscara de plátano variedad cavendish”, se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), instalación perteneciente a la Carrera de Ingeniería Química de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”.

Los procesos del secado de floema proveniente de las cáscaras de plátano, molienda o reducción de tamaño de las mismas, y mezcla de este material obtenido con los debidos reactivos químicos (glicerina, ácido acético, agua destilada) para la formación del polímero biodegradable, se realiza en instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), perteneciente a la Carrera de Ingeniería Química de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”.

3.2 Materiales, equipos y reactivos utilizados en el proceso de la investigación

Durante todo el proceso de la investigación y experimentación se utilizaron los siguientes materiales, equipos y reactivos:

3.2.1 Materiales utilizados

Los materiales utilizados en el trabajo de investigación se encuentran detallados en el Anexo B.

3.2.2 Equipos utilizados

Los equipos que se utilizaron en el trabajo de investigación, el detalle y las especificaciones de los equipos se encuentran en el Anexo C.

3.2.3 Reactivos químicos

Los reactivos químicos utilizados en el trabajo de investigación se encuentran detallados en el Anexo D.

3.3 Materia prima

La materia prima utilizada para el siguiente trabajo fue la cáscara de plátano variedad cavendish en estado verde-maduro, estos plátanos fueron adquiridos en el Mercado Campesino y son transportados desde el trópico de Cochabamba a Tarija, en estado verde, y luego es comerciado en la ciudad. Se muestra en la fotografía 3-1 y fotografía 3-2



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 3-1: Plátanos variedad Cavendish **Fotografía 3-2: Cáscaras recicladas**

3.4 Diseño factorial

En el diseño factorial se realizan todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores o variables que intervienen en el experimento. Los diseños factoriales más sencillos son los diseños 2^k , k corresponde al número de factores que intervienen en el proceso, con dos niveles cada uno y requieren de 2^k experimentos. Cada factor se estudia a dos niveles: nivel o valor alto (+) y nivel o valor bajo (-) (Fisher, 1926).

Los experimentos a realizarse incluyen todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores.

k = número de factores; número de columnas

(+) = nivel o valor alto

(-) = nivel o valor bajo

2^k = número de experimentos; número de filas

Para el proceso de obtención de Bioplástico, se tomaron las siguientes variables: volumen de glicerina, volumen de ácido acético y temperatura de trabajo. Estas variables pueden condicionar a las variables respuesta del bioplástico, que son el módulo de elasticidad y tensión

En el presente trabajo de investigación analiza cómo se comportan las propiedades físicas (módulo de elasticidad y tensión) del bioplástico en función del, volumen de glicerina (A), volumen de ácido acético(B), y temperatura de trabajo (C).

3.4.1 Aplicación del diseño factorial 2^k para la obtención de bioplástico

Los factores escogidos y el dominio experimental se muestran en la tabla III-1:

Tabla N° III-1

Factores y dominio experimental

Factores	Dominio Experimental		
	nivel (-)	nivel (0) *	nivel (+)
A: Glicerina (ml)	4	5	6
B: Ácido Acético (ml)	3	4	5
C. Temperatura (°C)	60	65	70

Fuente: Elaboración propia. 2018. *(Castillo, 2015)

Para la construcción del diseño de experimentos en la presente investigación, que refiere a la obtención de bioplástico a partir de almidón de cáscara de plátano, las variables son seleccionadas en función a la cantidad de reactivo utilizado, de esta manera obtener bioplástico a escala de laboratorio, recomendada por bibliografía consultada (Castillo, 2015), tomando como partida el nivel (0) recomendado y valores superiores e inferiores para luego analizar las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido.

Para la elaboración de bioplástico de almidón de cáscara de plátano a escala laboratorio se utiliza 10gramos de almidón de cáscara de plátano.

Los efectos de un factor se hacen variar entre los extremos de su dominio experimental: entre el nivel -1 y +1. Además de su variación se debe realizar para cada posible combinación de los valores de los demás factores.

Esto permitirá establecer si el efecto depende de qué valor tomen los otros factores. Todas estas combinaciones están contempladas en el diseño factorial completo 2^3 de la tabla N° III-2. En total ocho experimentos más una réplica y correspondientes a 2 niveles glicerina x 2 niveles ácido acético x 2 niveles de temperatura de trabajo.

Tabla N° III-2

Matriz de experimentos

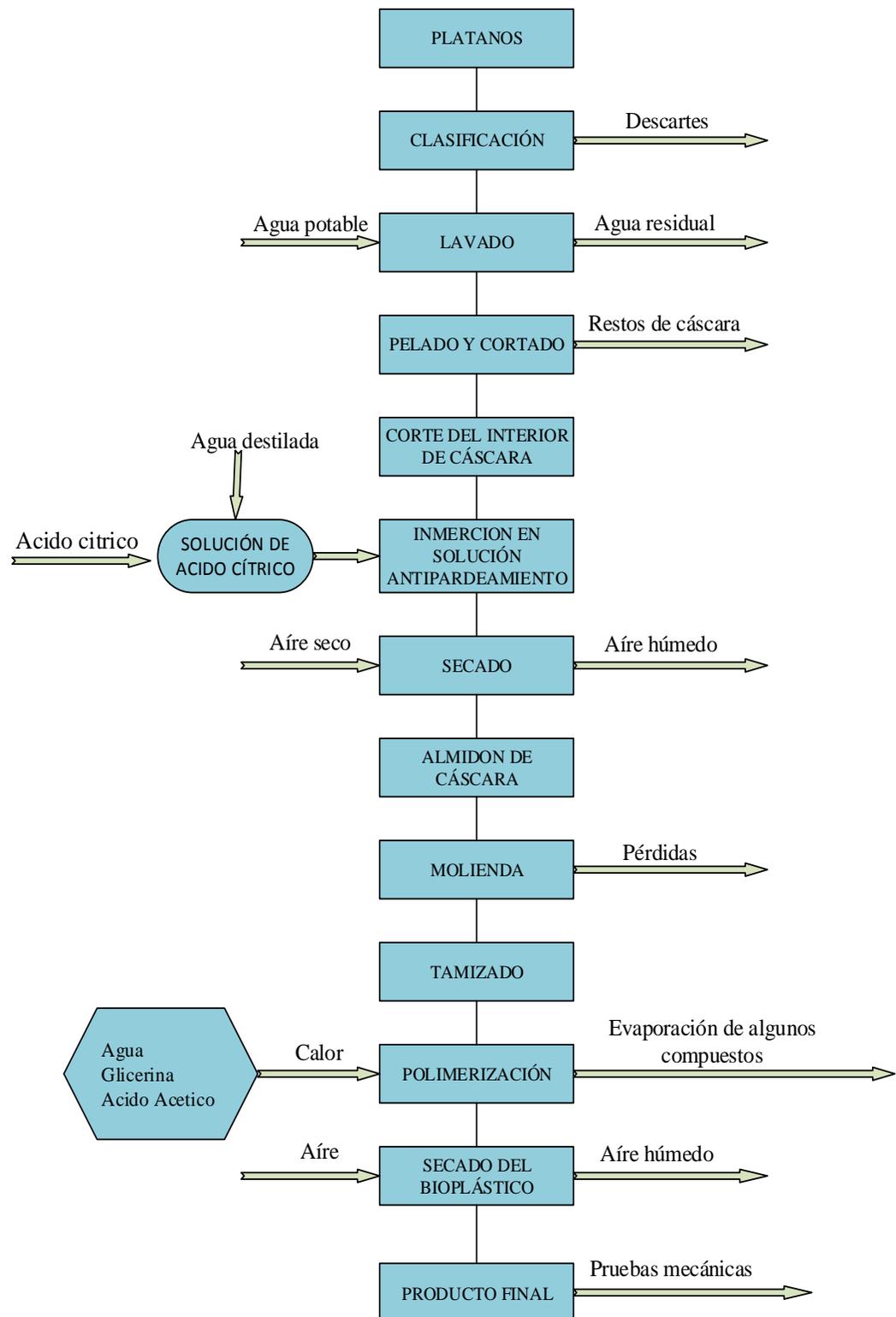
N°	Matriz de experimentos			Variables de experimentación			
	A	B	C	Glicerina	Ácido Acético	Temperatura (°C)	Respuesta
1	-1	-1	-1	4	3	60	y ₁
2	+1	-1	-1	6	3	60	y ₂
3	-1	+1	-1	4	5	60	y ₃
4	+1	+1	-1	6	5	60	y ₄
5	-1	-1	+1	4	3	70	y ₅
6	+1	-1	+1	6	3	70	y ₆
7	-1	+1	+1	4	5	70	y ₇
8	+1	+1	+1	6	5	70	y ₈

Fuente: Elaboración propia. 2018.

Y₁ representa a las variables respuesta que son módulo de elasticidad y tensión.

3.5 Descripción del proceso experimental

A continuación se puede observar el diagrama de flujo del proceso de obtención de “Bioplástico a partir de la cáscara de plátano” se muestra en la figura N° 3-1



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3-1: Diagrama de flujo proceso de obtencion de bioplastico

A continuación se da a conocer el proceso experimental a seguir para la “**obtención experimental de bioplástico a partir de la cáscara de plátano variedad cavendish**”.

3.5.1 Clasificación

El plátano es adquirido del Mercado Campesino, se clasifican los plátanos que estén en un estado verde-maduro, no estén golpeados ni dañados en la parte exterior del fruto (ver fotografía N° 3-3) ya que se obtendrá almidón de sus cáscaras, para un posterior uso.



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía N° 3-3: Plátano clasificado

3.5.2 Lavado

El plátano seleccionado se lava con agua potable por inmersión de los frutos en un lavador metálico con el fin de eliminar impurezas o suciedad presente en la cáscara de la fruta, (ver fotografía N° 3-4)



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía N° 3-4: Lavado del plátano

3.5.3 Pelado y cortado

El pelado se realiza de forma manual con la ayuda de un cuchillo pequeño de acero inoxidable para cortar la parte interior de las cáscaras, de esta manera se logra un corte uniforme y tener homogeneidad (ver fotografía N° 3-5).



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía N° 3-5: Cortado y pelado del plátano

3.5.4 Corte del interior de la cáscara de plátano (floema)

En nuestro caso, se puede decir que se recicla las cáscaras, que en otro caso serían para el desperdicio. Con ayuda de un cuchillo se hace un corte laminado de 1 mm a 2 mm de espesor aproximadamente y separamos el interior de la cáscara de plátano, de este se obtendrá posteriormente el almidón, (ver fotografía N° 3-6).



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía N° 3-6: Corte de floema de cáscara de plátano

3.5.5 Inmersión en solución antipardeamiento

Una vez separada la parte interior de la cáscara de plátano (floema), estas se introducen en la solución antipardeamiento para evitar que adquieran un color negro. Esta solución tiene como función evitar la oxidación. La solución se prepara disolviendo 4 g/l de ácido cítrico en un vaso de precipitado de 500ml a temperatura ambiente aproximadamente 20 °C y por el tiempo de 15 minutos, (ver fotografía N° 3-7).



