

OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE PAPA

JUAN SEBASTIAN HOLGUIN CARDONA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE PAPA

JUAN SEBASTIAN HOLGUIN CARDONA

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de aceptación

Ing. Sandra Liliana Mesa Espitia

Ing. Diana Milena Fonseca Morales

Ing., Oscar Chamarravi Guerra

Bogotá D.C, Febrero, 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dr. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco principalmente a mi mamá ya que, sin el apoyo, los consejos y la dedicación, la realización de este sueño no hubiese sido posible.

A la orientadora del trabajo de grado, la Ingeniera Sandra Liliana Mesa, por su orientación, colaboración y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

A Jorge Sánchez, asesor del SENA del parque de Biotecnología y Nanotecnología, quien me apoyo y oriento durante la etapa experimental del proceso

A Hernando Vargas Rincón, por abrirme las puertas de su empresa, guiarme y apoyarme en el proyecto.

A las Fundación Universidad de América, quienes, durante todo el trayecto de la carrera, me dieron las bases necesarias para desarrollar este proyecto.

Al SENA centro de Biotecnología y Nanotecnología, por abrirme las puertas de sus instalaciones y equipos para poder ejecutar el proyecto experimentalmente.

Y finalmente, a todas las personas que estuvieron presentes durante la ejecución de este trabajo de grado.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre María del Rosario Cardona y mis hermanos Santiago León y María José León, por su apoyo, consejos, por enseñarme el valor del trabajo, brindarme el apoyo para cumplir mis sueños, por su inmensa comprensión, amor y ayuda en los momentos más difíciles, por sus esfuerzos para darme una educación de calidad. Por enseñarme que antes de ser profesional se debe ser persona, por mis valores, mis principios, mi perseverancia, mi carácter y la fuerza para perseguir mis sueños.

A mi otra familia David García, Camilo Hernández y Alexander Arias, que han estado siempre, brindándome apoyo de fortaleza y energía para alcanzar todas mis metas, por darme consejos cuando fueron necesarios y su incondicional apoyo.

A Froilán Peñalosa, por acompañarme y apoyarme en el transcurso de este proyecto, por ayudarme a superar obstáculos con sus ideas y experiencia.

Especial dedicatoria a Stephanie Oviedo y Patricia Montoya, por la ayuda que me brindaron durante el transcurso de este proceso, por estar presentes en situaciones complicadas en el desarrollo de este proyecto, por la motivación que imprimían constantemente para continuar en este proceso y la alegría que representaban.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	23
1 GENERALIDADES	24
1.1 ALMIDÓN	24
1.1.1 AMILOSA	25
1.1.2 Amilopectina	26
1.1.3 Fuentes de obtención	26
1.1.4 Aplicaciones	27
1.2 SOLANUM TUBEROSUM	27
1.2.1 Almidón nativo de papa	28
1.2.2 Obtención del almidón de papa	28
1.2.3 Propiedades del almidón	29
1.3 MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN NATIVO	32
1.3.1 Modificación física	32
1.3.2 Modificación enzimática	32
1.3.3 Modificación química	32
1.3.3.1 Acetilación del almidón	33
1.4 ALMIDÓN MODIFICADO EN LA INDUSTRIA PLASTICA	34
1.4.1 Propiedades mecánicas	35
2 SELECCIÓN DEL PROCESO Y LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE UN BIO-PLÁSTICO	37
2.1 SELECCIÓN DEL PROCESO	37
2.1.1 Proceso tradicional	37
2.1.2 Proceso con almidón modificado	41
2.1.3. Proceso con matriz reforzada	44
2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN	48
2.2.1 Factores de alta importancia	48
2.2.2 Factores de media importancia	49
2.2.3 Matriz de factores ponderados	52
2.2.4 Proceso definitivo.	52
2.3 ESQUEMA DE TRABAJO Y MATERIAS PRIMAS, EQUIPOS	53

3 DETERMINAR LA MEJOR FORMULACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL BIOPLASTICO	57
3.1 MODIFICACIÓN QUÍMICA DEL ALMIDÓN POR ACETILACIÓN	57
3.1.1 Reactivos y materiales del proceso de modificación	58
3.1.2 Metodología para la modificación del almidón	59
3.1.2.1 Lavado del almidón	60
3.1.2.2 Modificación del almidón nativo	61
3.1.2.3 Secado del almidón modificado	62
3.1.3 Resultados de la modificación del almidón	63
3.2 CONFIRMACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN	67
3.2.1 Determinación de grado de sustitución	68
3.2.2 Determinación de la acetilación por espectroscopi.,	74
3.3 FORMULACIÓN DEL BIOPLÁSTICO	77
3.3.1 Metodología para la obtención del bioplástico	79
3.4 PRUEBAS MECÁNICAS	88
3.4.1 Resistencia de los materiales	89
3.4.2 Prueba de dureza o compresión	90
3.5 RESISTENCIA Y DUREZA	91
4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RELEVANTES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BIOPLÁSTICO	94
4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BIOPLASTICO	94
4.1.2 Equipos para el proceso de acetilación	97
4.1.2.1 Reactor	97
4.1.2.3 Horno de bandejas	108
4.1.2.4 Molino y tamiz	111
4.2.1 Equipos para el proceso de obtención del bioplástico	118
4.2.1.1 Tanques de mezcla	118
4.2.1.2 Reactor batch para la reacción de polimerización del almidón.	120
5. DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS Y LA VIABILIDAD DE LA OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO, POR MEDIO DEL INDICADOR FINANCIERO VPN	124
5.1 COSTOS DIRECTOS	124
5.1.1 Costos de equipos	124
5.1.2 Costo de los insumos	124
5.1.3 Costos de personal	126
5.2. COSTOS INDIRECTOS	126
5.3. FLUJO DE CAJA	128

6. CONCLUSIONES	132
7. RECOMENDACIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXO	142

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. microfotografía de gránulos de almidón.	24
figura 2. estructura de amilosa	25
figura 3. Estructura amilopectina	26
figura 4. Obtención del almidón de papa	29
figura 5. Forma de partícula del almidón de papa, yuca y maíz.	31
figura 6. Tipos de modificación química.	33
figura 7. Reacción de acetilación del almidón.	34
figura 8. Montaje por goteo.	61
figura 9. filtración con bomba de vacío.	62
figura 10. Agitación del proceso de modificación química del almidón.	69
figura 11. titulación de las muestras de almidón.	69
figura 12. comparación de los espectros para los almidones analizados.	75
figura 13. Espectro del almidón nativo.	75
figura 14. Espectro del almidón modificado 2	76
figura 15. espectro del almidón modificado 4.	76
figura 16. Molde de acero poroso con recubrimiento de pintura electrostática.	83
figura 17. Mezclador con aspas.	84
figura 18. Molde de acero gg d mp 420, con el bioplástico.	85
figura 19. Prototipo #1, secado en molde acrílico.	88
figura 20. Probetas para las pruebas mecánicas.	91
figura 21. Balance de materia para un reactor.	97
figura 22. balance de materia para un reactor batch.	98
figura 23. Mecanismo de reacción de polimerización del almidón.	121

LISTA DE CUADROS

	pág
cuadro 1. Temperatura y entalpía de gelatinización del almidón	30
cuadro 2. Factor de alta importancia.	49
cuadro 3. Calificación de los procesos del factor de alta importancia.	49
cuadro 4. Factores de importancia media.	52
cuadro 5. Calificación de los procesos.	52
cuadro 6. Matriz de selección de factores ponderados.	52
cuadro 7. Reactivos del proceso de modificación del almidón.	58
cuadro 8. equipos necesarios para la modificación del almidón.	58
cuadro 9. Condiciones de operación del almidón.	63
cuadro 10. reactivos del proceso de la confirmación de la modificación.	68
cuadro 11. equipos necesarios para la modificación del almidón.	68
cuadro 12. Condiciones de proceso para la confirmación química del almidón.	71
cuadro 13. reactivos del proceso de obtención del bioplástico.	77
cuadro 14. Equipos necesarios para la obtención del almidón.	78
cuadro 15. condiciones de proceso para obtención del bioplástico	81
cuadro 16. datos para el desarrollo de la prueba de resistencia del bioplástico.	90
cuadro 17. datos para el desarrollo de la prueba de compresión o dureza	91
cuadro 18. Tiempos de ciclos representativos para un proceso por lotes.	100
cuadro 19. parámetros de diseño para ciclones.	104
cuadro 20. Características de ciclones de alta eficiencia.	105
cuadro 21. tipos de molinos de acuerdo con el tamaño de partícula requerido.	111
cuadro 22. Número de agitadores requeridos.	118
cuadro 23. Constantes de velocidad de reacción.	121

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág
diagrama 1. Diagrama de flujo, limpieza del almidón modificado.	63
diagrama 2. Diagrama de balance de masa para la modificación del almidón.	64
diagrama 3. diagrama de proceso confirmación química del almidón.	71
diagrama 4. balance de masa obtención de un bioplástico.	81
diagrama 5. Diagrama de flujo con equipos del proceso de acilación.	96
diagrama 6. Diagrama de los equipos para la modificación del almidón.	113
diagrama 7. diagrama de flujo del proceso de obtención de bioplástico	115
diagrama 8. Diagrama de flujo con equipos del proceso de obtención del bioplástico.	122

LISTA DE TABLAS

	pág
tabla 1.materia prima para la obtención del bioplástico.	55
tabla 2. Resultados obtenidos de la modificación del almidón por entradas de etapa.	65
tabla 3.resultados obtenidos de la modificación del almidón por salida de etapa.	66
tabla 4.resultados de pérdidas y rendimiento.	66
tabla 5. Resultados del porcentaje de acetilos.	72
tabla 6.resultado del grado de sustitución.	73
tabla 7. Resultados obtenidos de la obtención de bioplástico por entradas de etapa.	86
tabla 8.resultados obtenidos de la obtención de bioplástico por salidas de etapa.	86
tabla 9.resultados de pérdidas y rendimiento.	86
tabla 10. Resultados de las pruebas mecánicas.	92
tabla 11.promedio de insumos necesarios para producir un gramo de almidón	96
tabla 12.tabla de proyección.	97
tabla 13. Promedio de insumos necesarios para producir el plástico con un gramo de almidón modificado.	116
tabla 14. Proyección de insumos para la producción del bioplástico.	117
tabla 15. Costos de los equipos.	124
tabla 16. Costos de insumos requeridos.	125
tabla 17. Costo de personal	126
tabla 18. Costos indirectos de producción.	127
tabla 19. Cuadro de amortización del crédito de inversión.	128

LISTA DE ECUACIONES

	pág
ecuación 1. Porcentaje de grupos acetilo.	70
ecuación 2. Grado de sustitución.	71
ecuación 3. balance de materia para un reactor batch.	98
ecuación 4. velocidad de reacción de la acetilación del almidón	98
ecuación 5. tiempo de reacción para un reactor batch con volumen constante.	99
ecuación 6. concentración final del ácido acético.	99
ecuación 7. concentración final del hidróxido de sodio.	99
ecuación 8. Tiempo de reacción.	100
ecuación 9. Tiempo de residencia de la sustancia en el reactor.	100
ecuación 10. Volumen del reactor.	101
ecuación 11. Volumen del reactor.	101
ecuación 12. Heurística nivel I	102
ecuación 13. Dimensionamiento del reactor.	102
ecuación 14. Relación de caudal.	105
ecuación 15. Geometría del ducto de entrada.	106
ecuación 16. Humedad en base seca.	108
ecuación 17. Energía requerida por el secador.	109
ecuación 18. Volumen de la cámara de secado.	109
ecuación 19. Caudal de aire de secado.	109
ecuación 20. Potencia del ventilador de secado.	110
ecuación 21. Masa de las bolas del molino.	112
ecuación 22. Volumen mínimo del contenedor.	112
ecuación 23. Valor mínimo de diámetro del impulsor.	113
ecuación 24. Costos directos totales.	126
ecuación 25. Expresión para encontrar el vpn.	130
ecuación 26. Expresión de la tasa mínima de retorno.	130

ABREVIATURAS

Kg: Kilogramos.
g: Gramos.
mL: Mililitros.
°C: Grados centígrados.
HCl: Ácido Clorhídrico.
NaOH: Hidróxido de Sodio.
MPa: Mega-pascales.
GPa: Giga-pascales.
N (concentraciones): Normalidad.
Psi: Libra por pulgada cuadrada.
mm: Milímetros.
N (fuerza): Newton.
s: segundos.
min: minutos.
h: horas.
Rpm: Revoluciones por minuto.
cm: centímetro.
m: metro.
m²: metro cuadrado
m³: metro cubico.
rad: radianes.
α: alfa.
β: beta
π: número Pi

GLOSARIO

MATRIZ DE SELECCIÓN: es una técnica de clasificación jerárquica para evaluar proyectos potenciales, problemas, alternativas basadas en un criterio específico o dimensiones de calidad.

PLÁSTICO: es el término para describir una gama amplia de materiales sintéticos o semisintéticos.

BIOPLÁSTICO: es el término usado para describir materiales plásticos derivados de sustancias naturales.

ALMIDÓN: sustancia blancuzca, inodora e insípida, con diferente tamaño y forma de partícula, que abunda en otras feculentas, como la papa o los cereales.

GRANULO: materiales que son presentados con un tamaño de partícula estándar o uniforme.

ACETILACIÓN: reacción química que consiste en la sustitución de átomos de hidrogeno por grupos acetilo.

AGUA TIPO I: usada en procedimientos que requieran máxima exactitud y precisión, debe seleccionarse este tipo de agua cuando la prueba sea esencial un nivel mínimo de componentes ionizados.

CENTRIFUGACIÓN: método de separación de mezclas por medio de sedimentación, se usa para acelerar este efecto físico de una mezcla por acción de una aceleración centrifuga y los componentes más pesados se precipitan y los livianos quedan de sobrenadante.

FILTRACIÓN: proceso de separación de partículas sólidas en un líquido por medio de un material poroso denominado filtro.

TAMIZAR: operación unitaria básica la cual se basa en pasar el material granulado a través de un tamiz con el fin de disminuir el tamaño de partícula.

MOLIENDA: proceso unitario que consiste es disminuir el tamaño de partícula de una materia sólida, se habla de molienda cuando se trata de partículas con tamaños inferiores a 2,54 cm.

HOMOPOLIMERO: polímero que está formado por el mismo monómero a lo largo de la cadena que lo conforma, el polietileno es un ejemplo de esta familia.

PAPA: también denominado patata, es un tubérculo comestible que se extrae de la tierra, es la reserva de energía de la planta herbácea *Solanum Tuberosum*.

REACCIÓN: es todo proceso termodinámico en el cual dos o más sustancias, se transforman cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias denominadas productos

REACTOR: es un equipo donde ocurre una reacción química, está diseñado para maximizar la conversión o la selectividad al menor coste posible.

MEZCLADOR: también denominado agitador, es un equipo diseñado para preparar disoluciones, suspensiones o mezclar líquidos.

pH: medida de acidez o alcalinidad de una disolución.

RESUMEN

El presente trabajo de grado se basó en la obtención de un bioplástico teniendo como materia prima el almidón nativo de papa. Se analizaron procesos desarrollados en diferentes estudios, agrupándolos en tres, donde se seleccionaron por sus características, por medio de una matriz de selección de factores ponderados, se escogió el mejor proceso al tener en cuenta factores como la calidad del material final y el tiempo de producción.

El proceso de matriz reforzada fue la técnica que se seleccionó para obtener el bioplástico, en cual el factor más importante fue la calidad del producto final. Este proceso tiene dos bloques claves, el primero es la modificación del almidón, que se realiza para acondicionar el almidón mejorando sus propiedades mecánicas; el segundo bloque es la obtención del bioplástico en donde se adicionan reactivos que mejoran la calidad y apariencia del producto final.

Con el proceso seleccionado se acondicionó el almidón para la modificación química por entrecruzamiento con ácido acético. La modificación se verificó al utilizar la espectroscopia de infrarrojo donde se analizaron diferentes intervalos de longitud de onda, entre las cuales se destaca la banda $4000-3000\text{ cm}^{-1}$, que confirmó la adición de grupos acilo al almidón nativo al sustituir grupos hidroxilos. Asimismo, se utilizó la técnica cuantitativa para la determinación de los grados de sustitución, con lo que se logró comprobar la modificación del almidón, al alcanzar un grado de sustitución comprendido en un intervalo medio alto, lo que indicó que es un material apto para el desarrollo de materiales plásticos.

Al haber conseguido el almidón modificado se procedió a obtener el bioplástico con el proceso establecido por medio del método de factores ponderados, donde se construyó un balance de masa con el fin de obtener la formulación del bioplástico, el cual arrojó un producto final con un peso de 1.4202 g, posterior a esto se llevaron a cabo las pruebas mecánicas de resistencia para evaluar las propiedades funcionales del material obtenido, donde el proceso de matriz reforzada presentó un porcentaje de elongación del 4.1%, resistencia a la tensión de 4.1 Mpa y una dureza de 71.2, esto se desarrolló con el fin de sugerir su posible aplicación en la fabricación de envases, tapas, filtros de cigarrillo entre otros; con la formulación obtenida a través del balance de masa se realizó una proyección para procesar de un kilogramo de almidón nativo, simulando las

mismas condiciones a nivel laboratorio y dimensionando los equipos del proceso a escala piloto.

Por último, se calcularon los costos operativos y de inversión, esto con el fin de establecer la viabilidad del proyecto por medio del indicador financiero VPN, y proyectar el funcionamiento de la planta piloto durante 10 años, en donde este tiempo se calculó en el tiempo de vida útil de la maquinaria.

Palabras clave: almidón, papa, bioplástico, acetilación, equipos

INTRODUCCIÓN

En Colombia el panorama de la contaminación por plásticos no es alentador; para junio de 2017 se estableció que un colombiano consume un promedio 6 bolsas al día, lo que significa un total de 288 bolsas en un año lo que traduce en toda su vida (77 años de vida promedio) 22.176 bolsas aproximadamente¹, lo cual es un consumo exagerado, además, es importante tener en cuenta que solo se recicla el 5% del plástico consumido. El 95% de plásticos restantes, una pequeña parte se lleva a un proceso de incineración, este método es más tóxico para el medio ambiente por la liberación de gases tóxicos como el monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno, fosgeno²; Los residuos sólidos también son una fuente de contaminación importante ya que adiciona dioxinas y furanos al suelo los cuales son potencialmente mortales para el ser humano, además de tener un costo de 1100 pesos por cada kilogramo de plástico³, la mayor parte del residuo de plástico se dirige a rellenos sanitarios y es así como estos desechos se vuelven intratables y tóxico para el medio ambiente, por ello, en la actualidad empresas asociadas a ACOPLASTICOS y otros sectores industriales buscan nuevos productos más amigables con el medio ambiente, sin embargo, no se han encontrado alternativas definidas, y mucho menos, rentables.

Aunque en Colombia se han venido implementando campañas y normatividades en cabeza del Ministerio de Ambiente y de la mano de asociaciones como: soy ECOlombiano y la WWF (Fondo Mundial para la naturaleza) a través de campañas como “reemBOLSAle al planeta” para controlar el uso de las bolsas plásticas y otros polímeros de uso industrial. En términos de regulación, a través de la resolución 668 de 2016 y los artículos 207- 208 de la ley 1819 de 2016, se adopta un impuesto al uso de las bolsas plásticas y una modificación a las especificaciones de los plásticos para que sea posible su reutilización, lo cual ha venido funcionando ya que según el DANE⁴, la producción de elementos plásticos ha caído en un 0.9% en el primer semestre del año 2018, aunque la producción de plásticos ha bajado, la necesidad de consumir este material es latente por lo cual buscar un producto alternativo que cumpla con las necesidades de los consumidores es muy importante.

¹WWF COLOMBIA. Colombia adopta regulación a las bolsas plásticas. [En línea]. 30 junio 2017. Disponible en: <http://www.wwf.org.co/?304333/Colombia-regula-bolsas-plasticas>

² Ibid. p.3.

³ DANE. . Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas Revisión 3.1 Adaptada para Colombia. [En línea]. 16 de Julio 2017. Disponible en: http://formularios.dane.gov.co/senApp/nomModule/aym_index.php?url_pag=clasificaciones&alr=&cla_id=2.

⁴ Ibid. p. 1.

Entre las posibles alternativas de materia prima para la producción de bioplásticos se encuentra el almidón de maíz, yuca, papa, etc. La papa es uno de insumos más estudiados para la producción de este material por su alto contenido de almidón, su alto nivel de producción y las buenas características que posee este almidón en su estructura como lo es la relación amilosa/amilopectina ya que este parámetro define entre otras cosas el tiempo de degradación el cual es de 0.091% del material desarrollado con almidón de papa cada hora⁵, lo cual hace este un material biodegradable.

La papa en la actualidad Colombiana, es uno de los ejes fundamentales de la economía de los departamentos de Boyacá, Nariño y Cundinamarca en donde los 283 municipios que los conforman la principal actividad económica es el cultivo de este tubérculo, el aporte de este sector al PIB agropecuario es del 4,4% según cifras publicadas por el DANE para el segundo trimestre de 2017⁶, además Infoagro informa que esta actividad es la que presenta mayor demanda movilizandando un poco más de tres millones de toneladas anuales.

Como se evidencia la papa es una materia prima con una excelente proyección en términos de disponibilidad para el desarrollo de una película plástica la cual puede tener múltiples usos a nivel industrial, desde la producción de plásticos flexibles hasta embalajes de uso industrial con un grado de degradación mayor que los plásticos usados en la actualidad, por lo tanto en el trabajo el presente trabajo busca establecer el proceso más adecuado, las especificaciones y la viabilidad económica de producir un bioplástico a partir de almidón de papa.

⁵RODRÍGUEZ AGUILAR, Daniel Eduardo. Efecto de la concentración de almidones resistentes de la papa común (*Solanum tuberosum*) y criolla (*Solanum phureja*) sobre la digestibilidad de nutrientes, energía metabolizable e integridad del tracto gastrointestinal de pollos de engorde. Tesis para maestría. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. 2013. p.13.

⁶ DANE. Op. Cit. p. 5.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un bioplástico partiendo de almidón de papa a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar el proceso y las materias primas para la obtención de un bioplástico.
2. Determinar la mejor formulación para la fabricación del bioplástico.
3. Definir las especificaciones técnicas de relevantes del proceso de fabricación del bioplástico.
4. Desarrollar la evaluación financiera por medio del indicador VPN.

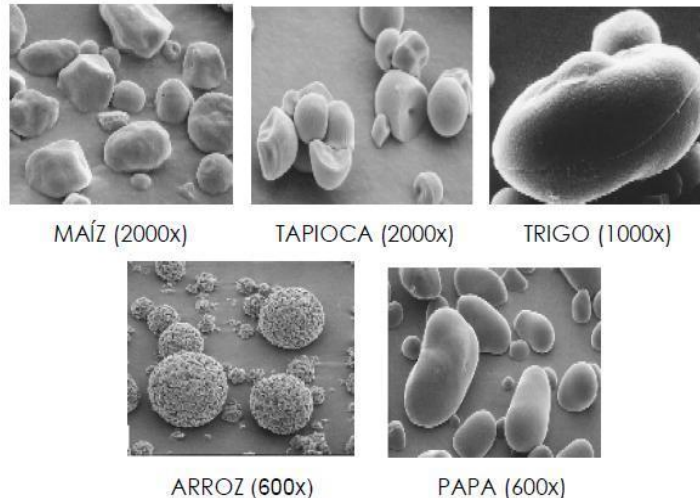
1. GENERALIDADES

1.1 ALMIDÓN

Tanto el almidón como la fécula son materias primas de origen vegetal, sólidas y generalmente en polvo. Se utilizan para describir en esencia la misma sustancia genérica, el cual es un glúcido abundante en el reino vegetal, puesto que su función es generar reservas energéticas para el desarrollo posterior de la planta. Esta molécula compleja se encuentra presente en tallos, granos y tubérculos y es allí donde radica la diferencia entre estos dos términos. Cuando se extrae de cereales (granos) se denomina almidón de lo contrario se denomina fécula.

Este polisacárido cuenta con una gran variedad de forma y tamaño de partículas que se pueden establecer en un rango de 0.5 a 100 μm , como se muestra en la figura 1, donde esto afecta sus propiedades funcionales, ya que al someter este material a una mezcla con agua se forma una suspensión temporal, lo cual no permite formar una solución, sin embargo al romper esa suspensión temporal por medio de agitación los gránulos tienen la tendencia a hincharse cuando no se someten a ningún tipo de conocimiento y este proceso es irreversible.

Figura 1. microfotografía de gránulos de almidón.



Fuente: ATWELL, M.D., Thomas D. Starch Modifications. En: Starches. Eagen Press Handbook. USA, 1999 p. 31-48.⁷

El almidón está compuesto por dos homopolímeros (polímero constituido por la repetición de un único monómero), de α -glucosa, donde estos monómeros de alto

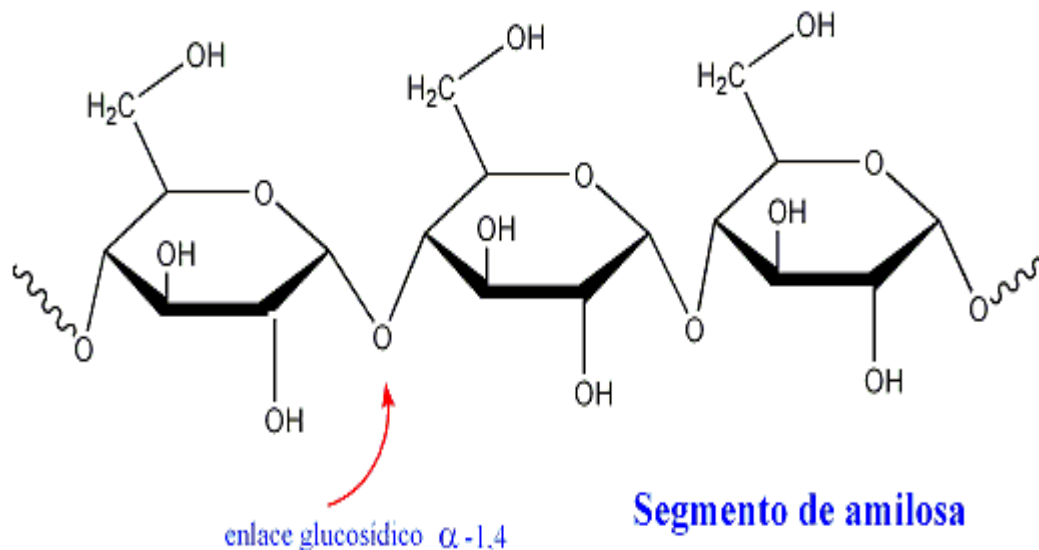
⁷ ATWELL, M.D., Thomas D. Starch Modifications. En: Starches. Eagen Press Handbook. USA, 1999 p. 31-48.

peso molecular y morfológicamente diferentes ya que la amilopectina posee ramificaciones que le brinda una formación estructural similar a un árbol mientras que la amilosa tiene una estructura lineal, generalmente los almidones cuentan con una relación 20 - 80 % de amilosa y amilopectina.

1.1.1 Amilosa. La amilosa en teoría es una cadena lineal de monómeros de unidades de glucosa como se muestra en la figura 2, sin embargo, experimentalmente se han encontrado cadenas de amilosa con pequeñas ramificaciones pero que no afectan o modifican sus propiedades, estas ramificaciones están presentes en una proporción del 0.3 al 0.5 % del total de los enlaces.

La amilosa está compuesta por enlaces glucosídicos a 1-4, de moléculas de glucosa compuestas de 200 a 20000 unidades, con un peso molecular en el orden de un millón⁸.

Figura 2. estructura de amilosa



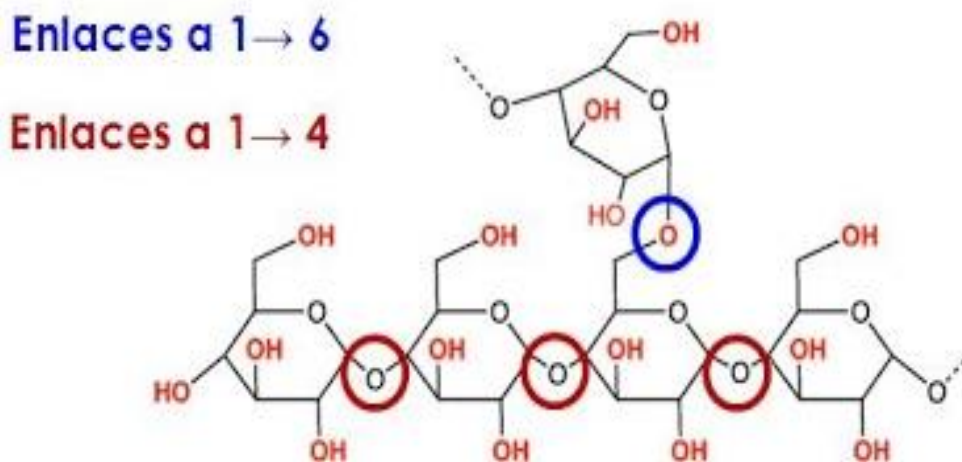
FUENTE: GEISSMAN, T.A. Principios de química orgánica. Segunda Edición. Editorial reverte. Barcelona.1973. 568 p.⁹.

⁸ GEISSMAN, T.A. Principios de química orgánica. Segunda Edición. Editorial reverte. Barcelona.1973. 568 p.

⁹ GONZALEZ Ana María y RAISMAN Jorge S., Amilosa, [En línea], 7 de septiembre de 2018 Disponible en: <http://www.biologia.edu.ar/macromoleculas/figacro/amilosa.gif>

1.1.2 Amilopectina. En la amilopectina se encuentran presentes dos tipos de enlaces el α 1-4, el cual le da origen a las uniones de las moléculas de glucosa y el enlace a α 1-6 el cual le da lugar a las ramificaciones, como se muestra en la figura 3, los cuales se forma a través de residuos de cadenas α -D-glucopiranosas, en la amilopectina estas ramificaciones aparecen cada 20 o 30 unidades de glucosa, y aunque el patrón de la formación estructural de este monómero no está actualmente definidos algunos estudios lo denominan como estructura fractal, alrededor de una estructura central¹⁰.

Figura 3. Estructura amilopectina



FUENTE: GEISSMAN, T.A. Principios de química orgánica. Segunda Edición. Editorial reverté. Barcelona.1973. 568 p (8).

1.1.3 Fuentes de obtención. Como se mencionó anteriormente el almidón se pueden encontrar en todo el reino vegetal puesto que este hace parte de las reservas energéticas de las plantas las cuales permiten que esta crezca conforme pasa el tiempo. A nivel industrial las principales fuentes de obtención de esta materia prima son la yuca, maíz, trigo y papa¹¹.

El maíz es el producto del cual se extrae mayor cantidad de almidón ya que a nivel mundial se producen cerca de 821 mil millones de toneladas en donde China y Estados Unidos manejan el 60% de esta producción, seguido a estos se encuentra

¹⁰ CALVO REBOLLAR, Miguel., Bioquímica de los alimentos, [En línea], 3 de enero de 2016, Disponible en: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>

¹¹ACOSTA Annie P y BLANCO Catherine., Obtención y caracterización de almidones nativos colombianos para su evaluación como posibles alternativas en la industria alimentaria. Tesis de pregrado. Cartagena de Indias, Colombia: Universidad de Cartagena, 2013. 50 p.

la papa con una producción mundial que se acerca a los 300 mil millones de toneladas y sus principales productores son china, Rusia y la unión europea.

1.1.4 Aplicaciones. En la actualidad las aplicaciones del almidón se concentran en la industria alimenticia y adhesivos; Sin embargo, se ha incursionado en nuevos nichos de mercado como el farmacéutico, madera laminada, textiles y plásticos, además de considerarse como la principal fuente de alimento del ser humano ya que aporta entre el 70 y 80% de las calorías necesarias para el funcionamiento del organismo.

En Colombia actualmente el almidón se usa principalmente en la industria alimenticia ya que por sus propiedades es ideal para aplicarlo en salsas, sopas, pastas, productos extruidos para fritos, carnes y postres lácteos; Adicionalmente se está incursionando en la incorporación del almidón como materia prima para materiales biodegradables.

1.2 SOLANUM TUBEROSUM

Se reporta que este tubérculo se domesticó en Sudamérica específicamente en Bolivia hace unos 10.000 años, la diversificación de este producto inició en Colombia atravesando la zona andina hasta llegar a argentina, posteriormente llegó a Centroamérica donde se diversificó por entrecruzamiento de las especies existentes en la época.

La papa es el cuarto comestible más importante del mundo, donde delante de este se encuentra el trigo, el maíz y el arroz; Las excelentes propiedades de la papa lo sitúan en esta posición además de su alta tasa de crecimiento y facilidad de cultivo, este producto contiene almidón, vitamina C, una pequeña porción de proteína y varios minerales lo que lo ha hecho uno de los cultivos más importantes para la alimentación humana.

Durante el proceso de cosecha la papa es seleccionada y procesada para diferentes fines, por lo tanto, el tubérculo fresco que se consume a nivel mundial es menos de 50% del cosechado, además cuando la papa se procesa libera almidón nativo de papa el cual se usa para procesos donde se obtienen colorantes, espesantes, aglomerantes, entre otros.

1.2.1 Almidón nativo de papa. Este almidón es un material multifuncional que presenta propiedades como, una fácil dispersión en agua fría, viscosidad relativamente alta, pobre estabilidad de cizallamiento, buena estabilidad de retrogradación, alta claridad en la pasta, las cuales se pueden utilizar en diferentes aplicaciones de alimentos y procesos de fabricación de agentes texturizantes, formadores de películas, aglutinantes de agua, materiales de relleno y espesantes.

Adicionalmente el almidón de papa posee un tamaño de partícula pequeño (2 μm – 66 μm) y la forma de sus gránulos es elipsoidal lo que favorece una formación de película clara, el tamaño de partícula en el almidón de papa es variable respecto a otros almidones provenientes de la yuca y el maíz en donde se evidencia una media poblacional de 15 μm adicionalmente como lo menciona Medina y colaboradores mediante el barrido por microscopía electrónica el tamaño y forma de partícula varía según el origen del almidón(maíz, papa, yuca, etc.), pero no cambia si la obtención del almidón es de la misma fuente y la papa se destaca por tener una superficie suave lo que le favorece a los procesos de modificación química u obtención de compuestos provenientes de esta materia prima ¹².

El almidón está en una proporción del 20% del contenido total de la papa con una relación del 14 % de amilosa y 86% amilopectina, lo cual hace que en los entornos en los que se trabaja este almidón interaccionan de forma negativa, lo cual llevan a tomarse acciones correctivas como la adición de mayor cantidad de plastificantes, aumento en la tasa de energía mecánica (agitación), temperatura, tasa de corte y otras variables que se tienen en cuenta en la fabricación o transformación de polímeros¹³.

1.2.2 Obtención del almidón de papa. El proceso de extracción del almidón para los tubérculos comienza con un lavado para retirar la tierra, polvo o cualquier impureza presente. La limpieza del producto se descortezaba y se lava nuevamente; El producto descortezado se corta en cuadros y se mezcla con agua para someterlo a un licuado obteniendo así una “lechada”, la cual se pasa por una tela obteniendo un filtrado. Este filtrado se decanta, se obtiene un sobrenadante el cual se debe eliminar, el sedimento se lava con agua y se vuelve a filtrar, por último, se seca el almidón en un horno, este proceso se muestra en la figura 4, la papa es considerada el cuarto alimento más importante y de más alto consumo por su alto contenido de almidón el cual oscila entre el 16 y 20% según la variedad del tubérculo.

¹²MEDINA Jorge y Salas Juan., Morphological Characterization of Native Starch Granule: Appearance, Shape, Size and its Distribution. En: Revista Ingeniería universidad de los Andes. Mayo, 2008. vol. 28. no. 27. p 57 – 62.

¹³ Ibid., p. 61.

Figura 4. obtención del almidón de papa



Fuente: MEDINA Jorge y Salas Juan., Morphological Characterization of Native Starch Granule: Appearance, Shape, Size and its Distribution. En: Revista Ingeniería universidad de los Andes. ¹⁴.

1.2.3 Propiedades del almidón. Al almidón se le pueden evaluar diferentes propiedades las cuales, dan a conocer su aplicabilidad en diferentes procesos.

- pH: el pH es una propiedad muy importante para los procesos de caracterizado del almidón ya que esta propiedad le da una predisposición de ceder o aceptar hidrogeniones, los pH generalmente desviados de la media (pH: 7 - 7.5), son los más usados para procesos de modificación.
- Solubilidad: Los almidones según su porcentaje de amilosa y amilopectina poseen cierta capacidad de disolverse en agua cuando están por encima de la temperatura de gelatinización.
- Absorción de agua: Es la capacidad del gránulo de almidón de absorber y retener agua y está ligado directamente con la temperatura de gelatinización ya que entre más aumenta la temperatura su capacidad de retención de agua es mayor.
- Poder de hinchamiento: Es la propiedad irreversible de los gránulos de almidón ya que estos absorben agua debido al incremento de la temperatura de gelatinización.
- Sinéresis: Es la propiedad del almidón de liberar agua que está directamente dentro del gránulo del almidón, esta liberación ocasiona un reagrupamiento

¹⁴ Ibid., p. 21.

interno en las moléculas de amilosa y amilopectina la cual es producto de la retrogradación.