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía N° 3-7: Inmersión en solución ácida

3.5.6 Secado

Se retira la parte interior de la cáscara de la solución antipardecimiento, se coloca en las bandejas de la estufa de conveción forzada a una temperatura de 60 °C por 6 horas para ser secadas, de esta manera disminuir la humedad presente y obtener el almidón del interior de la cáscara para su posterior uso, (ver fotografía N° 3-8).



Fuente: Elaboración propia

Fotografía N° 3-8: Secado de floema de la cáscara de plátano

3.5.7 Molienda

Se retira de la estufa la parte interior de la cáscara de plátano seca, luego se trituran y se muelen en morteros hasta pulverizarlas, para obtener una especie de polvillo fino (ver fotografía N° 3-9)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía N° 3-9: Almidón de floema de cáscara de plátano

3.5.8 Tamizado

El polvo fino obtenido en la molienda se coloca en un tamizador para ser homogenizado, con bandejas de diferente abertura de malla. El almidón de interior cáscara de plátano como producto final es el que pasa a través de la malla N° 60 aproximadamente 0,0063 mm (ASTM), con esta operación se obtiene una muestra con tamaño de partícula homogéneo, posteriormente se determina la humedad del almidón de cáscara de plátano, registra 9,2 % de humedad, se coloca en una bolsa para evitar que esta se humedezca al entrar en contacto con el medio ambiente (ver fotografía N° 3-10).



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 3-10: Tamizado de floema de cáscara de plátano

3.5.9 Polimerización

Una vez obtenido el almidón del interior de la cáscara de plátano, este se mezcla en un vaso de precipitado de 250 ml con los determinados reactivos e insumos y las cantidades correspondientes (ver tabla N° III-3), se realizó ocho experimentos más una réplica, luego se analizaron para determinar sus propiedades físicas y de esta manera se encontró una combinación con las características más óptimas.

Tabla N° III-3

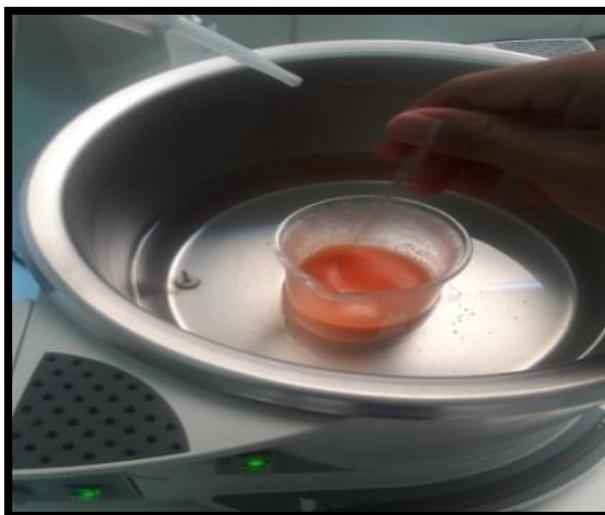
Componentes para la elaboración de bioplástico

Insumos y reactivos	Cantidades
Almidón de cascara de plátano	10 gr
Agua destilada	60ml
Ácido Acético	5ml
glicerina	6ml

Fuente: Elaboración propia.

Para elaborar el bioplástico los componentes fueron vertidos en un vaso de precipitado, el primer paso fue calentar el agua del termostato de inmersión a 70°C para baño maría, luego en un vaso de precipitado de 250 ml se coloca 10 g de almidón de interior de cáscara de plátano con 60 ml de agua destilada se introduce el vaso de precipitado con

los componentes citados al baño maría y se comienza a agitar con una varilla de vidrio, cuando la mezcla se comienza a gelificar con ayuda de una pipeta se vierte 6 ml de glicerina seguido de 5 ml de ácido acético,(ver figura N° 3-11), se sigue agitando suavemente hasta completar el tiempo de 20 min, se obtiene una mezcla homogénea y consistente que se coloca en cajas petri para ser secado en la estufa de convección forzada, (ver figura N° 3-12).



Fotografía N° 3-11: Elaboración de bioplástico

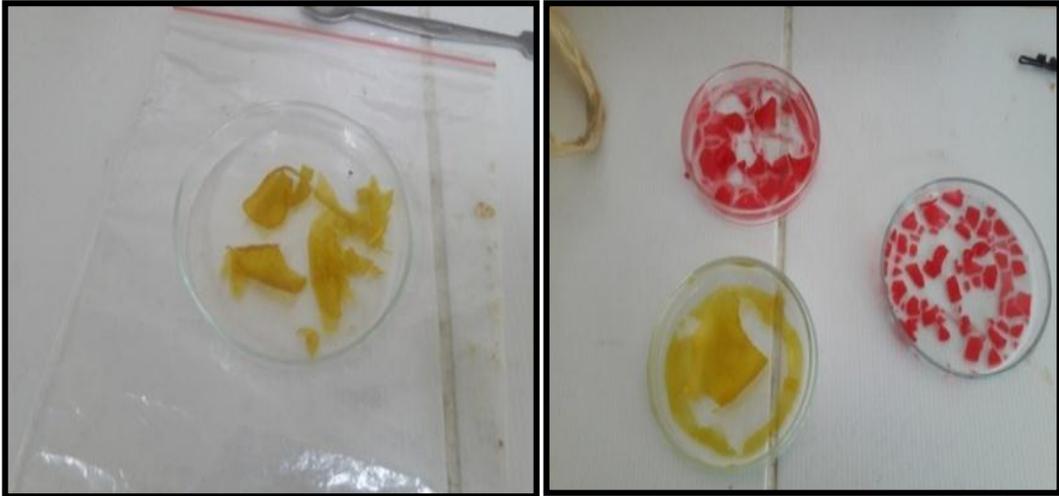
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía N° 3-12: Secado de bioplástico

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente el bioplástico gelificado es colocado en cajas Petri, y llevadas a una estufa para ser secadas a una temperatura de 60 ° C durante 5 horas, pasado este tiempo se retira las cajas Petri de la estufa, obteniendo de manera exitosa el bioplástico, que luego se retira de estos recipientes (ver fotografía N° 3-13).



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N° 3-13: Producto final bioplástico de cáscara de plátano

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de la materia prima

Se analiza la materia prima (plátano) para conocer el peso y la longitud de cada uno.

4.1.1 Propiedades físicas de la materia prima

Para establecer las propiedades físicas de la materia prima, en la parte experimental del trabajo, se realizó tomando 16 muestras de plátano en estado verde-maduro.

El promedio de los resultados es la suma de todos los valores observados divididos por el número de observaciones. Se tomó en cuenta la ecuación matemática (4.1), citada por (Murillo, 1990).

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} \quad \text{Ecuación(4.1)}$$

Donde:

\bar{X} = Valor promedio de los resultados

x_1, x_n = Son los valores observados de la muestra

N= Número de observaciones

Para determinar las propiedades físicas del plátano se tomó una regla (aproximadamente similar a un calibre) con la cual se midió la longitud de cada uno de los plátanos, luego se pesó los plátanos en una balanza digital. Posteriormente, se pelaron para pesar solo las cáscaras y por último se pesó solo el endocarpio cortado. Las características físicas de plátano variedad cavendish en estado verde-maduro se muestran en la tabla IV-1

Tabla IV-1

Propiedades físicas del plátano en estado verde-maduro

Muestras	Longitud (cm)	Peso del plátano (g)	Peso de las cáscara (g)	Peso de endocarpio (g)	Porcentaje de cáscara %	Porcentaje de pulpa %
1	17,0	106,75	30,3	9,20	28,38	71,62
2	16,3	94,33	26,6	8,10	28,19	71,81
3	17,7	103,52	30,1	9,17	29,07	70,91
4	17,5	116,94	32,6	9,80	27,87	72,13
5	16,0	93,86	30,6	9,30	32,60	67,40
6	17,0	113,16	31,0	9,45	27,39	72,61
7	16,1	121,06	31,1	9,46	25,68	74,32
8	16,0	114,55	34,1	10,39	29,76	70,24
9	16,0	109,34	31,2	9,49	28,53	71,47
10	17,7	112,24	31,6	9,60	28,15	71,85
11	16,5	136,66	36,7	11,17	26,85	73,15
12	16,3	124,6	35,0	10,65	28,08	71,92
13	16,9	126,54	33,1	10,07	26,15	73,85
14	16,1	121,6	32,6	9,92	26,80	73,20
15	15,2	117,68	30,9	9,40	26,25	73,75
16	18,1	113,3	31,7	9,60	27,97	72,03
Promedio	16,65	114,13	31,82	9,67	27,98	72,02

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo es determinar las propiedades físicas del plátano, se determina cuántos gramos existe en el interior de la cáscara de plátano (floema), para este se utiliza la parte no comestible del plátano que tiene un valor del 27,98 % con este dato se calcula el rendimiento de almidón de interior de cáscara de plátano ya que de este se obtiene el bioplástico.

Los parámetros fisicoquímicos de la cáscara de plátano son determinados por el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) perteneciente a la U.A.J.M.S., en la tabla N° IV-2 se muestran los resultados.

Tabla N° IV-2***Análisis físico-químico del interior de cáscara de plátano (floema)***

Parámetro	Unidad	Resultado
Azúcares reductores	%	0,23
Azúcares totales	%	2,66
Ceniza	%	1,27
Fibra	%	0,08
Grasa	%	0,42
Hidratos de carbono	%	12,92
Humedad	%	84,29
Proteína	%	1,02

Fuente: C.E.A.N.I.D. 2017.

Para determinar el contenido de humedad con la que se parte en el proceso de secado del interior de cáscara de plátano se tomó una muestra de 5 gr para su análisis que fueron colocados en una balanza de humedad infrarroja, los datos se muestran a continuación en la tabla IV-3. Se muestra valores de pérdida de humedad de la muestra de interior de cáscara de plátano en condiciones de temperatura de 60 ° C, los datos porcentuales de humedad se toman con intervalos de 10 min.