- Viscosidad: Es la resistencia de las moléculas de un fluido a deformarse, esta oposición es debido a las fuerzas de adherencia que tienen un fluido, esta propiedad pertenece a los fluidos en movimiento la cual se no ve reflejada en líquidos estáticos puesto que sus moléculas están en estado estacionario.
- El almidón se comporta como un fluido no newtoniano y su comportamiento se describe como pseudoplástico puesto que al momento de fluir su viscosidad disminuye al aumentar su velocidad de desplazamiento.
- Gelatinización: Es el proceso en el que los gránulos de almidón que son mezclados con agua fría absorben y se hinchan entre un 10 - 20%, sin embargo, cuando a esta mezcla se le aplica temperatura se forma una pasta (gelatinización). Este proceso es irreversible puesto que los gránulos se reorganizan estructuralmente al entrar en contacto con agua caliente, las temperaturas y entalpías de gelatinización de algunos almidones estudiados se presentan en la figura 5.

Cuadro 1. Temperatura y entalpía de gelatinización de diferentes tipos de almidón
Fuente: HERNANDEZ MEDINA, Marilyn, et al. Caracterización fisicoquímica de

Almidones	Ti (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)	ΔH (J.g ⁻¹)
Makal	72,5 ^a	78,4 ^a	84,0 ^a	14,9 ^a
Camote	55,2 ^b	61,3 ^b	68,2 ^b	9,2 ^b
Yuca	57,8 ^c	65,2 ^c	75,3 ^c	10,0 ^c
Sagú	62,2 ^d	74,9 ^d	89,2 ^d	12,5 ^d
<i>X. sagittifolium</i> ¹	66-83	69-85	79-90	4-15
Camote ¹	58-75	63-74	78-86	10-18
Yuca ¹	50,68	54-78	60-100	4-22
Maíz ²	62,3	66,3	72,9	10,3
Papa ³	60	69	80	4,6

almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México, 2008, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000300031 [Consulta: Consulta: Jueves, 2 de Febrero de 2018]¹⁵.

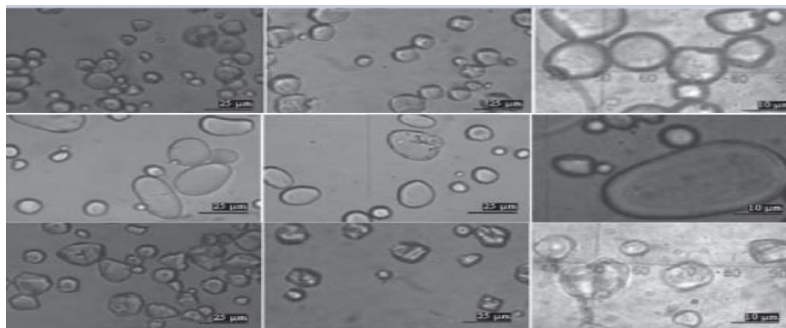
- Retrogradación: es el proceso siguiente a la gelatinización del almidón, en este proceso se libera agua presente dentro del gránulo de almidón mientras este

¹⁵ HERNANDEZ MEDINA, Marilyn, et al. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México, 2008, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000300031 [Consulta: Consulta: Jueves, 2 de Febrero de 2018]

se enfría, en este proceso las moléculas de amilosa y amilopectina se asocian entre sí, reteniendo agua en los intersticios que se forman entre los gránulos de almidón. La velocidad de retrogradación depende de factores como la longitud de las cadenas de amilopectina, la concentración de lípidos y la presencia de derivados de mono ésteres y fosfatos¹⁶.

- Tamaño de partícula: esta propiedad es fundamental ya que influye en la compatibilidad, teniendo en cuenta que cuando el tamaño de partícula disminuye se incrementa el ángulo de reposo, el coeficiente de fricción interparticular, el análisis de esta propiedad está dado por diferentes postulados ya que permiten su cuantificación entre los cuales están el diámetro de Feret, el diámetro de Marín, El diámetro de Stokes, determinación de tamices y Mastersizer 200¹⁷.
- Forma de partícula: es importante ya que al aumentar el tamaño de partícula aumenta la angularidad de los gránulos de almidón y su ángulo de reposo, por lo que se disminuye la velocidad de fluencia. Al igual que el tamaño de partícula, la forma de la partícula tiene influencia en la compactación de los gránulos, la figura 6 muestra las diferentes formas de partículas.

Figura 5. Forma de partícula del almidón de papa, yuca y maíz.



Fuente: HERNANDEZ MEDINA, Marilyn, et al. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México, 2008, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000300031 [Consulta: Consulta: Jueves, 2 de Febrero de 2018].¹⁸

¹⁶ GONZALEZ Ana María y RAISMAN Jorge S., Op. Cit., p.5.

¹⁷ ARISTIZÁBAL, Johanna y SÁNCHEZ, Teresa. Guía técnica producción y análisis de almidón de yuca. 1 ed. Roma, Italia: FAO, 2007. 63 p. ISBN 1020-4334.

¹⁸ Medina. Op. Cit. p. 61.

1.3 MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN NATIVO

Los polisacáridos del almidón están empaquetados por medio de enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares, haciendo el almidón insoluble en agua fría, resistente a ciertos tratamientos químicos y enzimáticos, por lo tanto, varios estudios se han enfocado en la utilización del almidón nativo, por ser un producto biodegradable, no tóxico y de bajo costo. Sin embargo, la aplicación del almidón sin modificar es baja ya que la fragilidad en el área de empaques, deterioro de este a condiciones ambientales húmedas, la reducida procesabilidad por su alta viscosidad, la incompatibilidad con algunos solventes y polímeros.

Debido a estas limitaciones en cuantos, a las propiedades mecánicas y químicas, se desarrollaron tres métodos para la modificación del almidón nativo, la modificación química, la modificación física y la microbiana o por una combinación entre las mencionadas anteriormente.

1.3.1 Modificación física. Este tipo de modificación tiene como fin alterar la estructura del granular, el tamaño físico o bien incrementar la solubilidad del almidón en agua a temperaturas bajas. Los métodos de tratamiento incluyen el tratamiento de la materia prima a condiciones de temperatura, presión, cizalla e irradiación con luz ultravioleta; Dentro de estos métodos se destacan la pre-gelatinización, hidrólisis parcial, método de baja humedad, método de recocido, extrusión por tratamiento térmico, radiación y ultrasonido.

1.3.2 Modificación enzimática. Para esta modificación se usan enzimas y microorganismos con el fin de forzar una hidrólisis del almidón, esto se realiza para la producción de dextrinas y glucosa, dentro de las enzimas más utilizadas para este fin se encuentran:

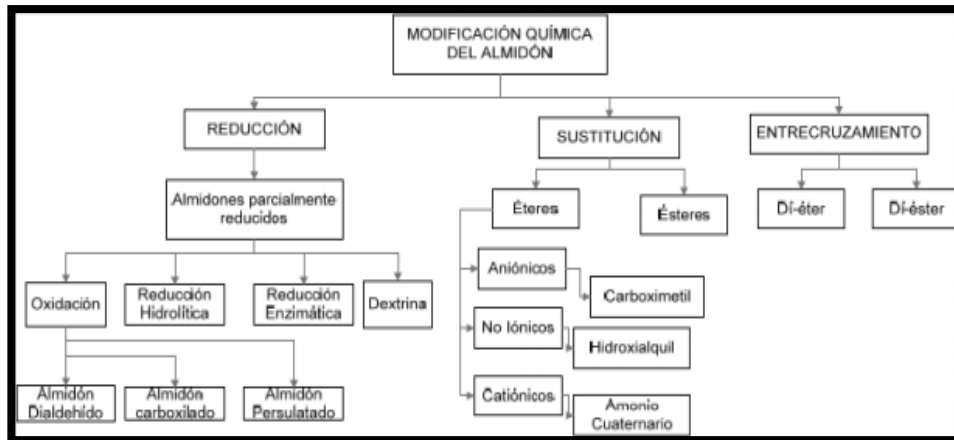
- α -amilasa: esta hidroliza las moléculas de amilosa y amilopectina dando paso a oligosacáridos (dextrinas).
- Glucoamilasa: Se emplea mezclándolo con α -amilasa con el fin de obtener jarabes de glucosa.
- β -amilasa: Esta no realiza hidrólisis a los enlaces 1-6 de la amilopectina, formando maltosa.
- Isoamilasa y pululanasa: Hidrolizan los enlaces 1-6 de la amilopectina, dejándolos preparados para la adición de nuevos elementos.

1.3.3 Modificación química. La modificación química del almidón se enfoca directamente a interactuar con los grupos hidroxilo del polímero del almidón, la modificación química se divide en tres grupos principales, reducción, sustitución y entrecruzamiento como se evidencia en la figura 6. Cada tipo de modificación le asigna propiedades diferentes al almidón.

La modificación química se evalúa por el grado de sustitución ya que indica el número promedio de sustituciones por unidad de anhidroglucosa en el almidón, el

grado máximo de sustitución es tres puesto que por cada unidad de glucosa hay disponibles tres grupos hidroxilos¹⁹.

Figura 6. Tipos de modificación química.



Fuente: Revista de ingeniería e investigación, Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos.²⁰

Al añadirle un grupo éster al almidón le permite a este modificar su naturaleza hidrofílica y obtener así cambios significativos en sus propiedades mecánicas y térmicas ²¹, este tipo de reacciones con almidón se desarrollan usualmente con donadores acilo, anhídridos y acilos clorados en presencia de algún tipo de solvente orgánico.

1.3.3.1 Acetilación del almidón. La modificación de almidón por acetilación se obtiene por el proceso de entrecruzamiento Di-éster, o esterificación con grupos acilos, incorporando grupos acetilos en la molécula de almidón, el éxito del proceso depende de la fuente de almidón, la concentración del reactivo, el tiempo de reacción, relación amilosa/amilopectina, pH y la presencia de algún tipo de catalizador.

La acetilación del almidón es relativamente sencilla, cuando se desarrolla con ácido acético ya que es una reacción de un solo paso(lo cual no ocurre con solventes como al anhídrido acético o el acetaldehído) como se muestra en la figura 7, por lo tanto dependiendo la concentración del reactivo, se obtendrá un determinado grado de sustitución, en donde una molécula con bajo grado de sustitución presenta características como alto poder de hinchamiento, mejor

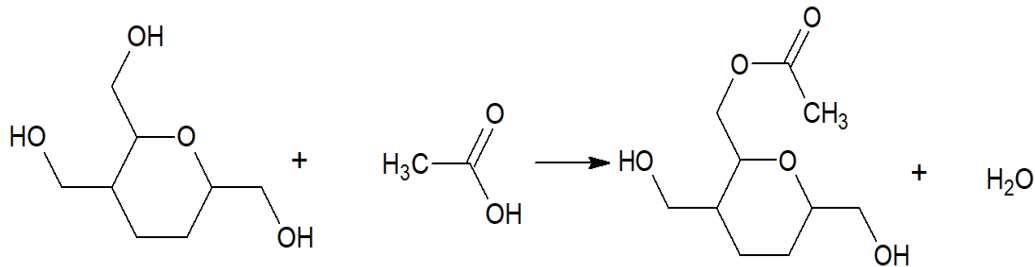
¹⁹ Miladinov, V. D., Hanna, M. A., Starch esterification by reactive extrusion., Industrial Crops and products, Vol. 11, 2000, pp. 51- 57.

²⁰ PEÑARANDA CONTRERAS, Oscar Iván; PERILLA, Jairo Ernesto y ALGECIRA ENCISO, Néstor Ariel. Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. En: Revista Ingeniería e Investigación. Diciembre, 2008. vol. 28. no. 3. p 47-52.

²¹ Heinze, T., Liebert, T., Koschella, A. Esterification of Polysaccharides., Vol. XVI, 2006, pp. 232.

solubilidad en agua y baja temperatura de gelificación, el grado de sustitución mediano o alto (0,5 - 2,5)²², muestra gran aplicabilidad como aglutinantes para tabletas, adhesivos termoplásticos, colillas para cigarrillos y materiales de revestimientos, concluyendo que los grados de sustitución demuestran que esta modificación conlleva un cambio en las propiedades fisicoquímicas del almidón proporcional al grado de acetilación del mismo.

Figura 7. Reacción de acetilación del almidón.



Fuente: Elaboración Propia.

La acetilación se da por una esterificación donde los grupos hidroxilos (OH), son sustituidos por los grupos acetilos (CH₃-C=O)²³, como se muestra en la figura 1, los cuales se incorporan en la molécula de almidón, dependiendo la concentración del reactivo, tiempo de reacción, pH y catalizador usado brindando mayor estabilidad al almidón al variar su estructura.

1.4 ALMIDÓN MODIFICADO EN LA INDUSTRIA PLASTICA

El almidón modificado cuenta con propiedades especiales las cuales pueden ser utilizadas para diversos fines, como los bioplásticos, ya que como se producen con recursos a muy bajos costos y con métodos de producción sencillos, son más económicos que algunos polímeros sintéticos, por lo tanto, la concientización entre consumidores es de suma importancia para aumentar su demanda en diversas industrias como el sector productor de alimentos, productos de uso doméstico, electrónicos, entre otros.

Desai y otros²⁴, usaron almidones modificados como un agente de entrecruzamiento en elastómeros de poliuretano, Seung-Yu²⁵ incorporar los

²² Shogren, R. L., Rapid Preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction., Carbohydrate Polymers, Vol. 52, No. 3, 2003, pp. 319-326

²³ PEDRAZA GUARNIZO Julieth y ARENAS RIAÑO Alejandra., Evaluación del proceso de modificación de almidón de papa mediante acetilación y oxidación, para su aplicación como excipiente en la industria farmacéutica a nivel laboratorio. Tesis de pregrado. Bogotá D.C., Colombia: Universidad de américa, 2017, p.71.

²⁴ Desai, S., Thakore, I., Sarawade, B. and Devi, S. Structure-property relationship in polyurethane elastomers containing starch as a crosslinker, Polymer Engineering & Science, 40 (5), pp. 1200-1210, 2000.

gránulos de almidón en un sistema de poliuretano, en donde el almidón fue agregado al aceite de higuera y polioles derivados con el fin de aumentar la funcionalidad de dichos compuestos, sin embargo estos trabajos solo usan el almidón como agente reforzante y no como materia prima lo cual satisface la necesidad de un producto plástico degradable en poco tiempo y con baja tasa de contaminación.

Actualmente se han desarrollado diversos procesos experimentales para la obtención de bioplásticos a partir de almidón dentro de los cuales se destacan los procesos desarrollados con almidón de maíz y yuca, se ha ido incursionando en el estudio de la morfología del almidón de papa por su versátil aplicación en la industria y su alta disponibilidad, los procesos de obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa han dado excelentes resultados mecánicos y físicos.

1.4.1 Propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas de los materiales, son las propiedades físicas que describen el comportamiento de un material al aplicarle tres tipos de fuerza, tracción (se aplican fuerzas para tratar de alargar un objeto), compresión (aplican fuerza para tratar de acortar un objeto) y torsión (se aplican fuerzas que intentan hacer girar un objeto alrededor de un eje), según el tipo de material se le aplican algunas pruebas mecánicas para evaluar el material, para materiales plásticos estas son algunas pruebas.

- Elasticidad: Es la propiedad en la que un material recupera su forma original al cesar el esfuerzo al cual fue sometido.
- Plasticidad: Es la propiedad en la cual pierde su forma original al disminuir el esfuerzo al cual se aplicó, esta propiedad indica la capacidad que tiene el material de mantener su forma al someterlo a algún esfuerzo.
- Dureza: Es la resistencia que ejerce un material a ser penetrado por otro, esta propiedad brinda información acerca del desgaste en presencia de materiales abrasivos.
- Tenacidad: Es la resistencia a la rotura de un material cuando está sometido a esfuerzos lentos de deformación.
- Fragilidad: Es la rotura del material por un esfuerzo sin que se produzca una deformación plástica.

Estas propiedades tienen como fin establecer cuán resistente es el material, para establecer los usos a nivel industrial, ya que un polímero flexible o rígido va a tener diferente aplicabilidad. Si bien las propiedades mecánicas de las piezas inyectadas deberían ser similares al material constitutivo, la variación de los parámetros puede modificar en cierta medida estas propiedades. No siempre es posible realizar ensayos de tracción, compresión, etc., sobre las piezas inyectadas, esto dependerá de la geometría y tamaño de la pieza. En algunas

²⁵ Seung, K.A., The crosslinking of polyurethane incorporated with starch granules and the rheological properties, *Macromolecules. Matter. Eng.*, pp. 288:569, 2003

ocasiones, se puede hacer una probeta a partir de la pieza, sobre la cual, se pueden realizar algunos ensayos. Para conocer el desempeño de las piezas en uso, se deberán realizar ensayos que simulen su funcionamiento y condiciones de trabajo.

2. SELECCIÓN DEL PROCESO Y LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE UN BIO-PLÁSTICO

Mediante este capítulo se pretende definir el método adecuado para la obtención de un bioplástico, lo que requiere de un ejercicio de revisión de los diferentes procesos desarrollados por otros autores, para lo cual se tienen en cuenta las diferentes características que estos poseen y con clasificarlos según sus similitudes y diferencias.

Inicialmente, se revisa el método tradicional que hace referencia a la obtención de un bioplástico de manera simple (al almidón no se le realiza ninguna alteración y el proceso de obtención del producto final, no requiere de equipos con controles de velocidad, temperatura, presión entre otros y se puede obtener de forma artesanal). Se agrupan algunas investigaciones que aplicaron este proceso, en las cuales el material obtenido se somete a ciertas pruebas físico- químicas, donde se observó que los almidones provenientes del maíz, papa y yuca tienen los mismos grupos funcionales como lo son alcoholes, grupos aldehídos y cetona lo cual es de utilidad para comparar el comportamiento de estos.

Luego de estudiar y analizar el método tradicional, se considera el proceso con almidón modificado, en el cual se destaca el método de acilación, que modifica químicamente el almidón. Al realizar esta modificación las propiedades mecánicas del bioplástico mejoran en relación con las obtenidas en el método tradicional. Según la literatura, los hallazgos en los métodos anteriores refieren que los productos obtenidos no cumplían con las características físico-químicas propias de un plástico como la resistencia, dureza, olor, color, forma, entre otras, por lo anterior se hizo necesario revisar un tercer método: matriz reforzada, en el cual se usan elementos orgánicos o químicos, que logran mejorar sus propiedades mecánicas o suplir deficiencias a nivel estructural, que se observaron en los dos procesos anteriormente mencionados.

2.1 SELECCIÓN DEL PROCESO

2.1.1 Proceso tradicional. El proceso tradicional para la obtención de un bioplástico se ha desarrollado como la técnica mediante el cual se vierte una mezcla en un molde hasta obtener un objeto rígido que reproduce la forma o cavidad del molde.

El proceso tradicional se resume en dos pasos: primero, la mezcla de las materias primas el almidón y el agua, en la cual se somete el almidón a hidratación en proporciones del 8% al 75% de almidón y agua de 14% al 81%. La segunda parte es una mezcla que incluye el plastificante (glicerol, agua, alcohol polivinílico), que se utiliza entre el 2% y el 24%, además del modificador químico (si se desea) entre el 4% y el 9%²⁶ el cual se encarga de otorgar al producto final un grado de acidez diferente lo cual cambia las propiedades mecánicas y físicas; cabe aclarar que los modificadores químicos no alteran la estructura del almidón, estos facilitan la interacción molecular con los plastificantes. Durante todo el procedimiento se hace uso de la agitación de tipo manual y temperatura ambiente, mientras se logra una solución totalmente homogénea. Luego se eleva a una temperatura máxima de hasta 80°C para que proceda la gelatinización del almidón con un tiempo de producción entre 10 y 20 minutos²⁷, sin dejar la agitación durante el proceso de calentamiento. Observar la figura N° 1.

El trabajo desarrollado por Ortiz y otros, se efectuaron pruebas experimentales preliminares, y se nombra a este proceso como método casting el cual definen, como el método en el cual se varían las diferentes concentraciones de almidón (como materia principal), agua (hidratante y plastificante), glicerol (plastificante) y ácido clorhídrico (modificador químico) para de esta manera, obtener una formulación con buena relación de sus materias primas, originando un producto final con propiedades mecánicas y físicas que coincidan con los plásticos provenientes del petróleo; sin embargo, el problema principal de los distintos prototipos desarrollados por este método fue el agrietamiento de las láminas.

La formulación más representativa probada fue 8% almidón, 11% glicerol, 75% agua y 6% HCl debido a que, con esta, el producto no presenta agrietamientos. La estructura sólida, se sometió a pruebas de fusión, resistencia al agua, densidad y permeabilidad, lo cual resultó en un punto de fusión del material de 265 °C; no obstante, a los 241°C hay un cambio de color a ámbar lo que indica el inicio de la fusión del material; sin embargo la prueba de permeabilidad concluyó que el material tiene deficiencias estructurales y por este motivo generó una pérdida en peso del 50% de material y al momento de secarse mostró un alto grado de deformación, además la prueba de densidad arrojó que este material está en un rango cercano de 1 g/mL de relación peso volumen²⁸.

De otro lado, en un estudio realizado por Narváez, con materias primas como almidón, glicerina, agua y modificadores químicos (hidróxido de sodio (NaOH) y

²⁶MOISES ORTIZ, MARIA, et al., Desarrollo de una película plástica a partir del almidón extraído de papa residual. Tesis de pregrado. Guadalajara., México: Universidad Tecnológica de Jalisco, 2013, p, 186.

²⁷ Hernandez, M. A. (2010-2012). Desarrollo de una película plástica a partir del almidón. Guadalajara.

²⁸MOISES ORTIZ. Op. Cit., pp 190-192.

ácido clorhídrico (HCl), se desarrolló un diseño de experimentos cuyo factor de importancia resultó ser el pH, puesto que uno de los principales objetivos era obtener un bioplástico con un cierto grado de acidez, para evaluar las propiedades mecánicas. Parte de este estudio permite notar que el proceso de secado se llevó a cabo en moldes de teflón en un rango de temperaturas de 50°C a 70°C, en esta última temperatura se evidenció la obtención de una película uniforme. Las pruebas mecánicas se realizaron bajo la norma ASTM D3039/D3039M -14, las cuales fueron: primero, elasticidad que presenta cambios según la relación de glicerina-almidón utilizada, en el cual un 15% de glicerina mostró que el módulo de elasticidad es del 0,16005 MPa. Segundo, resistencia o esfuerzo último, determinó que es 0,0269 MPa también con un 15% de glicerina y manteniendo un pH 7 y elongación fue de 0,16 mm con un porcentaje de glicerina del 35%, según estas mediciones se determinó que la resistencia mecánica aumenta, entre menor sea la relación de concentración de glicerina con el almidón y el agua, mientras que la elasticidad y elongación variaron según la cantidad de glicerina y el pH de la mezcla²⁹.

Asimismo, en la investigación desarrollada por García, se reemplazó el modificador químico por ácido acético y se llevó a cabo el procedimiento descrito en la figura 7, el secado de las películas plásticas se llevó a cabo durante 2 horas a 100°C y 4 días a temperatura ambiente, adicionalmente las proporciones utilizadas para mezclar glicerina y (almidón con agua) fueron de 8,23%, 19,60% y 65,32% respectivamente; a este prototipo se le realizaron pruebas mecánicas de resistencia a la tracción en una superficie de 0,005 m² y un espesor de 0,51mm con lo cual arrojó una resistencia a la tracción de 0,25Mpa, teniendo en cuenta las normas ASTM D-638 que manifiesta que la resistencia estándar para un polímero es de 3 a 140 MPa y el resultado fue de 0,25 MPa, por lo anterior se demostró que no cumplió con la norma, además de esto la prueba de espesor arrojó un resultado negativo indicando un posible problema para continuar con la realización de las pruebas mecánicas; a pesar de esto, este material se puede usar en cuanto no sea sometido a altas temperaturas ni presiones que provocan fallas del mismo³⁰.

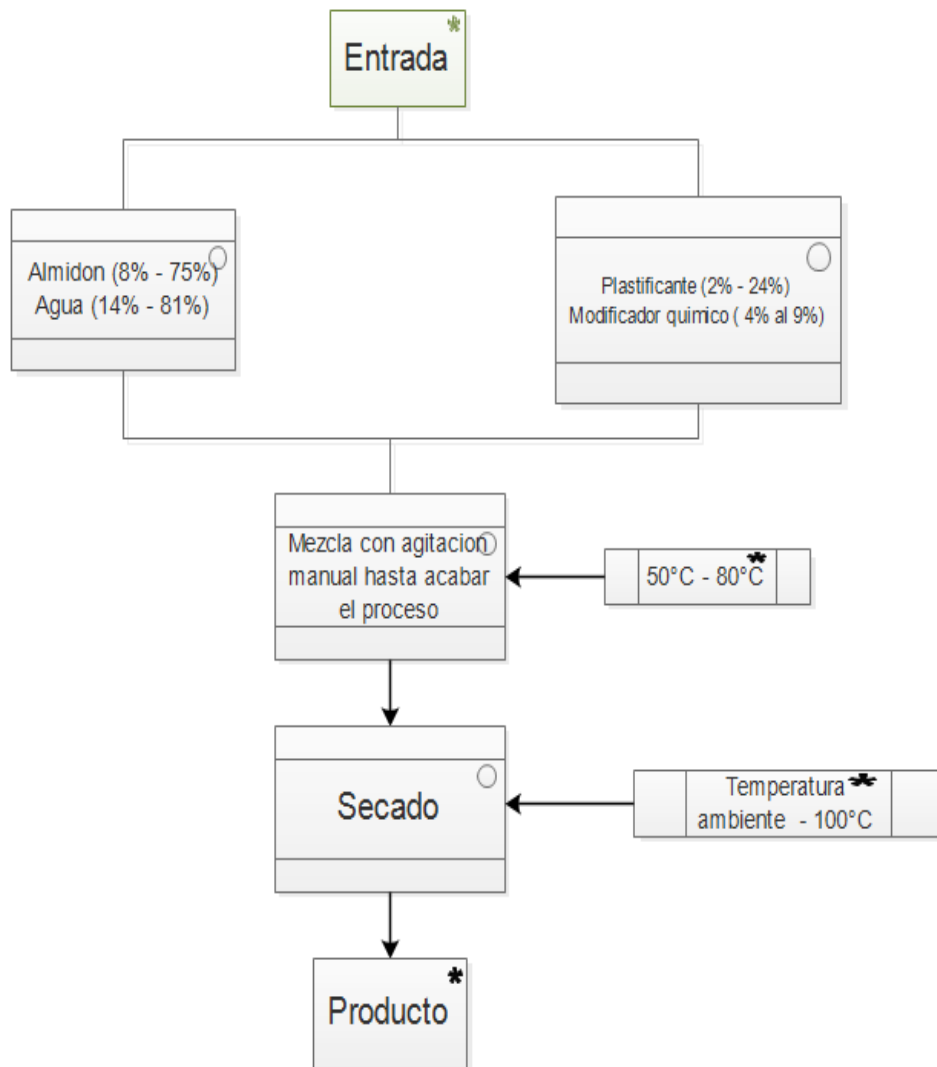
Para concluir y tal como se demostró en las investigaciones anteriormente citadas, las propiedades mecánicas fundamentales como la resistencia a la tensión está comprendida entre valores de 0,16 y 0,25 MPa y un esfuerzo máximo de 0,00269 MPa valores inferiores a los que establece la norma ASTM D-638 la cual habla de

²⁹ NARVAES GUERRERO, María Alejandra., Optimización de las propiedades mecánicas de bioplásticos sintetizados a partir de almidón. Tesis de pregrado. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito, 2016, p, 27.

³⁰ GARCIA QUIÑONEZ, Alma Verónica., Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz., Tesis de pregrado. Santa Tecla, San Salvador; Universidad Especializada en Ingeniería, 2015, p, 30.

un valor mínimo de resistencia de 3 MPa y un esfuerzo máximo de rotura de 0,01 a 0,028 GPa. Además, los equipos para el desarrollo de este proceso son de fácil acceso en un laboratorio (sin tomar en cuenta las pruebas mecánicas, y fisicoquímicas del producto). Por otro lado, el tiempo total de producción del bioplástico está en un rango de 15 a 25 minutos, sin embargo, el proceso de secado está entre 36 a 48 horas a temperatura ambiente y el acceso a materia prima es sencillo ya que los materiales como el almidón, la glicerina, los modificadores químicos y el agua destilada son de venta libre (pueden ser adquiridos por cualquier persona natural sin ninguna restricción).

Diagrama 1. Diagrama del proceso tradicional



Fuente: Elaboración Propia.

2.1.2 Proceso con almidón modificado. Un segundo proceso revisado para la obtención de un bioplástico es el de almidón modificado que tiene como objetivo modificar el almidón de forma química; este método se constituye en la sustitución de los hidrógenos presentes en los grupos hidroxilos de la molécula de la amilosa, diversos métodos se han desarrollado para lograr un producto con mejores características aumentando la resistencia, permeabilidad, procesabilidad y la compatibilidad con algunos productos hidrofóbicos, en comparación con el proceso tradicional mencionado en el literal 2.1.1., este proceso cuenta con una etapa adicional, que consiste en que previo a iniciar el proceso de obtención de la película plástica, se realiza la modificación a la molécula del almidón a través de acilación o termo formado.

La acilación del almidón se ha desarrollado a partir de la esterificación del almidón con anhídrido acético, vinil acetato o ácido acético, este proceso se divide según el tipo de acetilación formada o requerida (GS) baja o (GH) alta; la baja (GS) se usa en la industria alimentaria ya que brinda consistencia, textura y durabilidad y el alta (GH) se usa como sustitutos termoplásticos³¹.

Para el proceso desarrollado por Carrascal, evidenciado en la figura 8, se adiciona agua destilada para hidratar el almidón, posteriormente se agregó gota a gota el agente modificador para que reaccionara con el almidón para obtener el cambio químico. Según el grado de sustitución (alta o baja) que se desee, el pH de la mezcla debe mantenerse entre 8 y 8,5, posterior a esto se lavó el almidón tres veces con agua y una con etanol para eliminar el exceso del agente modificador, después se centrifugó la mezcla por 10 minutos, se eliminó el exceso de humedad y se ingresó a un horno a 40°C por un tiempo de 8 horas.

De este modo, al tener el almidón ya modificado con GS se siguió el proceso descrito en la figura 8, con el fin de obtener el bioplástico, que presentó resultados físico químicos favorables, puesto que la gelatinización del material aumentó al doble comparada con la del almidón sin modificar (la temperatura de gelatinización normal del almidón de papa es de 62 a 68 °C, y con el almidón modificado fue de 120 a 140 °C) , esto mostró que el producto final aumenta la capacidad de retención de agua y disminuye la deformación del material. Además de esto, se comprobó que al realizar el proceso de acilación la compresibilidad de este aumentó y no presentó problemas de laminación, ya que esta se realizó en máquinas de molino abierto en un rango de 120 a 180°C.

³¹ FLOREZ, Jorge A., Acetilación de almidón nativo de batata (*Ipomeas batata* L). Tesis de pregrado, Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional, 2016, pp, 30 – 45

Al producto resultante siguiendo la estructura del proceso en la figura 8, no se le hicieron pruebas mecánicas ya que el uso final era su implementación en la industria farmacéutica como sustitutos del plástico existente.³²

El anhídrido acético y el ácido acético han sido los reactivos más usados en procesos de acilación del almidón; sin embargo, brindan una mejor afinidad con otros componentes que se le puedan agregar a la mezcla, para obtener un producto final como se evidencia en la investigación realizada por Benítez y colaboradores, en la cual la aplicación del proceso de acilación al almidón se realizó a través del vinil acetato, para luego agregarle reactivos que han aportado nuevas propiedades al material como el alcohol polivinílico y glicerol que actuaron como plastificantes, además de cloruro de sodio y ácido bórico los cuales trabajaron como agentes anti fúngicos, adicional a esto, se agregaron lubricantes como el ácido esteárico para facilitar la formación de la película plástica. Al realizar pruebas al producto con almidón modificado por acilación con vinil acetato, se demostró que a una temperatura de 24°C y una humedad relativa del 59% se obtiene una fuerza máxima de tracción de 6,07N y la elongación máxima es del 14,98%, con lo cual se concluye, que se obtiene un material que puede competir medianamente con los plásticos provenientes del petróleo.

En el desarrollo del almidón modificado por termo-compresión se sometió la mezcla (almidón con el agente modificador) a altas presiones y temperaturas, se ingresó la solución en un reactor con un rango de presión de 0 a 40 Psi y un rango de temperatura de 180 a 200 °C, así se obtuvieron mejores resultados en las propiedades mecánicas como el esfuerzo a la tensión y el módulo elástico, además se evidencia un alto grado de sustitución de los grupos funcionales en los que interviene la acilación (alcoholes, grupos aldehídos y cetona); para iniciar el proceso de modificación del almidón por termo-compresión, el almidón debe mezclarse con agua por 30 minutos, para garantizar la homogeneidad de la mezcla y así adicionar el agente modificador (ácido acético), posterior a esto se ingresa la mezcla al reactor durante 3 minutos. Al obtener el almidón modificado se continúa con el procedimiento de mezcla con el plastificante y el modificador químico (alcohol polivinílico) para obtener el bioplástico. Entre los resultados de este proceso se evidenció que las pruebas de tensión tienen en promedio un valor de 4,025 MPa, además se obtuvieron valores promedio de elasticidad de 8 J/m y deformación de 1 lo cual muestra un bioplástico aceptable cumpliendo con la norma ASTM D-638.

En la metodología planteada por Corrales se desarrolla una experimentación en la cual se estableció el uso de un diseño de experimentos del japonés Genichi Taguchi, con esta metodología se permitió orientar el proceso experimental por

³² CARRASCAL SANCHEZ, Juan J., Acetilación del almidón de Arracacia xanthorrhiza y evaluación de su aplicación como posible auxiliar farmacéutico. Tesis de pregrado, Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional, 2013, p, 15

medio de matrices (arreglos ortogonales diseñados) en las que se involucraron las variables del sistema como temperatura, cantidad de almidón, cantidad de modificador químico para la acilación, para obtener mayor robustez en la experimentación, al tener ya los prototipos obtenidos a través del proceso indicado en la figura 8 se aplicaron las pruebas mecánicas al bioplástico y se obtiene que el esfuerzo máximo es de 3,25 MPa, y un módulo de elasticidad de 1,13 MPa³³, al finalizar la investigación se recomendó el uso de agentes espesantes como los polisacáridos: carboximetilcelulosa e hidroxietilcelulosa, los cuales fueron de utilidad para aumentar el volumen de la mezcla, lo cual redujo los costos de producción.

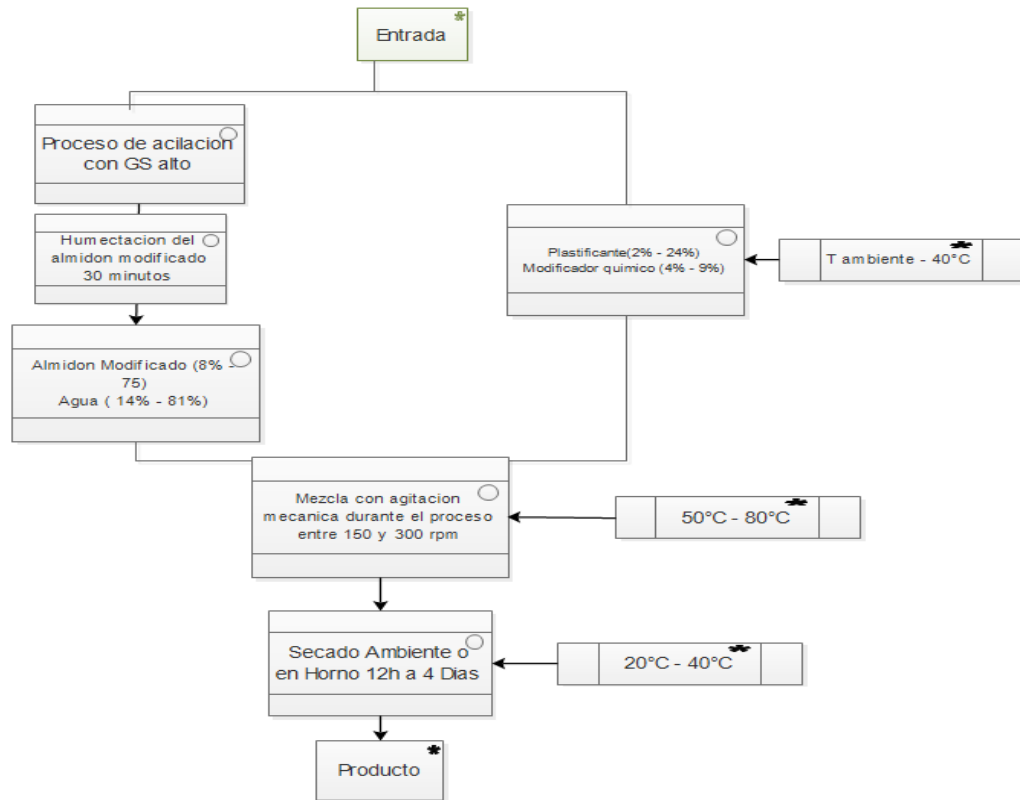
En consecuencia, los productos finales desarrollados con este método lograron cumplir con los requisitos mínimos de la norma ASTM D-638 donde el valor promedio de resistencia fue 3,46 MPa y la norma exige como valor mínimo 3 MPa; sin embargo, el material obtenido aún presenta problemas de permeabilidad puesto que al entrar en contacto con agua pierde su forma, además algunos modelos muestran valores inferiores al valor mínimo establecido en la norma.