La determinación del contenido de humedad fue calculado por la expresión matemática citada por Contreras, (2005), para realizar el cálculo del contenido de humedad en base seca, se obtiene de la siguiente ecuación (4.2):

$$X = \frac{m_i - m_{SS}}{m_{SS}} \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

Donde:

X = Contenido de humedad en base seca (gramos de agua/gramos de sólido seco)

m_i = Masa de interior de cáscara de plátano (gramos de agua/ gramos de sólido seco)

m_{SS} = Masa de sólido seco de interior de cáscara de plátano (gramos de sólido seco)

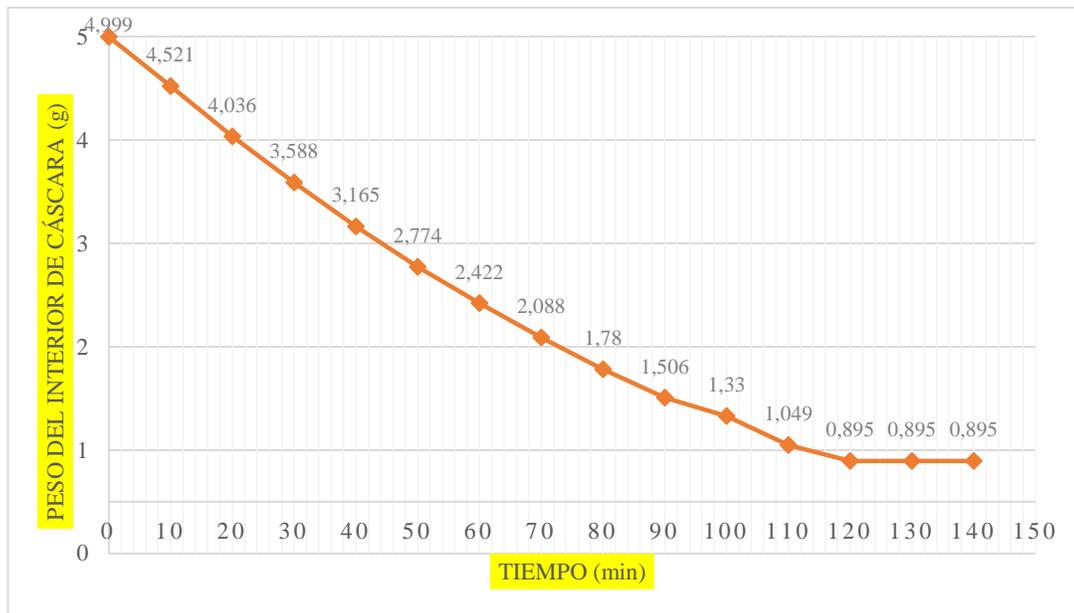
Tabla N° IV-3

Determinación de humedad del interior de cáscara de plátano

Tiempo (min)	Peso del interior de cáscara de plátano (g)	Porcentaje de humedad (%)	Humedad Kg_{agua}/Kg_{sólido seco}
0	4,999	0	0
10	4,521	9,54	0,105
20	4,036	19,26	0,238
30	3,588	28,22	0,393
40	3,165	36,68	0,579
50	2,774	44,49	0,802
60	2,422	51,55	1,063
70	2,088	58,23	1,332
80	1,780	64,39	1,808
90	1,506	69,87	2,319
100	1,330	73,59	2,758
110	1,049	79,01	3,765
120	0,895	82,09	4,585
130	0,895	82,09	4,585

Fuente: Elaboración propia.

La figura N° 4-1 muestra una curva del comportamiento del interior de cáscara de plátano vs el tiempo de secado, en condiciones de secado asistido infrarrojo



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 4-1: Curva representativa de humedad

Se puede apreciar que en el transcurso del inicio del secado (figura N° 4-1) hasta aproximadamente 25 min, es la etapa de calentamiento inicial del sólido. Luego se calienta y se elimina humedad presente en la muestra.

Posterior a esto, el secado permanece constante hasta que la muestra alcanza el contenido de humedad de 82,09 % este dato fue calculado en la balanza de humedad infrarroja en un tiempo total de 140 minutos, posterior a este tiempo la humedad permanece constante.

Se determina el contenido de humedad del almidón de interior de cáscara de plátano en la balanza de humedad infrarroja, se parte de una muestra de 5 gramos, en un tiempo de 35 minutos se determina en este equipo una humedad de 9,10 % que se muestra en la tabla N° IV-4.

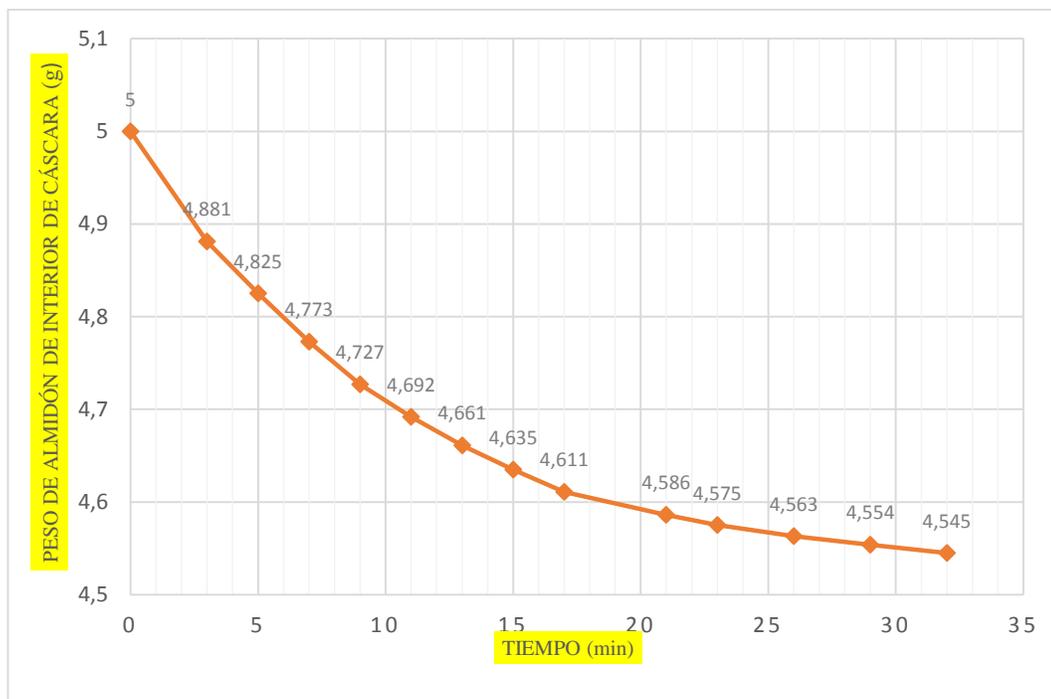
Tabla N° IV-4

Determinación de humedad de almidón de interior de cascara de plátano

Tiempo (min)	Peso de almidón de cascara (g)	Porcentaje de humedad (%)	Humedad Kg _{agua} /Kg _{sólido seco}
0	5	0	0
3	4,881	2,38	0,024
5	4,825	3,49	0,036
7	4,773	4,54	0,047
9	4,727	5,45	0,057
11	4,692	6,17	0,065
13	4,661	6,79	0,072
15	4,635	7,29	0,078
17	4,611	7,78	0,084
21	4,586	8,27	0,089
23	4,575	8,49	0,092
26	4,563	8,74	0,095
29	4,554	8,93	0,098
32	4,545	9,1	0,101
35	4,545	9,1	0,101

Fuente: Elaboración propia

La figura N° 4-2 muestra una curva del comportamiento del almidón de interior de cascara de plátano vs el tiempo de secado, en condiciones de secado asistido infrarrojo



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 4-2: Curva representativa para la pérdida de humedad

4.2 Ensayos preliminares para la obtención de bioplástico decáscara de plátano

De acuerdo al diseño factorial, se realizan 8 ensayos más una réplica para la obtención de bioplástico con los parámetros propuestos.

Se obtiene bioplástico del interior de cáscara de plátano con temperaturas de trabajo de 60 y 70 °C, con volúmenes de 4ml y 6ml de glicerina y volúmenes de 3ml y 5ml de ácido acético. Al bioplástico obtenido se les calcula el módulo tensil (resistencia a la deformación) y la tensión (resistencia a la tracción), con los resultados se determinan los parámetros óptimos para el proceso.

4.2.1 Modulo tensil

La obtención de bioplástico se realiza a partir de 10gr de almidón de interior de cáscara de plátano previamente tratado con ácido cítrico y 60ml de agua, a presión atmosférica

de 610 mmHg (milímetros de mercurio) registrados en la ciudad de Tarija, los resultados de la prueba mecánica, para el módulo tensil se muestra en la tabla N° IV-5. Las propiedades para módulo tensil y tensión del bioplástico fueron medidos en el equipo de medida para módulo de elasticidad (módulo de Young) que consta de un equipo que tiene una escala circular, se asemeja a un reloj que mide la deformación con una exactitud de lectura de 0,01 mm y a partir de los datos obtenidos se calcula el módulo tensil y tensión.

El material se deforma hasta un máximo, denominado punto de ruptura, entre el límite de la deformación elástica y el punto de ruptura tiene lugar la deformación plástica, en la experiencia, el bioplástico utilizado para las pruebas resulto ser un poco frágil.

Se utilizó muestras de bioplástico de 9 mm de ancho, 7mm de longitud y 2mm de espesor, para esto se fue añadiendo pesos desde 15,94 gramos fuerza (gf) hasta un peso promedio aproximado de 289,94 gramos fuerza (gf) donde se observar un cambio en el material tratado, (ruptura del bioplástico) estas pruebas fueron hechas en el laboratorio de física perteneciente a la U.A.J.M.S, el detalle de las pruebas mecánicas y las fotografías se encuentra en el Anexo 2.

Tabla N° IV-5

Resultados para la prueba módulo tensil aplicada al bioplástico

N°	Variables de obtención			Módulo tensil (N/cm ²)		Promedio
	Glicerina	Ácido Acético	Temperatura	Réplica 1	Réplica 2	
1	4ml	3ml	60 °C	270,977	269,038	270,00
2	6ml	3ml	60 °C	151,169	122,290	136,729
3	4ml	5ml	60 °C	122,445	115,854	119,149
4	6ml	5ml	60 °C	239,968	236,791	238,379
5	4ml	3ml	70 °C	294,866	299,094	296,597
6	6ml	3ml	70 °C	146,825	150,901	148,863
7	4ml	5ml	70 °C	279,479	238,253	258,866
8	6ml	5ml	70° C	262,308	256,343	259,325

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos que se muestra en la tabla N° IV-5, el bioplástico obtenido aplicando los parámetros del experimento 5, correspondiente a volumen de glicerina 4ml; volumen de ácido acético 3ml y temperatura de 70 °C presenta mayor módulo tensil (resistencia a la deformación) **296,597N/cm²**, en comparación al resto de los experimentos.

El bioplástico obtenido aplicando los parámetros del experimento uno que se muestra en la tabla N° IV-5 logra un módulo tensil de **270,00N/cm²**, que es el segundo valor más alto del experimento, presentando buenas características frente a la deformación, con una temperatura de trabajo menor, lo que también indica un menor costo energético.

El resultado que reporta menor módulo tensil (resistencia a la deformación) es el del experimento tres se muestra en la tabla N° IV-5 con un valor de **119,149N/cm²**.

Por otra parte, se observa que a cantidades menores de glicerina 4ml la resistencia a la deformación es menor, el bioplástico es más resistente, que a cantidades de 6ml donde se pierde resistencia a la deformación debido a que la glicerina proporciona elasticidad

y el bioplástico es menos rígido. Los cálculos de las pruebas y fotografías para determinar el módulo tensil y tensión se encuentran detallados en el Anexo 2

4.2.2 Tensión mecánica

La obtención de bioplástico se realiza a partir de 10 g de almidón de cáscara de plátano previamente tratado con ácido cítrico y 60ml de agua, a presión atmosférica de 610 mmHg (milímetros de mercurio) registrados en la ciudad de Tarija, los resultados de la prueba mecánica, para el módulo tensil se muestra en la tabla N° IV-6

Tabla N° IV-6

Resultados para la prueba de tensión aplicada al bioplástico

N°	Parámetros de obtención			Tensión (N/cm ²)		Promedio
	Glicerina	Ácido Acético	Temperatura	Réplica 1	Réplica 2	
1	4ml	3ml	60 °C	14,033	13,831	13,932
2	6ml	3ml	60 °C	13,165	12,469	12,817
3	4ml	5ml	60 °C	13,169	12,789	12,979
4	6ml	5ml	60 °C	14,901	14,128	14,514
5	4ml	3ml	70 °C	15,790	16,973	16,382
6	6ml	3ml	70 °C	13,165	13,379	13,272
7	4ml	5ml	70 °C	14,901	16,109	15,505
8	6ml	5ml	70° C	15,790	17,512	16,651

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos que se muestra en la tabla N° IV-6, el bioplástico obtenido aplicando los parámetros del experimento 8, volumen de glicerina 6ml, volumen de ácido acético 5ml y temperatura de 70°C presenta mayor tensión (resistencia a la tracción) **16,651 N/cm²**, en comparación al resto de los experimentos, esto sucede debido a que los reactivos a una temperatura de trabajo de 70 °C se mezclan y complementan mejor.