El proceso de acilación por termoformado es una opción apropiada para modificar el almidón y mejorar el proceso debido a que reduce tiempo de producción y mejora las propiedades finales del producto de interés. Sin embargo, al momento adquirir los equipos necesarios para garantizar las condiciones del proceso se torna sumamente costoso; por esto a nivel experimental se usa la acilación química a temperatura y presión ambiente procesos que también arrojan buenos resultados, pero requieren más tiempo. La producción del proceso de almidón modificado ocurre entre 50 y 65 minutos, ya modificado el almidón se somete a un proceso de secado, durante 8 horas a 40°C; la obtención del bioplástico con el almidón modificado tiene un tiempo de producción entre 20 y 25 minutos (hasta obtener la pasta) y el secado de la película de 12 a 96 horas (según el grosor de esta).

El acceso a la materia prima es complejo ya que el anhídrido acético y el ácido acético glacial, son productos controlados por la oficina nacional de estupefacientes de Colombia, además el ácido clorhídrico es un insumo con restricción de venta institucional, esto quiere decir que solo empresas constituidas pueden adquirir este componente. Los equipos para este proceso son más especializados con respecto al proceso anterior, los cuales se encuentran en laboratorios analíticos y de calidad, los cuales no son de fácil acceso.

³³ MENSES, Juliana; CORRALES, María C.; VALENCIA, Marco. Revisión de la Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. En: Revista IEA. Junio, 2008. p. 5-6.

Diagrama 2. Diagrama de proceso con almidón modificado



Fuente: Elaboración Propia.

2.1.3. Proceso con matriz reforzada. Un último proceso revisado fue el proceso con matriz reforzada en el cual se agrega cualquier material orgánico (fibras, polisacáridos) o químico (acetato de polivinilo, alcohol polivinílico, poliestireno, polipropileno, entre otros) al almidón, los cuales podrían suplir falencias como las deficiencias estructurales, grado de deformación, espesor, resistencia y permeabilidad.

En la aplicación de este proceso desarrollado por Espina y otros, se agregó a las mezclas (de almidón modificado y agua destilada), fibras como el bagazo de caña de azúcar y peladilla de espárrago, las cuales aportan rigidez y resistencia al material; conforme a esto se concluyó que esta mezcla era muy frágil ya que la fractura del material se presentó entre 2,1 y 4,2 g de esfuerzo, el hallazgo positivo de esta prueba es que la resistencia a la flexión del material es mejor, puesto que según la fibra de refuerzo que se escoja puede aumentar hasta en un 30% su

flexibilidad comparada con productos a los que no se les adiciona algún refuerzo en su matriz.³⁴

De esta manera, integrar este tipo de materiales mejora sustancialmente la matriz polimérica, gracias a este estudio se realizan nuevos prototipos en donde se incorporan materias primas orgánicas como la Celocell (hidroxi-etil-celulosa), chitosan, xantan entre otras, todo esto para favorecer la calidad del producto final.

La metodología planteada por Averous y otros en su publicación "Blends of thermoplastic and polyester amide"³⁵, tuvo como base principal una mezcla de materiales primarios como el almidón, agua y glicerina para el desarrollo del bioplástico, además de tener preparada una poliésteramida (BAK) desarrollada por la compañía Bayer.

Para la obtención del bioplástico, el almidón siempre se mantuvo en una proporción del 50% respecto a toda la mezcla, adicionalmente se desarrolló un diseño experimental obteniendo diferentes formulaciones, variando las cantidades de glicerol y agua donde la mejor relación fue de 74% de almidón, 10% de glicerol y 16% del BAK, de este forma se obtuvo una mejora del 10% en su permeabilidad y su módulo de elasticidad a diferentes temperaturas; adicional a esto el rango de temperaturas a la que se sometió el material fue de -57°C a 100°C, lo cual expandió los usos de este material.

El proceso implementado por Ruiz y coautores, desarrolló como primer paso la modificación del almidón por medio de acilación con anhídrido acético, siguiente a esto se ingresa el almidón modificado humectado con agua por un tiempo de 30 minutos, luego se agrega el glicerol manteniéndolo en constante agitación para lograr así homogeneidad, la mezcla se coloca en un horno abierto a 170°C durante 45 minutos, aquí se debe continuar la agitación de forma ocasional, para permitir la evaporación del agua, luego se deja enfriar la solución. Posterior a esto, se le adiciona agua a la mezcla con el fin de hidratarla después del secado y lograr un 65% de humedad relativa, con el fin de lograr una mejor homogenización.

Por último y desarrolladas las formulaciones con un diseño de experimentos, se le adicionaron los pellets de poliéster amida, los cuales refuerzan la matriz polimérica, dejando la materia prima lista para la formación de la película del bioplástico, y así realizarle las pruebas mecánicas a los prototipos que mejor resultaron, dichas pruebas arrojaron que el esfuerzo máximo estaba entre 1,47 y

³⁴ ESPINA, Miguel; CRUZ TIRADO J.P.; SICHE Raúl. Propiedades mecánicas de bandejas elaboradas con almidón de especies vegetales nativas y fibras de residuos agroindustriales. En: Scienta Agropecuaria. Junio, Vol. 7, No. 2. pp. 15-18.

³⁵ AVEROUS, L, et al. Blends of thermoplastic starch and polyesteramide: processing and properties. En: Revista Applied Polymer Science. Mayo, Vol. 76, No 7, pp. 1121- 1135.

18,47 GPa y la deformación se encontraba entre un 4,23% y 71,06%, lo cual hace al producto interesante puesto que logra ingresar en el rango de aprobación de la norma ASTM D-638 y hace que el material producido sea viable para competir con materiales plásticos, sin embargo los costos son muy altos, ya que la adición de la poliéster amida incrementa su costo (al ser un reactivo de alto costo y difícil adquisición por estar bajo patente), además de tener un tiempo muy largo de producción.

Con la premisa de aumentar la calidad del producto se buscan materiales los cuales sean de fácil acceso y que brinden al bioplástico mejorar sus propiedades, Arroyo y otros le adicionan a la matriz del bioplástico Celocell (hidroxi-etil-celulosa), PVA (alcohol polivinílico) esto previo a someterlo a calentamiento y durante el proceso se adicionó estaño para lograr así mejores resultados en las pruebas mecánicas, éstas fueron llevadas a condiciones estándar de 24°C y una humedad relativa del 61%, cabe resaltar que las probetas que mejor respondieron a estas pruebas, fueron sometidas a un tratamiento térmico por 12 horas, con lo cual se encontró que la fuerza máxima de tracción se encontró entre 8.7 N/mm² y 12.36N/mm², y una elongación máxima entre 16.41% y el 42.49%³⁶, esto resulta satisfactorio puesto que cumple con la norma técnica ASTM D-638 además se logra un material competitivo respecto a los plásticos derivados del petróleo en cuanto a calidad.

Con el fin de aumentar las propiedades mecánicas al material obtenido del proceso que se describió anteriormente, Alarcón C. plantea que se agregó una serie de materiales los cuales aumentan las propiedades del producto final, usando dos plastificantes para que lograran cubrir espacios intersticiales que se presentan cuando solo se usa un tipo de plastificante; además se encontró que el almidón al modificarse con un 5% p/v de ácido acético logró obtener una mejora importante en el producto final tales como propiedades térmicas del material, puesto que se logró un grado alto de sustitución (GSH) y no se produjo fracturas en las películas del bioplástico. Al adicionar a la mezcla etanol, PVA, xantano y quitosano proporcionaron un aumento en las propiedades mecánicas, su textura, y comprobó que obtuvo así una elongación promedio del 33% y una resistencia a la tracción de 8.47 N/mm² en promedio³⁷ su textura es lisa, además el material es translúcido.

En conclusión, este proceso posee un costo más elevado respecto al proceso tradicional y el proceso de almidón modificado puesto que requiere de más materias primas, pero menores tiempos de producción los cuales están entre 13 y 14 horas, mejora la apariencia del bioplástico dándole una coloración más

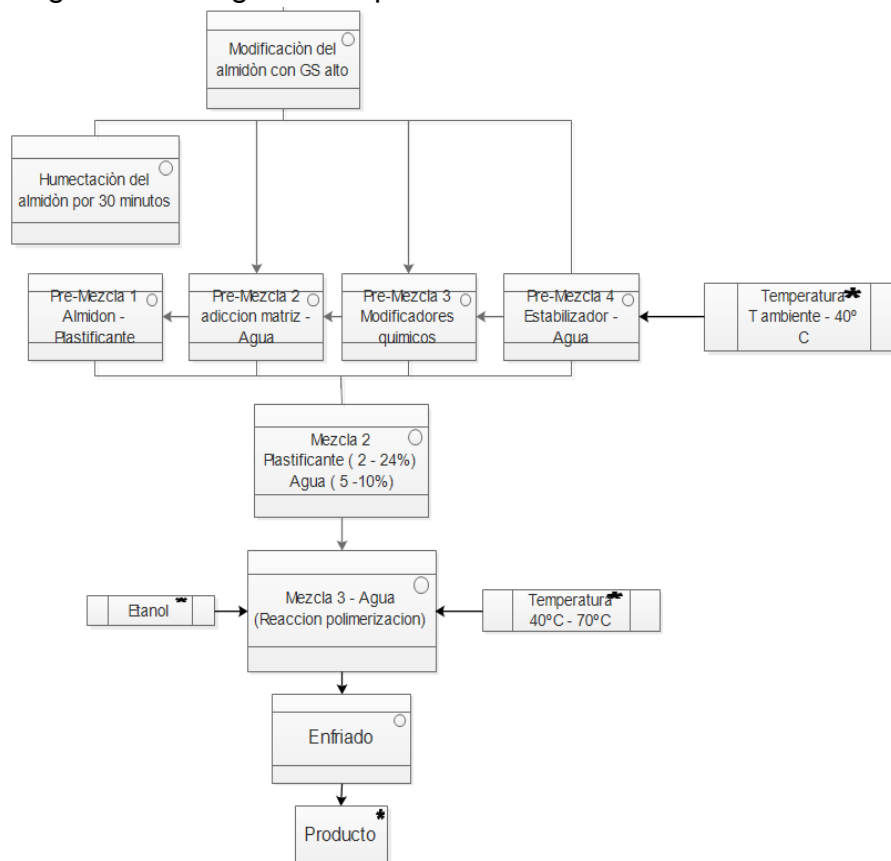
³⁶ARROYO, Edmundo; ALARCÓN, Hugo. Obtención de biopolímeros de papa como una alternativa al desarrollo de materiales inocuos al medio ambiente. En: TECNIA. Junio, Vol. 24, No 2, pp. 13 – 21.

³⁷Ibid., p. 19.

agradable para el consumidor final, le agrega propiedades mecánicas como resistencia a la tracción entre 8 y 9 N/mm², además una elongación entre el 15 y el 45%.

Comparando con materiales como el polietileno de baja densidad, que posee un rango de resistencia a la tracción de 8 a 21 MPa además de un porcentaje de alargamiento entre el 15 y 130%, son valores que pueden lograr hacer competir este producto con los plásticos derivados del petróleo que se emplean en la actualidad, adicionalmente también está cerca de las propiedades de los polímeros de origen celulósico, los cuales poseen una resistencia a la tracción entre 14 y 55 MPa y un porcentaje de alargamiento entre 5 y el 50%³⁸, además visualmente los bioplásticos obtenidos con este proceso tienen una textura lisa, suave y un color translúcido el cual se puede modificar según el uso que se requiera, estas propiedades permiten lograr una mayor competitividad con los polímeros derivados del petróleo e incluso con los de origen vegetal como lo son los celulósicos.

Diagrama 3. Diagrama de proceso con matriz reforzada.



Fuente: Elaboración Propia.

³⁸ UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Curso de fundamentos de ciencia de materiales. Unidad 15. Valencia. UPV, 2015.

2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN

El método de factores ponderados es un análisis cuantitativo en el cual se comparan factores tangibles como la calidad, costos a corto y largo plazo, tiempos de producción, entre otros. Esta técnica tiene como ventaja que es sencilla y rápida, sin embargo, los puntajes asignados dependen exclusivamente de la preferencia del investigador y por lo tanto no pueden ser reproducidos.

Para llevar a cabo este método se debe realizar un filtro entre las diferentes alternativas que se quieran analizar dando puntajes o calificaciones a los factores considerados relevantes del proceso para así diferenciar de manera objetiva los procesos con el fin de realizar una buena elección.³⁹

En estos procesos de decisión es necesario presentar ventajas y desventajas, para establecer criterios de selección adecuados sin llegar a alterar el proceso, por ello los pasos para desarrollar este proceso de selección son:

- Listar los factores más importantes
- Asignar a los factores un peso relativo el cual irá dividido en partes para obtener un total de 100 puntos.
- Calificar individualmente a cada una de las alternativas en estudio en cada uno de estos factores generalmente de 0 a 10.
- Este coeficiente se multiplica por el factor de la calificación.
- Se suman los productos hallados
- Y se selecciona la alternativa con mayor puntaje ponderado.

Se tiene como objetivo seleccionar un proceso el cual tenga como característica principal la calidad del producto que hace referencia a las propiedades mecánicas del bioplástico, la cual se define como factor de alta importancia. En los factores de media importancia o que aportan valor agregado al factor de alta importancia se incluyen el tiempo de producción, los equipos que se necesiten para la producción del biopolímero y el acceso a la materia prima.

Definir la calidad como factor de alta importancia implica realizar comparaciones con productos similares para establecer que es lo que los diferencia, con el fin de garantizar el cumplimiento de las condiciones de seguridad y fabricación adicionalmente asegurar la calidad de un producto ofrece una garantía al cliente que todo lo que se ofrece es bueno y que su consumo implica la profesionalidad de categoría de la marca que desarrolla el producto.

La investigación requiere darle mayor importancia a la calidad del producto, con esto se refiere a las propiedades mecánicas (Elongación y resistencia a la tracción) además de las visuales (textura, color). Este factor se clasifica de alta

³⁹ LONDOÑO RESTREPO, Guillermo; PUERTA ZAPATA, Antonio; RESTREPO GOMEZ, Bernardo. Ponderación de factores y características para la autoevaluación, {En línea}. {10 de Febrero de 2018} disponible en(<http://embera.udea.edu.co/reacreditacion/docs/ponderacion-de-factores.pdf>)

importancia ya que el objetivo principal es de desarrollar un bioplástico que tenga las capacidades de igualar o superar las propiedades mecánicas de los polímeros de carácter sintético, lo cual hará que la aplicación de este material sea más versátil por lo cual se le confiere un nivel de alta importancia.

Cuadro 2. Factor de alta importancia.

FACTORES	PESO
Calidad del producto.	55

Fuente: Elaboración Propia.

Este factor tendrá una calificación para cada alternativa de 1 a 10 donde la base de la calificación estará dada por la norma ASTM D-638 la cual evalúa las propiedades mecánicas de resistencia de un material las cuales están comprendidas para la resistencia del material en un rango de 3 a 140 MPa y un porcentaje de alargamiento de 5 a 50%, estas calificaciones se dividieron en tres partes, donde los productos finales con valores inferiores a los orientados por la norma tendrán una calificación de 1, los productos con valores en el límite inferior o con tendencia a salir del rango mínimo tendrá una calificación de 5 y por último los materiales con valores superiores al valor mínimo de la norma se calificarán con 10 puntos. Las valoraciones que se colocaron a continuación son soportadas con la información obtenida en el capítulo 1.

Cuadro 3. Calificación de los procesos del factor de alta importancia.

Proceso	Calificación
proceso tradicional (1)	1
proceso almidón modificado (2)	5
proceso matriz reforzada (3)	10

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.2 Factores de media importancia. Estos factores le aportan una mayor robustez a la matriz de selección, tienen un valor menor a los de alta importancia porque estos factores intervienen en la elección de un proceso ya que al desarrollarlo a nivel industrial debe ser sencillo y económico adquirir los equipos del proceso, además el tiempo de producción también es importante por lo cual esto determina en cierta medida la capacidad de producción en un ambiente industrial y por último el acceso a la materia prima también es un ítem importante para la producción define la capacidad de producción y la calidad del producto.

Para el desarrollo del proceso (a nivel experimental), se deben tener en cuenta tres tipos de laboratorio: el primero ha de ser un laboratorio en el cual se desarrollen procesos fisicoquímicos, un segundo laboratorio donde se desarrollen procesos de tipo analítico o pruebas de calidad y por último un laboratorio donde se cuente con equipos de última tecnología o los denominados I+D, los anteriores se calificarán con uno, cinco y diez siendo uno el laboratorio de mayor requerimiento y diez el de menor requerimiento.

El primer laboratorio de procesos químicos el cual debe contar con material básico como objetos de vidrio (pipetas, beakers, buretas, agitadores de vidrio, vidrio de reloj, entre otros), pesa analítica, y se pueden llevar a cabo operaciones comunes (titulación, mezclado, pesaje. etc.).

El segundo tipo de laboratorio son los analíticos y de calidad, en el cual se encuentran material más especializado, en el cual se pueden realizar procesos como centrifugado, secado en horno, tamizaje, molienda y demás. Por último, el laboratorio de investigación y desarrollo (I+D) el cual debe estar equipado con instrumentos de medición y muestreo los cuales están certificados con aseguramiento de calidad, además de la anterior, el equipo computacional a utilizar debe estar equipado con un software capaz de alcanzar la precisión y exactitud para cualquier prueba requerida.

Para cada proceso se asignó un tipo de laboratorio basado en los requerimientos de los mismos, para el proceso tradicional no se necesitan instrumentos especializados por lo que se le asigna a este proceso una calificación de diez, y el proceso con almidón modificado y matriz reforzada no requieren equipos con calibraciones metrológicas especiales por lo cual se les asigna un valor de cinco puntos.

De otro lado, el acceso a la materia prima se define como la facilidad de adquirirla dentro del territorio nacional, éste puede verse afectada por las restricciones en cada territorio, en Colombia existe un listado de sustancias controladas para las cuales requieren de permisos especiales para su comercialización o su uso las cuales se rige por el decreto 2897 de 2011 expedido por el ministerio de justicia⁴⁰. Frente a esto, valoración asignada para cada proceso se decide puntuar de cero a diez y dividiendo este puntaje en tres secciones: asignando cero a alguna de las

⁴⁰MINISTERIO DE JUSTICIA Y EL DERECHO. Autorizaciones extraordinarias para el manejo de sustancias químicas controladas. Bogotá. MinJusticia, 2011.

materias primas que no se pueda adquirir en territorio nacional, ya que pedir alguna sustancia química que no se encuentre dentro del país requiere permisos y por tanto aumenta los costos para la adquisición del insumo. Se valora con cinco puntos cualquier materia prima con restricción de venta o comercialización por el decreto 2897 de 2011 ya que adquirir alguna materia prima con este tipo de restricciones requiere de trámites, los cuales demoran el proceso para la fabricación del producto, y con diez puntos se valora todas aquellas materias primas que no tengan ningún tipo de restricción de venta o comercialización.

En contraste con lo anterior, el tiempo de producción en el cual se define que la duración máxima de producción será de 30 horas, ya que este es el tiempo promedio de la producción de los polímeros provenientes del petróleo⁴¹ y por lo tanto se valora cada proceso de cero a diez; por lo anterior, se puntuará con el valor mínimo (cero) a los procesos que tarden más de 30 horas de producción.

Con cinco los que se encuentren en un rango entre 30 y 12 horas, por último, se puntuará con diez a los procesos que tengan un tiempo inferior a 12 horas de producción. Por consiguiente, el proceso tradicional se puntuará con cero ya que el tiempo de producción está entre 36 y 48 horas lo cuales excede el parámetro propuesto.

El proceso con almidón modificado tiene un tiempo de producción de entre 24 y 14 horas lo cual se puntúa con cinco y el proceso con matriz reforzada tiene un tiempo entre 18 y 12 horas el cual también se califica con cinco; Teniendo las calificaciones asignadas a cada uno de los procesos ya se nombra cada uno de los procesos de forma genérica como se muestra a continuación y se calculan las puntuaciones totales para cada uno de los procesos presentados, según el peso y la calificación que se les asignara.

⁴¹CASTRO ARRIETA, Bladimir. Diseño de un sistema de producción y operaciones para la empresa INDUPLAC que permita optimizar el proceso de poliestireno expandido (EPS). Tesis de Especialización. Bogotá, Colombia: Universidad Sergio Arboleda, 2015, pp, 25 – 80.

Cuadro 4. Factores de importancia media.

factores	peso	calificación
Equipos de proceso	15	Laboratorio Procesos Químicos: 10 Laboratorios Analíticos y calidad: 5 Laboratorios (I+D): 1
Tiempo de Producción	15	> 30 Horas: 1 12<Horas<30: 5 < 12 Horas: 10
Acceso a la Materia Prima	15	Materia prima importada: 0 Materia prima con restricción: 5 Materia prima sin restricción: 10

Fuente: Elaboración Propia.

- Proceso 1: PROCESO TRADICIONAL.
- Proceso 2: PROCESO CON ALMIDÓN MODIFICADO.
- Proceso 3: PROCESO CON MATRIZ REFORZADA.

Cuadro 5. Calificación de los procesos.

CALIFICACIÓN	Equipos de proceso	Tiempo de producción	Acceso a la materia prima
PROCESO 1	10	0	10
PROCESO 2	5	5	5
PROCESO 3	5	5	5

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.3 Matriz de factores ponderados.

Cuadro 6. Matriz de selección de factores ponderados.

FACTORES		ALTERNATIVAS					
Descripción	Peso relativo	calificación proceso 1	(P) * C	Calificación proceso 2	(P) * C	Calificación proceso 3	(P) * C
Calidad del Producto	55%	1	0,55	5	2,75	10	5,5
Equipos de proceso	15%	10	5,5	5	2,75	5	2,75
Tiempo de Producción	15%	0	0	5	2,75	5	2,75
Acceso a la Materia prima	15%	10	5,5	5	2,75	5	2,75
Puntuación Total	100%		11,55		11		13,75

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.4 Proceso definitivo. La matriz de selección de factores ponderados arrojó la puntuación para cada uno de los procesos estudiados, el proceso que mejor puntuación obtuvo fue el proceso con matriz reforzada ya que ofrece un producto de gran calidad, el ácido clorhídrico cuenta con restricciones para su adquisición, sin embargo las empresas constituidas pueden adquirir el reactivo, declarando el uso, el resto de materias primas se puede encontrar con gran facilidad, los equipos necesarios para la implementación de este proceso no son sofisticados, lo cual indica que no requiere una gran inversión, el tiempo de producción no es tan prolongado lo que sugiere una productividad alta, además de la rotación de inventarios en las materias primas y en el producto final.

El proceso desarrollado por Alarcón y otros⁴² y basado en la técnica de Averous y colaboradores⁴³, fue obtenido a través de un diseño de experimentos por la metodología Taguchi, el proceso de matriz reforzada cuenta con tres bloques principales de producción, en el cual, el primero se realiza la modificación del almidón con ácido acético en una proporción del 5% V/V, que permite así obtener un almidón con unas proporciones excelentes de amilosa y amilopectina y un grado de sustitución alto, lo cual hace de esta materia prima ideal para materiales poliméricos termo resistentes según lo demostrado en este estudio, luego se realizan unas pre-mezclas con los aditamentos con el fin de homogeneizarlas con el almidón modificado para que el proceso sea más rápido, por último se realizan las mezclas con los plastificantes y el material final se deja enfriar y secar con la forma que se desee.

2.3 ESQUEMA DE TRABAJO Y MATERIAS PRIMAS, EQUIPOS

El almidón de papa modificado es la materia prima principal para la obtención del bioplástico ya que este cuenta con dos cadenas de polisacáridos las cuales posteriormente se van a polimerizar. El agua, el alcohol polivinílico y la glicerina son materias primas que cumplen una función humectante y plastificante, además este último tiene una acción consolidante disminuyendo la porosidad del bioplástico que se evidencia en forma de burbujas, el Celocell es un material que actúa como espesante y extensor, lo que permite que el producto tenga un mayor rendimiento sin afectar sus propiedades, además le añade al producto final propiedades hidrófobas.

El ácido bórico y el Cloruro de Sodio le confieren una capa protectora ante productos fúngicos ya que al ser un bioplástico tiene mayor susceptibilidad a las bacterias y hongos. La goma xantán o quitosano (también llamado chitosán) son

⁴² ARROYO, Edmundo; ALARCÓN, Hugo. Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de la papa. En: Revista de la Sociedad Química del Perú. Junio, Vol. 82, No 3, pp. 2 – 13.

⁴³ AVEROUS, Op. Cit., p. 1122.

polímeros lineales de origen animal que actúan como estabilizantes de la mezcla del almidón, además de ello refuerzan la protección ante bacterias y hongos, adicionalmente aumentan las propiedades elásticas ya que su cadena polimérica actúa como fibras de refuerzo. El aceite mineral funciona como lubricante de la mezcla y permite que la probeta se contraiga sin efectuarse rompimiento, el etanol es el precursor de la polimerización de la mezcla, el cual se debe adicionar de forma lenta y progresiva.

Asimismo, se tienen dos etapas principales en el proceso de matriz reforzada: en la primera etapa se realiza la modificación del almidón a través de un proceso denominado entrecruzamiento por acilación con ácido acético en una relación del 5% v/v, en este proceso se disminuye la fragilidad de los gránulos del almidón otorgándole a esta materia prima una mejora en sus propiedades mecánicas, reduciendo la sensibilidad del almidón a las altas temperaturas manteniendo su integridad.

Esto se realiza con el procedimiento planteado por Carrascal⁴⁴, al tener modificado el almidón se realiza un proceso de confirmación química de la acilación a través de una titulación del almidón modificado teniendo de blanco el almidón nativo en donde lo que se pretende es establecer el porcentaje de acetilos y el grado de sustitución presentes en el almidón usando las formulaciones establecidas por Rivas y otros⁴⁵.

En la segunda etapa del proceso es la obtención del bioplástico, el cual consta de ciertas preparaciones previas o pre-mezclas las cuales preparan la materias primas (celocell, almidón modificado, agua destilada) para incorporarlas al proceso de forma más rápida, al tener los componentes listos, se continúa con una cadena de procesos de mezcla, en los cuales se adicionan plastificantes, lubricantes, agentes antifúngicos y estabilizantes a medida que cada proceso va requiriendo dichas sustancias.

Las mezclas uno, dos y tres tienen un tiempo de residencia antes que se agregue otro insumo de 5 minutos y un rango de temperatura entre la Temperatura ambiente (en el laboratorio 22°C) hasta los 40°C, posterior al tren de mezclas la reacción de polimerización tiene un tiempo que va entre 8 a 12 minutos y una temperatura entre los 60°C - 70°C este tiempo varía según la rigurosidad en la que se llevó a cabo el proceso en términos de la temperatura, las materias primas necesitadas para los tres bloques de proceso para la obtención del bioplástico se encuentran en la tabla 1.

⁴⁴ CARRASCAL, Op. Cit., p. 11.

⁴⁵ RIVAS GONZÁLEZ, M; ZAMUDIO FLORES, P. B. y BELLO PÉREZ, L. A., Efecto del grado de acetilación en las características morfológicas y fisicoquímicas del almidón de plátano. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2009. Vol. 8, No. 3, p. 291-297.

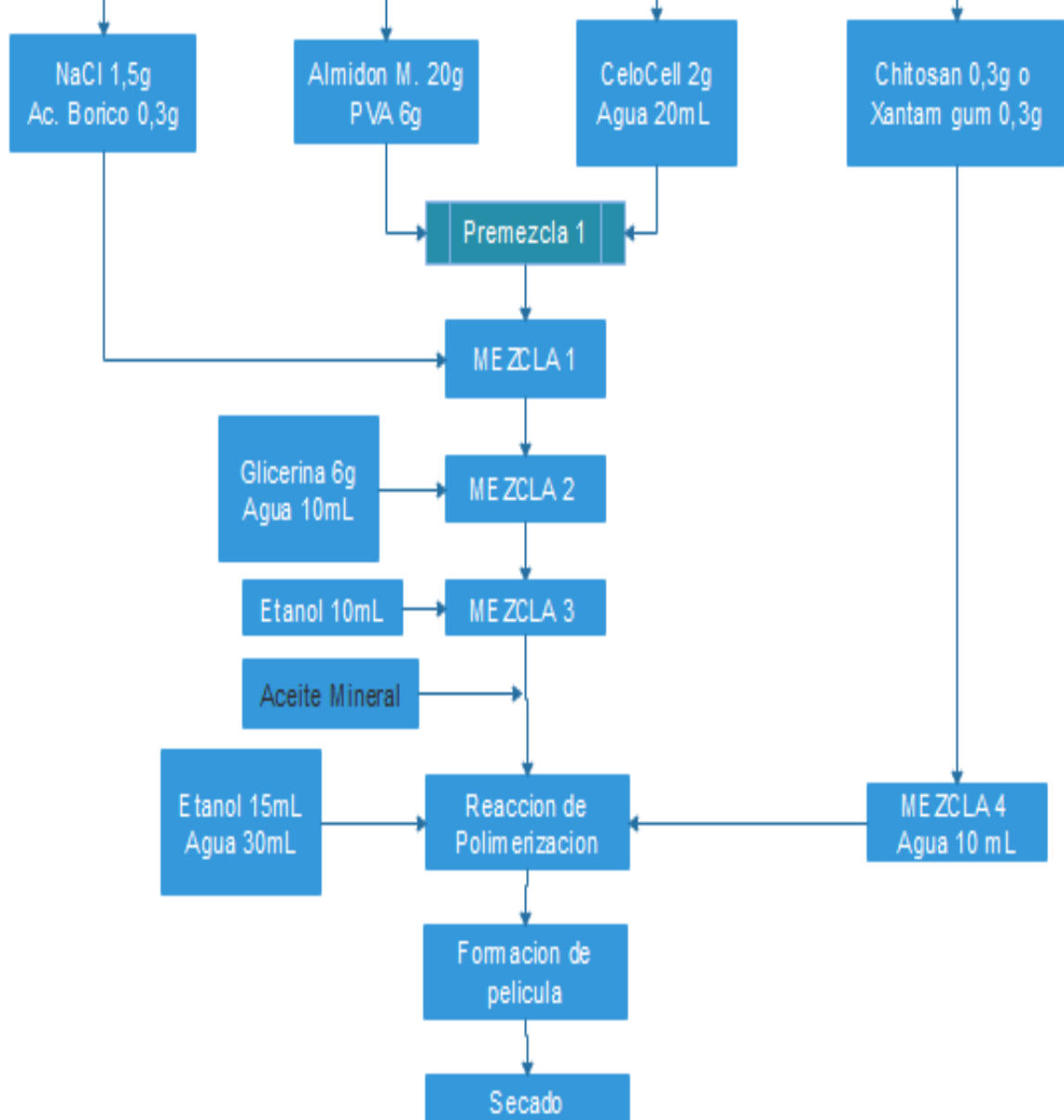
Tabla 1. materia prima para la obtención del bioplástico.

materias primas (preparación de bioplástico)	Concentración (p/p %)
Cloruro de Sodio	95.5
Ácido Bórico	100
Hidroxietilcelulosa - Celocell	100
Agua destilada Tipo 1	-
Glicerina USP	85
Etanol absoluto	100
Aceite Mineral	100
Goma Xantan - Chitosano	100
PVA LP 50	50

Fuente: Elaboración Propia.

El siguiente diagrama fue diseñado con base en el proceso desarrollado por Alarcón y otros el cual muestra el proceso para la obtención del material polimérico, a partir de las consideraciones expuestas con anterioridad.

Diagrama 4. Diagrama de obtención de bioplástico.



Fuente: ARROYO, Edmundo; ALARCÓN, Hugo. Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de la papa. En: Revista de la Sociedad Química del Perú. Junio, Vol. 82, No 3, pp. 2 – 13⁴⁶.

⁴⁶ ARROYO, Op. Cit, p: 13.

3. DETERMINAR LA MEJOR FORMULACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL BIOPLASTICO

Para obtener un bioplástico, inicialmente se procede a realizar la modificación química del almidón nativo, el cual es un proceso que se desarrolló para la industria alimenticia; en la actualidad se tienen rutas químicas (sustitución, reducción y entrecruzamiento) y físicas (pre gelatinización y etiqueta limpia) para desarrollar el proceso de modificación del almidón, se ha determinado las mejores aplicaciones según el grado de sustitución y la ruta escogida, por ejemplo, para espesantes de alimentos se usa una sustitución con grados bajos de sustitución, para las pinturas y biopolímeros se usa generalmente reducciones o entrecruzamientos con grados medios o altos de sustitución y las láminas de uso farmacéutico emplean diferentes tipos de modificación del almidón⁴⁷.

Posterior al proceso de modificación del almidón nativo, se debe realizar una confirmación de la acilación, la cual brinda información tal como el porcentaje en el que se modificó y el grado de sustitución, lo cual resulta importante ya que de este modo se validan los usos a los cuales se expondría el producto final.

Adicionalmente, al tener el almidón modificado se realiza el procedimiento de la obtención del bioplástico planteado por Alarcón y otros, con esta técnica se desarrollaron varios prototipos para evaluar sus propiedades mecánicas, de esta manera definir sus posibles aplicaciones, comparar las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido con las de un polímero de origen sintético, además de esto permite establecer condiciones de operación para obtener una formulación.

3.1 MODIFICACIÓN QUÍMICA DEL ALMIDÓN POR ACETILACIÓN

Entre las rutas químicas de modificación química del almidón se encuentra la oxidación⁴⁸ la cual disminuye la retrogradación del almidón, aumenta el brillo, transparencia y blanquea el almidón, no obstante, estas mejoras son solo de carácter visual ya que las propiedades mecánicas no se mejoran.

La modificación química por entrecruzamiento⁴⁹ disminuye la fragilidad del gránulo del almidón aumentando su resistencia a altas temperaturas, incrementa las propiedades de resistencia mecánica y mantiene la integridad en condiciones ácidas, lo cual es lo que se busca para el producto final;

Por último, se tiene los almidones modificados por sustitución⁵⁰ en este proceso se acopla la molécula específica para desempeñar una función específica, reduce la temperatura de gelatinización y aumenta la retención de agua; sin embargo, al ser

⁴⁷ Xin, J.-Y., Wang, Y., Liu, T., Lin, K., Chang, L., & Xia, C.-G. Biosynthesis of Corn Starch Palmitate by Lipase Novozym 435. En: International Journal of Molecular Sciences, Mayo, Vol 13, No. 6(2012). pp. 7226-7236.

⁴⁸ Ibid. p. 7230.

⁴⁹ Trina Ghosh, D., & Anil N., N. 'Green' crosslinking of native starches with malonic acid and their properties. En: Carbohydrate Polymers, Noviembre, Vol. 90, No. 4(2012), pp. 1620– 1628.

⁵⁰ CARRASCAL, Op. Cit., p. 10.

una modificación tan específica disminuye el espectro de aplicabilidad del almidón, adicionalmente, al aumentar la retención de agua dificulta los procesos de secado tanto del almidón ya modificado como el bioplástico. Por lo cual se decide usar la modificación química por entrecruzamiento ya que ofrece mejoras en las propiedades que fallan en los procesos tradicionales y en el proceso de almidón modificado descritos en los literales 2.1.1 y 2.1.2.


3.1.1 Reactivos y materiales del proceso de modificación del almidón. Para todos los reactivos relacionados en el cuadro 7, la hoja de seguridad se ubica en el ANEXO A. El agua destilada tipo I, fue suministrada por los laboratorios del SENA nodo BIOTECNOLOGIA y NANOTECNOLOGIA ubicado en Bogotá, donde se utilizaron los equipos relacionados en el cuadro 8, el almidón nativo de papa se adquirió con la empresa CIMPA S.A., adicionalmente se toma como base para todos los cálculos 40 g de almidón nativo puesto que esa cantidad es la que se modificó.

Cuadro 7. Reactivos del proceso de modificación del almidón.

REACTIVOS	g reactivo /g de almidón nativo
ÁCIDO ACÉTICO (5%)	0.1313
AGUA DESTILADA TIPO 1	11.25
HCL (1N)	0.026
NaOH (0,1 N)	0.005508

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 8. Equipos necesarios para la modificación del almidón.

nombre del equipo	descripción	imagen
PLANCHA DE CALENTAMIENTO CON AGITACIÓN (TECHNE TSSM1)	Se utiliza para calentar beakers o recipientes con un intervalo de temperatura entre 50 - 540 °C, además de brindar agitación con regulación de 60 a 1200 rp	

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 9. Equipos necesarios para la modificación del almidón.(Contunuación)

<p>BALANZA ANALITICA (NIMBUS NBL-21B)</p>	<p>Este instrumento de medición sirve para medir pequeñas masas en un rango menor de un miligramo.</p>	
<p>CENTRÍFUGA (HERMILE Z-326)</p>	<p>Este equipo separa las partículas en una solución homogénea, mediante un movimiento de rotación y aceleración centrífuga, lo cual ocasiona sedimentación.</p>	
<p>BOMBA DE VACÍO</p>	<p>Extrae partículas de aire dentro de un volumen sellado creando así un volumen parcial, logrando separar la fase sólida de la líquida de la modificación del almidón de forma más rápida.</p>	
<p>HORNO DE CALENTAMIENTO DE BANDEJAS.</p>	<p>En este equipo hace el proceso de secado estandarizado a 40°C, allí se seca el almidón nativo en el pretratamiento y el almidón modificado.</p>	

Fuente: Elaboración Propia.