4.3 Comparación de bioplástico obtenido de almidón de interior de cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) vs bioplástico de almidón de yuca y maíz a escala laboratorio

Los datos de las propiedades mecánicas que presenta el bioplástico, fueron calculadas en el laboratorio de física perteneciente a la U.A.J.M.S, las comparaciones de las propiedades mecánicas se muestran en la tabla N° IV-7

Tabla N° IV-7

Comparación de las propiedades mecánicas de los bioplásticos de almidón

Parámetros	Bioplástico		
	Cáscara de plátano	Yuca	Maíz
Módulo tensil (MPa)	2,97	2,45	2,35
Tensión (MPa)	0,17	0,35	0,25
Porcentaje de Elongación (%)	5,14	3	7
Densidad g/cm ²	1,025	1,12	1,2

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 Comparación entre el bioplástico obtenido a partir de almidón de cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) y bioplástico comercial

La tabla N° IV-8 muestra la comparación del bioplástico a escala industrial frente a uno obtenido en laboratorio.

Tabla N° IV-8

Tabla comparativa de las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido en laboratorio vs industrial

Parámetros	Bioplástico	
	Cáscara de plátano	Comercial
Módulo tensil (MPa)	2,97	-----
Tensión (MPa)	0,17	14 - 60
Porcentaje de Elongación (%)	5,14	27 - 900
Densidad g/cm ²	1,025	1,2 – 1,35

Fuente: Elaboración propia.

La tensión que determina la norma ASTM D 638 para plásticos (Instron, 2011) es de 14 a 140 MPa. Por consiguiente, la películas de bioplástico que corresponden a los experimentos N° 5 (16.396 N/cm²) y N° 8 (16.396 N/cm²) que se muestra en la tabla N° IV-5 presentaron una resistencia Tensil de 0.17 MPa y 0.16 MPa respectivamente.

En ambos casos, los valores no cumplen la norma; lo cual lleva a concluir que las propiedades físicas del bioplástico producido en el laboratorio son deficientes en comparación con los plásticos comerciales.

4.4 Resultados del diseño factorial

Con los resultados obtenidos de cada variable respuesta, y las variables de trabajo para la obtención de bioplástico, se realiza el análisis de varianza, obteniéndose la ecuación que modelo, para determinar el módulo tensil (resistencia a la deformación) y grado de tensión (resistencia a la tracción) en función de las variables de proceso estudiadas, como son el volumen de ácido acético, glicerina y temperatura.

4.4.1 Influencia del volumen de glicerina, volumen de ácido acético y temperatura, en el rendimiento de la obtención de bioplástico

Estos experimentos se realizaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), instalación perteneciente a la Carrera de Ingeniería Química de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”. Se realiza el análisis de varianza (ANOVA) para los resultados experimentales mostrados en la tabla N° IV-5 y tabla N° IV-6.

Las variables y las interacciones de las variables utilizadas en el diseño factorial se describen en la tabla N° IV 9.

Tabla N° IV-9

Nomenclatura de variables utilizadas en el análisis estadístico

Variables	Descripción	Tipo de Efecto
A	Volumen de Glicerina	Principal
B	Volumen de ácido acético	Principal
C	Temperatura	Principal
AB	Volumen de Glicerina x Volumen de ácido acético	Combinado
AC	Volumen de Glicerina x Temperatura	Combinado
BC	Volumen de ácido acético x Temperatura	Combinado
ABC	Volumen de Glicerina x Volumen de ácido acético x Temperatura	Combinado

Fuente: Elaboración propia.

La tabla N° IV-10 muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) del módulo tensil que se aplicaron al bioplástico, para un nivel de significancia del 5 %

Tabla N° IV-10

Análisis de la varianza para determinar el módulo tensil del bioplástico

Variables	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	Valor F	Valor P
A	1	5922,6	5922,6	1041,09	0,0
B	1	51,0	51,0	8,96	0,017
C	1	9373,4	9373,4	1647,83	0,0
AB	1	47266,6	47266,6	8308,54	0,0
AC	1	2637,0	2637,0	463,52	0,0
BC	1	1991,7	1991,7	350,11	0,0
ABC	1	2363,8	2363,8	415,51	0,0
Error	8	45,5	5,7		
Total	15	69652,5			

Fuente: Elaboración propia.

R-cuadrado = 99,74 %

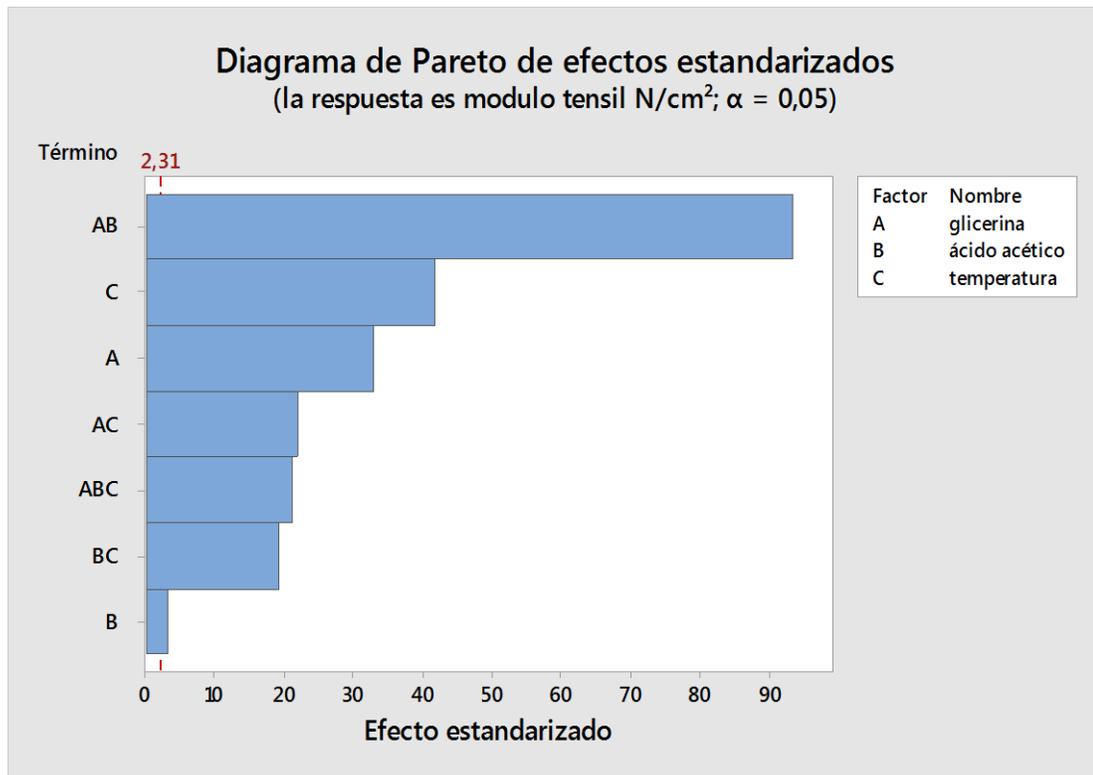
El análisis de la varianza muestra la variabilidad de la respuesta del módulo tensil del bioplástico en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego muestra la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental. Los efectos principales de volumen de glicerina (A), volumen de ácido acético (B), y Temperatura (C).

Los efectos principales como ser volumen de glicerina (A), volumen de ácido acético (B), Temperatura (C) y los efectos combinados volumen de glicerina x volumen de ácido acético (AB), volumen de glicerina x Temperatura (AC), volumen de ácido acético x Tiempo (BC) y volumen de glicerina x volumen de ácido acético x temperatura (ABC) son altamente significativos y representativos para esta variable respuesta, puesto que tienen valores de P menores a 0.05.

En la figura N° 4-3 que muestra el diagrama de Pareto, se observa cada uno de los efectos estimados en orden decreciente, los segmentos de cada barra son proporcionales al efecto estandarizado, que es equivalente al efecto estimado dividido por su error estándar.

En el diagrama de Pareto, las barras que cruzan la línea de referencia son estadísticamente significativas, efectos a un nivel de confianza de 95 %. Por ejemplo en este diagrama de Pareto, las barras que representan los factores AB, C, A, AC, ABC, BC y B cruzan la línea de referencia que está en 2,31 se muestra en la figura N° 4-3.

Estos factores son estadísticamente significativos en el nivel de 0.05 con los términos del modelo actuales, con la cual se verifica que variables son las predominantes.



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4-3: Gráfico de Pareto para determinar módulo tensil del bioplástico

El modelo matemático que resulta del ajuste de todos los datos contiene tres efectos principales significativos y representativos, más todas las interacciones son altamente significativas y representativas. La ecuación del modelo es:

$$\text{Modulo N/cm}^2: 3979 - 701,8 A - 1205,1 B - 39,87 C + 212,36 A*B + 7,156 A*C + 14,386 B*C - 2,431 A*B*C$$

tensión que se aplicó al bioplástico, para un nivel de significancia del 5 %

Tabla N° IV-11

Análisis de la varianza para determinar la tensión (resistencia) del bioplástico

Variables	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media Cuadrada	Valor F	Valor P
A	1	0,7608	0,7608	1,72	0,226
B	1	2,2283	2,2283	5,04	0,024
C	1	15,5059	15,5059	35,08	0,0
AB	1	14,7245	14,7245	33,31	0,0
AC	1	1,7895	1,7895	4,05	0,079
BC	1	1,0552	1,0552	2,39	0,161
ABC	1	0,3280	0,3280	0,74	0,414
Error	8	3,5363	0,4420		
Total	15	39,9287			

Fuente: Elaboración propia.