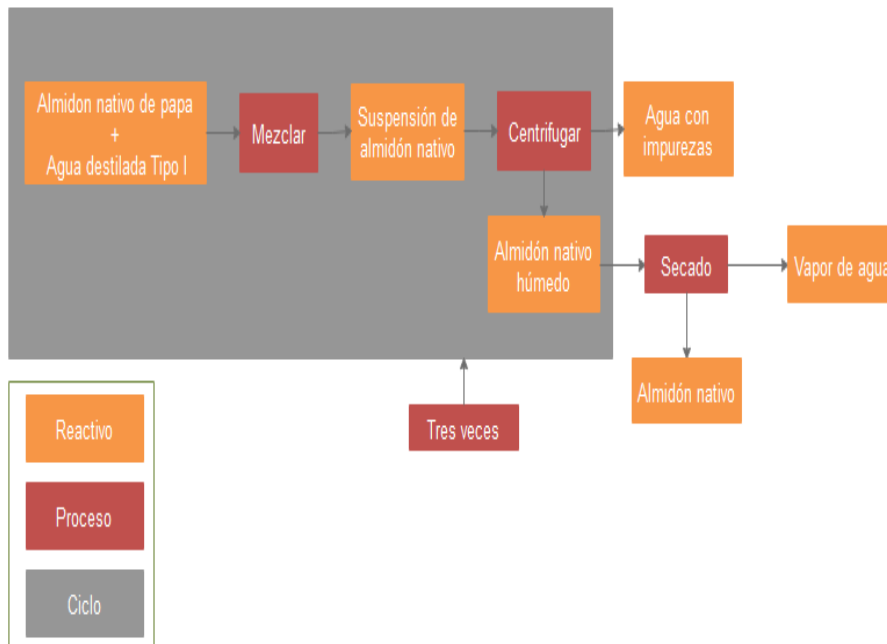
3.1.2 Metodología para la modificación del almidón

3.1.2.1 Lavado del almidón. El almidón nativo de papa fue adquirido por kilos en la empresa CIMPA S.A., este se somete a un lavado con agua destilada tipo 1, mezclándolos con un agitador de vidrio o un shaker, se recomienda este último ya que logra una solución homogénea.

Posterior a esto, se pasa la mezcla acuosa por el equipo de centrifugado para acelerar la sedimentación, con unas condiciones de operación de 2600 rpm por 15 minutos, este proceso se debe realizar tres veces para así asegurar que el almidón quede libre de contaminaciones⁵¹.enseguida se procede a realizar una filtración con una bomba de vacío para asegurar la separación de las dos fases y extraer la mayor parte de agua posible, por último, se ingresa a un de horno de bandejas a una temperatura de 35°C por 12 horas, se expande el almidón uniformemente.

Para finalizar se reduce el tamaño de partícula pasando el almidón por un tren de tamices (mallas entre 8 y 50) llevándolo así a un tamaño de partícula uniforme de 0.297 mm, como se describe en el diagrama 2.

Diagrama 5. Diagrama de flujo para el lavado del almidón.



Fuente: Elaboración Propia

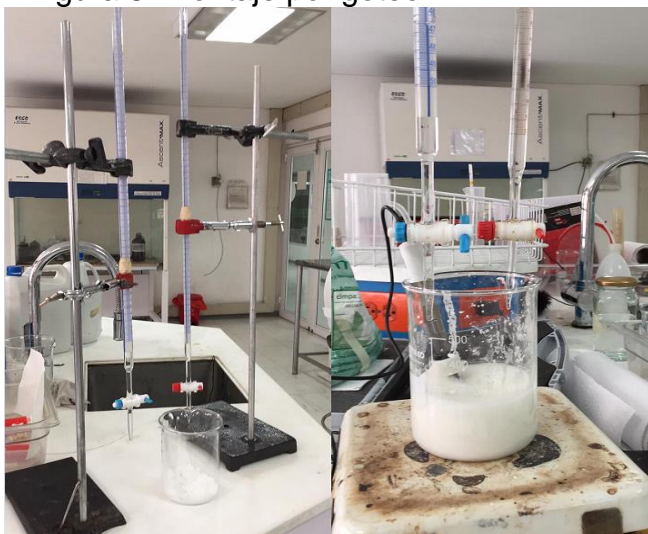
⁵¹ Novelo, C. L. and Betancour, A. D. Chemical and functional properties of *Phaseolus lunatus* and *Manihot esculenta* starch blends. En: Starch/Stärke. Vol. 57, No. 9(2005). pp. 431-441

3.1.2.2 Modificación del almidón nativo. La modificación química del almidón permite que este cambie su estructura modificando sus propiedades como se mencionó en literal 2.1., este proceso requiere mantener variables controladas como la temperatura, el pH, el tiempo de reacción y la cantidad de reactivo, este proceso se llevó a cabo en repetidas ocasiones y se colocan muestras de cuatro ensayos reportados en el cuadro 9, los cuales sirven para detallar la repetibilidad del proceso estableciendo así una formulación para la modificación del almidón nativo.

La cantidad de reactivo se controla a partir de un montaje por goteo donde los reactivos (ácido acético (5%) y NaOH (0,1 N)) se sitúan en buretas de 50 mL, y se fijan en dos soportes universales, como se muestra en la figura 8. Se pesa los 40 g de almidón nativo de papa en un beaker de 250 mL con 100 mL de agua destilada tipo 1, se mezcla con el almidón nativo de papa, esto se hace de forma mecánica (agitador shaker) con una velocidad entre 400 y 600 rpm durante 30 minutos para garantizar la homogeneización de la solución.

Se mide el pH con un potenciómetro con el fin de mantener controlada la alcalinidad de la solución, se adiciona 1mL de NaOH para estabilizar el pH entre 8 -8,5 ya que la reacción se desarrolla en un medio básico, al tener estabilizado el pH de la mezcla se procede a colocar el montaje de los reactivos y se agregan gota a gota el ácido acético y el hidróxido de sodio, al adicionar la cantidad de ácido acético, se deja reaccionar la mezcla durante 30 minutos. Por último, se detiene la reacción con 1 mL de HCL al 1 N ya que al disminuir el pH como se ve en el diagrama 5, la reacción se detiene debido a que la esterificación del almidón se desarrolla en medios básicos⁵².

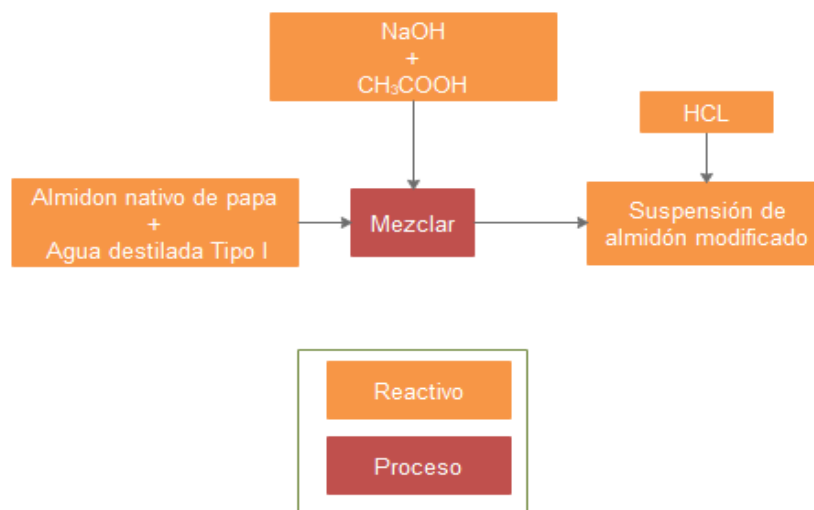
Figura 8. Montaje por goteo.



Fuente: Elaboración Propia

⁵² Korhonen, Ossi. et al. Evaluation of novel starch acetate–diltiazem controlled release tablets in healthy human volunteers. En: Journal of Controlled Release. Marzo, 2004. vol. 95. p. 515.

Diagrama 6. Diagrama de flujo, acetilación del almidón.



Fuente: Elaboración Propia

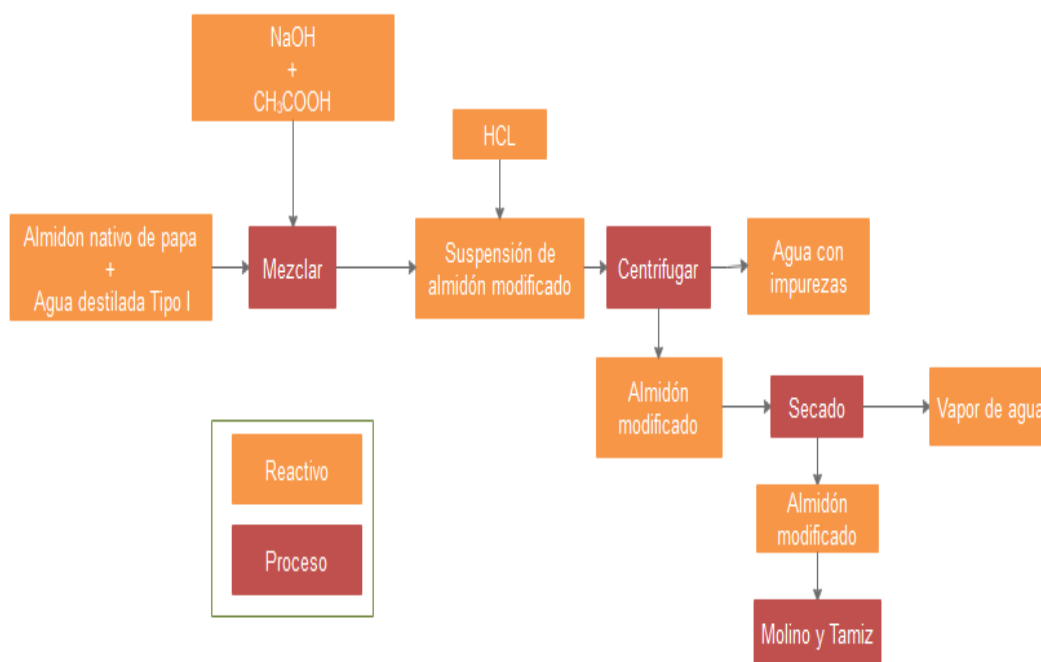
3.1.2.3 Secado del almidón modificado La mezcla proveniente del proceso de acetilación se lleva a una centrífuga a una velocidad de 2600 rpm, y una temperatura de 15°C durante 15 minutos, el sobrenadante resultante se filtra con una bomba de vacío, como se ve en la figura 9, y el almidón que resulta sedimentado se extrae, se hace un lavado con agua tipo 1, este proceso se lleva a cabo tres veces asegurándose que quede lo más limpio posible de los reactivos utilizados para la acetilación, así como se evidencia en el diagrama 3; adicional a esto, se lleva a un horno de bandejas a una temperatura de 35°C por un tiempo de 8 h, extendiendo el almidón en la bandeja para garantizar un secado uniforme como se ve en el diagrama 6.

Figura 9. filtración con bomba de vacío.



Fuente: Elaboración Propia

Diagrama 1. Diagrama de flujo, limpieza del almidón modificado.



Fuente: Elaboración Propia

3.1.3 Resultados de la modificación del almidón. Para la modificación del almidón se realizaron varios ensayos, entre los cuales se destacan los anotados en el cuadro 9, ya que siguen las condiciones descritas en el literal 3.1.2.2., además de las cuatro replicas realizadas para este proceso denominadas ensayo 1, ensayo 2, ensayo 3, ensayo 4.

Cuadro 9. Condiciones de operación del almidón.

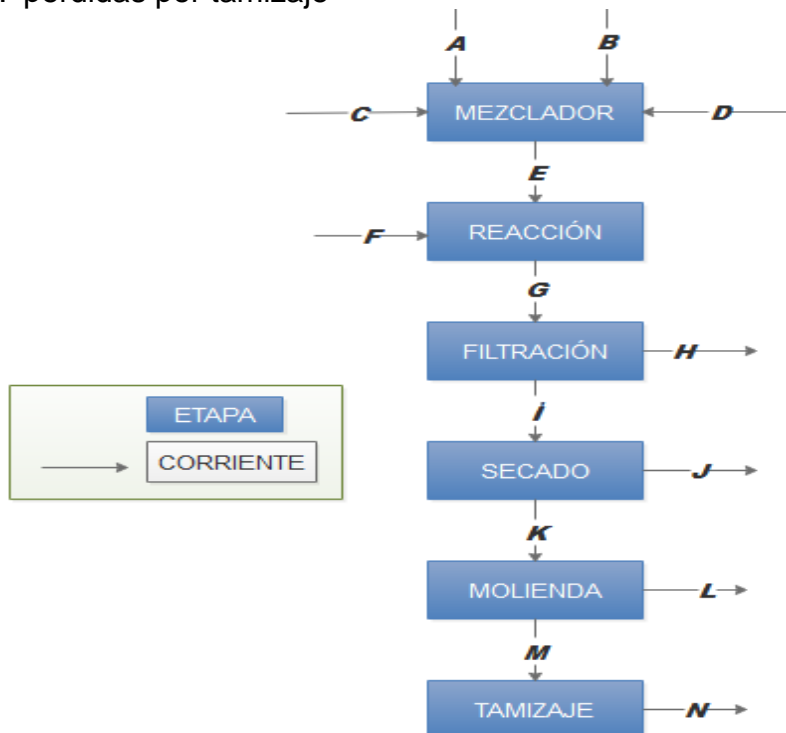
CONDICIONES	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Almidón modificado (g)	40,0231	40,0132	40, 0239	40,0005
Ácido acético 5% (mL)	5	5	5	5
pH (durante la reacción)	8,30	8,22	8,12	8,42
pH (luego de la reacción)	6, 98	7,01	7,02	7,08
Temperatura (°C)	18	21	17	21
Tiempo de reacción (min)	30	30	30	30

Fuente: Elaboración Propia.

Posterior al lavado se pesan 40 g de almidón nativo lavado y se procede al proceso de acilación descrito en el numeral 3.1.2.2. y se toman los datos de las entradas y las salidas descrito en los diagramas 3 y 4 con el fin de desarrollar un balance de masa, para obtener los datos relacionados con el porcentaje de pérdida y por tanto el rendimiento del proceso a nivel laboratorio.

Diagrama 2. Diagrama de balance de masa para la modificación del almidón.

- A. agua destilada tipo i
- B. hidróxido de sodio
- C. ácido acético
- D. almidón nativo de papa.
- E. suspensión del almidón acetilado
- F. ácido clorhídrico
- G. almidón acetilado
- H. pérdidas por filtrado
- I. almidón húmedo
- J. pérdidas por secado
- K. almidón seco
- L. pérdidas por secado
- M. almidón modificado con tamaño de partícula uniforme
- N. perdidas por tamizaje



Fuente: Elaboración Propia.

Para cada entrada o salida del proceso se realizó el pesaje de cada elemento en la balanza analítica, cada elemento de entrada o salida se puede ver en el diagrama 5, como base de cálculo se tomaron los 40 gramos de almidón que se modificaron para establecer la entrada y la salida de las materias primas por cada gramo de almidón nativo.

Como ya se mencionó, este procedimiento tiene como objetivo calcular el rendimiento y el porcentaje de pérdidas totales del proceso, lo cual se calculó para establecer las especificaciones técnicas del proceso a una escala a nivel piloto. Las pruebas de modificación química del almidón por acetilación se realizaron en principio con ácido acético glacial con un volumen de 5 mL; sin embargo con este reactivo no se pudo mantener el pH propuesto para que la reacción se llevara a cabo, por tanto, se decidió usar ácido acético proveniente de la fermentación vegetal, en el cual su concentración es alrededor de 5% v/v después, se propone un montaje de goteo para mantener el pH establecido en la sección 3.1.2.2. , así se lograron unas condiciones estables de proceso.

Al obtener la técnica para llevar a cabo el proceso se tomó nota de las mediciones hechas en la balanza analítica, de las cantidades de salida y entrada para cada proceso, así se estableció un balance de masa lo cual sirvió para calcular las pérdidas del proceso en el que se encontró el rendimiento del proceso, el cual se calculó con base a la masa de entrada y la masa de salida de todo el proceso, que fue en promedio del 80%. Las pérdidas del proceso se presentaron en la etapa de secado y en la etapa de filtrado ya que el almidón modificado se quedaba adherido en las paredes el embudo buchner.

Tabla 2. Resultados obtenidos de la modificación del almidón por entradas de etapa.

Etapa	Entrada	ensayo 1 (g)	ensayo 2 (g)	ensayo 3 (g)	ensayo 4 (g)
mezclado	A	2,4986	2,4992	2,4985	2,5000
	B	0,0059	0,0062	0,0063	0,0065
	C	0,1312	0,1312	0,1312	0,1312
	D	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
reacción	E	3,6357	3,6366	3,6360	3,6377
	F	0,0297	0,0297	0,0297	0,0297
filtración	H	3,6654	3,6663	3,6657	3,6675
secado	J	1,4786	1,4320	1,5417	1,5345

molienda	L	0,8448	0,8041	0,8444	0,8187
tamizaje	n	0,8404	0,7998	0,8395	0,8138

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. resultados obtenidos de la modificación del almidón por salida de etapa.

Etapa	salida	ensayo 1 (g)	ensayo 2 (g)	ensayo 3 (g)	ensayo 4 (g)
Mezclado	E	3,6357	3,6366	3,6360	3,6377
Reacción	H	3,6654	3,6663	3,6657	3,6675
Filtración	I	2,9136	3,0008	2,8993	2,9330
	J	1,4786	1,4320	1,5417	1,5345
Secado	K	0,0044	0,0043	0,0050	0,0049
	L	0,8448	0,8041	0,8444	0,8187
Molienda	M	0,0185	0,0207	0,0204	0,0191
	N	0,8404	0,7998	0,8395	0,8138
Tamizaje	O	0,8219	0,7791	0,8190	0,7947

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. resultados de pérdidas y rendimiento.

	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	ensayo 4
PÉRDIDAS TOTALES (%)	17,7578	22,0655	18,0467	20,5275
RENDIMIENTO (%)	82,2422	77,9345	81,9533	79,4725

Fuente: Elaboración propia.

Al llevar a cabo cada etapa de la modificación del almidón se evidenció que en las etapas de filtración, molienda y tamizaje se presenta una pérdida de la cantidad de almidón nativo que se usó para este fin; En la etapa de filtrado se evidenció pérdida ya que pequeñas cantidades de almidón quedaban retenidas en el filtro y en las paredes del embudo buchner, este proceso se lleva a cabo en tres ocasiones lo cual aumenta las pérdidas de almidón en este proceso; Al disminuir el tamaño de partícula del almidón modificado seco en el molino quedaban retenidas pequeñas cantidades de almidón en las paredes y uniones del molino, adicionalmente en las mallas usadas para garantizar la uniformidad en el tamaño de partícula se observó que quedaron pequeñas cantidades de almidón retenidas en los bordes que unen la malla con la estructura del tamiz. El rendimiento del proceso es más bajo de lo esperado ya que al plantear el proceso se esperaba un rendimiento cercano al 100%, puesto que las etapas involucradas en el proceso no se evidenciaban pérdidas en la teoría recopilada. Sin embargo, un rendimiento del 80% (en promedio) no es malo y puede mejorarse buscando otra forma de llevar a cabo la separación del almidón de los solventes usados para el proceso ya que en esta etapa del proceso es donde más se evidencian pérdidas.

3.2 CONFIRMACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN

La modificación química del almidón por entrecruzamiento tiene como ventajas la disminución de la temperatura de gelatinización de los gránulos de almidón, se presenta una retrogradación muy baja del almidón, mejora las propiedades mecánicas y disminuye la viscosidad de este.

Para la confirmación de la modificación hay dos rutas, química y física; la química se denomina: “determinación de grado de sustitución mediante valoración de retroceso”⁵³, la cual determina la cantidad de hidroxilos sustituidos, esta técnica se usa para la acilación; y la física es por espectroscopia de infrarrojo que busca determinar si la sustitución de los grupos funcionales de interés fue exitosa donde se establecen una comparación entre el almidón nativo y el almidón modificado analizando las longitudes de onda presentes en el espectro medio (4000 a 400 cm⁻¹.), que es donde se encuentran los grupos funcionales que se van a estudiar.



⁵³ CARRASCAL, Op. Cit., p. 10.

Cuadro 10. reactivos del proceso de la confirmación de la modificación del almidón.

REACTIVO	g reactivo /g de almidón nativo
ETANOL 75%	42,99
KOH 0,5N	0,3366
HCL 0,5N Almidón modificado	15,4
HCL 0,5 N Almidón Nativo	13,2

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11. equipos necesarios para la modificación del almidón.

NOMBRE DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
AGITADOR SHAKER	Es un equipo que sobre una placa metálica se colocan recipientes de fondo plano no metálicos puesto debajo de la placa, hay un motor eléctrico el cual produce las fuerzas magnéticas que le permiten girar al imán para proporcionar la agitación deseada al usuario.	
POTENCIOMETRO (MILWAUKEE 600)	Este dispositivo electrónico se encarga de verificar que la alcalinidad por medio de un bulbo de vidrio el cual mide el potencial eléctrico de la sustancia y determina el pH de la muestra.	

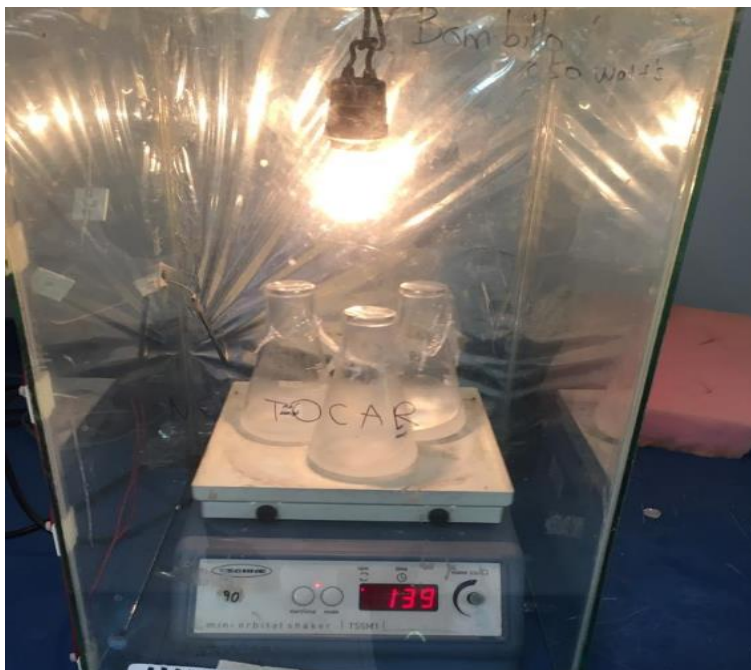
Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Determinación de grado de sustitución. El proceso químico para la

confirmación de la modificación del almidón determina el grado de sustitución de los grupos hidroxilos. La metodología para este proceso consiste en pesar 1g de almidón modificado mediante la acetilación, en un Erlenmeyer de 250 mL, se añaden 50 mL de etanol al 75% en agitación durante 30 minutos en un rango de temperatura de 20°C a 26°C, transcurrido este tiempo se deja en reposo durante 10 minutos, se le agregan 40 mL de KOH 0,5 N, esta mezcla se debe agitar durante 72 horas en un agitador shaker con una velocidad de agitación de 415 rpm, y una temperatura de 22°C,(se realiza el mismo procedimiento para el almidón nativo de papa), como se muestra en la figura 10.

Transcurrido este tiempo se adicionaron 2 gotas de fenolftaleína, y se realiza una titulación con HCL 0,5N⁵⁴, este procedimiento se realiza para el almidón nativo y modificado y se evidencia también en el diagrama 5, se toman los datos de los volúmenes usados de HCL para la titulación, como se muestra en la figura 11, ya que son los datos necesarios para emplear en la ecuación 1.

Figura 10. agitación del proceso de confirmación química del almidón modificado.



Fuente: Elaboración propia

Figura 11. titulación de las muestras de almidón.

⁵⁴ RIVAS GONZÁLEZ, M; ZAMUDIO FLORES, P. B. y BELLO PÉREZ, L. A., Efecto del grado de acetilación en las características morfológicas y fisicoquímicas del almidón de plátano. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2009. Vol. 8, No. 3, p. 29



Fuente: Elaboración propia

Ecuación 1. Porcentaje de grupos acetilo.

$$\text{Porcentaje de acetilo} = \frac{(\text{mL Blanco} - \text{mL muestra}) * \text{NHCL} * 0.043 \text{ mEq}}{\text{Peso de muestra base seca (g)}}$$

Donde 0,043 corresponde a los miliequivalentes del grupo acetilo.

Con el porcentaje de acetilo encontrado se puede encontrar el grado de sustitución el cual es número de grupos acetilos introducidos por unidad de glucosa⁵⁵.

⁵⁵ ADEBOWALE, Kayode; AFOLABI, Adeniyi, OLU-OWOLABI, Iromidayo, Funtional, physicochemical and retrogradation properties of swordm bean (*Canavalia gladiate*) acetylated and oxidized starches. EN: Carbohydrate Polymers. Julio, 2006, vol. 65, no, 1, p.93-101.

Ecuación 2. Grado de sustitución.

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 * \%Acetilo}{4300 - (42 * \%Acetilo)}$$

Donde,

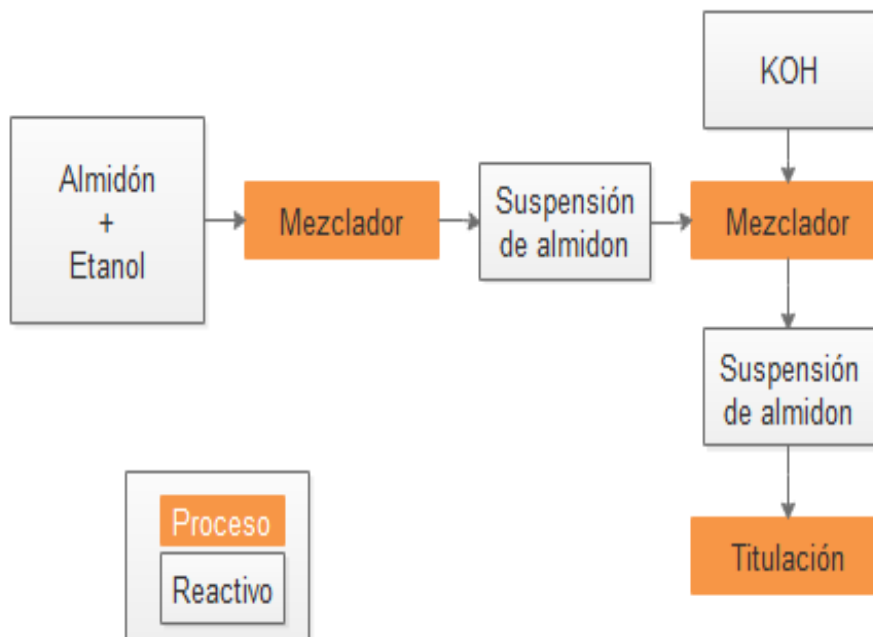
162 corresponde al peso molecular del anhidro de glucosa.

4300 corresponde al peso molecular del grupo acetilo multiplicado por 100%.

42 corresponder al peso molecular del grupo acetilo menos 1.

Para el desarrollo de esta confirmación se tomaron muestras de los ensayos realizados y consignados en el literal 3.1.3. , y se llevó a cabo el proceso 3.1.2., con las condiciones de operación descritas en el cuadro 12, en donde se realizan cuatro ensayos, el ENSAYO 1 (ALMIDÓN NATIVO) es el blanco de la prueba ya que no se le realizó ningún tratamiento químico ni físico, los ENSAYOS 2,3 y 4 son modificaciones químicas por entrecruzamiento con ácido acético, se llevó a cabo estos ensayos para confirmar la repetibilidad del proceso para un posterior escalamiento.

Diagrama 3. diagrama de proceso confirmación química del almidón.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 12. Condiciones de proceso para la confirmación química del almidón.

condiciones	ensayo 1 (almidón nativo)	ensayo 2	ensayo 3	ensayo 4
Almidón modificado (g)	1,0201	1,0232	1, 0240	1,0009
Temperatura 1 (°C)	26	25	26	26
KOH 0,5N (mL)	40	40	40	40
Temperatura 2 (°C)	22	21	20	21

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del grado de sustitución a través del método de modificación por acilación, se presenta en las TABLA 5 y 6 se encuentran los valores hallados del porcentaje de acetilos con la ecuación 1 y el grado de sustitución con la ecuación 2, los cálculos se encuentran en el ANEXO B.

Tabla 5. Resultados del porcentaje de acetilos.

DATOS	Ácido Acético (mL)	HCL (mL)	%Acetilos	RSD
ALMIDÓN NATIVO	0	13.9	0%	0.0021
MODIFICADO 1	5	10.4	14.8113%	0.0018
MODIFICADO 2	5	10.3	15.2226%	0.0015
MODIFICADO 3	5	10.4	15.1413%	0.0002

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.Resultado del grado de sustitución.

DATOS	Ácido Acético (mL)	HCL (mL)	GS	RSD
ALMIDÓN NATIVO	0	13.9	0	0.0021
MODIFICADO 1	5	10.4	0.6523	0.0018
MODIFICADO 2	5	10.3	0.6736	0.0015
MODIFICADO 3	5	10.4	0.6694	0.0002

Fuente: Elaboración propia.

El grado de sustitución está directamente relacionado con la modificación química e indica el promedio del número de sustituciones por unidad de anhidroglucosa en el almidón, el máximo grado de sustitución(GSH) es de 3 puesto que es la cantidad máxima disponible de hidroxilos disponibles por unidad de anhidroglucosa, en la modificación del almidón desarrollada en el presente trabajo, el grado de sustitución resultó ser en promedio de 0,6651 y un porcentaje de acetilación promedio de 15,05844%, los cual ubica este almidón en el intervalo de grado de sustitución medio o alto como lo indica Shogren⁵⁶, este tipo de almidón tiene como propiedad fundamental su hidrofobicidad además de aplicaciones como adhesivos, filtros de cigarrillos, tabletas, plásticos biodegradables y adsorbentes de metales iónicos⁵⁷.

A comparación con otros autores como Vargas, et al.⁵⁸, que para almidones de papa se obtiene un valor del porcentaje de acetilación de 0,44% y un grado de sustitución de 0,02; también los valores reportados por Bello⁵⁹ con un porcentaje de acetilación de 1.1% y un grado de sustitución 0,04. Los valores reportados por estos autores son inferiores a los obtenidos en esta investigación, lo cual puede responder al tiempo de reacción, al tipo de ácido carboxílico usado o la concentración del mismo.

⁵⁶ Shogren, R. L., Rapid Preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction., Carbohydrate Polymers, Vol. 52, No. 3, 2003, pp. 319-326.

⁵⁷ Ibid. 322.

⁵⁸ VARGAS, G, et al., Propiedades funcionales de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y su modificación química por acetilación. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Scientia Agropecuaria, Vol. 7 No. 3, 2016. p 223 - 230.

⁵⁹ BELLO PÉREZ, Luis Arturo, et al, Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca* L. (VAR. MACHO). Texcoco, México. Agrociencia, vol. 2 No. 36, 2002

3.2.2 Determinación de la acetilación por espectroscopia de infrarrojo. Para el análisis de la modificación por acetilación se usó un espectrofotómetro Agilent Series 600, en el que se puede realizar un análisis del espectro infrarrojo el cual se divide en tres, el espectro lejano (con longitudes de onda de 10 a 1000 cm^{-1}), infrarrojo medio (con longitudes de onda 4000 a 1000 cm^{-1}) e infrarrojo cercano (con longitudes de onda de 4000 a 13000 cm^{-1}), y se puede analizar más de un punto en búsqueda de cambios vibracionales en los grupos funcionales de interés⁶⁰.

Para este caso de análisis según Arroyo Benitez⁶¹ y Carrascal Juan⁶², fue conveniente desarrollar un análisis con una longitud de onda entre 4000 - 400 cm^{-1} , con el fin de realizar una gráfica completa del espectro medio de infrarrojo, en la cual las longitudes de onda de interés se encuentran entre 1400 - 1600 cm^{-1} y 3000 - 3500 cm^{-1} debido a que en esos rangos se encuentran los grupos acetilos y los enlaces hidrógeno los cuales son de interés para confirmar la modificación del almidón.

Para desarrollar la espectroscopia de infrarrojo se usa la técnica de amasado la cual consiste en colocar la muestra a analizar en un portaobjetos y añadirle una o dos gotas de Nujol, el cual es un hidrocarburo pesado que limpia el lente, la cantidad que se usa para esta técnica es alrededor de 0.002 g de muestra y para disminuir el ruido del equipo solo una persona lo debe estar manipulando, se debe limpiar el lente cada vez que se cambie de muestra, el lugar donde esté el equipo debe estar alejado de vibraciones fuertes.

Esta prueba se realizó con dos réplicas de almidón modificado por acetilación comparándolo con almidón nativo y se observó la variación en la longitud de onda en la modificación de las bandas 1230 cm^{-1} , 1700 - 1750 cm^{-1} y 3000- 3800 cm^{-1} en la cual se evidencian cambios cuando el almidón presenta modificación por la sustitución de grupos OH.

La figura 12 muestra de forma comparativa los resultados obtenidos por las muestras analizadas, en las cuales se evidenciaron los cambios en diferentes longitudes de onda, en donde el blanco (la prueba realizada al almidón al cual no se le realizó ninguna modificación) es de color fucsia, y el almidón modificado 2 y 3 se representan con las líneas de azul y negro respectivamente, además las figuras 13, 14 y 15 muestra en qué punto se muestra los picos con mayor intensidad de cada muestra.

⁶⁰ AGILENT. Resolutions Pro FTIR Software. Santa Clara. Estados Unidos. 2018.

⁶¹ARROYO, Op. Cit., p. 16.

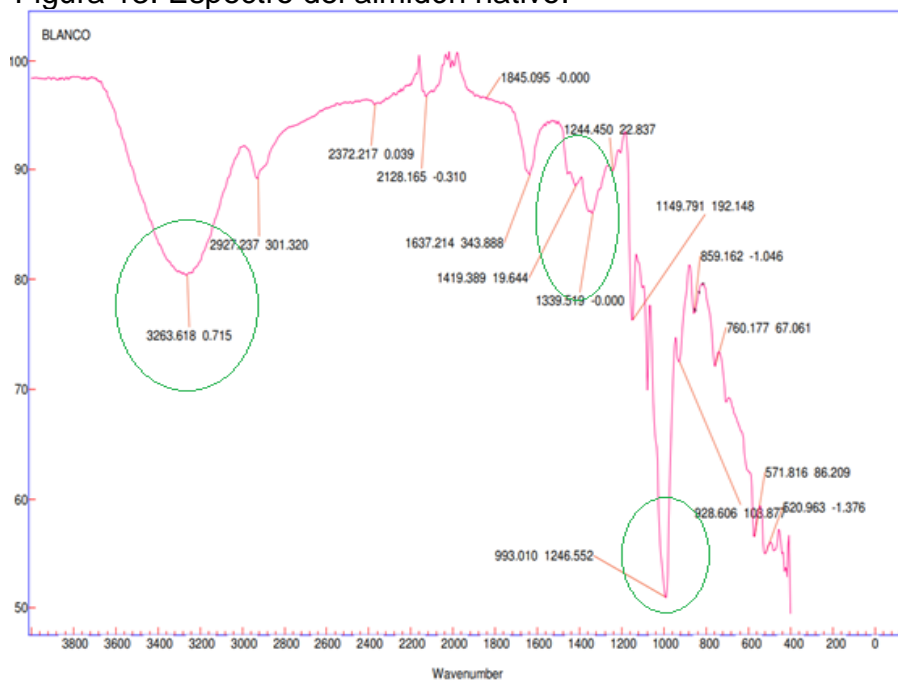
⁶² CARRASCAL. Op. Cit., p. 11.

Figura 12.comparación de los espectros para los almidones analizados.



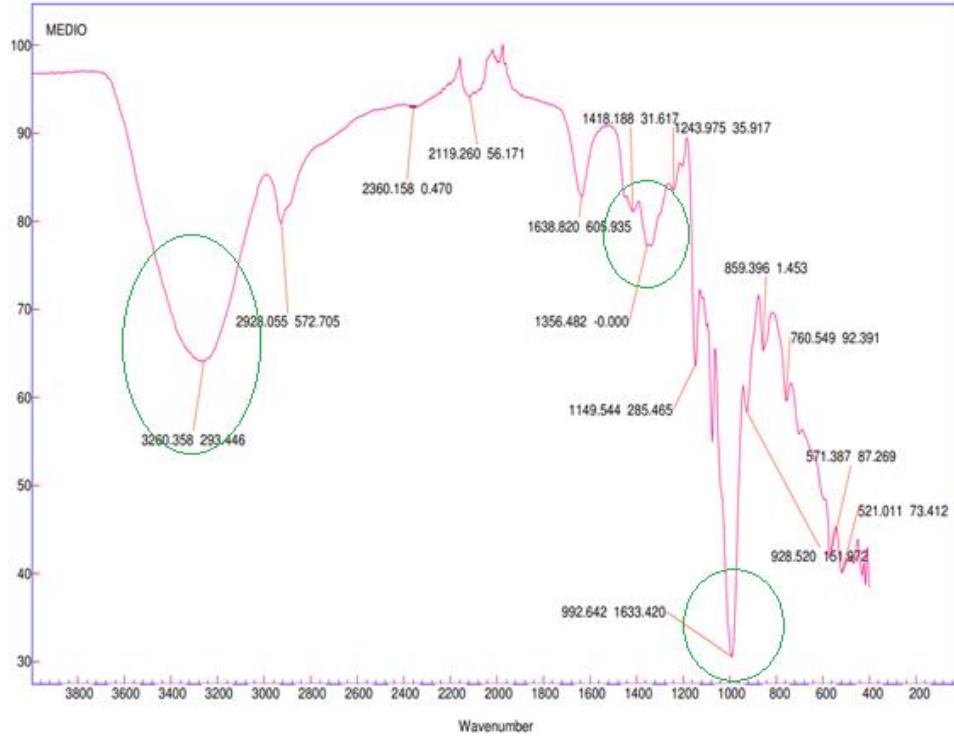
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Espectro del almidón nativo.



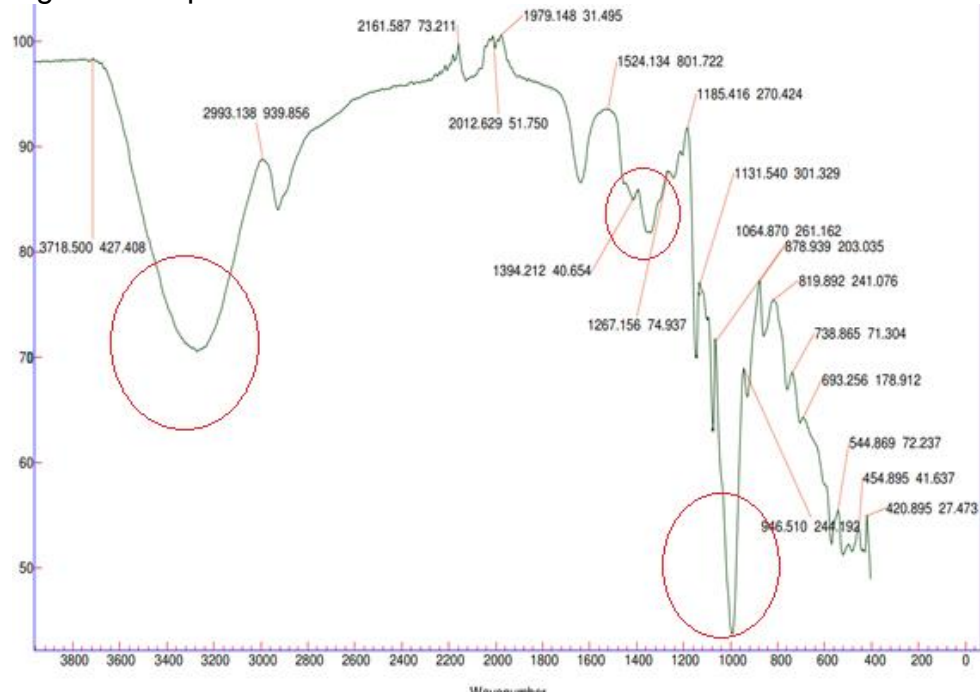
Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Espectro del almidón modificado 2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. espectro del almidón modificado 4.



Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se puede evidenciar los cambios que se presentaron en las señales de interés, sin embargo en la figura 10 se aprecia los cambios en las señales entre 750 cm^{-1} y 1250 cm^{-1} , las cuales corresponden al estiramiento del grupo funcional acetilo(C-O) que se presenta su pico más alto en 1000 cm^{-1} el cual representa el estiramiento.

Se confirmó la presencia del grupo carbonilo característica en la señal ubicada entre 1700 y 1750 cm^{-1} , en donde la prueba confirmó cambios para las réplicas del almidón acetilado con el almidón nativo. La longitud de onda comprendida entre 3000 y 4000 cm^{-1} , aumentó en las réplicas de almidón modificado ya que esta banda corresponde a los estiramientos de los grupos hidroxilos (OH-), estas señales aumentaron su intensidad indicando la presencia de grupos carboxílicos, con lo anterior se confirma que la acetilación del almidón fue exitosa, al existir una variación significativa en las longitudes de onda analizadas, tal como se reporta en la figura 12.

3.3 FORMULACIÓN DEL BIOPLÁSTICO

La estructura de proceso de almidón que se desarrollo fue realizada por Alarcón y otros, se eligió este proceso conforme los resultados que arrojaron la matriz de selección en el literal 2.2.4. Este proceso de matriz reforzada necesita de los reactivos descritos en el cuadro 12, en la cantidad necesaria de reactivo por cada gramo de almidón modificado (donde el almidón modificado total a usar son 20 g) y los equipos necesarios para el proceso descritos en el cuadro 13, 14 respectivamente.

Cuadro 13. reactivos del proceso de obtención del bioplástico.

Reactivo	g reactivo /g de almidón nativo
ALMIDÓN MODIFICADO	1
CELOCELL	0.1
ALCOHOL POLIVINÍLICO (C ₄ H ₆ O ₂) _n	0.3
NaCl	0.075
H ₃ BO ₃	0,015
GOMA XANTAN	0.015
C ₃ H ₈ O ₃	0.3
ACEITE MINERAL	0.15
C ₂ H ₆	1.25

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14. Equipos necesarios para la obtención del almidón.

NOMBRE DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p>PLANCHA DE CALENTAMIENTO CON AGITACIÓN</p>	<p>Se utiliza para calentar Erlenmeyer con un intervalo de temperatura entre 25 - 540 °C.</p>	
<p>MEZCLADORA DE ASPAS (WISD EW)</p>	<p>Se utiliza para simular la agitación de un reactor BATCH, además de ello aseguramos la homogeneización de los reactivos a una velocidad de 710 rpm.</p>	
<p>TERMÓMETRO DE INFRARROJO DE PRECISIÓN (STEREN)</p>	<p>Se usa en conjunto con un termómetro de bulbo y capilar con el fin de controlar el proceso la temperatura en el mezclado y el secado.</p>	
<p>MUFLA (J&C SCIENTIFIC)</p>	<p>Se usa este equipo para el secado del producto final asegurando una temperatura uniforme en los moldes.</p>	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Metodología para la obtención del bioplástico. Para el desarrollo del bioplástico se debe realizar cuatro premezclas con el fin de agilizar el método de obtención del material final.

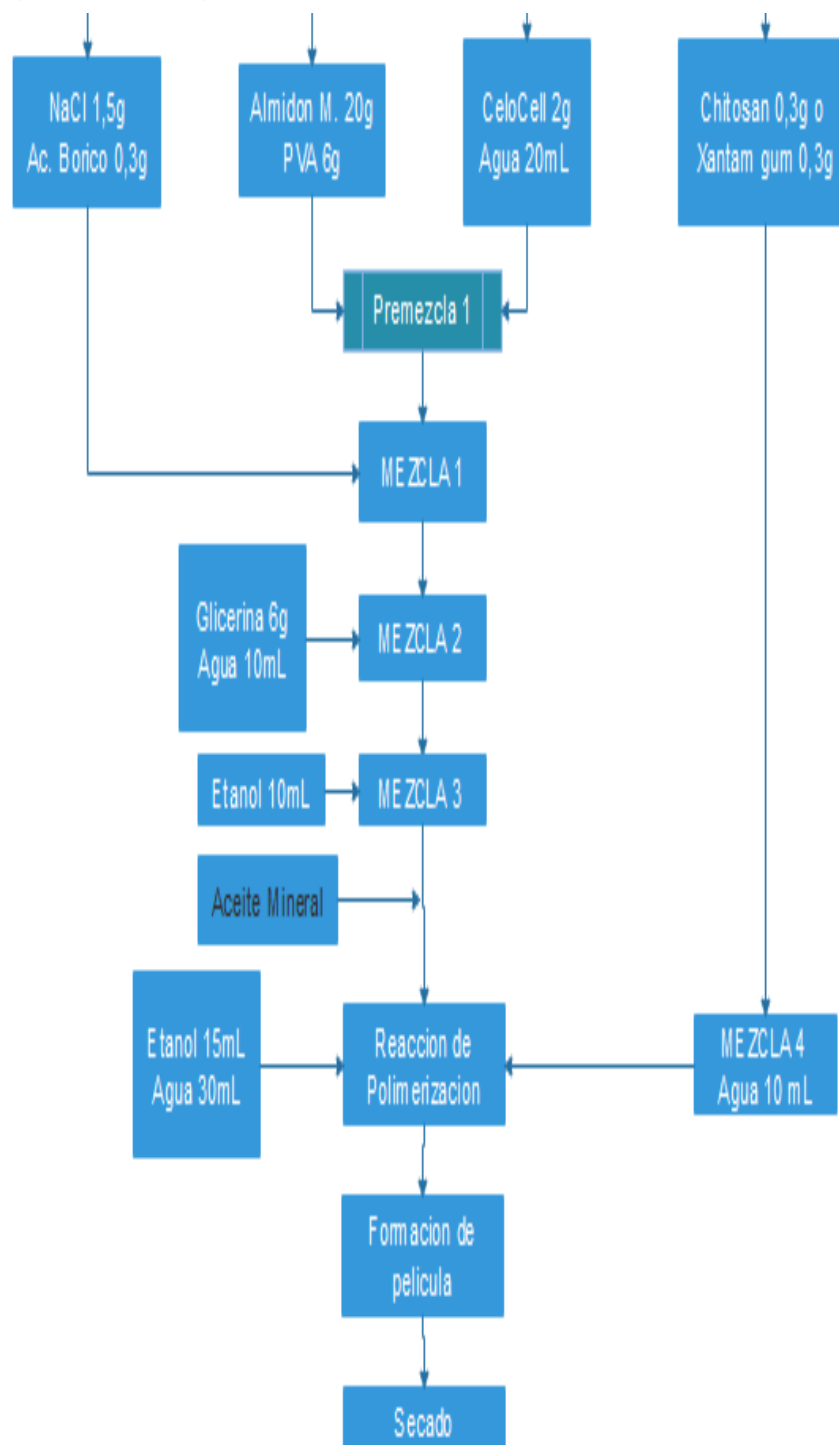
La importancia de las premezclas es evitar la formación de cúmulos durante el proceso de homogeneización, disminuir las pérdidas de material al desarrollar el mezclado y por último disminuir el tiempo de operación, las condiciones para esta técnica se muestran en el cuadro 13 y las cantidades a utilizar en el cuadro 15. La primera premezcla realizada fue el almidón de papa modificado, el PVA y el agua destilada tipo I, esta mezcla se llevó a cabo utilizando agitación magnética en una plancha de calentamiento a 25°C, a una velocidad de agitación de 150 rpm durante 30 minutos; la segunda premezcla fue el celocell con agua destilada tipo I, con agitación mecánica a 250 rpm y a 40°C durante 5 minutos, estas condiciones se mantienen en todo el proceso.

Para agregar la tercera premezcla, la cual consiste en NaCl y Ácido bórico se realizan los pesajes de ambos reactivos dejándolos reservados hasta llegar el momento de unirlos a la mezcla y la última premezcla se agrega la goma xantán y el agua la cual se debe agitar por 20 minutos a una velocidad de agitación de 150 rpm ; al tener todos los ingredientes homogeneizados se sigue el proceso descrito en el diagrama 1 y luego de tener las pre-mezclas en condiciones óptimas, se desarrolla un tren de mezclas.

En la pre-mezcla tres se le agregan 10 mL de etanol para homogeneizarla, adicionalmente el etanol se vierte poco a poco para así asegurar que interactúe con las aglomeraciones del material, al terminar de verter el etanol se debe adicionar 3 mL de aceite mineral a la mezcla el cual sirve como lubricante de la mezcla; por último, se eleva la temperatura a 70°C y 800 rpm la velocidad y se adicionan 15 mL de etanol y 30 mL de agua destilada tipo I en un rango de tiempo entre 8 a 12 minutos.

El secado del material resultante, debe llevarse a temperatura máxima de 110°C, y en un rango de tiempo entre 6 a 18 horas, se debe disponer de un desmoldante como el aceite mineral o ácido esteárico, para que permita retirar el producto final de su molde y sin afectar su estructura ni forma, se usaron moldes de vidrio, acero, acero con pintura electrostática, con estos moldes se proyectó un grosor de película de entre 1 a 2 mm, con el fin de poder realizar las pruebas mecánicas siguiendo las normas ASTM.

Diagrama 1. Diagrama de proceso para la obtención del bioplástico.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 15. condiciones de proceso para obtención del bioplástico

CONDICIONES	VALOR	UNIDAD
Temperatura Pre- mezcla	25	°C
Temperatura Mezcla	40	°C
Temperatura Polimerización	70	°C
Temperatura de Secado	35 - 60	°C
Tiempo de premezcla	30	min
Tiempo de mezcla	5	min
Tiempo de R. polimerización	7-12	min
Tiempo de secado	8 - 16	H
Velocidad agitación mezcla.	250	rpm
Velocidad de agitación R. polimerización.	710	rpm

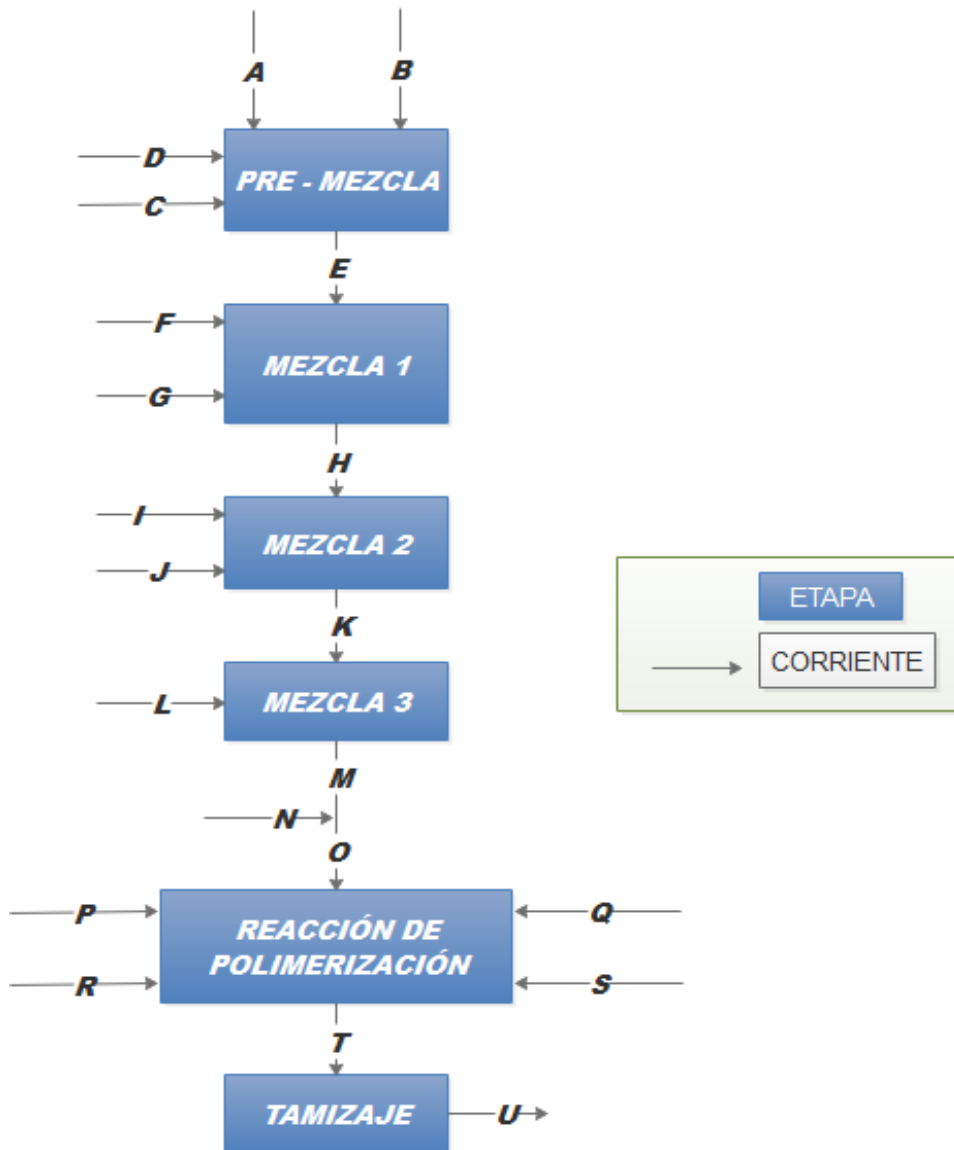
Fuente: Elaboración propia.

En este punto al obtener el almidón modificado y con la certeza que el proceso |de modificación que se realizó fue exitoso, se procedió a realizar la respectiva obtención del producto final, ulterior a la modificación, se pesaron 20 g de almidón modificado y se procedió al proceso de obtención del bioplástico descrito en el numeral 3.3. Se tomaron los datos de las entradas y las salidas descritos en el diagrama 7 con el fin de desarrollar un balance de masa, estos datos se consignaron en las tablas 7 y 8, los datos de porcentaje de pérdida y el rendimiento del proceso se consignaron en la tabla 9, los cuales se obtuvieron con el balance de masa desarrollado.

Diagrama 4. balance de masa obtención de un bioplástico.

- A. ALMIDÓN MODIFICADO
- B. PVA
- C. AGUA DESTILADA
- D. HXCELL
- E. PREMEZCLA
- F. NaCl
- G. ACIDO BORICO
- H. MEZCLA 1
- I. GLICERINA
- J. AGUA DESTILADA

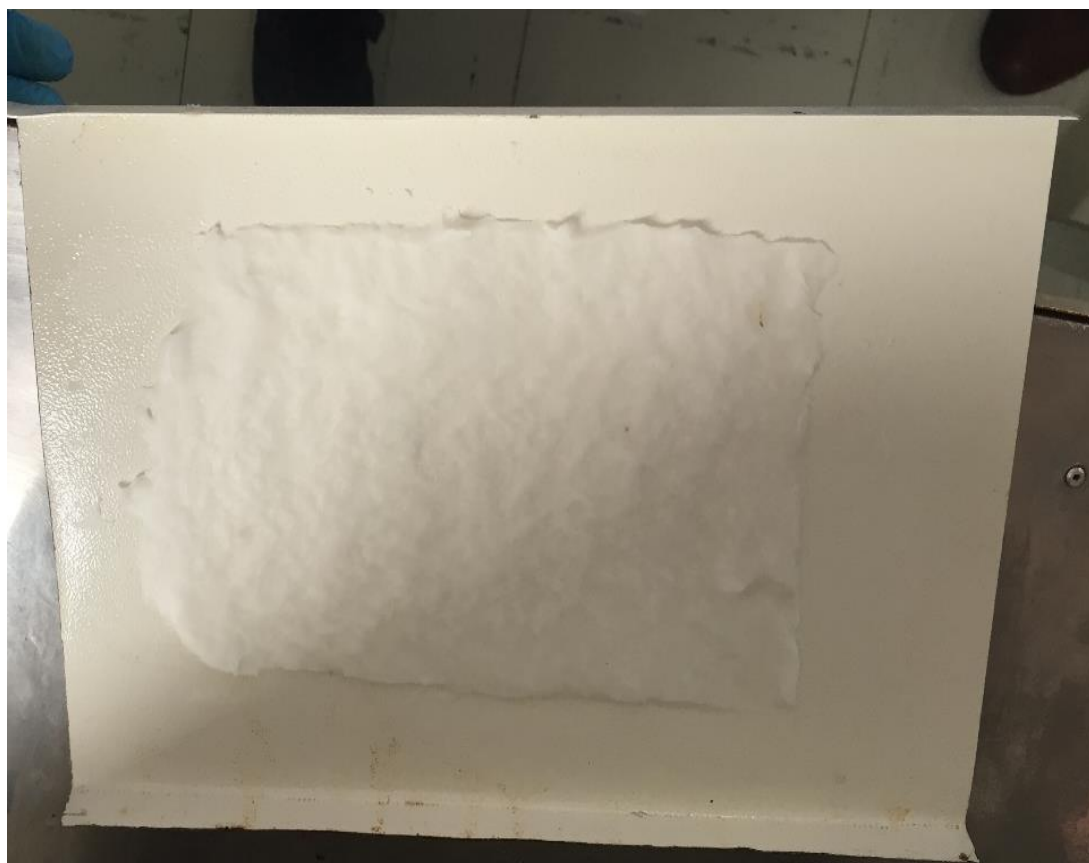
- K. MEZCLA 2
- L. ETANOL
- M. MEZCLA 3
- N. ACEITE MINERAL
- O. PRE-POLIMERIZACIÓN
- P. ETANOL
- Q. AGUA
- R. GOMA XANTAN
- S. AGUA
- T. BIOPLÁSTICO
- U. BIOPLÁSTICO SECO



Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la mezcla totalmente homogeneizada se disminuyó la temperatura durante media hora retirándola del montaje y colocándola en una placa difusora, el molde se lubricó, y se realizó la película de un espesor de 2mm, 25 cm de largo y 15 de ancho en una placa de acero poroso con un recubrimiento de pintura electrostática, como se muestra en la figura 16, en la reacción de polimerización se perdió un porcentaje de 22.5183% en promedio del material ya que queda adherido en las paredes del beaker, adicionalmente ocurrió la evaporación de algunos solventes como el agua y el etanol.

Figura 16. Molde de acero poroso con recubrimiento de pintura electrostática.



Fuente: Elaboración propia

Al someter el material a secado no se tenía suficientes fuentes bibliográficas para este proceso, por lo tanto se tomó el proceso referenciado por Alarcón⁶³, el cual consistía en llevar el film a secado a 40°C en horno de bandejas y al aire libre, donde resultó que en horno de bandejas abiertas de capacidad de hasta 5 kilos, tardó 9 horas en alcanzar un punto óptimo en el cual los bordes del producto no se afectan, el proceso al aire libre tardó 24 horas y la temperatura ambiente estuvo estable a 21°C, dentro de la cabina donde se colocó el molde, en este

⁶³ALARCON, Op. Cit., p. 9.

punto las pérdidas del material fueron de cerca de un 71.9884% en promedio con respecto al peso total de la mezcla y a la evaporación de los solventes que estaban en solución.

Para el montaje se colocó una plancha de calentamiento y se verificó la temperatura por medio de un beaker con agua, además se usó una mezcladora industrial con rotor de aspas con el fin de simular un reactor discontinuo por lotes, como se muestra en la figura 17, se decidió usar este montaje así ya que se experimentó con agitación magnética y manual y debido a esto el producto final resultaba con material aglomerado, lo cual no era óptimo para el desarrollo de los filmes del bioplástico. Con la mezcladora se aseguró una mezcla homogénea adicionalmente del control de la velocidad para la mezcla más acertado, al tener este montaje se procedió a realizar el proceso establecido en el numeral 2.3., del mismo modo las premezclas se mantuvieron por separado y almacenadas en cajas de Petri para evitar contaminación con el medio.

Figura 17. Mezclador con aspas.



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente , se probaron diferentes moldes ya que se evidenció que el material del molde y su diseño afecta en la uniformidad del secado del producto de interés; el primer molde que se usó es una placa de aluminio cubierto con pintura electrostática, con el cual se notó una buena distribución en el secado, sin embargo los bordes de las probetas se endurecía por el contacto prolongado con la temperatura; en segunda instancia se experimentó en un molde de acero GGD MP 420, diseñado en máquina CNC por REPSON S.A.S., como se muestra en la figura 18, y se evidenció que en estos moldes no ocurrió un secado uniforme ya que no hay evaporación del agua retenida por los gránulos del almidón; por último, se diseñó un molde con acrílico el cual mostró una mejor distribución de secado y por tanto la película del bioplástico quedó con un mejor aspecto en el secado.

Figura 18. Molde de acero GGD MP 420, con el bioplástico.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Resultados obtenidos de la obtención de bioplástico por entradas de etapa.

Etapa	entrada	ensayo 1 (g)	ensayo 2 (g)	ensayo 3 (g)	ensayo 4 (g)
PRE- MEZCLA	A	1	1	1	1
	B	0,2979	0,2986	0,3105	0,3047
	C	1,9780	1,9906	2,0034	1,9941
	D	0,0997	0,1027	0,1000	0,0998
MEZCLA 1	E	3,3756	3,3918	3,4140	3,3986
	F	0,0747	0,0772	0,0757	0,0748
	G	0,0153	0,0150	0,0157	0,0151
MEZCLA 2	H	3,4652	3,4841	3,5054	3,4885
	I	0,3121	0,3061	0,3111	0,3098
	J	0,4945	0,4975	0,4993	0,4985
MEZCLA 3	K	4,2718	4,2876	4,3158	4,2968
	L	0,5852	0,5888	0,5909	0,5900
REACCIÓN DE POLIMERIZACIÓN	(M)	4,3625	4,3789	4,4074	4,3883
	(N)	0,0990	0,1002	0,0999	0,1003
	P	0,5852	0,5888	0,5909	0,5900
	Q	1,4835	1,4925	1,4978	1,4955
	R	0,0149	0,0151	0,0153	0,0151
	S	0,4945	0,4975	0,4993	0,4985
SECADO	T	5,0418	5,1478	5,0884	5,1122

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. resultados obtenidos de la obtención de bioplástico por salidas de etapa.

etapa	salida	ensayo 1 (g)	ensayo 2 (g)	ensayo 3 (g)	ensayo 4 (g)
PREMEZCLA	E	3,3871	3,3025	3,4126	3,4062
MEZCLA 1	H	3,4771	3,3923	3,5040	3,4963
MEZCLA 2	K	4,2864	4,1747	4,3141	4,3064
MEZCLA 3	M	4,3774	4,2636	4,4057	4,3982
REACCIÓN DE POLIMERIZACIÓN	T	5,0591	5,0122	5,0864	5,1236

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. resultados de pérdidas y rendimiento.

etapa	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	ensayo 4
PÉRDIDAS TOTALES (%)	5,7919	5.5845	5.3687	5.2279
RENDIMIEN TO (%)	41,2639	44,4488	43,0363	42,4131

Fuente: Elaboración propia.

Al concluir la etapa de obtención del bioplástico se evidencia que las premezclas de glicerina- agua y de goma xantan- agua son necesarias porque estas previenen la formación de cúmulos y las otras dos premezclas agilizan el tiempo de producción, por lo tanto, se confirmó que estas etapas adicionales son necesarias para el proceso.

Se logró identificar que la mezcla alcanza su etapa de gelatinización entre los 70 y 75°C, lo cual concuerda con lo establecido en a nivel teórico por Medina y otros⁶⁴. En cuanto a las pérdidas del proceso se identificó que éstas ocurrieron en mayor medida por la evaporación del agua y el etanol, sin embargo un porcentaje del bioplástico queda adherido en las paredes del beaker lo cual incrementa las pérdidas de insumos que son calculadas de acuerdo al total de insumos añadidos en el proceso de la obtención del bioplástico, las perdidas en promedio fueron de 5.4857%, el rendimiento del proceso respecto al almidón que se utilizó fue en promedio 42.79%, que se evidencia en la tabla 9, esto se debió a la adición de reactivos como el cloruro de sodio, ácido bórico y la goma xantan.

En el planteamiento no se esperaban pérdidas tan altas de reactivo ya que no se tuvo en cuenta la evaporación de reactivos, estas pérdidas se presentaron en mayor medida en la etapa de la reacción de polimerización y el secado de la película (ya que empieza a evaporarse el agua que resulta del proceso de retrogradación del granulo del almidón), por lo tanto, se tendrá que encontrar la manera de recuperar los reactivos evaporados con el fin de reutilizarlos o emplearlos en otro proceso.

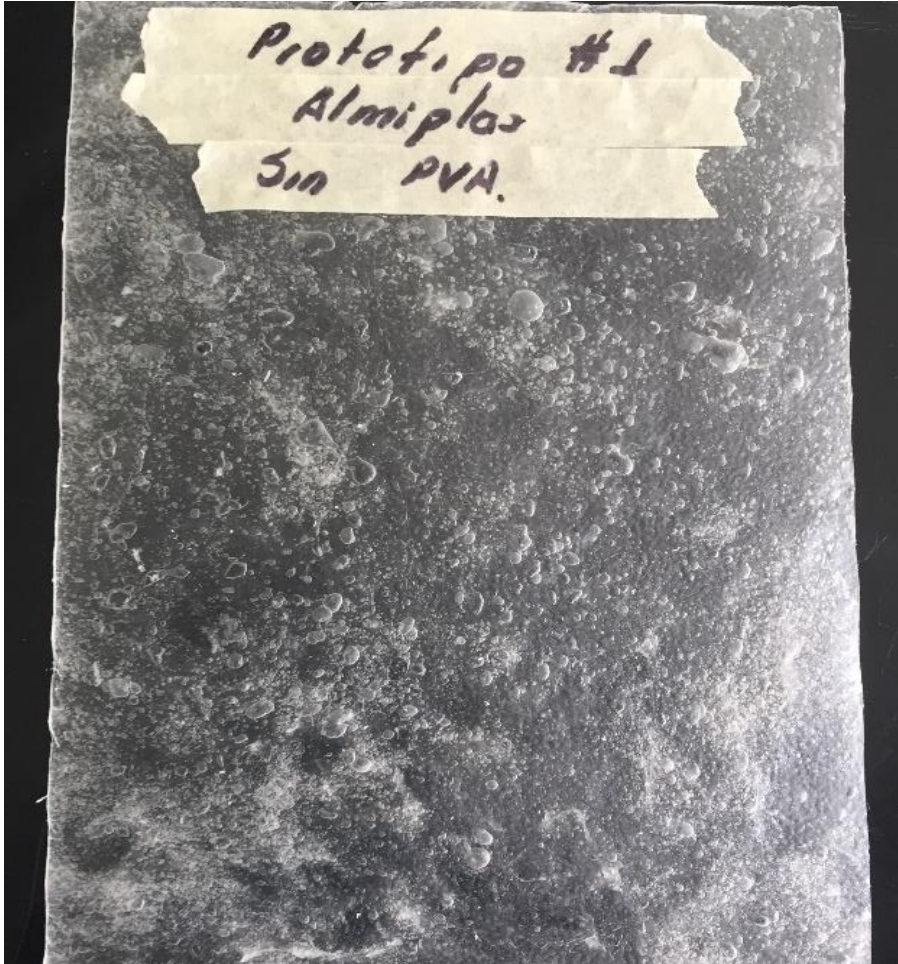
El rendimiento con respecto a la cantidad utilizada de almidón modificada es alto, sin embargo, puede aumentar este rendimiento buscando la manera de retirar el material que queda pegado en los bordes del reactor.

Por último, el secado de la película del bioplástico se llevó a cabo en molde de acrílico ya que este permitía una evaporación de los líquidos retenidos en los gránulos de almidón, además de ello permitió darle forma a la película plástica (largo, ancho y grosor), adicionalmente este tipo de molde permitió un desmolde

⁶⁴ HERNANDEZ MEDINA, et al. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. En: Food Science and Technology. Vol. 28. No. 3(2008), pp. 2-18.

sencillo sin ocasionar perdidas en el material ya seco, como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Prototipo #1, secado en molde acrílico.



Fuente: Elaboración propia.

3.4 PRUEBAS MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de un material describen el comportamiento que va a tener, y por tanto las aplicaciones en las cuales se pueden desempeñar adecuadamente los materiales, además brinda información de la calidad del material realizado. Para los plásticos se pueden aplicar diversos tipos de pruebas regularizadas por la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés y por las Normas Técnicas Colombianas (NTC)⁶⁵, las cuales

⁶⁵INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Cauchos o plásticos. Bogotá. ICONTEC, 2006.

se pueden agrupar en tres tipos de pruebas que evalúan las propiedades que afectan el material: compresión, tracción y cizalla.

Asimismo, las propiedades fundamentales que se le atribuyen a los materiales son en primera instancia la resistencia, la cual evalúa el material a esfuerzos externos evaluada por la norma ASTM D638; en segundo lugar, la rigidez que mide la resistencia a la deformación, en tercer lugar, la dureza la cual determina como actúa el material bajo una gran carga compresiva concentrada regulada por la norma ASTM D2240 y por último, la tenacidad la cual mide la capacidad del material para absorber energía cinética durante los impactos⁶⁶.

La prueba de cizalla es regulada por la norma ASTM D695, esta prueba se realiza a los materiales que son compuestos (porcentaje de bioplástico y algún porcentaje de polímero o fibra) y rígidos, por lo tanto, no aplica para el material desarrollado en el presente trabajo.

3.4.1 Resistencia de los materiales. Para evaluar la resistencia del material trabajado de forma objetiva, se desarrolló un bioplástico hecho con el método tradicional trabajado por Narváez⁶⁷, también se obtuvo otro bioplástico aplicando el método de almidón modificado realizado por Alarcón⁶⁸, con el fin de comparar el resultado al aplicar las pruebas a las probetas y confirmar que la matriz de selección que se usó fue útil para obtener el mejor prototipo de bioplástico a partir de almidón de papa.

Como se mencionó en el anterior numeral, la tracción hace referencia a la evaluación del material a esfuerzos externos, por lo tanto la herramienta que se usó para evaluar las propiedades mecánicas según la norma ASTM D638, fue una máquina universal doble espacio, la cual se asemeja a una prensa capaz de sostener materiales aplicando fuerza en dos puntos, donde las mordazas se encargan de imprimir la presión para la aplicación de las pruebas de tracción y compresión, usando la presión hidráulica para este fin.

Para medir la resistencia a la tracción se deben evaluar los pequeños movimientos y deformaciones, por lo tanto se trabajó con cargas aplicadas de forma longitudinal en la estructura a analizar; el material que se usó es un material plástico lo que indica que no es elástico y por tanto sus deformaciones no son totalmente reversibles; para ello se estudian fenómenos como la deformación y la tensión, los cuales presentan los resultados de las capacidades mecánicas del material, según la norma ASTM D638, las probetas para este tipo de pruebas se realizarán

⁶⁶ UNIVERSIDAD NACIONAL DE NORDESTE. Introducción a la resistencia de materiales. Argentina. UNNE. 2004.

⁶⁷ Narvaez.Op. Cit. p. 27.

⁶⁸ Alarcón, Óp. Cit. p. 13.

de acuerdo a las de tipo 1⁶⁹, puesto que es un plástico semirrígido y presenta cierta oposición al doblarse y en algunos casos fracturarse, además de tener un grosor menor a 0.26 mm estas muestras debían tener unas dimensiones de 16.5 cm de largo y 2 cm de ancho⁷⁰. Las especificaciones dadas en el cuadro 16, muestran las condiciones y las indicaciones para realizar la prueba de resistencia al material plástico.

Cuadro 16. datos para el desarrollo de la prueba de resistencia del bioplástico.

condiciones	valor	Unidad
largo probeta	165	mm
ancho probeta	20	Mm
espesor probeta	1	Mm
velocidad	5 +/- 25%	mm/min
tensión nominal	0.1	mm/min

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Prueba de dureza o compresión. Para la prueba de dureza o compresión se usa el método de dureza SHORE o martillo pendular, el cual mide la dureza de superficies como metales, gomas, plásticos verificada con la norma ASTM D695, la cual establece los rangos de medida y los factores a tener en cuenta, como las dimensiones de 2 cm de ancho por 2 cm de largo y una grosor mínimo de 6.4 mm, una humedad máxima relativa del 50%, y una temperatura de 23°C +/- 2⁷¹, las condiciones de este proceso en el cuadro 17,

⁶⁹ SANTAELLA MACHADO, Daniela C., Estudio de la Deformabilidad a Tracción de Películas Plásticas: Normas ASTM D638 vs. ASTM D882. Tesis de pregrado. Barranquilla. Colombia: Universidad Simón Bolívar, 2012. Pp. 25- 80.

⁷⁰ GALLEGO BOTERO, Paula A.; CLAROS CLAROS, Rolando F. Diseño mecánico de una maquina universal de ensayos para polímeros. Proyecto para título de Tecnólogo Mecánico. Pereira. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. Pp. 44- 90.

⁷¹ ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Rubber Property- Durometer Hardness. Pensilvania. ASTM. 2015.

Cuadro 17. Datos para el desarrollo de la prueba de compresión o dureza del bioplástico.

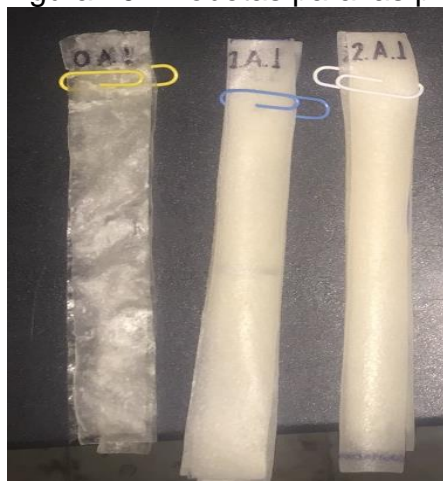
CONDICIONES	VALOR	UNIDAD
LARGO PROBETA	20	Mm
ANCHO PROBETA	20	Mm
ESPESOR PROBETA	< 6.4	Mm
HUMEDAD RELATIVA	50	%
TEMPERATURA	23 +/- 2	°C

Fuente: Elaboración propia.