R-cuadrado = 64,57 %

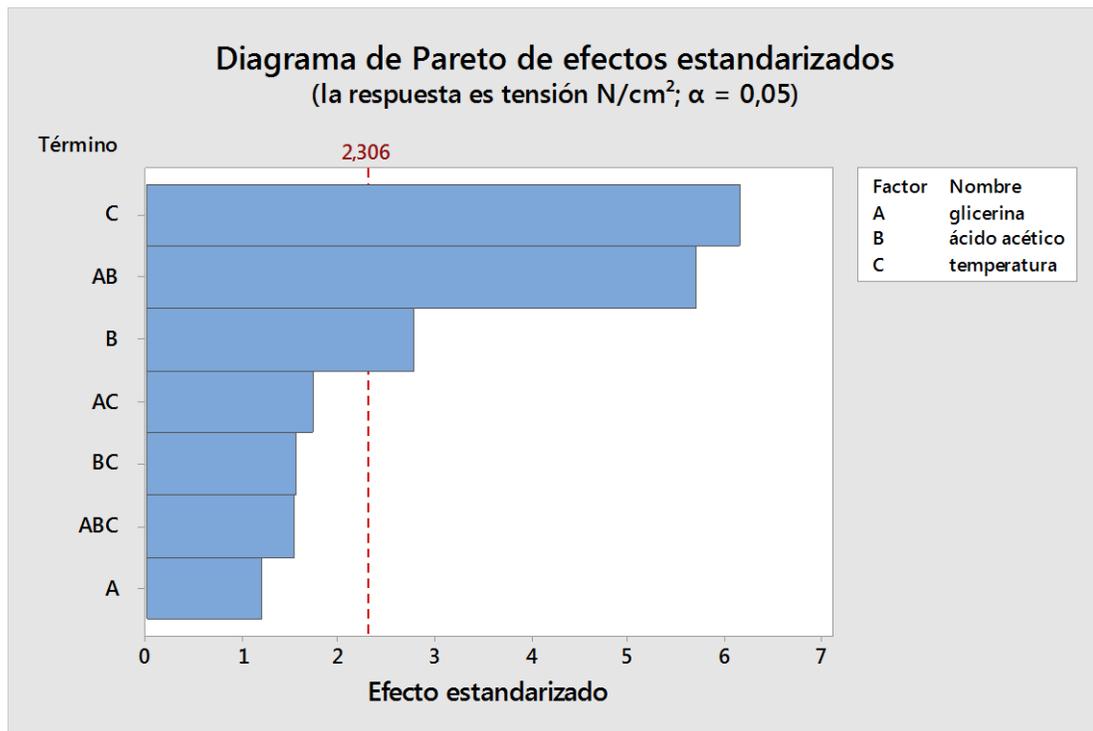
El análisis de la varianza reparte la variabilidad de la respuesta tensión del bioplástico en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego prueba la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental. Los efectos principales son volumen de glicerina (A), volumen de ácido acético (B), y Temperatura (C). Solamente (B) glicerina, (C) temperatura y (AB) Glicerina x ácido Acético son altamente significativos y representativos para esta variable respuesta, puesto que tienen valores de P menores o iguales a 0.05, y los efectos combinados volumen de glicerina x Temperatura (AC), volumen de ácido acético x Temperatura (BC) y volumen de glicerina x volumen de ácido acético x Temperatura (ABC) es significativo, más no representativo para el análisis.

El gráfico de Pareto muestra cada uno de los efectos estimados en orden decreciente, la longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, que es equivalente al efecto estimado dividido por su error estándar.

La línea de referencia vertical se utiliza para definir los efectos significativos. Las barras que se prolongan más allá de la línea de referencia corresponden a efectos que son altamente significativos al nivel de confianza de 95 %.

En el diagrama de Pareto, las barras que cruzan la línea de referencia son estadísticamente significativas, efectos a un nivel de confianza de 95 %. Por ejemplo en este diagrama de Pareto, las barras que representan los factores C, AB y B cruzan la línea de referencia que está en 2,306 se muestra en la figura N° 4-4

Estos factores son estadísticamente significativos en el nivel de 0.05 con los términos del modelo actuales, con la cual se verifica que variables son las predominantes.



Fuente: Elaboración propia

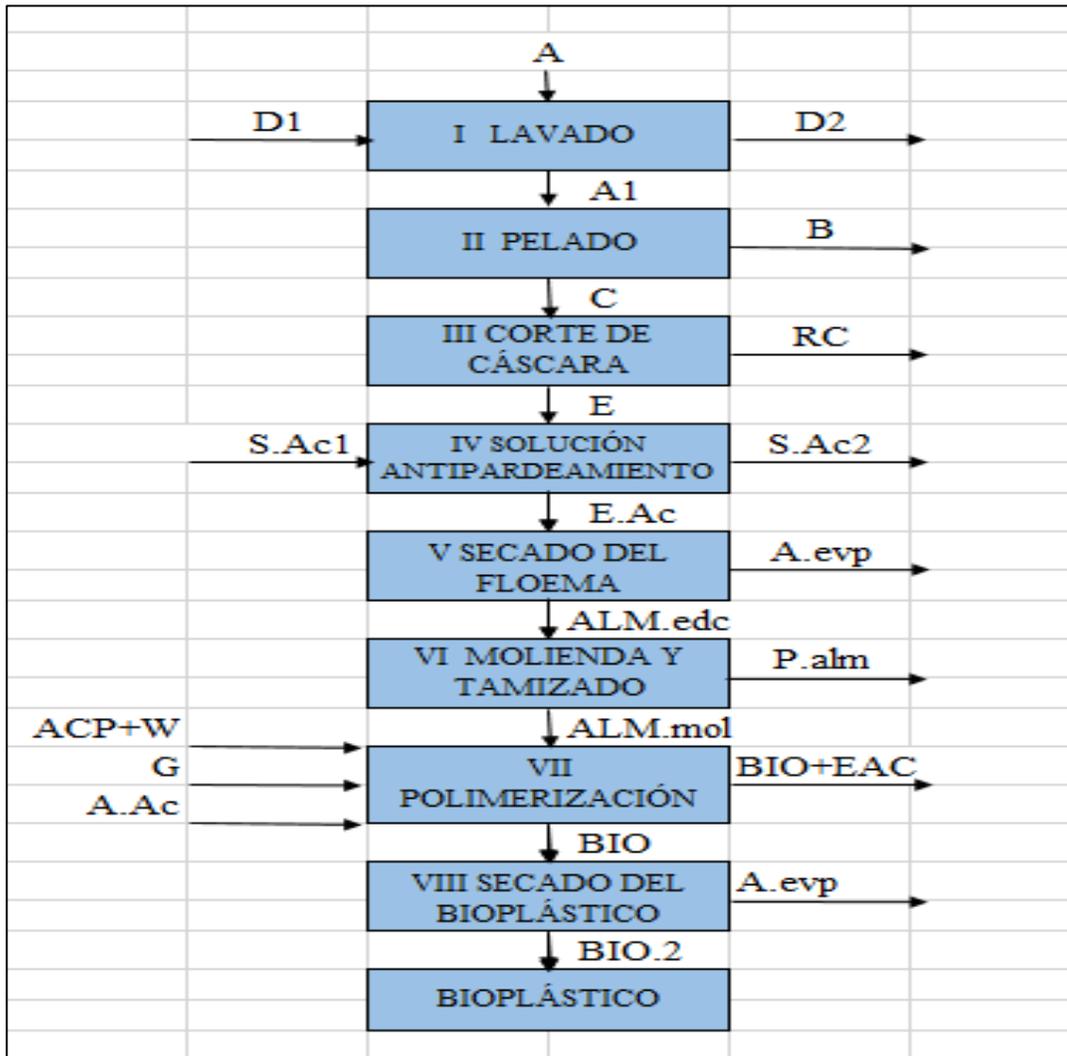
Figura N° 4-4: Gráfico de Pareto para determinar la elasticidad del bioplástico

El modelo matemático que resulta del ajuste de todos los datos contiene tres efectos principales significativos y representativos, un factores, dos interacciones de dos factores más una interacción de tres factores son significativa pero no representativa.

$$\text{Tensión N/cm}^2: -25,2 + 7,74 A + 1,5 B + 0,899 C + 0,90 A*B - 0,181 A*C - 0,092 B*C + 0,0286 A*B*C$$

4.5 Balance de materia para el proceso de obtención de bioplástico a partir de cáscara de plátano (*musa paradisiaca*)

Se realiza el balance de materia general para la obtención de bioplástico, se observa en la figura N° 4-4, luego se procede a realizar de manera más detallada etapa por etapa.



Fuente: Elaboración propia **Figura N° 4-4: Balance de masa en la obtención de bioplástico**

Donde:

A = Cantidad de plátano

A₁ = Cantidad de plátano lavado

D₁ = Cantidad de agua para lavado

D₂ = Cantidad de agua residual

B = Pulpa de plátano

C = Cáscara de plátano

E = Cantidad de interior de cáscara de plátano (floema)

RC = Descartes de cáscara

S.Ac₁ = Cantidad de solución de ácido cítrico a la entrada

S.Ac₂ = Cantidad de solución de ácido cítrico a la salida

E.Ac = Cantidad de endocarpio con solución acida a la salida

A.evp = Cantidad de agua evaporada

ALM.edc = Almidón de interior de cáscara de plátano

P.alm = Cantidad de almidón de interior de cáscara perdido en molienda

ALM.mol = almidón de interior de cáscara molido

W = Cantidad de agua

ACP = Almidón de interior cáscara de plátano

G = Cantidad de glicerina

A.Ac = Cantidad de ácido acético

BIO = Plástico biodegradable

EAC = Evaporación de algunos compuestos

BIO = Cantidad de bioplástico

BIO.2 = Cantidad de bioplástico final

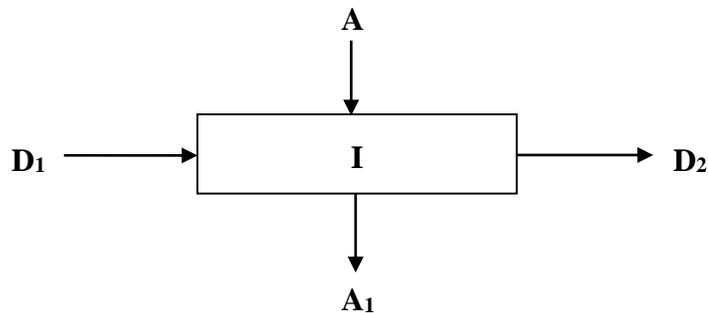
A.evp = Agua evaporada del bioplástico

4.5.1 Balance de masa en el lavado de plátano

Se lava 3586,73gramos de plátano y se utiliza 3333,33mililitros de agua.

Se considera la densidad del agua igual a 1g/ml (Taylor, 1993), en Tarija la densidad del agua es de 99,37g/ml fueron medidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) por lo que se usan 3312,002g de agua para el lavado.

La cantidad de agua residual se considera igual a la cantidad de agua utilizada para el lavado en un sistema de estado estacionario.



Donde:

D_1 = Cantidad de agua para lavado = 3312,002 g

D_2 = Cantidad de agua residual = 3312,002 g

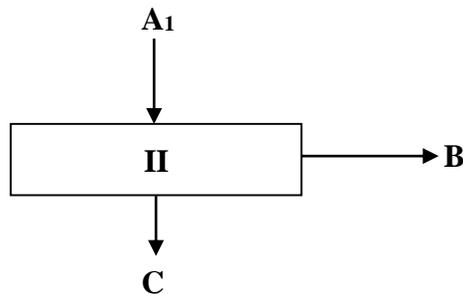
A = Cantidad de plátano = 3586,73 g

A_1 = Cantidad de plátano lavado = 3586,73 g

4.5.2 Balance de masa en el pelado del plátano

El balance global para el bloque II se realiza en base a datos obtenidos experimentalmente detallados en la tabla N° IV-2, así se tiene que de 114,13 gramos

de plátano, 31.82 gramos corresponden a la cáscara, por lo tanto, se necesitan 3586,73 gramos de plátano para obtener 1000 gramos de cáscara.



Donde:

A = Cantidad de plátano = 3586,73 g

B = Pulpa de plátano (g)

C = Cáscara de plátano = 1000 g

Balance de masa para el bloque II:

$$A = B + C \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

$$\% \text{ de cáscara de plátano} = \frac{C}{A} \times 100 \quad \text{Ecuación (3.2)}$$

De la ecuación [3.1]

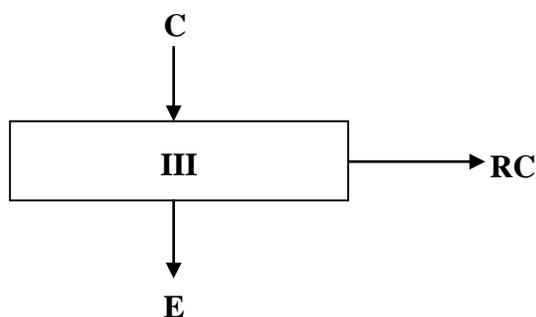
$$B = 2586,73 \text{ gr}$$

De la ecuación [3.2]

$$\% \text{ de cáscara de plátano} = 27,88 \%$$

4.5.3 Balance de masa en el corte del interior de cáscara de plátano

El balance global para el bloque III se realiza en base a datos obtenidos experimentalmente detallados en la tabla N° IV-2, se tiene que por cada 114.13 gr de plátano, 31,82 gramos corresponden a cáscara, de los cuales se pudo obtener 9,67 gramos de interior de cáscara de plátano, lo que corresponde a 303,9 gramos de interior de cáscara de plátano en total.



Donde:

C = Cáscara de plátano = 1000 g

E = Cantidad de interior de cáscara de plátano (floema) = 303.9 g

RC = Descartes de cáscara (g)

Balance de masa para el bloque III:

$$C = E + RC \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

$$\% \text{ de interior de cáscara de plátano} = \frac{E}{C} \times 100 \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

De la ecuación (3.3):

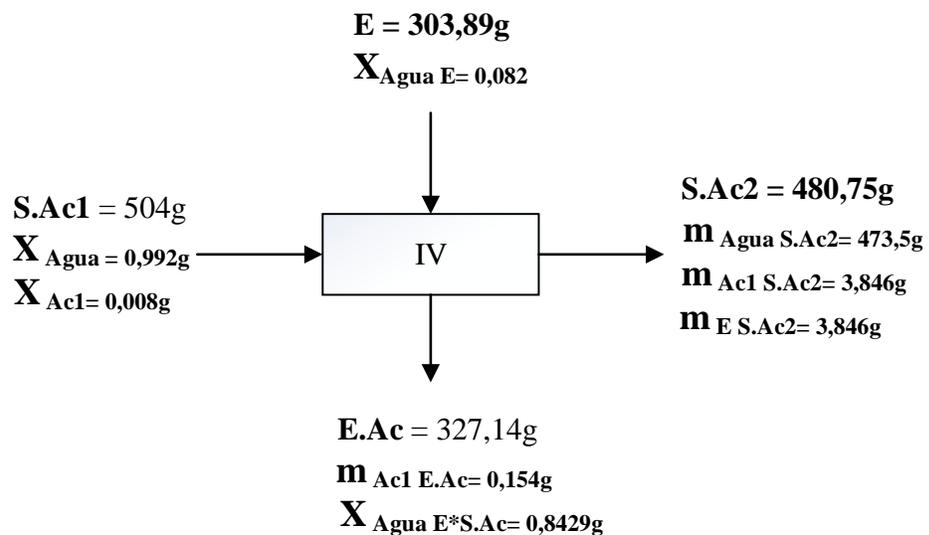
$$RC = 696.11 \text{ g}$$

De la ecuación (3.4):

% de interior de cáscara de plátano = 30.39 %

4.5.4 Balance de masa en la solución antipardecamiento

Balance de masa para el bloque IV



Donde:

S.Ac₁ = Cantidad de solución de ácido cítrico a la entrada = 504 g

S.Ac₂ = Cantidad de solución de ácido cítrico a la salida = 480,75 g

E = Cantidad de interior de cáscara de plátano (floema) = 303,89 g

E.Ac = Cantidad de interior de cáscara de plátano con solución acida a la salida (g)

Balance de masa para el bloque IV:

$$E + S.Ac_1 = E.Ac + S.Ac_2 \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

De la ecuación [3.5]:

E.Ac = 327,14 g

4.5.4.1 Balance por componentes de la etapa IV

- Fracción de humedad de floema = 0,82
- Fracción de humedad de floema con ácido cítrico = 0,8429
- Concentración de la solución de ácido cítrico = 0,8 %

En esta etapa se calcula los componentes como agua pura, ácido cítrico y restos de floema presentes en la solución, luego de ser utilizada para evitar el pardeamiento del floema de cáscara de plátano.

Agua pura

$$X_{m_{H_2O}E} * E = 0,82 * 303,89 \text{ g}$$

$$m_{H_2O}E = 249,2 \text{ g}$$

$$m_{H_2O}S.Ac1 = 500 \text{ g}$$

$$X_{m_{H_2O}E.Ac} * E.Ac = 0,8429 * 327,14 \text{ g}$$

$$m_{H_2O}E.Ac = 275,74 \text{ g}$$

$$m_{H_2O} * E + m_{H_2O} * S.Ac1 = m_{H_2O} * S.Ac2 + m_{H_2O} * E.Ac$$

$$m_{H_2O} * S.Ac2 = 249,2 \text{ gr} + 500 \text{ gr} - 275,74 \text{ g}$$

$$m_{H_2O}S.Ac2 = 473,46 \text{ g}$$

Ácido cítrico presente a la salida

$$m_{Ac1} * S.Ac1 = 4 \text{ g}$$

$$m_{Ac1} * S.Ac2 = 480,75 \text{ gr} * 0,008 \text{ g}$$

$$m_{Ac1}S.Ac2 = 3,846 \text{ g}$$

Restos de floema en la solución con ácido cítrico a la salida

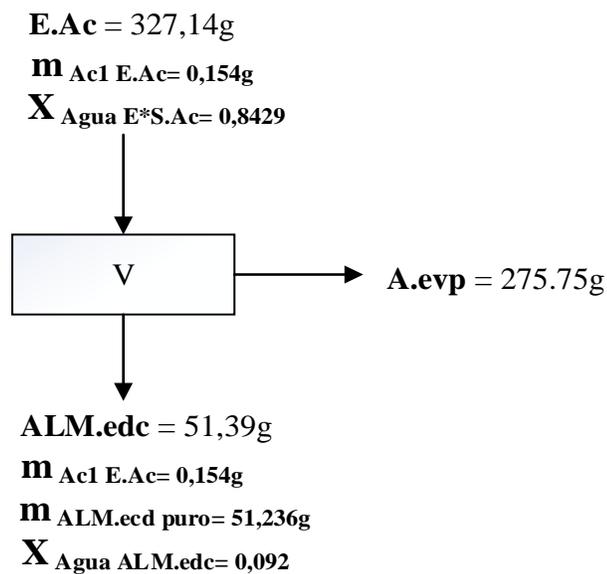
$$S.Ac2 = m_{H_2O} * S.Ac2 + m_{Ac1} * S.Ac2 + m_E$$

$$m_E = 480,75 \text{ g} - 473,5 \text{ g} - 3,846 \text{ g}$$

$$m_E = 3,404 \text{ g}$$

4.5.5 Balance de masa en el secado del interior de cáscara de plátano (floema)

En esta etapa se elimina el agua hasta obtener un peso constante del floema el cual contiene almidón.



Donde:

$E.Ac$ = Interior de cáscara de plátano tratado con ácido = 327,14 g

$A.evp$ = Cantidad de agua evaporada (g)

$ALM.edc$ = Almidón de interior de cáscara de plátano = 51,39 g

4.5.5.1 Balance por componentes etapa V

En esta etapa se calcula la masa de ácido cítrico presente en el interior de cáscara de plátano (floema), y la masa final de agua evaporada

- Fracción de humedad de floema con ácido cítrico = 0,8429
- Concentración de la solución de ácido cítrico = 0,8 %

Cantidad de ácido cítrico en el floema tratado

$$m_{Ac1} * S. Ac2 = 480,75gr * 0,008g$$

$$m_{Ac1} * S. Ac2 = 3,846 g$$

$$m_{Ac1} * E. Ac = 4gr - 3,846g$$

$$\mathbf{m_{Ac1} * E. Ac = 0,154 g}$$

Cantidad de agua pura en el floema tratado

$$Xm_{H20} * E. Ac = 0,8429 * 327,14 g$$

$$\mathbf{m_{H20} * E. Ac = 275,75 g}$$

Balance de masa para el bloque V:

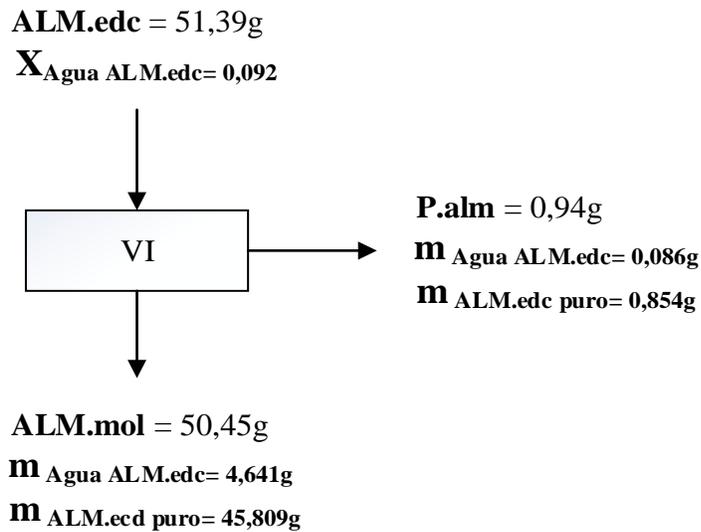
$$E.Ac = ALM.edc + A.evp \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

De la ecuación [3.6]:

$A.evp = 275,75 g$

4.5.6 Balance en la Molienda

En la molienda se registra una pérdida de 0,94 gramos de almidón de interior cáscara de plátano (floema).