3.5 RESISTENCIA Y DUREZA

Para confirmar que el proceso propuesto y desarrollado fue el adecuado, y con base en la literatura del capítulo dos, se trabajaron películas plásticas correspondientes a el proceso tradicional, el proceso de almidón modificado y el proceso de matriz reforzada, con el objetivo de ser comparadas entre sí y con el polietileno, ya que este es el material más usado por la mayoría de las empresas del sector para desarrollar sus productos, por lo anterior, se realizaron pruebas a los tres tipos de probetas desarrolladas, la denominada "0A" es la obtenida con almidón nativo por el método tradicional descrito en el numeral 2.1.1.; Mientras que la muestras nombradas "1A" son las del proceso con almidón modificado descrito en el numeral 2.1.2., y por último el proceso de matriz reforzada denominada "2A" descrito en el numeral 2.1.3., como se muestra en la figura

Figura 20. Probetas para las pruebas mecánicas.



Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos con las pruebas mecánicas de resistencia desarrollados en la máquina universal computarizada marca Jinan Testing Equipment modelo WDW-30, se identificaron varias características del material como la tracción máxima, porcentaje de elongación, carga ante de la ruptura, con el fin de establecer si el material es óptimo.

Tabla 10. Resultados de las pruebas mecánicas.

	% Elongación	Resistencia a la tensión (MPa)	Dureza shore D
Proceso tradicional (0A)	3.3238	0.625	NA
Proceso almidón modificado (1A)	3,432	1,23	NA
Proceso matriz reforzada (2A)	4,132	4,12	71,2

Fuente: Elaboración propia.

Para la prueba de resistencia se utilizaron las probetas con las especificaciones técnicas mencionadas en literal 3.4.1. , con esta prueba se logró determinar la elongación máxima, la tensión máxima del material, consignando estos valores en el tabla 10, donde se evidencia un aumento en las propiedades según el proceso que se desarrolle, en comparación con materiales poliméricos como el polietileno (usado ampliamente a nivel industrial) en donde su elongación esta entre valores de 5 al 50%, la resistencia a la tensión esta entre 3 – 55 Mpa y una dureza de 91 shore, el proceso de matriz reforzada posee buenas propiedades mecánicas, ya que está entre los rangos de este material lo cual lo hace competitivo con plásticos sintéticos, sin embargo, posee falencias en el proceso de secado ya que el molde de acero no permite una evaporación del agua uniforme presente en los gránulos de almidón, el molde de aluminio con pintura electrostática no ofrece dimensiones uniformes y la temperatura no se distribuye uniformemente, por último, el molde acrílico ofrece una buena distribución de temperatura y un dimensionamiento uniforme de la probeta pero no se puede desarrollar el secado a altas temperaturas(lo cual aumenta el tiempo de proceso).

El bioplástico desarrollado con matriz reforzada posee características mecánicas que le permiten competir con plásticos sintéticos, un porcentaje de elongación del 4% lo cual indica que se está frente a un material semi rígido que tiene un pequeño espacio de deformación elástica donde el material puede recuperar su forma después de aplicarle una fuerza, lo que lo hace referencia a un material poco dúctil⁷², la resistencia del material ofrece gran aplicabilidad para desarrollar

⁷² UNNE, óp. Cit., p.65.

envases, tapas, cobertura, fibras de refuerzo, haciéndole competencia a materiales sintéticos como el polietileno y el poliestireno. La dureza del material se midió con un dispositivo de dureza Shore D, el cual alcanzó una fuerza de penetración de 71,5 lo cual indica que el material posee una buena resistencia a la compresión y se puede usar como material que necesite soportar hasta 60 Kg de peso⁷³.

⁷³ SALAZAR TRUJILLO, Jorge E. Resistencia de materiales básica para un estudiante de ingeniería. Segunda edición. Manizales: Centro de Publicaciones, 2008. 68p.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RELEVANTES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BIOPLÁSTICO

El mercado actual de los plásticos se caracteriza por un alto crecimiento y una fuerte diversificación, puesto que la aplicabilidad de estas materias primas incluye desde botellas para bebidas hasta segmentos electrónicos. Este mercado crece cerca de un 20% anualmente⁷⁴, donde la producción anual es cercana a 880 toneladas de bioplásticos, frente a una producción de plásticos sintéticos o no biodegradables de 300 millones de toneladas, esta diferencia se debe a la falta de procesos estandarizados o una guía de especificaciones técnicas tanto en el proceso de producción, como en los equipos.

La empresa PRECOCIDOS EL PAISA ubicada Bogotá, es una productora de snacks de papa, plátano, arracacha, garbanzos, entre otras, esta pequeña empresa procesa semanalmente 1000 Kg de papa lavada, para la producción de papas chips, para la preparación de este producto se debe retirar el almidón presente en la papa después de realizar los cortes ya que este afecta el aceite de fritura, afectando la calidad del producto.

Al realizar el lavado de las papas ya cortadas el almidón resultante se extrae en un cubo de acero inoxidable, donde se determina que cerca del 0,5% del total de la papa tratada es almidón; sin embargo, a pesar de esta baja cifra, se manifiesta que la venta del almidón es complicada por su bajo nivel de producción y no pueden competir con industrias como frito lay, pepsico, entre otras, por tanto, este material se usa como abono, se regala o se desecha.

Para encontrar un uso más práctico a este material se decidió escalar los procesos descritos en el capítulo 2, con el fin de identificar los equipos y las dimensiones que se necesitan para producir bioplásticos con esta materia prima. Por lo tanto, se toma un kilogramo de este material para realizar una proyección y determinar la configuración de cada equipo.

4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Para la fabricación del plástico por el proceso de matriz reforzada se deben tener en cuenta las dos fases desarrolladas en el capítulo dos, la primera es la obtención del almidón modificado definido en el literal 3.1 y la segunda fase es la formulación y obtención del bioplástico definido en el literal 3.3., lo cual es útil para establecer las condiciones de operación para cada uno de los procesos.

4.1.1 Especificaciones para obtención del almidón modificado. Para obtener el almidón modificado se siguió el proceso presentado en el diagrama 3, en el cual se muestran las etapas para la obtención del almidón modificado, con las entradas

⁷⁴ <https://www.dinero.com/pais/articulo/crecimiento-de-la-industria-plastica-en-el-primer-semestre/232022>

y salidas del proceso, con esto se definió los equipos necesarios para desarrollar dicho proceso, los equipos se evidencian en el diagrama 10, en donde se encuentra un reactor, una bomba centrífuga, una bomba de vacío, un horno de bandejas, un molino y un tamiz.

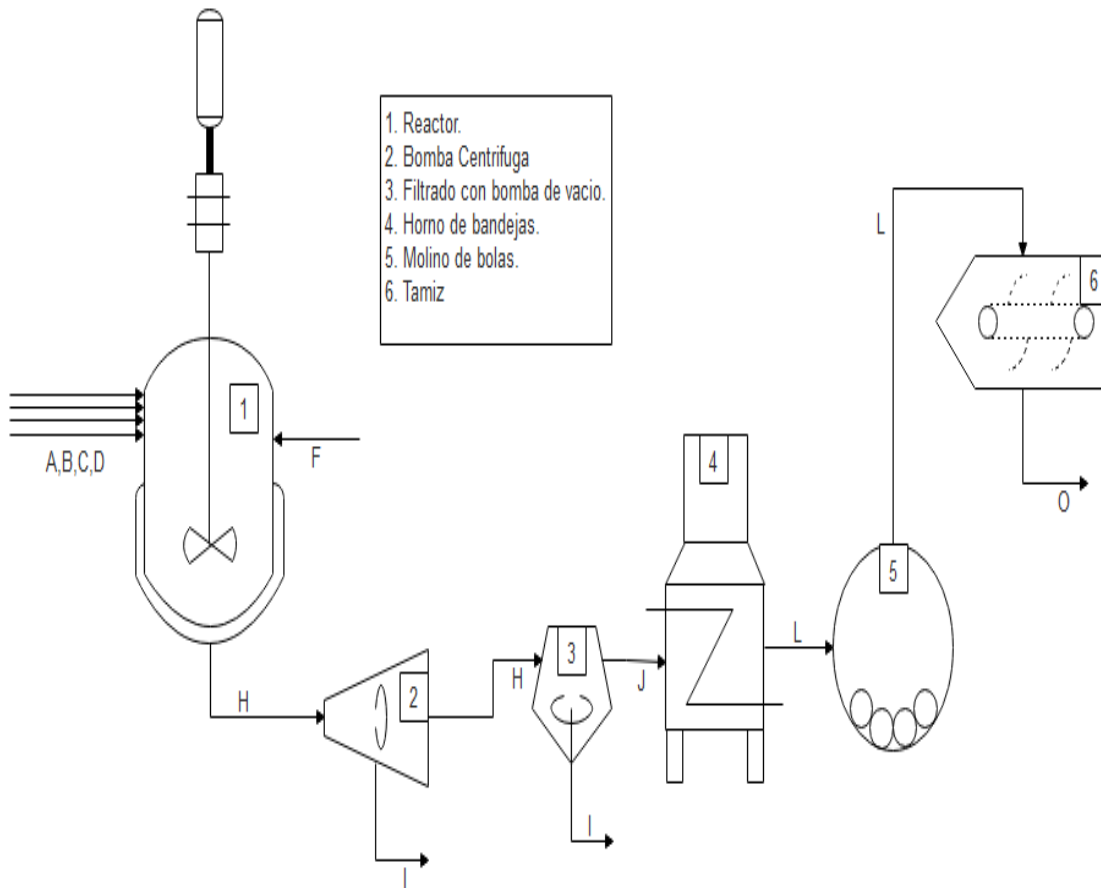
Un reactor batch fue acertado para el proceso, ya que era un recipiente de gran volumen, lo cual proporcionaba tiempos de residencia prolongados. Estos reactores se usan con preferencia en sistemas reactivos en fase líquida a presiones medias o bajas, son perfectos si se necesita emplear un sistema con condiciones estáticas (objetivos de control), las cuales son usadas para obtener un grado de conversión alto, y mantener el sistema en estado estacionario controlando las variables de temperatura y nivel del tanque.

La bomba centrífuga y la bomba de vacío en el proceso se pueden usar uno solo equipo, puesto que a escala piloto e industrial los equipos que separan los sólidos de los líquidos lo hacen de forma eficiente; dentro de estos equipos se encuentran los separadores ciclónicos, filtradores y sedimentadores. Para el establecer las condiciones de operación del separador es necesario contar con datos como el flujo que se va a manejar, la caída de presión, el diámetro del separador y la velocidad de entrada del flujo.

El secado del almidón se realiza en un horno de bandejas ya que a nivel experimental dio un buen resultado un tiempo de secado rápido y uniforme, a nivel industrial se usan diferentes tipos de hornos de bandejas, el cambio radica en mayor medida, en la forma en el que el aire caliente pasa por las bandejas y si hay corrientes de salidas de material evaporado, estos hornos de secado pueden tratar hasta una tonelada de material según sea su configuración, el molino y los tamices se usan para asignar un tamaño de partícula uniforme, a nivel experimental se confirmó que el tamaño de partícula influye en la velocidad de homogenización, además Carrascal⁷⁵ en su investigación concluye que el tamaño de partícula del almidón influye en los procesos que alteran la morfología del granulo.

⁷⁵ CARRASCAL, óp. Cit., p. 125.

Diagrama 5. Diagrama de flujo con equipos del proceso de acilación.



Fuente: Elaboración propia

Para producir un kilogramo de almidón modificado se tuvo en cuenta el balance de entradas desarrollado en la tabla 2, ya que mostró la cantidad de insumos necesarios para modificar un gramo de almidón nativo, lo cual permite la viabilización para especificar las dimensiones de los equipos. Por lo anterior, se realiza un promedio de los reactivos utilizados para el proceso de modificación del almidón en la TABLA 11, para de esta forma proyectar la producción a 1000 g, como se muestra en la TABLA 12.

Tabla 11. Promedio de insumos necesarios para producir un gramo de almidón modificado

ETAPA	ENTRADA	PROMEDIO (g)
MEZCLADO	A	2,4991
	B	0,0062
	C	0,1312
	D	1,0000
REACCIÓN	F	0,0297

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Tabla de proyección.

ETAPA	ENTRADA	PROMEDIO (g)	PROYECCIÓN (g)
MEZCLADO	A	2,4991	2499,0750
	B	0,0062	6,2250
	C	0,1312	131,2000
	D	1,0000	1000,0000
REACCIÓN	F	0,0297	29,7000

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Equipos para el proceso de acetilación

4.1.2.1 Reactor. Para el proceso acetilación se sugiere un reactor batch, en donde el tanque posee un mecanismo de agitación el cual garantiza un mezclado uniforme de la mezcla, este reactor opera de forma estacionaria. Este tipo de reactor supone un mezclado instantáneo, homogéneo, no hay entrada ni salida de reactantes.⁷⁶

El punto de partida para el diseño de un reactor es el balance de materia focalizado a un reactante o producto, que se realiza por determinado volumen de control, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Balance de materia para un reactor.

$$\left(\begin{array}{c} \text{entrada de} \\ \text{reactante al} \\ \text{volumen de} \\ \text{control} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{salida de} \\ \text{reactante} \\ \text{del volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{desaparición} \\ \text{de reactante} \\ \text{por reacción} \\ \text{química} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{acumulación} \\ \text{de reactante} \\ \text{en el volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right)$$

Fuente: GRAAF, R. A., et al. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch. En: Carbohydrate Polymers. Vol. 28. No. 2, pp. 137-144

Sin embargo, como la entrada y la salida de reactantes son nulas, el balance de materia quedaría como el descrito en la figura 22.

⁷⁶ UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA. Fundamentos de diseño de reactores. Puebla. 2010.

Figura 22. balance de materia para un reactor batch.

$$\left(\begin{array}{c} \text{desaparición} \\ \text{de reactante} \\ \text{por reacción} \\ \text{química} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{c} \text{acumulación} \\ \text{de reactante} \\ \text{en el volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right)$$

Fuente: GRAAF, R. A., et al. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch. En: Carbohydrate Polymers. Vol. 28. No. 2, pp. 137-144

Se asume que el reactor está perfectamente agitado, lo cual indica que cualquier punto tiene la misma composición, y el volumen de control es todo el reactor la ecuación de diseño del reactor se puede expresar en función de la concentración del reactivo y conversión de la reacción como se muestra en la ecuación 3.

Ecuación 3. balance de materia para un reactor batch.

$$t = C_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} = - \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{r_A}$$

Fuente: GRAAF, R. A., et al. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch. En: Carbohydrate Polymers. Vol. 28. No. 2, pp. 137-144

En el estudio desarrollado por Graff y otros⁷⁷, se analiza la cinética de la acetilación del almidón con acetato de vinilo y ácido acético, donde determinan que la reacción es de segundo orden, además de una única reacción encontrando así la ecuación de la velocidad de reacción, la cual se muestra a continuación en la ecuación 4, para el caso de las reacciones simples el criterio es el de la máxima productividad.

Ecuación 4. velocidad de reacción de la acetilación del almidón

$$r_{Ac} = -k C_{RAC} C_{ROH}$$

Donde

r_{Ac} , es la velocidad de reacción de la velocidad de reacción.

k , es la constante de velocidad.

C_{RAC} , es la concentración de ácido acético.

C_{ROH} , es la concentración de hidróxido de sodio.

⁷⁷ GRAAF, R. A., et al. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch. En: Carbohydrate Polymers. Vol. 28. No. 2, pp. 137-144.

Se establece el valor de la constante de velocidad de la reacción, con los datos de la cinética hallados, con un factor de frecuencia de $k = 9,28 \times 10^1 \frac{1}{mol \cdot s}$ y una energía de activación de $Ea = 46,650 \times 10^3 \frac{J}{mol}$, estos valores se determinaron con un tratamiento del almidón con ácido acético al 5% (en masa) en medio acuoso, una temperatura de 20° y 35 °C, un pH entre 7,5 y 8,5⁷⁸.

Para calcular el tiempo de la reacción se usó la ecuación 3 obtenida por el balance de materia que se realizó para el reactor batch, la cual se estableció en la ecuación 5, teniendo en cuenta que el volumen de reacción se mantiene constante.

Ecuación 5. tiempo de reacción para un reactor batch con volumen constante.

$$t_r = C_{AA0} \int_0^x \frac{dx}{-r_a} \quad V = constante$$

Donde,

t_r , Es el tiempo de reacción.

C_{AA0} , es la concentración inicial de ácido acético.

dx , es el diferencial de la conversión en la reacción.

$-r_a$, es la velocidad de la reacción.

La velocidad de reacción se dio por la ecuación 4, lo cual llevaba a definir las concentraciones del ácido acético y del hidróxido de sodio de acuerdo con lo definido por Graff y otros, las cuales se establecen relacionando la conversión con las concentraciones iniciales de cada reactivo, se usa como indicador de intercambio de hidroxilos el volumen de hidróxido de sodio utilizado, por lo tanto, las concentraciones finales de los reactivos quedan expresados por la Ecuación 6 y 7.

Ecuación 6. concentración final del ácido acético.

$$C_{AA} = C_{AA0} - C_{ROH0}X$$

Ecuación 7. concentración final del hidróxido de sodio.

$$C_{ROH} = C_{AA0}(1 - X)$$

Donde,

C_{AA0} , es la concentración inicial de ácido acético.

C_{ROH0} , es la concentración inicial del hidróxido de sodio.

⁷⁸ Dahm, K.D.; Vlscio, D.P. Fundamentals of Chemical Engineering Thermodynamics. Cengage Learning, 2014.

Sustituyendo la ecuación 6 y 7 en la ecuación 5, la ecuación del tiempo de reacción se define por la ecuación 8.

Ecuación 8. Tiempo de reacción.

$$t_r = C_{AA0} \int_0^x \frac{dx}{K C_{ROH0} (1 - X) (C_{ROH0} - C_{AA0} X)} \quad V = \text{constante}$$

Reemplazados los valores para una conversión del 15%, se obtuvo un tiempo de reacción de 642.65 segundos o 11 minutos.

Para el tiempo total de residencia del reactor batch se tiene la ecuación 9, en donde se tienen en cuenta el tiempo de la reacción y el tiempo muerto, este último es el tiempo de servicio del reactor en donde se tiene en cuenta el tiempo de carga, descarga y limpieza.

Ecuación 9. Tiempo de residencia de la sustancia en el reactor.

$$t_{batch} = t_r + t_c + t_d + t_l$$

Donde,

t_{batch} , es el tiempo total de residencia del reactor.

t_r , es el tiempo de reacción.

t_c , es el tiempo de carga de los reactivos.

t_h , es el tiempo de calentamiento de la mezcla.

t_l , es el tiempo de descarga y limpieza del reactor

Los tiempos de carga, calentamiento, descarga y limpieza fueron entregados por los procesos externos a la reacción el tiempo de carga, se refiere al tiempo en el que el operario ingresa la materia prima al reactor y se inicia el proceso de mezclado, el tiempo de calentamiento se refiere al tiempo donde que se tarda el reactor en acondicionarse a la temperatura indicada para el proceso. El tiempo de descarga de la mezcla se realizó después de que ocurra la reacción y se desocupó el volumen del reactor unido con el tiempo de limpieza del reactor donde se eliminaron las trazas de la mezcla reactante.

Para calcular este tiempo muerto se decidió usar los tiempos planteados por Fogler⁷⁹, en donde establece un rango de tiempos para cada uno de los procesos mencionados anteriormente, estos tiempos se describen en el cuadro 18.

Cuadro 18. Tiempos de ciclos representativos para un proceso por lotes.

⁷⁹ FOGLER, Scott.; RAMIREZ LOPEZ, Roman. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. Cuarta edición. Michigan: Pearson Education. 2008. 1120 p.

ACTIVIDAD	TIEMPO (h)
Carga de los reactivos al reactor.	1.5 - 3
Calentamiento o acondicionamiento del reactor.	1 - 2
Tiempo de reacción	VARIABLE
Descarga y limpieza del reactor	0.5 - 1
Tiempo total de reacción	3 - 6

Fuente: Elaboración propia.

Se usaron los valores mínimos de tiempo para el proceso, los tiempos de producción, reemplazando los valores seleccionados en la ecuación 9, para un tiempo total de proceso de 6 horas por ciclo de producción de acetilación del almidón, sin embargo, este tiempo es una sugerencia para el proceso ya que puede variar según las necesidades del proceso.

Para hallar el volumen del reactor se trabaja con la ecuación 10, la cual relaciona la producción deseada con la producción que se puede generar a la salida del reactor y la producción que ocurre durante la reacción de la acetilación

Ecuación 10. Volumen del reactor.

$$V = \frac{P_D}{P_V}$$

Donde;

V es el volumen del reactor

PD es la producción deseada (moles/tiempo); para convertirlo en otras unidades utiliza el PM del compuesto deseado.

PV es la producción por unidad de volumen (moles/volumen*tiempo)

La producción deseada fue determinada por el proceso o la cantidad necesaria a producir, la cual fue de 1000 g / día de almidón nativo a modificar, la producción por unidad de volumen toma en cuenta el tiempo completo de operación del reactor, concentración inicial del ácido acético, y la conversión que se tomó para determinar el tiempo de reacción quedando así la ecuación 11 donde se determina el volumen del reactor.

Ecuación 11. Volumen del reactor.

$$V = \frac{P_D}{\frac{X * C_{AAo}}{t_{batch}}}$$

Donde;

C_{AA0} , es la concentración inicial del ácido acético.

t_{batch} , es el tiempo total de operación del reactor.

X, es la conversión de la reacción con la que se determinó el tiempo de residencia.

Reemplazando los valores en la ecuación 11, se obtiene un volumen de 5.0925 litros. Con el volumen obtenido por la ecuación 11 se dimensionó el reactor, para este fin se utiliza la heurística denominada nivel L⁸⁰, la cual brinda una relación la altura y el diámetro en una proporción 2:1, esta relación está dada por la ecuación 12, además se realizó una consideración adicional que el volumen útil del reactor es del 85% ⁸¹del volumen total del tanque en forma cilíndrica dando un factor de seguridad del 15%. Con la información anterior se halló las dimensiones del tanque (de forma cilíndrica), utilizando el volumen hallado en la ecuación 11. Y La ecuación 13.

Ecuación 12. Heurística nivel I

$$h = \frac{1}{2}D$$

Ecuación 13. Dimensionamiento del reactor.

$$V = 0,85 * \frac{\pi * D^3}{8}$$

Donde;

V, es el volumen del reactor.

D, es el diámetro del reactor.

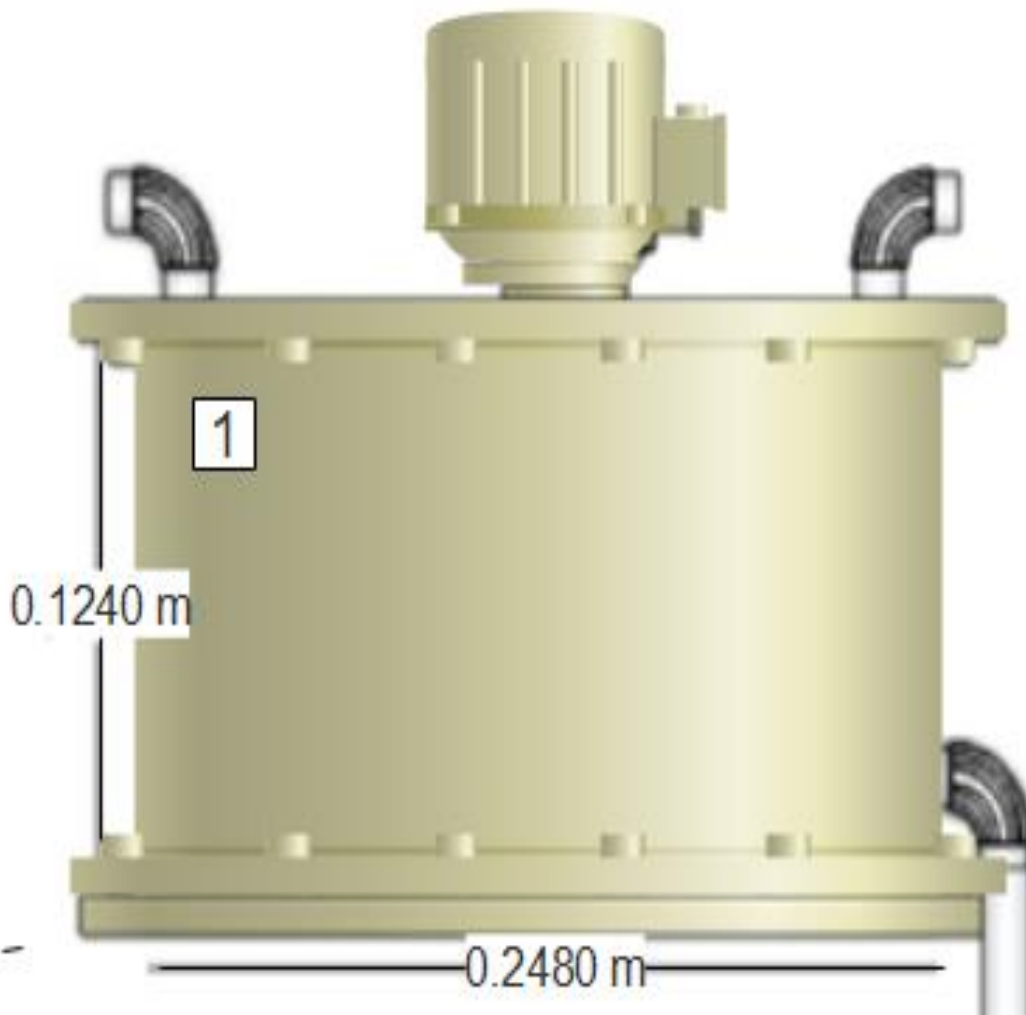
h, es la altura del reactor.

Al sustituir los valores se obtiene un diámetro del reactor con unas dimensiones de 1.7869 m y una altura de 0.8934 m, como se muestra en la gráfica 11.

⁸⁰ ALVAREZ, Hernán. Diseño Simultáneo de Proceso y Control. Uso de efectos dinámicos en Ingeniería de Procesos. Tesis para año Sabático. Medellín. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010, pp. 101- 150.

⁸¹ BEQUETTE, W. Behavior of a CSTR with a recirculating jacket heat transfer system. En: Proceedings of American Control Conference. Vol. 30, No. 7(2002), pp. 1391-1413.

Gráfica 1. Reactor batch para el proceso de acetilación



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2 Separador centrífugo (ciclón). Este equipo usa la fuerza centrífuga para realizar separaciones de sólidos en líquidos ya que, por su simplicidad, eficiencia alta en su operación y sus bajos costos de operación, son ideales para sustancias para un tamaño de partícula superior a 5 micras⁸².

⁸² LAZALDE-CRABTREE, H.; BUENDÍA, E. Manual de Diseño de Equipo Geotérmico de Superficie. Reporte final del proyecto titulado "Estudio de los parámetros de diseño para separadores de vapor y silenciadores de un campo Geotérmico", México. Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1982, pp, 20-45.

Este tiempo de separadores debe tener una entrada en espiral o tangencial, circular o con un cambio en su sección transversal esta entrada debe tener inclinación de cerca de 4°, ya que así hará fluir la mezcla con mayor rapidez⁸³.

El proceso para realizar un diseño de un separador centrífugo está dado por los siguientes pasos:

1. Seleccionar el tipo de ciclón dependiendo del funcionamiento requerido.
2. obtener un estimativo del tamaño de partícula estimativo en la corriente a ser tratada.
3. Calcular el diámetro del ciclón para una velocidad estándar de 22 m/s, determinando así las otras dimensiones del ciclón.
4. Estimar el número de ciclones.
5. Calcular la eficiencia del ciclón y si se requiere elegir otro tipo de ciclón.
6. Calcular la caída de presión y si se requiere elegir otro tipo de ciclón.

Los separadores de acción centrífuga tienen como parámetros de diseño el diámetro del ciclón, la caída de presión y la velocidad de entrada, estos valores ya están predefinidos, los cuales se mostrarán en el cuadro⁸⁴.

Cuadro 19. parámetros de diseño para ciclones.

PARÁMETRO	VALOR
DIÁMETRO DEL CICLÓN	< 1.0
CAIDA DE PRESION	< 2488,16 Pa
RELACIÓN DE VELOCIDADES	<1,35
VELOCIDAD DE ENTRADA	15,2 - 27,4 m/s

Fuente: Elaboración propia.

Las partículas del almidón de papa son menores a 0.08 mm por lo tanto se hace necesario un ciclón de alta eficiencia, estos ciclones están diseñados para alcanzar una mayor remoción de partículas pequeñas que los ciclones convencionales, logrando alcanzar una eficiencia en la remoción del 90% de los cuales existen 3 tipos el Stairmand, Swift y Echeverri, las características de estos ciclones se dan a continuación en el cuadro 20.

⁸³ GLASSLEY, W., Geothermal Energy, Renewable Energy and the Environment. Segunda edición. Estados Unidos: CRC Press. 2014. 423 p.

⁸⁴ ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos. Diseño óptimo de ciclones. En: Revistas de Ingenierías Universidad de Medellín. Vol. 5. No. 9. (2006). Pp. 124 - 139.

Cuadro 20. Características de ciclones de alta eficiencia.

Dimensión	stairmand	swift	echeverri
diámetro de ciclón (m)	1.0	1.0	1.0
altura de entrada (m)	0.5	0.44	0.5
ancho de entrada (m)	0.2	0.21	0.2
altura de salida (m)	0.5	0.5	0.625
diámetro de salida (m)	0.5	0.4	0.5
altura parte cilíndrica (m)	1.5	1.4	1.5
altura parte cónica (m)	2.5	2.5	2.5
altura total del ciclón (m)	4.0	3.9	4.0
factor de configuración	551.22	698.65	585.71
número de cabezas de velocidad (m)	6.4	9.24	6.4

Fuente: Elaboración propia.

Los ciclones Stairmand y Swift son los que se usan en mayor proporción en la industria cuando se necesita un ciclón de alta eficiencia⁸⁵, se hace el diseño con las características de un ciclón de tipo stairmand y se propone una velocidad de entrada de 21,5 m/s y un caudal de 3,5 m³/s, las cual está entre el rango de las velocidades estipulado en el cuadro 19. Con estos valores se puede determinar el diámetro del ciclón y otras dimensiones con las relaciones características de las familias de reactores, se debe primero hallar el área del ciclón con la relación de caudal que se muestra en la ecuación 14.

Ecuación 14. Relación de caudal.

$$A = \frac{Q}{V}$$

Donde:

Q, Es el caudal de entrada.

V, es la velocidad de entrada al ciclón.

A, es el área del ducto de entrada del ciclón.

⁸⁵ Ibid., p. 128.

La geometría del ducto de entrada está definida por la ecuación 15, donde el área del ducto es de $0,1628 \text{ m}^2$, la cual se halló con la ecuación 14.

Ecuación 15. Geometría del ducto de entrada.

$$AREA \ DEL \ DUCTO \ DE \ ENTRADA = a * b$$

Donde:

a, es la altura del ciclón y se relaciona con el valor de la característica del ciclón descrito en la tabla 13.

b, es el ancho de entrada del ciclón y se relaciona con el valor de la característica del ciclón descrito en la tabla 13.

Reemplazando los datos anteriormente dichos se obtiene el diámetro del ciclón, mediante la ecuación 10.

Ecuación 10. Diámetro del ciclón.

$$0,5 D * 0,2 D = 0,1628 \text{ m}^2$$
$$D = \sqrt{\frac{0,1628}{0,5 * 0,2}} = 1,2760 \text{ m}$$

Teniendo el diámetro se pueden hallar las medidas restantes multiplicando el diámetro encontrado en la ecuación 10 con las proporciones propuestas en el cuadro 20 por Stairmand.

Altura de entrada al ciclón (a):

$$a = 0,5 * D$$
$$a = 0,5 * 1,2760 \text{ m} = 0,638 \text{ m}$$

Diámetro de entrada al ciclón (b):

$$b = 0,2 * D$$
$$b = 0,2 * 1,2760 \text{ m} = 0,2552 \text{ m}$$

Altura de salida del ciclón (S):

$$S = 0,5 * D$$
$$S = 0,5 * 1,2760 \text{ m} = 0,638 \text{ m}$$

Diámetro de salida del ciclón (Ds):

$$Ds = 0,5 * D$$
$$Ds = 0,5 * 1,2760 \text{ m} = 0,638 \text{ m}$$

Altura parte cilíndrica del ciclón (h):

$$h = 1,5 * D$$
$$h = 1,5 * 1,2760 \text{ m} = 1,914 \text{ m}$$

Altura total del ciclón (H):

$$H = 4,0 * D$$

$$H = 4,0 * 1,2760 \text{ m} = 5,104 \text{ m}$$

Altura parte cónica del ciclón (z):

$$z = 2,5 * D$$

$$z = 2,5 * 1,2760 \text{ m} = 3,19 \text{ m}$$

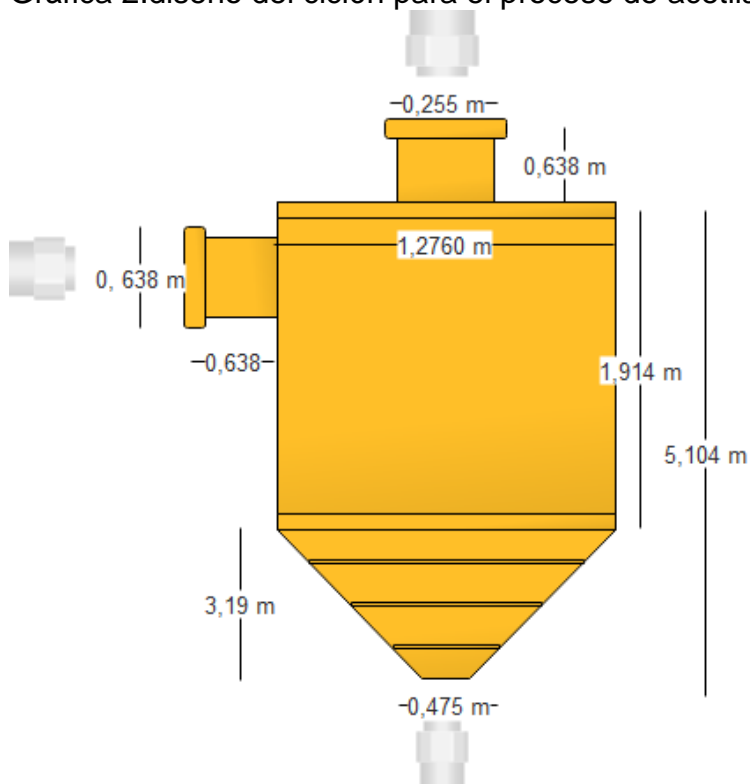
Diámetro salida del polvo (B):

$$B = 0,375 * D$$

$$B = 0,375 * 1,2760 \text{ m} = 0,4785 \text{ m}$$

La estimación del número de ciclones se da si el valor del diámetro es menor a un metro, ya que el valor que nos arrojó el diámetro del ciclón es mayor al parámetro establecido solo se requiere un ciclón simple. Sin embargo, como manifiesta Echeverri⁸⁶, este parámetro de diseño es una recomendación mas no una imposición de operación, por tanto, el diseño del separador centrífugo queda conforme se muestra en la figura 12.

Gráfica 2. diseño del ciclón para el proceso de acetilación.



Fuente: Elaboración propia.

⁸⁶ Ibid., p. 130.

4.1.2.3 Horno de bandejas. La operación de secado es una operación unitaria de transferencia de masa entre sólido-gas, donde el líquido contenido en el sólido se evapora con base en la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa cuando estas dos presiones se igualan. El objetivo final de un proceso de secado es la remoción de agua de un sólido hasta un nivel en donde el crecimiento microbiológico (la actividad microbiológica se detiene a niveles de humedad inferiores al 10%⁸⁷) y la deterioración por reacciones químicas sean mínimas.

La velocidad y uniformidad del secado son dos factores importantes que afectan la calidad del proceso, evitar pérdidas innecesarias de material, además de ello para que un proceso de secado sea eficiente se debe utilizar el mínimo de energía.

En la actualidad existen dos tipos de secadores los directos y los indirectos; Los secadores directos se logra a través de un contacto directo entre los sólidos húmedos y los calientes, el líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación, es decir con los gases calientes; Los secadores indirectos el calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared que retiene el calor y la velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y la superficie caliente.

A nivel experimental se usó un secador indirecto de tipo bandejas, es el más antiguo y el más utilizado en la actualidad, ya que la construcción de estos equipos es más barato, además pueden ser desarrollados para trabajos al vacío o para permitir una circulación normal o forzada, en estos equipos se utilizan flujos transversales de 2 a 5 m/s y para flujos ascendentes de 0,5 a 1,25 m/s en cada bandeja, por lo tanto se decide usar el mismo tipo de secado para el diseño a nivel piloto.

El diseño del secador se llevará a cabo con las ecuaciones desarrolladas para la cinética del secado⁸⁸, donde los parámetros se extraen de la experiencia experimental, el primer paso del diseño es calcula la humedad en base seca descrita en la ecuación 16.

Ecuación 16. Humedad en base seca.

$$x = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{P_{SS}}$$

Donde:

X = Humedad.

PSH = Peso del sólido húmedo.

⁸⁷ ARTEAGA, M.H, RODRÍGUEZ, Z.H. y SICHE, J.R., Optimización del secado de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Canchán utilizando un secador que opera con briquetas de carbón antracita. En: Encuentro Científico Internacional, Lima, Perú, Jul 2005.