Donde:

$P.alm =$ Cantidad de almidón de floema perdido en molienda = 0,94 g

$ALM.edc =$ Almidón de floema = 50,45 g

$ALM.mol =$ Almidón de floema molido = 51,39 g

4.5.6.1 Balance por componente etapa VI

En esta etapa se calcula el total de almidón de floema seco con una humedad menor al 10%, una perdida en el tamizado de 0,94 g

- Humedad de floema seco = 9,2 %

Cantidad de agua pura en el almidón de floema

$$X_{m_{H_2O}} * ALM.edc = 0,092 * 50,45 g$$

$$m_{H_2O} * ALM.edc = 4,641 g$$

Cantidad de almidón puro de floema

$$m * \text{ALM. edc} = \text{ALM. edc} - m_{\text{H}_2\text{O}} * \text{ALM. edc}$$

$$m * \text{ALM. edc} = 51,39 \text{ g} - 4,64 \text{ g}$$

$$\mathbf{m * ALM. edc = 46,75 \text{ g}}$$

Balance de masa para el bloque VI:

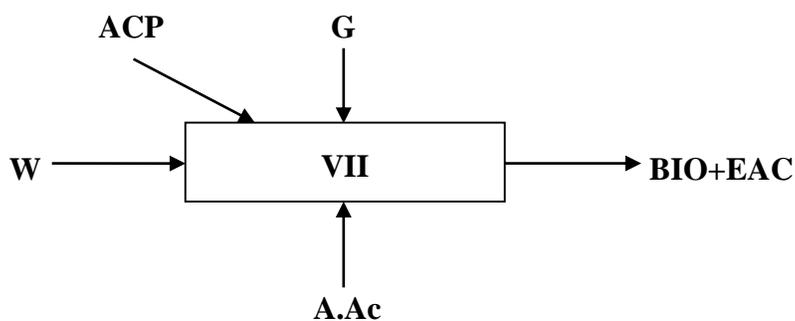
$$\text{ALM.edc} = \text{P.alm} + \text{ALM.mol} \quad \text{Ecuación (3.7)}$$

De la ecuación [3.7]:

ALM.mol = 51,39 g

4.5.7 Reacción de polimerización

Una vez obtenido el almidón de la cáscara de plátano variedad cavendish, se procede a mezclarlo con los reactivos mencionados en la tabla II-2



Densidades específicas de cada compuesto:

Agua = 1 g/cm³ (Taylor, 1993)

Glicerina = 1.26 g/cm³ (Kerton, 2009)

Ácido acético = 1.05 g/cm³ (Lancaster, 2002)

Donde:

W = Cantidad de agua = 60 g

ACP = Almidón de floema = 10 g

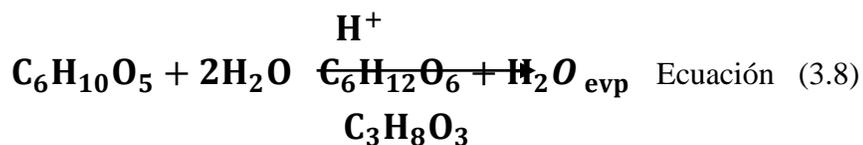
G = Cantidad de glicerina = 6.3g

A.Ac = Cantidad de ácido acético = 5.25 g

BIO = Plástico biodegradable = 71.77 g

EAC = Evaporación de algunos compuestos (g)

Hidrolisis acida para la obtención de bioplástico



$$81,55 \text{ g } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5} \times \frac{1 \text{ mol } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}}{162 \text{ g } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}} \times \frac{1 \text{ mol } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} \cdot 180 \text{ g } \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}{1 \text{ mol } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5} \cdot 1 \text{ mol } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}}$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = 90,61 \text{ g}$$

$$\% \text{ de rendimiento} = \frac{\text{rendimiento de la reacción}}{\text{rendimiento teórico}} \times 100 \quad \text{Ecuación (3.9)}$$

De la ecuación (3.9):

$$\% \text{ de rendimiento etapa de polimerización} = 79,207 \%$$

Teóricamente se deberá obtener 90,61 gramos de bioplástico (TPS) gelificado de interior de cáscara de plátano (floema), al final de la reacción que es una hidrólisis acida se pierde agua y reactivos como ácido acético, obteniéndose solo al final 71,77 gramos de bioplástico (rendimiento real), esta detallado en el balance de la etapa VII

4.5.7.1 Balance por componentes etapa VII

En esta etapa se realiza las cantidades de agua presente en cada reactivo y la pureza de cada uno de ellos

- Porcentaje de agua en el almidón de floema = 9,2 %
- Porcentaje de agua en la glicerina = 4 %
- Porcentaje de agua en el ácido acético = 99,75 %

Cantidad de agua pura en el bioplástico

$$X_{H_2O}ACP = 0,092 * 10g$$

$$\mathbf{m_{H_2O}ACP = 0,92 g}$$

$$X_{H_2O} * G = 0,04 * 6.3 g$$

$$\mathbf{m_{H_2O}G = 0,252 g}$$

$$X_{H_2O} * A.Ac = 0,9975 * 5.25 g$$

$$\mathbf{m_{H_2O}A.Ac = 5,237 g}$$

$$m_{H_2O}BIO = BIO - m_{ACP} - mG - mA.Ac$$

$$m_{H_2O}BIO = 71,77 gr - 9,08 g - 6,048 g - 0,0131 g$$

$$\mathbf{m_{H_2O}BIO = 56,628 g}$$

Cantidad de glicerina pura en el bioplástico

$$X_G * \text{BIO} = 0,96 * 6,3 \text{ g}$$

$$\mathbf{m_G \text{BIO} = 6,048 \text{ g}}$$

Cantidad de ácido acético puro en el bioplástico

$$X_{A.Ac} * A. Ac = 0,0025 * 5,25 \text{ g}$$

$$\mathbf{m_{A.Ac} * A. Ac = 0,0131 \text{ g}}$$

$$\mathbf{m_{A.Ac} \text{BIO} = 0 \text{ g}}$$

Cantidad de almidón puro en el bioplástico

$$m_{ALM} * ACP = ACP - m_{H_2O} * ACP$$

$$\mathbf{m_{ALM} * ACP = 9,08 \text{ g}}$$

$$W + m_{H_2O} * ACP + m_{H_2O} * G + m_{H_2O} * A. Ac = m_{H_2O} * \text{BIO} + m_{H_2O} * \text{EAC}$$

$$m_{H_2O} * \text{EAC} = 60 \text{ g} + 0,92 \text{ g} + 0,252 \text{ g} + 5,237 \text{ g} - 56,642 \text{ g}$$

$$m_{H_2O} \text{EAC} = 9,767 \text{ gr}$$

$$\text{EAC} = m_{H_2O} \text{EAC} + m_{A.Ac} A. Ac$$

$$\text{EAC} = 9,767 \text{ gr} + 0,013 \text{ g}$$

$$\mathbf{\text{EAC} = 9,78 \text{ g}}$$

Balance de masa para el bloque VII:

$$W + ACP + G + A. Ac = \text{BIO} + \text{EAC}$$

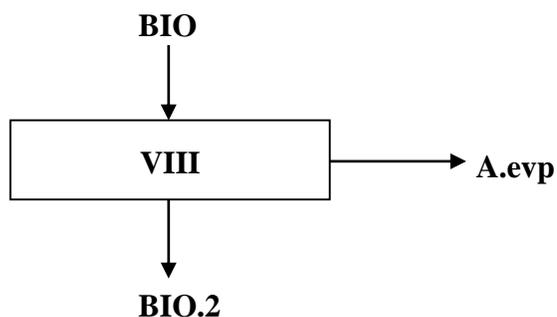
Ecuación (3.10)

De la ecuación [3.10]:

$$EAC = 9.78 \text{ g}$$

4.5.8 Balance de masa en el secado del bioplástico

Una vez mezclado los reactivos, se pudo obtener con éxito el bioplástico que fue depositado en unas cajas Petri, para su posterior secado en una estufa a 60 ° C durante 5 horas.



Donde:

BIO = Cantidad de bioplástico = 71.77 g

BIO.2 = Cantidad de bioplástico final = 21.26 g

A.evp = Agua evaporada = (g)

Balance para el bloque VIII:

$$BIO = BIO.2 + A.evp$$

Ecuación (3.11)

De la ecuación (3.11):

$$A.evp = 50.51 \text{ g}$$

4.5.9 Balance general para la obtención de bioplástico

El balance general para la obtención de bioplástico a partir de cáscara de plátano se muestra en detalle en la figura N° 4-4

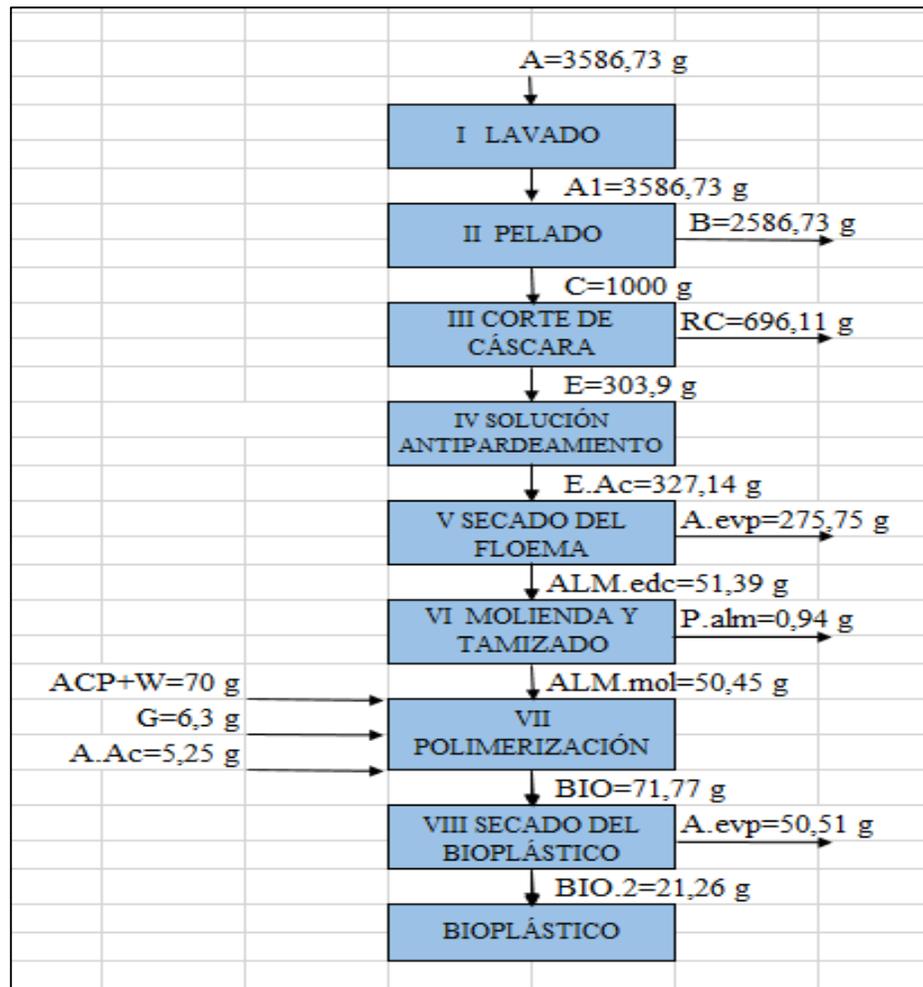


Figura N° 4-4: Balance general de obtención de bioplástico

Fuente: Elaboración propia.

4.5.10 Cálculo del rendimiento de almidón de cáscara de plátano

Se calcula el rendimiento del proceso de obtención de almidón a partir de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) en base a la cantidad de cáscara utilizada para la extracción

y la cantidad de almidón obtenido como producto final se muestra en la ecuación 3.12 (Vogel, 1996).

$$\text{Rendimiento (\%)} = (m_{\text{Almidón de cáscara}} / m_{\text{cáscara}}) \times 100 \quad \text{Ecuación (3.12)}$$

Donde:

$$m_{\text{almidón de cascara}} = 50,45 \text{ g}$$

$$m_{\text{cáscara}} = 1000 \text{ g}$$

De la ecuación (3.12):

$\text{Rendimiento (\%)} = 5,045 \%$

4.5.11 Cálculo del rendimiento final en la obtención de bioplástico

Se calcula el rendimiento del proceso de obtención de bioplástico a partir de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) en base a la cantidad de almidón y la mezcla de reactivos utilizada para la obtención de bioplástico como producto final.

$$\text{Rendimiento (\%)} = (m_{\text{producto final}} / m_{\text{materia prima}}) \times 100 \quad \text{Ecuación (3.13)}$$

Donde:

$$m_{\text{producto final}} = 21.263 \text{ g}$$

$$m_{\text{materia prima}} = 1000 \text{ g}$$

De la ecuación (3.13):

$\text{Rendimiento (\%)} = 2,126 \%$

4.6 Balance de energía en la obtención de bioplástico

Los balances de energía son unas de las herramientas más importantes con las que cuenta la ingeniería de procesos y se utiliza para contabilizar flujos de energía en un determinado proceso industrial, estos nos permiten conocer las necesidades energéticas del mismo (Felder, 1991).

4.6.1 Balance de energía en el secado del interior de cáscara de plátano (floema)

La tabla IV-11, muestra los resultados obtenidos de las propiedades psicométricas del aire de entrada y aire de salida de la estufa de convección forzada en base a las temperaturas de bulbo seco (Tbs) temperatura de bulbo húmedo (Tbh), las cuales se obtuvieron utilizando la carta psicométrica que se encuentra a condiciones de presión 610 mmHg de la ciudad de Tarija. Ver anexo E

Tabla IV-11

Propiedades psicométricas del aire

Propiedades	Entrada del aire	Salida del aire
Tbs (° C)	28	44
Tbh (° C)	20	38
HR (%)	52	71
Y (Kg agua/Kg aire)	0,0155	0,0531
H (Kcal/Kg)	7,50	26,8
V _e (m ³ /Kg)	0,815	0,875

Fuente: Zenteno, 2020

Donde:

HR = Humedad relativa (%)

Y = Humedad absoluta (Kg agua/Kg aire)

H = Entalpia (Kcal/Kg)

V_e = Volumen específico (m³/Kg)

Los datos de solido seco de almidón de interior de cáscara de plátano y del agua evaporada ya fueron calculados en la etapa V y etapa VI del balance de masa.

ALM.mol = masa de almidón de interior de cáscara de plátano seco 51,39 g

A.evp = masa de agua evaporada en el secado de endocarpio 275.75 g

Para calcular el caudal de aire utilizado se utiliza la ecuación(3.14) citada por (Valiente, 1994).

$$G = \frac{m_{ss}X_{BA} - X_{BS}}{(Y_{G2} - Y_{G1})} / h \text{ Ecuación(3.14)}$$

$m_{ss}X_{BA} - X_{BS} = 275,75$ g de agua evaporada

$(Y_{G2} - Y_{G1}) = 0,0376$ g agua / g aire seco (dato extraído de la tabla IV-11)

$h = 6$ horas de secado

G= 1222,29 gramos de aire seco hora

Para la determinación de la cantidad de calor que se requiere para el secado del interior de cáscara de plátano se utilizó la ecuación (3.15), citada por (Valiente, 1994).

$$Q_{vap} = m_{Aire} * cp_{Aire} * \Delta T \quad \text{Ecuación (3.15)}$$

Q_{vap} = Cantidad de calor por evaporación (Kcal/h)

m_{Aire} = Caudal másico del aire (Kg/h)

cp_{Aire} = Calor especifico del agua (Kcal/Kg °C)

ΔT = Variación de temperatura (°C)

La ecuación [3.15] también puede ser expresada como:

$$\Delta H = Q_{vap} = m_{Aire} * cp_{Aire} * \Delta T \quad \text{Ecuación (3.16)}$$

Esta ecuación es válida cuando no existe reacción química o cambio de estado entre los componentes que intervienen en el proceso de transformación. Es decir para sistema abierto (Valiente, 1994).

La expresión matemática (3.16), se puede expresar como una función del cambio de entalpías iniciales y finales, del aire en la estufa:

$$Q_{Vap} = Q_{Vap} = m_{Aire} * cp_{Aire} * \Delta T = m_{Aire} * (H_{final}^{\circ} - H_{inicial}^{\circ}) \quad \text{Ecuación (3.17)}$$

Reemplazando los valores encontrados de propiedades psicométricas de la tabla IV-12 para el aire, se tiene:

$$Q_{VapE} = 1,22229 \frac{Kg}{h} * (28 - 7,50) \frac{Kcal}{Kg} * 6h$$

$$Q_{VapE} = 150,341 \text{ Kcal/h}$$

4.6.2 Balance de energía en el secado del bioplástico de cáscara de plátano

Los datos de sólido seco de bioplástico de interior de cáscara de plátano y del agua evaporada ya fueron calculados en la etapa VIII del balance de masa.

BIO.2 = Cantidad de bioplástico final seco = 21.26 gr

A.evp = cantidad de agua evaporada en el secado del bioplástico = 50.51 g

Para calcular el caudal de aire utilizado, se utiliza la ecuación [3.14] citada por (Valiente, 1994).

$$G = \frac{m_{ss} X_{BA} - X_{BS}}{(Y_{G2} - Y_{G1})} / h$$

$m_{ss} X_{BA} - X_{BS} = 50,51$ g de agua evaporada

$(Y_{G2} - Y_{G1}) = 0,0376$ g agua / g aire seco (dato extraído de la tabla IV-12)

$h = 5$ horas de secado

$G = 268,670$ gramos de aire seco hora

Para la determinación de la cantidad de calor que se requiere para el secado del bioplástico de endocarpio de cascara de plátano se utilizó la expresión matemática (3.16), citada por (Valiente, 1994).

$$\Delta H = Q_{vap} = m_{Aire} * cp_{Aire} * \Delta T$$

La expresión matemática (3.16), se puede expresar como una función del cambio de entalpías iniciales y finales, del aire en la estufa:

$$Q_{vap} = Q_{vap} = m_{Aire} * cp_{Aire} * \Delta T = m_{Aire} * (H_{final}^{\circ} - H_{inicial}^{\circ})$$

Reemplazando los valores encontrados de propiedades psicométricas de la tabla IV-12 para el aire, tenemos:

$$Q_{vapB} = 0,26867 \frac{Kg}{h} * (28 - 7,50) \frac{Kcal}{Kg} * 5h$$

$$Q_{vapB} = 27,538 \text{ Kcal/h}$$

La cantidad de calor requerida para la elaboración de “bioplástico de cáscara de plátano” será:

$$Q_{Total} = Q_{vapE} + Q_{vapB}$$

$$Q_{Total} = 177,879 \text{ Kcal/h}$$

4.7 Determinación del costo de producción de bioplástico a escala laboratorio

Para determinar los costos de producción se toman en cuenta los datos empleados en el balance de materia y los gastos energéticos de los equipos utilizados durante el proceso de obtención de bioplástico.

4.7.1 Costos de materias primas y reactivos

En la tabla N° IV-12 se detallan la cantidad de materias primas y reactivos utilizados en el proceso y sus costos respectivos:

Tabla N° IV-12

Costos de materias primas, insumos y reactivos

Materia prima, insumos y reactivos	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Global (Bs)
Plátano	3,22	Kg	10,11	3,12
Ácido Cítrico (sólido)	0,0138	Kg	20	0,276
Glicerina (96%)	0,08	L	58	4,65
Ácido acético	0,075	L	38	2,85
Total			119,12	10,896

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.7.2 Costos de energía eléctrica

Para estimar los costos de energía eléctrica se toma como dato referencial 0,60 Bs el costo del Kw/h, que es la tarifa de electricidad en Bolivia.

En la tabla IV-13 se detalla la energía eléctrica consumida por los equipos durante el proceso.

Tabla N° IV-13

Costos de energía eléctrica en la obtención de bioplástico

Equipos	Potencia (Kw)	Tiempo (h)	Energía (Kw/h)	Costo Global (Bs.)
Baño maría	1,30	4	5.2	3.12
Estufa	2,00	29,00	58,00	34,80
Total				37,92

Fuente: Elaboración propia, 2016.

El costo total de producción es la suma de los costos de materias primas y reactivos utilizados para la elaboración de bioplástico, los costos de energía eléctrica:

$$\text{Costo total} = (10,896 + 37,92) \text{ Bs.}$$

$$\text{Costo total} = 48,816 \text{ Bs.}$$

La producción de 21.26 gramos de bioplástico de cáscara de plátano tiene un costo total de 48,816 Bs.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Se utilizó cáscara de plátano variedad cavendish en estado verde-maduro en la obtención de bioplástico, procedente del trópico boliviano. Los resultados de las propiedades físico-químicas determinados por el C.E.A.N.I.D. de la U.A.J.M.S. son: Azúcares totales: 2,66 %. Azúcares reductores (azúcares que se reducen por hidrólisis ácida): 0,23 %. Contenido de cenizas: 1,27 %. Humedad 84,29 %. Fibra: 0,08 %. Grasa: 0,42 %. Hidratos de carbono: 12,92 % y Proteína: 1,02 %
2. Las variables estudiadas en el proceso de obtención de bioplástico a partir de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) son volumen de glicerina, volumen de ácido acético y temperatura. En los ensayos preliminares de obtención se determina que las condiciones óptimas de proceso son cantidad de ácido acético de 5 ml, cantidad de glicerina 6 ml y temperatura de 70 °C, pertenecientes al experimento N° 8
3. El material presenta una tensión (resistencia a la tracción) de 16,651 N/cm² que equivale a (0,17 Mpa), que es muy baja comparada con la norma ASTM D 638 para plásticos.
4. El costo estimado de la obtención experimental (escala laboratorio) de bioplástico a partir de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) es de 55,806 Bs. por 21,26 gramos.
5. El bioplástico obtenido con las cantidades óptimas de ácido acético, glicerina y temperatura tiene un rendimiento definitivo 2,126 % presenta tensión 0,17 Mpa (resistencia a la tracción) y un módulo tensil 2,97 Mpa (resistencia a la deformación), presenta cualidades similares a una goma.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Utilizar equipos digitales para la medición de las propiedades físicas del bioplástico, para obtener datos más exactos.
2. Realizar el proyecto de obtención de bioplástico a partir de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) con un estudio detallado de costos para determinar si el mismo es factible a un nivel de producción industrial.
3. Realizar un estudio de cuantificación de los residuos de cáscara de plátano disponible en Bolivia a partir de otras actividades económicas que involucren el uso de la fruta, con el fin de utilizarla este desecho para la obtención de bioplástico a escala industrial.
4. Estudiar métodos de secado alternativos, al del secado por convección mediante una estufa eléctrica, debido a que este método resulta muy caro para el proceso.