⁸⁸ ORTIZ ALFARO, Betsabe S. Secado con bomba de calor para la deshidratación de frutos. Tesis de pregrado. Puebla. México: Universidad de las américas pueblas. 2010. Pp. 35 - 62

PSS = Peso del sólido seco.

A nivel experimental el peso del sólido húmedo tuvo un valor promedio de 61,15 g y el peso sólido seco de 32,4131 g, por lo tanto, la humedad en base seca es de 0,8866 (88,66 %).

La materia prima que teóricamente entra al proceso de secado es de 1496,7 g/día, esto se obtuvo con el balance de masa que se obtuvo en el capítulo 4, para el proceso del diseño se usa el diagrama de flujo propuesto por Siche y otros⁸⁹, donde se desarrolla un algoritmo para el diseño de un secador con los siguientes parámetros definidos, velocidad del aire 3 m/s, tiempo de secado de 10,3 h, espesor de producto de 2 cm y un área de succión de aire de 75 m².

Luego de obtener la humedad se debe calcular la energía requerida por el secador por medio de la ecuación 17.

Ecuación 17. Energía requerida por el secador.

$$Q = 10256,4 * m_p + 447,98 * m_p * x$$

Donde:

Q, es la energía requerida por el secador (kJ /H).

m, es la materia prima (kg/H).

x, es la humedad en base seca.

La energía requerida para el secado del almidón modificado es de 827,7830 kJ/h.

El volumen de la cámara está dado por la ecuación 18.

Ecuación 18. Volumen de la cámara de secado.

$$V = 0,0245 * m_p + 0,00102 * m_p * x$$

Donde:

V es el volumen de la cámara de secado (m³).

m es la materia prima (kg/h).

x es la humedad en base seca.

el volumen de la cámara de secado para la producción de almidón modificado es de 0,001974 m³.

El caudal de aire de secado está dado por la ecuación 19.

Ecuación 19. Caudal de aire de secado.

$$\theta = 1,019 * m_p + 0,0425 * m_p * x$$

⁸⁹ SICHE Raúl. Et al. Diseño de un secador de bandejas prototipo que opera con briquetas de carbón (antracita). En: V Congreso iberoamericano de ingeniería de alimentos. Vol. 4. Art 32. Pp. - 1-6.

Donde:

Q es la energía requerida por el secador (m^3/h).

m es la materia prima (kg/h).

x es la humedad en base seca.

El caudal de aire seco necesario para que exista una transferencia de calor es de $0,08211 m^3/h$.

La potencia del ventilador de secado está dada por la ecuación 20.

Ecuación 20. Potencia del ventilador de secado.

$$HP = 0,0348 * m_p + 0,00145 * m_p * x$$

Donde:

Q es la energía requerida por el secador (HP).

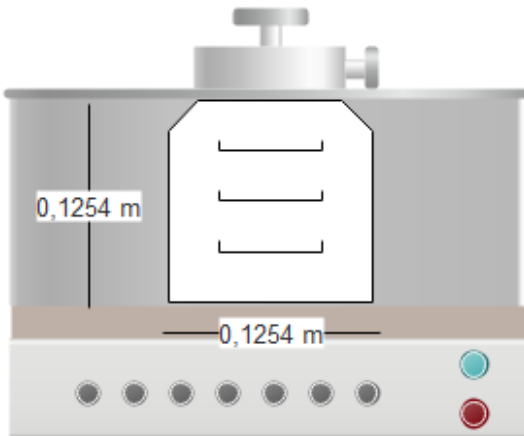
m es la materia prima (kg/h).

x es la humedad en base seca.

La potencia el ventilador para que se genere la energía del secador, y ocurra el secado en el tiempo propuesto es de $0,002804$ HP.

Las dimensiones y parámetros del secador de bandejas para secar $1496,7$ g/día de almidón de papa modificado con una humedad de $88,6\%$, queda que el volumen de las bandejas para el secado es de $0,0003145 m^3$, el volumen de secado es de $0,001974 m^3$; La grafica 3 muestra el diseño de horno de bandejas para la producción anteriormente mencionado.

Gráfica 3. Secador de bandejas.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.4 molino y tamiz. Este proceso unitario tiene como fin disminuir el tamaño de las partículas, este proceso se puede desarrollar en operaciones de baja escala (kilogramos por hora) hasta escala industrial (cientos de toneladas por hora). Este proceso se divide en tres tipos de molinos los que muelen grandes aglomerados denominados “crushers”, los que muelen tamaños de partículas medianos que se denominan “mills” y los que muelen tamaños de partículas pequeños llamados “grinders”⁹⁰, para cada tipo de molinos existen diversos equipos como los que se muestran en el cuadro 21.

Cuadro 21. tipos de molinos de acuerdo con el tamaño de partícula requerido.

rango de reducción de tamaño	de de	nombre genérico del equipo	tipo de equipo
grueso intermedio	e	molinos de grueso “crushers”	de molinos
intermedio y fino		molino de finos “mills o grinders”	<ul style="list-style-type: none"> ● de martillo. ● discos de atrición. ● de rodillos.
fino y ultrafino		molinos de ultrafinos “ultrafine grinders”	<ul style="list-style-type: none"> ● de martillos. ● de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de disminución de partícula se decide usar un molino de bolas, ya que fue el usado a nivel laboratorio, es eficiente al disminuir el tamaño de partícula y su mantenimiento es fácil, este tipo de molinos poseen una configuración única para cada tipo de proceso o necesidad, en cuanto a la obtención del tamaño de partícula deseado(ya que los molinos son equipos con una eficiencia cercana al 2%, ya que las pérdidas por calor de este equipo son muy grandes⁹¹), el equipo se diseñará para procesar 1000 g de material, con una velocidad de 500 rpm, las bolas pueden ser de acero o cerámica, este equipo tiene como eje principal un agitador de paletas, donde la energía rotacional es entregada a las bolas donde se convierte en energía de impacto, fricción y calor de este modo las partículas colisionan con las bolas fracturándose y disminuyendo su tamaño.

Con la energía de impacto, fricción y calor generada por el ciclo rotacional de las bolas se genera una amplitud de movimiento de 5 cm, una frecuencia de oscilación de 1200 Hz, lo cual produce una velocidad de impacto de las bolas de 5

⁹⁰ AUSTIN, L.G., TRASS O., Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment. Editado por Fayed, M. E., Otten, L., Chapman & Hall, New York: Handbook of Powder Science & Technology 1997. 634 p.

⁹¹ ORTEGA RIVAS, E., Handling and Processing of Food Powders and Particulars. En: “Encapsulated and Powdered Foods. Vol. 1.No. 1(2005), pp. 1-24.

m/s y una frecuencia de impacto alta por lo que son molinos de alta energía (generan calor residual) y de menor tiempo requerido para llevar a cabo la reducción de partícula.

El molino de bolas se compone por un motor impulsor (proporciona el movimiento para hacer girar la paleta giratoria, la cual le da la energía a las bolas para que colisionan y se produzca la disminución de partícula, la velocidad con la que trabaja el motor es de 500 rpm), contenedor (el cual almacena las bolas y el material a realizarle el tratamiento), cámara de refrigeración (extrae el calor del contenedor para así evitar cambios en la materia prima sometida a este proceso) y base de soporte.

Para el diseño del tazón hay dos tipos de relaciones de número de bolas y polvo para la capacidad de trabajo mencionada anteriormente que son 10:1 y 20:1⁹², sin embargo, Rivas y otros en su trabajo manifiesta que la relación que genera la menor cantidad de calor es 10:1 puesto que, a mayor número de bolas, mayor número de colisiones. Por lo cual la masa de las bolas se da por la ecuación 21.

Ecuación 21. Masa de las bolas del molino.

$$MASA\ BOLAS = \frac{masa\ de\ bolas}{masa\ de\ polvo}$$

Por lo tanto la masa de las bolas es de 10 Kg, teniendo la masa de las bolas se puede calcular el volumen mínimo del contenedor a través de la ecuación 22, esto está determinado por el volumen que ocupa las bolas y el espacio existente entre ellas dentro del tazón que Rivas y otros lo describe como el 38% del volumen total ocupado, al calcular el volumen mínimo se debe duplicar el valor del volumen obtenido para evitar la fricción excesiva, además de eso el diseño del contenedor tendrá forma cilíndrica y con los bordes redondeados con el fin de evitar que en las esquinas se acumule material.

Ecuación 22. Volumen mínimo del contenedor.

$$V = \frac{MASA\ DE\ BOLAS}{0,62 * \rho_{Material}}$$

Donde:

V es el volumen mínimo del contenedor.

P es la densidad del material en el que se quiere las bolas.

La densidad del material que se usará para construir las bolas es el acero inoxidable, y el volumen mínimo resultante de esto es de $2,01 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, ya que se debe duplicar este valor el volumen total del contenedor es de $4,02 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

Para las dimensiones mínimas del diseño del impulsor para transmitir la potencia del motor al contenido del tazón se trabaja el cálculo teniendo en cuenta que el eje

⁹² MAN O Lilo. Mechanical Alloying. Londres: Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 1-276

trabaja básicamente a torsión⁹³ como se indica en la ecuación 23; El valor de la torsión se halló considerando un valor de 1500 kW de potencia del motor, y una velocidad angular de 53 rad/s; Y el cálculo del esfuerzo admisible se realizó considerando un factor seguridad de 2 y un valor de límite elástico de 345 MPa que corresponde al material del acero inoxidable⁹⁴.

Ecuación 23. Valor mínimo de diámetro del impulsor.

$$d > \left[\frac{16 * T}{\pi * t} \right]^{1/3}$$

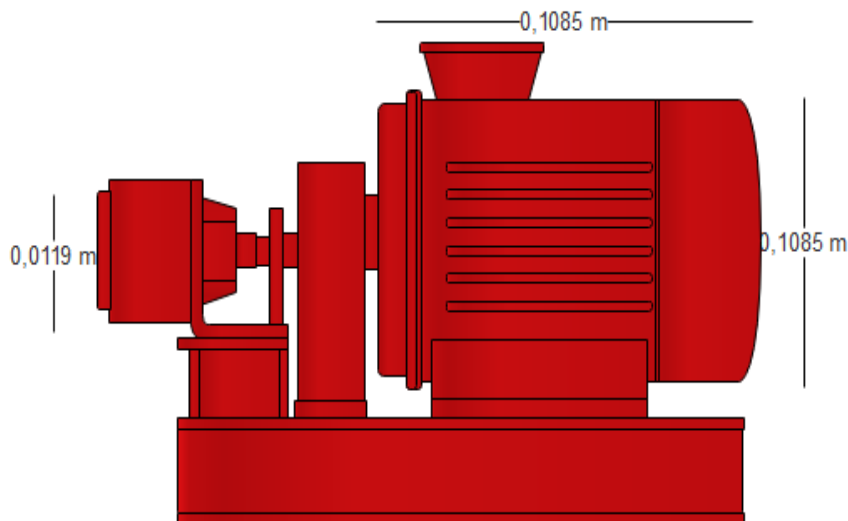
Donde:

T es el torque que debe ejercer el motor.

t es la torsión que necesita el sistema para funcionar.

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene que el diámetro debe ser mayor a 0,0119 m, para que soporte las condiciones de torsión el eje. El equipo estará equipado con una malla 50 de granos finos la cual asegurará el tamaño obtenido a nivel experimental ya que facilita homogeneización de las mezclas y su almacenamiento; El diseño del molino de bolas se muestra en la gráfica 4.

Gráfica 4. Molino de bolas.



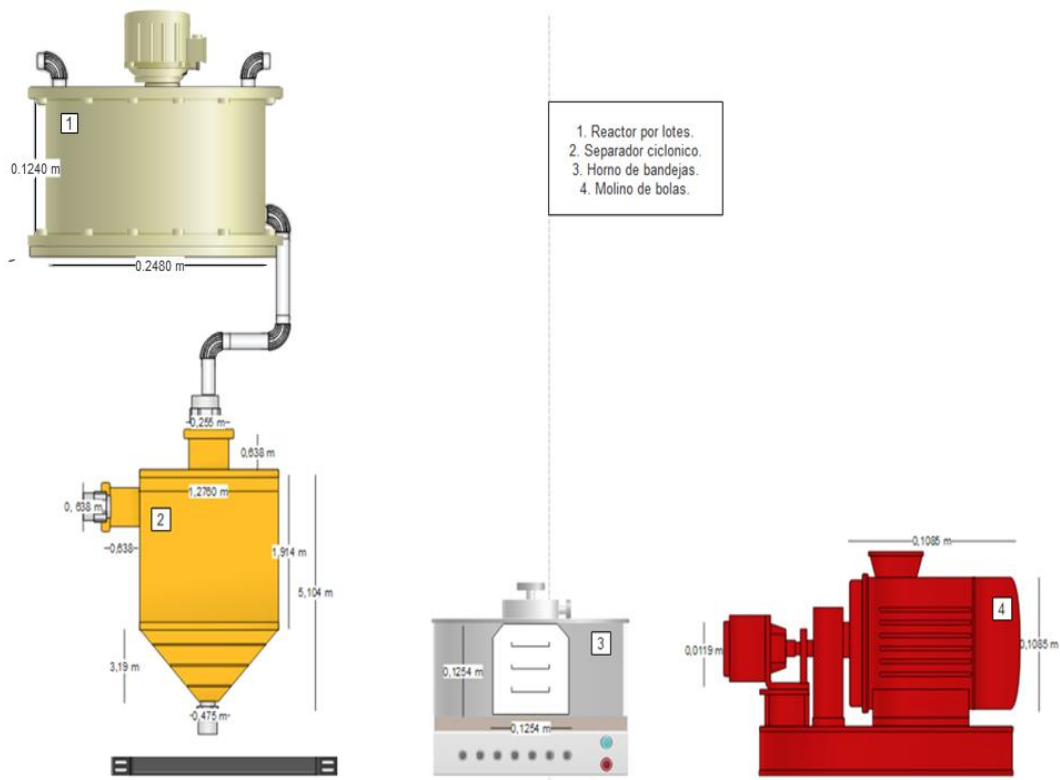
Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el proceso de la modificación de almidón a escala piloto se encuentra descrito en la Diagrama11.

Diagrama 6. Diagrama de los equipos para la modificación del almidón.

⁹³ ABD EL-RAHMAN M.K, B.K. MISHRA, R.K. Rajamani. Mineral Engineering.Vol. 14. No. 10(2001). Pp. 1321-1328

⁹⁴ NORTON R, Diseño de Máquinas, Tercera edición, México: Mc Graw-Hill, 1999, p. 759.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA OBTENCIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Para obtener el bioplástico se sigue el proceso descrito en el diagrama 7, donde se muestran las etapas para la obtención del bioplástico, se presentan las entradas y las salidas del proceso, con esto se definen los equipos que se necesitan para el proceso llevar a cabo el proceso a escala piloto descrito diagrama 12. Los equipos que se necesitan para este proceso son tanques de mezclado para las mezclas sólido-líquido o líquido-líquido, un reactor y un extrusor o secador de bandejas.

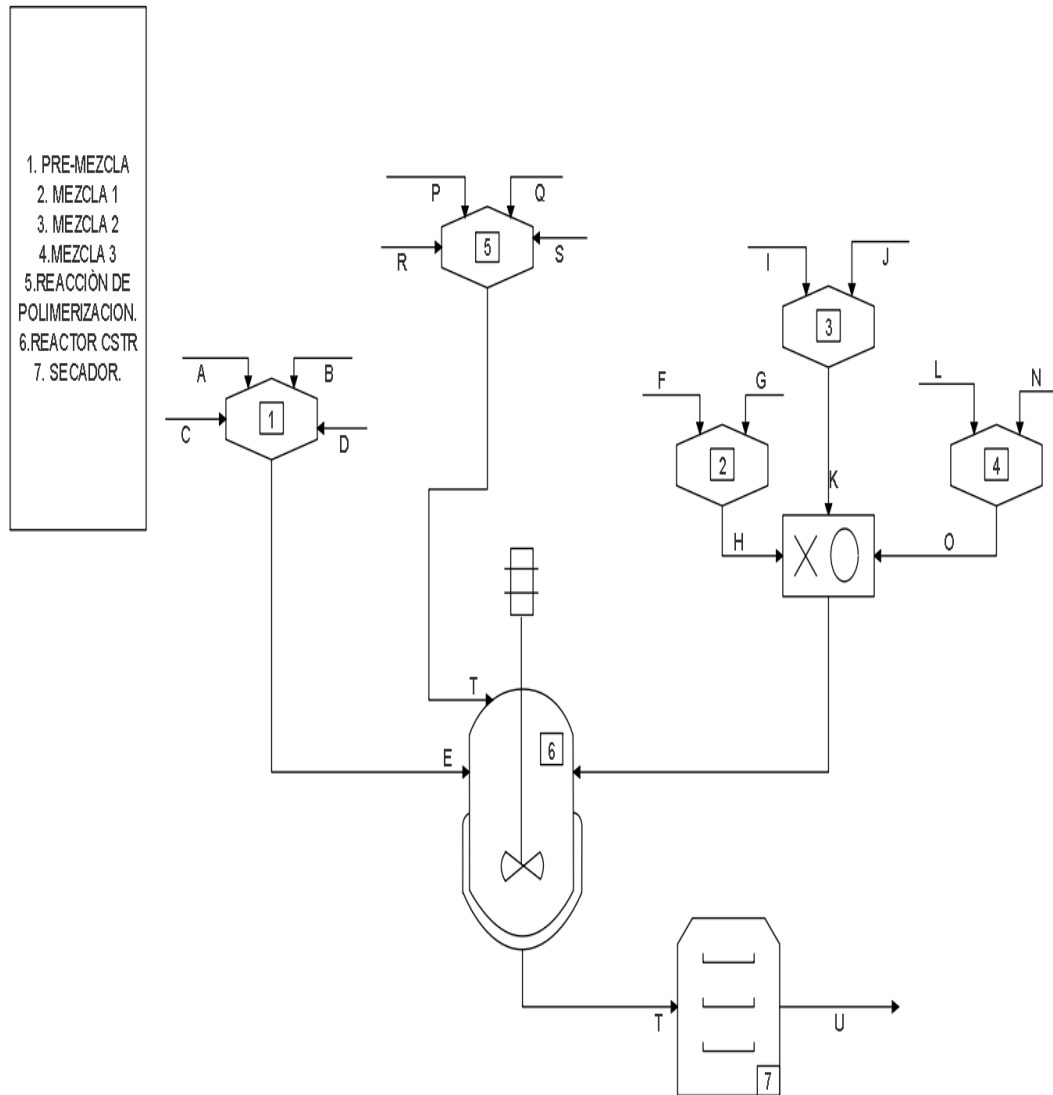
El reactor más adecuado para este proceso es un reactor batch ya que este reactor puede contener grandes volúmenes, tiempos de residencia prolongados además de que el sistema se puede mantener en estado estacionario con las condiciones de temperatura, nivel del tanque y presión constantes.

Los tanques de mezclado aseguran homogeneidad a los reactivos antes de verterlos en el reactor, son usados generalmente para mezclas líquidas o sólidas líquidas, estos tanques de mezclado solo tienen un control de nivel, ya que no se llevarán a cabo reacciones químicas, ni térmicas.

Por último, se usará un extrusor o un secador de bandejas el cual le dará la forma final al bioplástico bien sea en forma de pellet para un posterior uso o su forma

final de comercialización, esta operación mecánica se ejerce una presión o un empuje el cual lo hace pasar por un molde para lograr el producto final deseado.

Diagrama 7. diagrama de flujo del proceso de obtención de bioplástico.



Fuente: Elaboración propia.

Para este proceso se usará la totalidad del almidón modificado, teniendo en cuenta que el proceso tiene un rendimiento del 82%, por lo tanto, se usarán 820 g, para este fin se usarán los balances obtenidos en el literal 3.3.1, para desarrollar una proyección para la cantidad de bioplástico a producir, la proyección de la materia prima requerida queda expresada en la tabla 14 además que el promedio de la cantidad de insumos por entrada queda evidenciado en la tabla 13.

Tabla 13. Promedio de insumos necesarios para producir el plástico con un gramo de almidón modificado.

ETAPA	ENTRADA	PROMEDIO (g)
	A	1
	B	0,3029
	C	1,9915
	D	0,1005
MEZCLA 1	F	0,0756
	G	0,0153
MEZCLA 2	I	0,3098
	J	0,4974
MEZCLA 3	L	0,5887
	N	0,0999
REACCIÓN DE POLIMERIZACIÓN	P	0,5887
	Q	1,4923
	R	0,0151
	S	0,4974

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Proyección de insumos para la producción del bioplástico.

ETAPA	ENTRADA	PROYECCIÓN (g)
PRE-MEZCLA	A	820
	B	248,4038
	C	1633,0394
	D	82,4470
MEZCLA 1	F	62,0110
	G	12,5388
MEZCLA 2	I	254,0061
	J	407,8997
MEZCLA 3	L	482,7493
	N	81,8810
REACCIÓN DE POLIMERIZACIÓN	P	482,7493
	Q	1223,6991
	R	12,3616
	S	407,8997

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 equipos para el proceso de obtención del bioplástico.

4.2.1.1 Tanques de mezcla. Mezclar es una distribución al azar, de dos fases inicialmente separadas lo cual implica que se parte de dos fases para lograr un solo producto, los objetivos de mezclar sustancias son los siguientes:

- Mezcla de dos líquidos miscibles.
- Disolución de sólidos en líquidos.
- Dispersión de partículas finas en un líquido.
- Dispersión de dos fases no miscibles.

Para los tanques agitadores existen tres tipos de agitadores principales, los cuales se subdividen en dos según su montaje, los de tipo axial los cuales generan corrientes paralelas al agitador (hélice y paletas) y los de tipo radial los cuales generan corrientes de tipo tangencial o radial(turbina).

Durante el proceso experimental se evidenció que se necesitan realizar dos premezclas previas al iniciar el proceso de obtención del bioplástico las cuales son la glicerina con agua destilada y la goma xantan con agua destilada, estos mezcladores se agitan con agitadores de paletas plana, los cuales giran sobre un eje vertical. Estas paletas tienen un giro a velocidades moderadas en el centro del tanque, impulsando el líquido de forma radial, evitando el movimiento vertical a menos que las paletas tenga algún tipo de inclinación.

Para las dimensiones del tanque de agitación se obtiene por medio del volumen nominal el cual lo da las sustancias que se quieran mezclar, la primera mezcla que se debe tratar es la glicerina con agua la cual tiene un volumen nominal de 3 L, la segunda mezcla goma xantan y el agua con un volumen nominal de 0.5 L, para el diseño de estos mezcladores se toma en cuenta la heurística nivel L donde la relación diámetro/altura es 2 a 1, además de ello el tanque solo debe estar lleno entre el 85 y 75 %, adicionalmente debe tener la salida del tanque en la parte inferior del mismo.

Según la norma API 650 el factor de llenado es del 75%⁹⁵, para evitar derrames durante la mezcla, para las dimensiones del tanque agitador de las mezcla agua-glicerina es de un diámetro de 0,2218 m y una altura de 0,1109 m, para la mezcla goma xantan- agua las dimensiones del tanque de mezclado es de 0,1220 m de diámetro y 0,06103 m de altura, en los mezcladores por lo general se usan 4 deflectores, sin embargo este número puede variar según la naturaleza de la mezcla y la relación de la altura de líquido y el diámetro del tanque (H/D_t), donde esta relación para cada tanque de mezcla es de 1,34, en el cuadro 22, se muestra la cantidad de agitadores necesarios y la elevación del fondo según la relación establecida anteriormente.

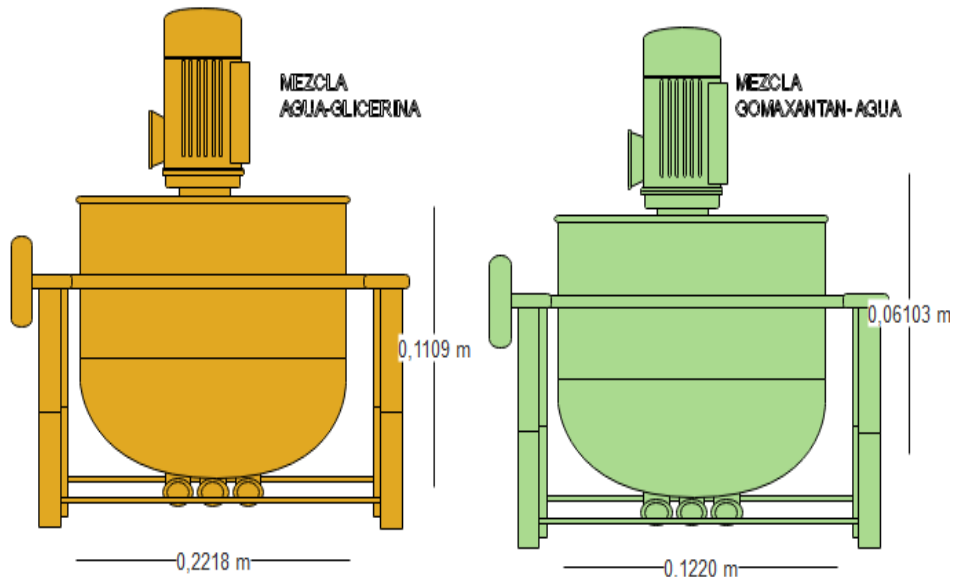
Cuadro 22. Número de agitadores requeridos

Mixing System	Maximum Liquid Height, Z/T	Number of Impellers	Impeller Elevation from Tank Bottom	
			Bottom	Top
Liquid blending	1.4	1	Z/3	—
	2.1	2	T/3	2 Z/3
Solids suspension	1.2	1	Z/4	—
	1.8	2	T/4	2 Z/3
Gas dispersion	1.0	1	T/6	—
	1.8	2	T/6	2 Z/3

Fuente: PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A., & KRESTA, S. M. Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. Primera edición, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004, p. 1352.⁹⁶

El resultado de este análisis es que para la mezcla glicerina- agua se necesitan unos agitadores con una elevación del suelo de 0,02772 m, para la mezcla goma xantán-agua se necesita un solo agitador con una elevación del suelo de 0,01144 m, obteniendo así una mezcla homogénea, este diseño se muestra en la gráfica 5.

Gráfica 5. Tanques de mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

⁹⁶ PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A., & KRESTA, S. M. Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. Primera edición, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004, p. 1352.

4.2.1.2 Reactor batch para la reacción de polimerización del almidón modificado. La reacción de polimerización o de cocción del almidón⁹⁷, es un proceso que depende de los elementos de agregación que posee el gránulo de almidón se establecer enlaces con los hidrógenos libres posterior a su modificación química, estos enlaces se establecen con materiales como etanol, glicerina, agua y alcohol isopropílico. La interacción de este tipo de elementos químicos con el almidón es de tipo polar al reaccionar con algunas sales de forma más veloz.

El almidón modificado mostró una temperatura de cocción o gelatinización de forma experimental entre 65 y 70°C, en donde la viscosidad de la mezcla incrementa quedando una pasta donde se denota la polimerización del mismo, según el trabajo desarrollado por Canónico y otros⁹⁸, esta reacción de polimerización es de cuarto orden, en donde con etanol, glicerina y agua se disuelven rápidamente con un tiempo menor a 20 minutos, lo cual no sucede con el alcohol isopropílico que tiene un tiempo de dilución superior a 30 minutos hasta una hora.

Para calcular el volumen del reactor, se escogió un reactor discontinuo ya que este tiempo de tanques cuentan con muchas facilidades de carga y descarga, además cuentan con relativas facilidades para conexiones con para la transferencia de calor con elementos como intercambiadores, serpentines, bafles, recirculación interna y externa, entre otros), que además en condiciones ideales la mezcla es totalmente homogénea.

Para el diseño de este reactor discontinuo se debe tener en cuenta que las reacciones de polimerización tienen como objetivo no producir en términos de tamaño molecular o conversión molar, sino en términos de dispersión de partículas la cual puede variar según el tipo de polimerización y el diseño del proceso.

Para analizar la dispersión de las partículas para la polimerización y hallar su cinética del almidón se debe desarrollar en tres partes denominadas como cocimiento, dispersión y cuantificación, donde se obtiene cuatro ecuaciones de velocidad de cuarto orden e irreversibles ya al iniciar la gelatinización del almidón (esto ocurre cuando se le da calor al grano de almidón).

Canónico propone el sistema de ecuaciones para el mecanismo de reacción para la polimerización del almidón que se muestra en la figura 23.

⁹⁷ CANONICO FRANCO, Marcia. Agregación en gránulos de almidón. Tesis de Doctorado. Querétaro. México: Universidad Autónoma de Querétaro. 2003. Pp. 10 – 81.

⁹⁸ Ibid., p. 68.

Figura 23. Mecanismo de reacción de polimerización del almidón.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}C_0[t] &= -k_1 C_0[t]^3 C_0[t] \\ \frac{d}{dt}C_1[t] &= k_0 C_0[t]^3 C_0[t] - k_1 C_1[t]^3 C_0[t] \\ \frac{d}{dt}C_2[t] &= k_1 C_1[t]^3 C_0[t] - k_2 C_2[t]^3 C_0[t] \\ \frac{d}{dt}C_3[t] &= k_2 C_2[t]^3 C_0[t] - k_3 C_3[t]^3 C_0[t] \\ \frac{d}{dt}C_4[t] &= k_4 C_4[t]^3 C_0[t] \end{aligned}$$

Con las ecuaciones descritas en la figura 23, se encontraron las constantes de velocidad de reacción y las respectivas energías de activación encontradas desde 61°C a 67°C, donde a 65°C, las constantes de velocidad se muestran en el cuadro 23, donde cada reacción que ocurre se va agregando gránulos de almidón conforme a la cantidad de elemento dispersante (etanol) y concentración de este.

Cuadro 23. Constantes de velocidad de reacción.

T (°C)	K0	K1	K2	K3
65	39,61	26,3	4199	58,25

Fuente: Elaboración propia.

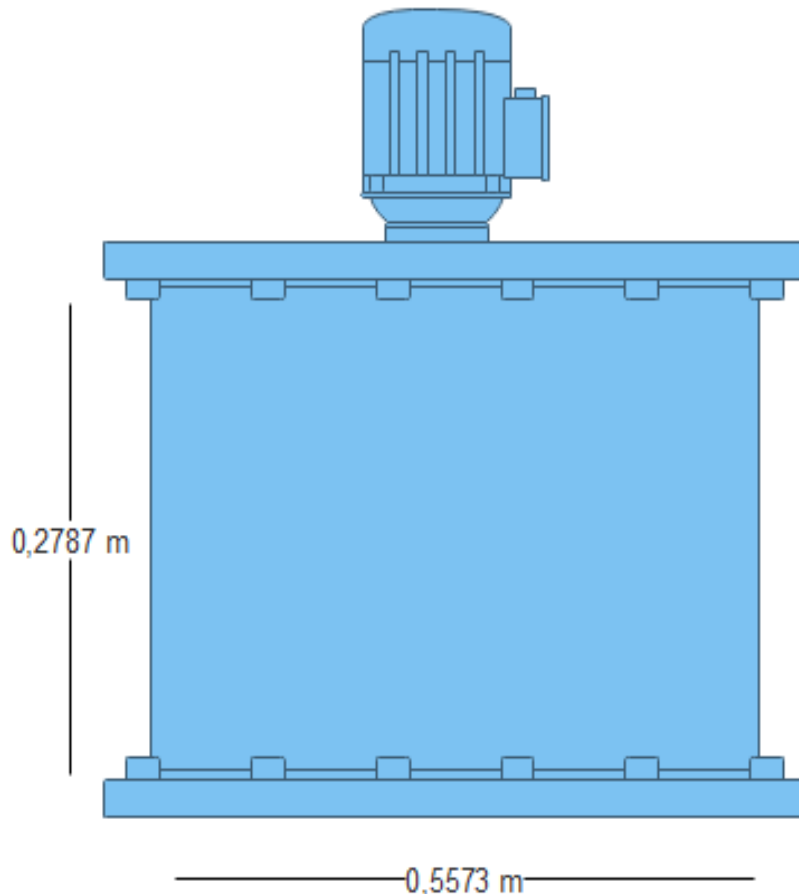
Para el tiempo de reacción con etanol y glicerina, Canónico y otros, expone que el tiempo de agregación (tiempo de reacción de polimerización) es de 6 a 15 minutos una temperatura no inferior de 67°C, lo cual concuerda con lo desarrollado a nivel experimental, donde la reacción de polimerización se llevó a cabo en un rango de temperatura entre 65 y 75°C, y al llegar a los 75°C la mezcla se empezó a solidificar en las partes donde se ponían en contacto con el material refractario, lo cual evidenciaba que la mezcla se estaba quemando, con lo que se concluyó que la temperatura máxima de polimerización debía ser inferior a los 75°C.

Teniendo el tiempo en el que se ejecuta la reacción de polimerización ya se puede hallar el tiempo de residencia con la ecuación 5, en donde el tiempo de carga de los reactivos es de 25 minutos dado por diagrama 6, para el tiempo de calentamiento se identificó a nivel laboratorio que para llegar a una temperatura de 70°C es de una hora, y el tiempo de limpieza también se calcula como una hora lo cual es lo estándar para materiales viscosos, por lo tanto el tiempo de residencia de la reacción es de 160 minutos, además de ello esta reacción se desarrolla con etanol absoluto que funciona como agente dispersor y se consume en su totalidad por lo que su conversión es del 100%.

Con estos datos se puede dar uso a la ecuación 6, con el fin de hallar el volumen del reactor para procesar 820 g/día de almidón modificado para obtener

bioplástico, resultando un volumen de 68 litros. Adicionalmente se usa la Heurística nivel L y un factor de seguridad del 85% con el fin de establecer las dimensiones del reactor, resultando un diámetro 0,5573 m y una altura de 0,2787 m, con un agitador de aspas, así como se muestra en la gráfica 6.

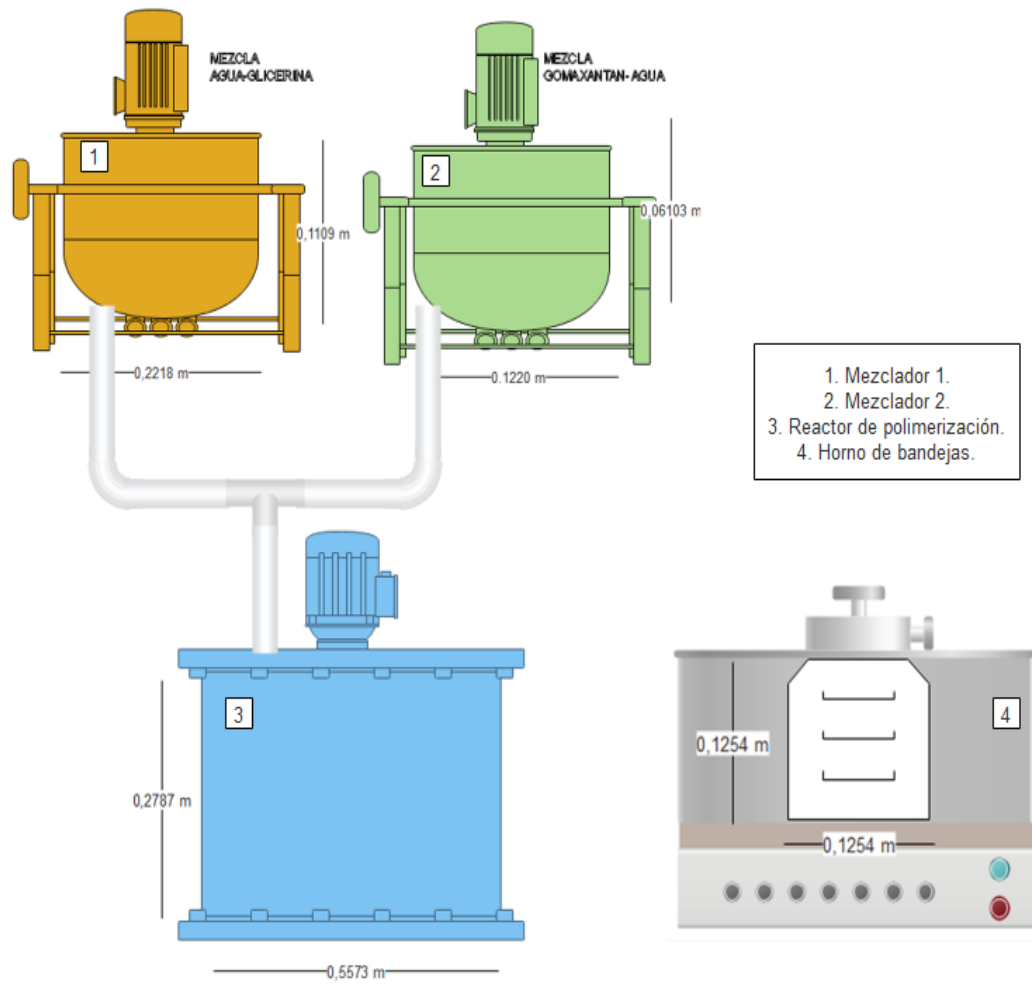
Gráfica 6. Dimensionamiento del reactor para la obtención del bioplástico.



Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de obtención del bioplástico es necesario un secador de bandejas, por tanto se decide usar el mismo secador diseñado en el literal 4.1.2.3., para el secado del almidón modificado, ya que a nivel experimental se usó el mismo secado de bandejas para secar la película del bioplástico, sin embargo se tendría que analizar si es posible usar las mismas bandejas ya que a nivel experimental las que mejor resultado dieron fueron las bandejas de acrílico, teniendo ya los equipos necesarios para desarrollar el proceso el diagrama de flujo con equipos quedaría como se muestra en la diagrama 13.

Diagrama 8. Diagrama de flujo con equipos del proceso de obtención del bioplástico.



Fuente: Elaboración propia.

5. DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS Y LA VIABILIDAD DE LA OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO, POR MEDIO DEL INDICADOR FINANCIERO VPN

En el presente capítulo se determinan los costos y la viabilidad financiera de la propuesta para la obtención de un bioplástico como teniendo como materia prima el almidón de papa modificado. Para este trabajo se tienen en cuenta los costos directos entre los que se muestran los costos de los equipos, los costos de los insumos y el costo del personal.

5.1 COSTOS DIRECTOS

5.1.1 Costos de equipos. Las cotizaciones de los equipos se llevaron a cabo por vía telefónica con la empresa Directindustry, la cual es una empresa fabricante e importadora de equipos industriales; Los costos de los equipos para el proceso de acetilación y obtención del bioplástico indicados en los literales 3.1.1. Y 3.2.1. Se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Costos de los equipos.

EQUIPO	VALOR (\$ COP)	CANTIDAD	TOTAL (\$COP)
Reactor Batch 5 -10 I	2.714.000	1	2.714.000
Separador Ciclón	2.637.700	1	2.637.700
Horno de bandejas	1.861.200	1	1.861.200
Molino de bolas con tamiz	3.102.000	1	3.102.000
Mezcladores (3L y 1L)	775.500	2	1.551.000
Reactor Batch 10 - 20 L (de laboratorio)	5.893.800	1	5.893.800
Costo total de los equipos			17.759.700

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Costo de los insumos. Los costos de los insumos requeridos para el proceso se establecieron por medio de las cotizaciones realizadas por la empresa CIMPA S.A.

Estos costos están determinados por la cantidad necesaria para cada proceso y la proyección que se hizo en la Tabla 12, para el proceso de acilación y en la tabla 14, para el proceso de obtención del bioplástico, estos costos se plasman en la tabla 16.

Tabla 16. Costos de insumos requeridos.

reactivo	valor unitario kg (\$ cop)	cantidad (kg)	total (\$ cop)
agua destilada	3250	2,4990	8.121,75
ácido acético	6900	0,006225	42,9525
hidróxido de sodio	32000	0,1312	4.200
almidón nativo	4500	1	4.500
ácido clorhídrico	23500	0,0297	697,95
acetato polivinilo	12500	0,2485	3.106,25
hidroxietil celulosa	24000	0,08245	1.978,8
cloruro de sodio	9000	0,06201	558,09
ácido bórico	4700	0,01254	58,938
glicerina usp	14500	0,2540	3.683
aceite mineral	8600	0,08188	704,168
agua destilada	3250	3,6725	11.935,625
etanol	47000	0,9654	45.373,8
TOTAL			84.961,3235

Fuente: Elaboración propia.

Este valor total es el de una producción de un día y se asume que semanalmente se lleva a cabo dos procesos de producción, por tanto, mensualmente el valor de insumos es de \$ 679.690,588 COP.

5.1.3 Costos de personal. Teniendo en cuenta que para la producción de un lote de producto se necesita un solo operario además de los valores establecidos por el ministerio de trabajo para 2018; Se determinó el costo del personal en la tabla 17.

Tabla 17. Costo de personal

rubro	mensual (\$ cop)	anual (\$ cop)
SALARIO MÍNIMO	781.242	9.374.904
AUXILIO TRANSPORTE	88.211	1.058.532
APORTE A PENSIÓN	93.749	1.124.988
APORTE A SALUD	66.406	796.867
ARL (CUATRIMESTRAL)	33.984	135.936
CAJA COMPENSACION	31.250	374.996
DOTACIÓN (ANUAL)	NO APLICA	290.000
VACACIONES (ANUAL)	NO APLICA	434.727
PRIMA (ANUAL)	NO APLICA	869.453
CESANTÍAS	NO APLICA	869.453
INTERÉS CESANTÍAS	NO APLICA	104.334
TOTAL	1.094.842	15.434.190

Fuente: Elaboración propia.

Los costos directos totales para el primer mes de operación están dados por la ecuación 24:

Ecuación 24. Costos directos totales.

$$COSTOS_{directos\ totales} = COSTOS_{equipos} + COSTOS_{insumos} + COSTOS_{personal}$$

$$COSTOS_{totales} = \$20.666.168,59$$

5.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos de producción hacen referencia a los implementos y servicios que se necesitan para poner en marcha el proceso y que no intervienen de forma directa en el proceso, por lo que esos costos se toman fijos durante todo el proceso. Los equipos descritos en el capítulo 4 usan corriente eléctrica y agua,

por lo tanto, no es necesario contar con una línea de gas natural, los costos indirectos se expresan en la tabla 18.

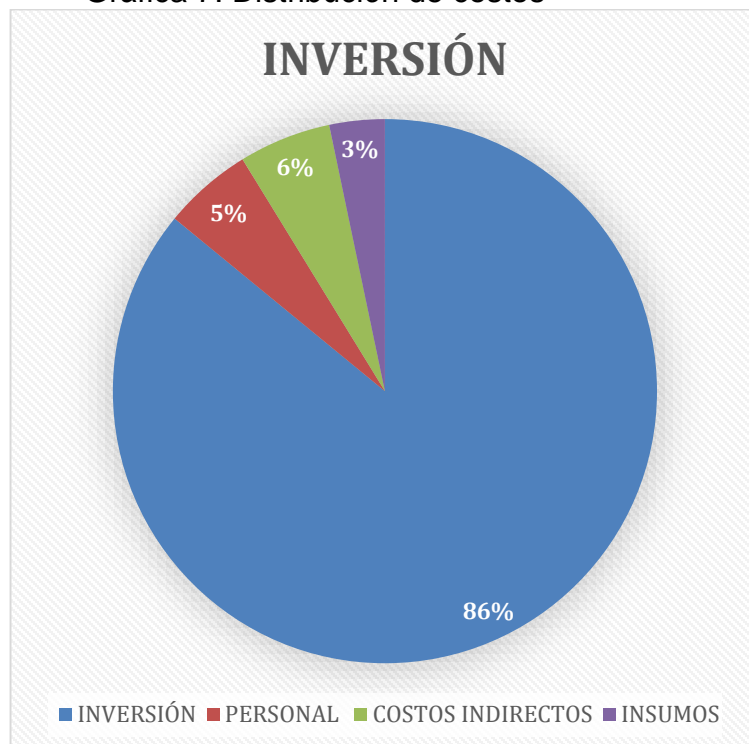
Tabla 18. Costos indirectos de producción.

servicio	valor unitario (\$ cop)	total/día	total/mes	costo anual (\$ cop)
agua	4.264,86	34.118,88	1.023.566,4	12.282.796,8
luz	451.54	3.612,12	108.369,6	1.300.435,2
implementos de seguridad	126.000	-	-	126.000
total		37.731	1.131.936	13.709.232

Fuente: Elaboración propia.

El proceso requiere para iniciar una inversión inicial de \$ 20.666.168,59 COP, entonces un 86% de ese valor corresponde a la inversión por parte de los equipos, mientras que los costos de materia prima son el porcentaje más bajo en la distribución de costos, como se muestra en la gráfica 7.

Gráfica 7. Distribución de costos



Fuente: Elaboración propia.

5.3 FLUJO DE CAJA

Se realiza un balance anual del proyecto en el cual se tiene una demanda anual de 500 kilos del bioplástico y este se vende en \$100.000 COP el kilo donde esta oferta de producto solo abarca el 0.4% de la demanda que a la fecha se acerca a las 2.2 millones de toneladas a nivel mundial, en donde américa latina aporta el 5% de este valor, según lo indica el centro español de plásticos⁹⁹, los costos en la operación están dados por los costos indirectos, el costo del personal y el costo de la materia prima.

Adicional a esto para la variación del costo de los servicios públicos se hace un promedio del IPC que presenta el país los últimos cinco años (2013-1.94%; 2014-3.66%; 2015-6.77%; 2016-5.75%; 2017-4.09%), donde se presenta un incremento de 4.44%, para los costos de la materia prima y el precio de venta al público se decide aplicar este mismo porcentaje de alza; Para el salario de los operarios se realizó un promedio de los últimos cinco años en los que incremento el salario mínimo del país (2013-4.02% ;2014-4.50%; 2015-4.60% ;2016-7%;2017-5.9%), obteniendo así un aumento promedio del 5.2%.

Para los equipos el decreto 3019 de 1989 manifiesta que los bienes muebles, maquinaria y equipo, trenes, aviones y barcos tienen una vida útil de 10 años, por lo tanto, la depreciación de los equipos es del 10% anual del valor adquirido ya que la depreciación de toma de forma lineal. Además, se tiene en cuenta que para la adquisición de los equipos y demás costos de operación se hace un préstamo con una entidad bancaria a un tiempo de 5 años la cual ofrece una tasa de interés efectiva anual del 12.46 %¹⁰⁰, esto se evidencia en la tabla 19.

Tabla 19. Cuadro de amortización del crédito de inversión.

Periodo	Saldo	Interés	Cuotas	Amortización
0	\$ 22.000.000			
1	\$ 22.000.000	\$ 2.741.200	\$ 4.400.000	\$ 17.600.000
2	\$ 17.600.000	\$ 2.741.200	\$ 4.400.000	\$ 13.200.000
3	\$ 13.200.000	\$ 2.192.960	\$ 4.400.000	\$ 8.800.000
4	\$ 8.800.000	\$ 1.644.720	\$ 4.400.000	\$ 4.400.000
5	\$ 4.400.000	\$ 1.096.480	\$ 4.400.000	\$ 0

⁹⁹ CENTRO ESPAÑOL DE PLÁSTICOS. El Centro Español de Plásticos consigue el Bronze Label [En línea]. España., 2013. 2 p. Disponible en: [https://cep-plasticos.com/es/contenido/el-centro-espanol-de-plasticos-consigue-el-bronze-label].

¹⁰⁰ EL TIEMPO. Crédito a empresas, el que más ha subido tras alza del emisor [En línea]. Bogotá D.C., Colombia. 2016., 1p. Disponible en [http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16604233.]

Fuente: Elaboración propia

El flujo de caja proyectado a 10 años se ve evidenciado en la tabla 19, donde se muestran los ingresos anuales, los costos operacionales, depreciación, además de eso se tienen en cuenta los impuestos que recaen directamente sobre las ganancias que son del 22.2%.

Tabla 19. Flujo de caja.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\$ 0	\$ 50.000.000	\$ 52.200.000	\$ 54.496.800	\$ 56.894.659	\$ 59.398.024	\$ 62.011.537	\$ 64.740.045	\$ 67.588.607	\$ 70.562.506	\$ 73.667.256
\$ 0	-\$ 37.299.709	-\$ 39.064.370	-\$ 40.913.096	-\$ 42.849.921	-\$ 44.879.072	-\$ 47.004.981	-\$ 49.232.293	-\$ 51.565.881	-\$ 54.010.849	-\$ 56.572.551
\$ 0	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870
\$ 0	2.741.200	2.741.200	2.192.960	1.644.720	1.096.480	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
\$ 0	7.438.221	7.873.560	8.869.874	9.879.148	10.901.602	12.485.687	12.986.882	13.501.856	14.030.787	14.573.835
\$ 0	1.651.285	1.747.930	1.969.112	2.193.171	2.420.156	2.771.822	2.883.088	2.997.412	3.114.835	3.235.391
\$ 0	5.786.936	6.125.630	6.900.762	7.685.977	8.481.447	9.713.864	10.103.794	10.504.444	10.915.952	11.338.443
\$ 0	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870	2.520.870
\$ 0	8.307.806	8.646.500	9.421.632	10.206.847	11.002.317	12.234.734	12.624.664	13.025.314	13.436.822	13.859.313
\$ 22.000.000	-\$ 4.400.000	-\$ 4.400.000	-\$ 4.400.000	-\$ 4.400.000	-\$ 4.400.000	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
\$ 22.000.000	\$ 3.907.806	\$ 4.246.500	\$ 5.021.632	\$ 5.806.847	\$ 6.602.317	\$ 12.234.734	\$ 12.624.664	\$ 13.025.314	\$ 13.436.822	\$ 13.859.313

Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminado el flujo de caja se evidencia que en los primeros cinco años se presenta una ganancia pequeña, ya que en este tiempo se está pagando el crédito que se adquirió con la entidad financiera por treinta millones de pesos, luego de que se termina de pagar ese crédito se evidencia un crecimiento de la ganancia neta obteniendo en el año seis una ganancia de más de doce millones de pesos triplicando la ganancia antes de terminar el pago a los acreedores.

Sin embargo, los indicadores financieros son los que determinan si el proyecto es o no viable por lo tanto se emplea el modelo del VPN (valor presente neto), el cual nos sirve para determinar si la inversión hecha desde el comienzo del proyecto hasta la fecha de finalización (diez años) va a ser maximizada. Por lo tanto, si el valor de este indicador es positivo el proyecto tendrá viabilidad económica y se obtendrá una ganancia equivalente al valor obtenido. En caso de que el valor sea negativo indicará que el proyecto no cuenta con viabilidad financiera y en caso el valor sea igual a cero esto quiere decir que no habrá aumento ni disminución de capital y habría que recurrir a otro indicador financiero para determinar la viabilidad del proyecto, la ecuación 25 muestra la forma en la que se realiza el cálculo del VPN.

Ecuación 25. Expresión para encontrar el VPN.

$$VPN = -I + \frac{P_1}{(1 + TMR)^1} + \frac{P_2}{(1 + TMR)^2} + \dots + \frac{P_n}{(1 + TMR)^n}$$

Donde;

VPN es el valor presente neto.

I es la inversión inicial.

Pn es el flujo neto anual.

TMR es la tasa mínima de retorno.

N es el periodo.

La tasa de retorno esperada (TR) , es el valor que permite determinar el margen de ganancias mínimo que pretende recoger el proyecto; Para esto se tienen en cuenta factores como la inflación del año en el que se pretende ejecutar el proyecto y la tasa de retorno esperada la cual se puede calcular con un análisis financiero del mercado teniendo en cuenta factores como la oferta y la demanda, para este proyecto se estimó en un 15.42 %¹⁰¹, además de ello cabe resaltar que la tasa de retorno debe ser mayor a la inflación ya que de lo contrario el proyecto será inmediatamente inviable, la expresión utilizada para este fin es la que se muestra en la ecuación 26.

Ecuación 26. Expresión de la tasa mínima de retorno.

$$TMR = (((1 + FI) * (1 + TR)) - 1) * 100$$

Donde;

¹⁰¹ VARGAS ROMERO, Paola A.; HERNANDEZ MORALES, John J. Elaboración de un plan de negocios para determinar la factibilidad de la producción de bioplásticos a partir de papa en contra de la contaminación en Colombia. Tesis de pregrado. Bogotá D.C. Colombia: Universidad Militar Nueva Granada. 2015. Pp. 15-130.

FI es la inflación para 2017. (3.49%)

TR es la tasa de retorno esperada. (15.42%)

Con una inflación del 3.49%, y una tasa de retorno esperada del 15.42% se obtiene una tasa mínima de retorno de 19.4481 %, lo cual sugiere que se tendrá una ganancia superior del 19% de la inversión realizada. Una vez especificados los datos para la evaluación del indicador se obtiene un valor presente neto de \$ 44.215.558 COP, para un periodo de diez años lo cual sugiere que ese valor será el capital de ganancia para la implementación del proyecto.

6. CONCLUSIONES

- Se modifica el almidón de papa haciendo uso de ácido acético por medio de una reacción de acetilación, esto se demuestra mediante los espectros de infrarrojo donde se evidencia un cambio en ciertas regiones en relación con el almidón nativo, adicionalmente por medio del cálculo de los grados de sustitución se ubicó el almidón modificado en un intervalo de sustitución medio – alto, el cual tiene aplicaciones como la fabricación de filmes de bioplástico, colillas de cigarrillo, entre otros.
- De la elaboración del bioplástico se determinó que la velocidad de secado y la temperatura son factores importantes ya que estos afectan la elasticidad y la estabilidad de la película conforme transcurre el tiempo. Si el secado de la película es rápido y a altas temperaturas se obtiene un material frágil y quebradizo; Por otra parte si esta operación se desarrolla de forma gradual la película que se obtiene es elástica y sin cortes, por otro lado el tipo de molde usado para este fin también es importante puesto que si es hermético como en el caso del acero no permite la retrogradación del almidón y este se quema sin obtenerse una película, finalmente si el molde posee una alta porosidad en su superficie la película se quedara pegada en esos poros y el desmoldado no es fácil y la película tiende a quebrarse.
- En cuanto a las propiedades mecánicas, el bioplástico desarrollado por el proceso de matriz reforzada tiene mejores propiedades que los otros dos propuestos en este trabajo, con una mejora en el porcentaje de elongación del 24% y en la resistencia a la tensión entre el 300 y 500%, adicionalmente la prueba de dureza sugiere que este bioplástico tiene una buena tolerancia al desgaste por lo que se podría usar por periodos prolongados de tiempo.
- Acerca de las especificaciones técnicas del proceso se concluye que el número de equipos es reducido y que teóricamente se puede replicar lo hecho en el laboratorio. Además de ello teniendo las formulaciones con base en un gramo de almidón se puede proyectar una producción a escala piloto e industrial con el fin de suplir la demanda actual de este tipo de productos.
- El proyecto visto desde el punto económico es viable, ya que se obtiene una tasa interna de retorno del 19,5%, lo que sugiere una ganancia anual de ese valor, este valor puede variar si se produce este producto en mayor cantidad ya que se plantean cinco producciones mensuales, además de ello el VPN que se obtiene es de un poco más de 45 millones de pesos generando más ganancia después de cancelar el crédito solicitado para poner en marcha el proceso.

7. RECOMENDACIONES.

- Establecer un modelo de secado detallado, con el fin de obtener prototipos mas refinados.
- Proponer la investigacion teniendo en cuenta la biodegradabilidad y compostabilidad del material señidos a los metodos y normativas vigentes.
- Desarrollar el proceso de modificacion del almidon con otro tipos de acidos con el fin de obtener un mayor grado de sustitucion.
- Perfeccionar la tecnica del desarrollo de peliculas plasticas con almidones con diferente grado de sustitucion y evaluar su calidad.
- Idear un diseño conceptual de una planta de produccion de este bioplastico por medio de herramientas informaticas.
- Establecer el procesamiento del bioplastico para la formacion del producto final.

BIBLIOGRAFÍA

ABD EL-RAHMAN M.K, B.K. MISHRA, R.K. Rajamani. Mineral Engineering.Vol. 14. No. 10(2001). Pp. 1321-1328.

ACOSTA Annie P y BLANCO Catherine., Obtención y caracterización de almidones nativos colombianos para su evaluación como posibles alternativas en la industria alimentaria. Tesis de pregrado. Cartagena de Indias, Colombia: Universidad de Cartagena, 2013. p. 36.

ADEBOWALE, Kayode; AFOLABI, Adeniyi, OLU-OWOLABI, Iromidayo, Funtional, physicochemical and retrogradation properties of swordm bean (Canavalia gladiate) acetylated and oxidized starches. EN: Carbohydrate Polymers. Julio, 2006, vol. 65, no, 1, p.93-101.

AGILENT. Resolutions Pro FTIR Software. Santa Clara. Estados Unidos. 2018.

ALVAREZ, Hernán. Diseño Simultáneo de Proceso y Control. Uso de efectos dinámicos en Ingeniería de Procesos. Tesis para año Sabático. Medellín. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010, pp. 101- 150.

ARROYO, Edmundo; ALARCÓN, Hugo. Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de la papa. En: Revista de la Sociedad Química del Perú. Junio, Vol. 82, No 3, pp. 2 – 13.

ARROYO, Edmundo; ALARCÓN, Hugo. Obtención de biopolímeros de papa como una alternativa al desarrollo de materiales inocuos al medio ambiente. En: TECNIA. Junio, Vol. 24, No 2, pp. 15 – 17.

ARTEAGA, M.H, RODRÍGUEZ, Z.H. y SICHE, J.R., Optimización del secado de papa (Solanum tuberosum) variedad Canchán utilizando un secador que opera con briquetas de carbón antracita. En: Encuentro Científico Internacional, Lima, Perú, Jul 2005.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Rubber Property- Durometer Hardness. Pensilvania. ASTM. 2015.

ATWELL, M.D., Thomas D. Starch Modifications. En: Starches. Eagen Press Handbook. USA, 1999 p. 31-48.

AUSTIN, L.G., TRASS O., Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment. Editado por Fayed, M. E., Otten, L., Chapman & Hall. New York: Handbook of Powder Science & Technology 1997. 634 p.

AVEROUS, L, et al. Blends of thermoplastic starch and polyesteramide: processing and properties. En: Revista Applied Polymer Science. Mayo, Vol. 76, No 7, pp. 1121- 1135.

BELLO PÉREZ, Luis Arturo, et al, Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca* L. (VAR. MACHO). Texcoco, México. Agrociencia, vol. 2 No. 36(2002), pp. 23 – 46.

BEQUETTE, W. Behavior of a CSTR with a recirculating jacket heat transfer system. En: Proceedings of American Control Conference. Vol. 30, No. 7(2002), pp. 1391-1413.

CALVO REBOLLAR, Miguel., Bioquímica de los alimentos, [En línea], 3 de enero de 2016, Disponible en: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>

CANONICO FRANCO, Marcia. Agregación en gránulos de almidón. Tesis de Doctorado. Querétaro. México: Universidad Autónoma de Querétaro. 2003. Pp. 10 – 81

CARRASCAL SANCHEZ, Juan J., Acetilación del almidón de *Arracacia xanthorrhiza* y evaluación de su aplicación como posible auxiliar farmacéutico. Tesis de pregrado, Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional, 2013, p, 15.

CASTRO ARRIETA, Bladimir. Diseño de un sistema de producción y operaciones para la empresa INDUPLAC que permita optimizar el proceso de poliestireno expandido (EPS). Tesis de Especialización. Bogotá, Colombia: Universidad Sergio Arboleda, 2015, pp, 25 – 80.

CENTRO ESPAÑOL DE PLÁSTICOS. El Centro Español de Plásticos consigue el Bronze Label [En línea]. España., 2013. 2 p. Disponible en: [<https://cep-plasticos.com/es/contenido/el-centro-espanol-de-plasticos-consigue-el-bronze-label>].

DANE. Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas Revisión 3.1 Adaptada para Colombia. [En línea]. 16 de Julio 2017. Disponible en: http://formularios.dane.gov.co/senApp/nomModule/aym_index.php?url_pag=clasificaciones&alr=&cla_id=2

DESAI, S., et al. Structure-property relationship in polyurethane elastomers containing starch as a crosslinker, *Polymer Engineering & Science*, 40 (5), pp. 1200-1210, 2000.

DINERO. Industria plástica creció 6% en primer semestre. {En línea}. 17 de septiembre de 2016. {Fecha de consulta: 7 de Junio de 2018}. Disponible en: (<https://www.dinero.com/pais/articulo/crecimiento-de-la-industria-plastica-en-el-primer-semestre/232022>).

ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos. Diseño óptimo de ciclones. En: *Revistas de Ingenierías Universidad de Medellín*. Vol. 5. No. 9. (2006). Pp. 124- 139.

EL TIEMPO. Crédito a empresas, el que más ha subido tras alza del emisor [En línea]. Bogotá D.C., Colombia. 2016., 1p. Disponible en [<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16604233>].

ESPINA, Miguel; CRUZ TIRADO J.P.; SICHE Raúl. Propiedades mecánicas de bandejas elaboradas con almidón de especies vegetales nativas y fibras de residuos agroindustriales. En: *Scienta Agropecuaria*. Junio, Vol. 7, No. 2. pp. 15-18.

FLOREZ, Jorge A., acetilación de almidón nativo de batata (*Ipomeas batata* L). Tesis de pregrado, Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional, 2016, pp, 30 – 45.

FOGLER, Scott.; RAMIREZ LOPEZ, Roman. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. Cuarta edición. Michigan: Pearson Education. 2008. 1120 p.

GALLEGO BOTERO, Paula A.; CLAROS CLAROS, Rolando F. Diseño mecánico de una maquina universal de ensayos para polímeros. Proyecto para título de Tecnólogo Mecánico. Pereira. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. Pp. 44- 90.

GARCIA QUIÑONEZ, Alma V., Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz., Tesis de pregrado. Santa Tecla, San Salvador: Universidad Especializada en Ingeniería, 2015, p, 30.

GEISSMAN, T.A. Principios de química orgánica. Segunda Edición. Editorial reverte. Barcelona.1973. 568 p.

GLASSLEY, W., Geothermal Energy, Renewable Energy and the Environment. Segunda edición. Estados Unidos: CRC Press. 2014. 423 p.

GONZALEZ Ana María y RAISMAN Jorge S., Amilosa, [En línea], 7 de septiembre de 2018 Disponible en: <http://www.biologia.edu.ar/macromoleculas/figacro/amilosa.gif>

GRAAF, R. A., et al. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch. En: Carbohydrate Polymers. Vol. 28. No. 2, pp. 137-144.

HEINZE, T., LIEBERT, T., KOSCHELLA, A. Esterification of Polysaccharides., Vol. 16, 2006, pp. 232

HERNANDEZ MEDINA, et al. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. En: Food Science and Technology. Vol. 28. No. 3(2008), pp. 2-18.

HERNANDEZ MEDINA, Marilyn, et al., Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México, 2008, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000300031 [Consulta: Jueves, 2 de febrero de 2018]

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Cauchos o plásticos. Bogotá. ICONTEC, 2006.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto,2018. ISEM 9789588585673 153 p.

KORHONEN, Ossi. Et al. Evaluation of novel starch acetate–diltiazem controlled release tablets in healthy human volunteers. En: Journal of Controlled Release. Marzo, 2004. Vol. 95. p. 515.

LAZALDE-CRABTREE, H.; BUENDÍA, E. Manual de Diseño de Equipo Geotérmico de Superficie. Reporte final del proyecto titulado “Estudio de los parámetros de diseño para separadores de vapor y silenciadores de un campo Geotérmico”, México. Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1982, pp, 20-45.

LONDOÑO RESTREPO, Guillermo; PUERTA ZAPATA, Antonio; RESTREPO GOMEZ, Bernardo. Ponderación de factores y características para la autoevaluación, {En línea}. {10 de Febrero de 2018} disponible en(<http://embera.udea.edu.co/reacreditacion/docs/ponderacion-de-factores.pdf>)

MAN O LILU. Mechanical Alloying. Londres: Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 1-276

MENSES, Juliana; CORRALES, María C.; VALENCIA, Marco. Revisión de la Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. En: Revista IEA. Junio, Vol. 3, No. 8, 2008. pp. 5-7.

MILADINOV, V. D., HANNA, M. A., Starch esterification by reactive extrusion., Industrial Crops and products, Vol. 11, 2000, pp. 51- 57.

MINISTERIO DE JUSTICIA Y EL DERECHO. Autorizaciones extraordinarias para el manejo de sustancias químicas controladas. Bogotá. MinJusticia, 2011.

NARVAES GUERRERO, María A., Optimización de las propiedades mecánicas de bioplásticos sintetizados a partir de almidón. Tesis de pregrado. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito, 2016, p, 27.

NORTON R, Diseño de Máquinas, Tercera edición, México: Mc Graw-Hill, 1999, p. 759.

NOVELO, C. L. and Betancour, A. D. Chemical and functional properties of Phaseolus lunatus and Manihot esculenta starch blends. En: Starch/Stärke. Vol. 57, No. 9(2005). pp. 431-441.

ORTEGA RIVAS, E., Handling and Processing of Food Powders and Particulars. En: “Encapsulated and Powdered Foods. Vol. 1.No. 1(2005), pp. 1-24.

ORTIZ ALFARO, Betsabe S. Secado con bomba de calor para la deshidratación de frutos. Tesis de pregrado. Puebla. México: Universidad de las Américas Puebla. 2010. Pp. 35 – 62

PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A., & KRESTA, S. M. Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. Primera edición, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004, p. 1352.

PEDRAZA GUARNIZO Julieth y ARENAS RIAÑO Alejandra., Evaluación del proceso de modificación de almidón de papa mediante acetilación y oxidación, para su aplicación como excipiente en la industria farmacéutica a nivel laboratorio. Tesis de pregrado. Bogotá D.C., Colombia: Universidad de América, 2017, p.71.

PEÑARANDA CONTRERAS, Oscar Iván; PERILLA, Jairo Ernesto y ALGECIRA ENCISO, Néstor Ariel. Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. En: Revista Ingeniería e Investigación. Diciembre, 2008. Vol. 28. no. 3. p 47-52.

RIVAS GONZÁLEZ, M; ZAMUDIO FLORES, P. B. y BELLO PÉREZ, L. A., Efecto del grado de acetilación en las características morfológicas y fisicoquímicas del almidón de plátano. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2009. Vol. 8, No. 3, p. 29.

RODRÍGUEZ AGUILAR, Daniel Eduardo. Efecto de la concentración de almidones resistentes de la papa común (*Solanum tuberosum*) y criolla (*Solanum phureja*) sobre la digestibilidad de nutrientes, energía metabolizable e integridad del tracto gastrointestinal de pollos de engorde. Tesis para maestría. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. 2013. p.218.

SALAZAR TRUJILLO, Jorge E. Resistencia de materiales básica para un estudiante de ingeniería. Segunda edición. Manizales: Centro de Publicaciones, 2008. 68p.

SANTAELLA MACHADO, Daniela C., Estudio de la Deformabilidad a Tracción de Películas Plásticas: Normas ASTM D638 vs. ASTM D882. Tesis de pregrado. Barranquilla. Colombia: Universidad Simón Bolívar, 2012. Pp. 25- 80.

SEUNG, K.A., The crosslinking of polyurethane incorporated with starch granules and the rheological properties, *Macromolecules. Matter. Eng.*, pp. 288:569, 2003

SHOGREN, R. L., Rapid Preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction., Carbohydrate Polymers, Vol. 52, No. 3, 2003, pp. 319-326.

SHOGREN, R. L., Rapid Preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction., En: Carbohydrate Polymers, Vol. 52, No. 3(2003), pp. 319-326.

SICHE Raúl. Et al. Diseño de un secador de bandejas prototipo que opera con briquetas de carbón (antracita). En: V Congreso iberoamericano de ingeniería de alimentos. Vol. 4. Art 32. Pp. -1-6.

TRINA GHOSH, D., & Anil N., N. 'Green' crosslinking of native starches with malonic acid and their properties. En: Carbohydrate Polymers, Noviembre, Vol. 90, No. 4(2012), pp. 1620– 1628.

UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA. Fundamentos de diseño de reactores. Puebla. 2010.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE NORDESTE. Introducción a la resistencia de materiales. Argentina. UNNE. 2004.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Curso de fundamentos de ciencia de materiales. Unidad 15. Valencia. UPV, 2015.

VARGAS ROMERO, Paola A.; HERNANDEZ MORALES, John J. Elaboración de un plan de negocios para determinar la factibilidad de la producción de bioplásticos a partir de papa en contra de la contaminación en Colombia. Tesis de pregrado. Bogotá D.C. Colombia: Universidad Militar Nueva Granada. 2015. Pp. 15-130.

VARGAS, G, et al., Propiedades funcionales de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y su modificación química por acetilación. En: Scientia Agropecuaria, Vol. 7. No. 3.(2016). p 223 - 230.

WWF COLOMBIA. Colombia adopta regulación a las bolas plásticas. [En línea]. 30 junio 2017. Disponible en: <http://www.wwf.org.co/?304333/Colombia-regula-bolsas-plasticas>

XIN, J.-Y, et al. Biosynthesis of Corn Starch Palmitate by Lipase Novozym 435.En: International Journal of Molecular Sciences, Mayo, Vol 13, No. 6(2012). pp. 7226-7236.

ANEXO

ANEXO A

FICHA TÉCNICA DEL ACETATO POLIVINILICO.

FICHA TÉCNICA		Código: PE-GC-FT-65 Versión: 4 Fecha E: 16/11/2016 Fecha UR: 06/09/2016 Página: 1 de 2
PVA LP -50		
1. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DESCRIPCIÓN		
POLÍMERO VINIL - ACRÍLICO - DE EXCELENTE COMPORTAMIENTO EN FORMULACIÓN DE VINILOS TIPO 2 Y 3, RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, BUENA VISCOSIDAD. ÚTIL TAMBIÉN COMO IMPRIMANTE Y PARA REFORZAR VINILOS Y ACABADOS.		
2. ESPECIFICACIONES		
<ul style="list-style-type: none"> • CONTENIDO DE SÓLIDOS.....48% - 51% • VISCOSIDAD.....5.000 - 10.000 cP • pH.....4.0 - 5.5 • Tg.....10° C 		
3. COMPATIBILIDAD	4. APLICACIÓN	
PVA LP 50 es compatible con otras dispersiones de polímeros aniónicas o no iónicas; Así mismo es compatible con espesantes acrílicos, alcohol polivinílico, éteres de celulosa, plastificantes y filmogénos tales como Texanol y acetato de butil(dil)glicol, antiespumantes grasos y siliconados, solventes aromáticos. PVA LP 50 posee una muy buena compatibilidad con los pigmentos y cargas, esta se puede incrementar adicionando dispersantes de pigmentos tipo polifosfato / hexametáfosfato de sodio, o dispersantes policarboxílicos tipo DISPERSYG.	PVA LP 50 se utiliza para la fabricación de PINTURAS de buena calidad y acabados de alta resistencia, imprimantes, enlucidos, granoplast y carraplast. Formulaciones y sugerencias están disponibles a solicitud. Dosificaciones que varían de 10 % a 30 % sobre el peso total son utilizadas en la fabricación de vinilos, dependiendo del producto final a obtener. Derivado de su alta viscosidad, el PVA-LP-50 se recomienda para estucos y masillas interiores, proporcionando una excelente manejabilidad y buena adherencia. PVA LP 50, se utiliza también como agente sellador de superficies porosas, láminas de fibrocemento o Drywall. Para estucos y acabados exteriores recomendamos la línea ACRITEN o el uso de VAMCRIL.	
5. SEGURIDAD	6. ALMACENAMIENTO	
Se recomienda disponer de áreas ventiladas, utilizar gafas y guantes de protección además del cumplimiento de las directrices y normas de las asociaciones profesionales de seguridad en el manejo de productos químicos. Según nuestras experiencias este producto no ejerce acción alguna perjudicial para la salud siempre que se manipule correctamente.	PVA LP 50 se puede almacenar por periodos de 12 meses en los envases originales herméticamente cerrados, a temperaturas comprendidas entre 6 a 40°C manteniendo sus características y desempeño. Al igual que otras dispersiones, PVA LP 50 es sensible al hierro, cobre, zinc y aluminio. Se debe evitar almacenar en empaques de este tipo de metales.	
7. OBSERVACIONES		
Las recomendaciones y sugerencias de este documento, son fruto de nuestro conocimiento y experiencia. Sin embargo esto no libera a nuestros clientes de realizar sus propios ensayos y controles dada la diversidad de materiales con los que PVA LP 50 se puede mezclar. Así mismo no representa garantía jurídica a determinadas propiedades en una aplicación concreta.		
ESTE DOCUMENTO IMPRESO SE CONSIDERA COPIA NO CONTROLADA		

FICHA TÉCNICA GOMA XANTAN.



CERTIFICATE OF ANALYSIS

Date: OCT. 13, 2017
Invoice No.: EX117-688

To whom it may concern:

Commodity : XANTHAN GUM
Batch No. : 201710B-N09
Manufacture Date : OCT. 13, 2017
Expiry Date : OCT. 12, 2019
Packing : 25KGS BAG
Quantity : 20,000KGS

This is to certify that we, the undersigned, have inspected the quality of the above mentioned goods and found the result of inspection as follows:

ITEM	STANDARDS	RESULTS
APPEARANCE	WHITE-LIKE OR LIGHT-YELLOW POWDER	CONFORM
PARTICLE SIZE	100% THROUGH 80MESH, NOT LESS THAN 95% THROUGH 200MESH	CONFORM
VISCOSITY (1% KCL, CPS)	1200 - 1700	1613
SHEAR RATIO	6,5 MIN.	8,1
V1/V2	1,02 - 1,45	CONFORM
PH (1% SOLUTION)	6,0 - 8,0	6,33
LOSS ON DRYING	15% MAX	4,7%
ASHES	16% MAX	8,5%
PB	2PPM MAX	CONFORM
TOTAL NITROGEN	1,5% MAX	CONFORM
PYRUVIC ACID (%)	1,5% MIN	CONFORM
TOTAL PLATE COUNT	2000CFU/G MAX	300CFU/G
MOULDS/YEASTS	100CFU/G MAX	CONFORM
COLIFORM (MPN/G)	0,3 MAX	CONFORM
SALMONELLA	ABSENT	CONFORM

****CONCLUSION: THIS PRODUCT CONFORMS TO THE FACTORY'S EXPORT STANDARDS.**

LOS ANTERIORES DATOS SON TRANSCRIPCIÓN EXACTA REPORTADA POR NUESTRO PROVEEDOR



Gestión de Calidad Cimpa s.a.s.

Cimpa s.a.s. declara que los resultados reportados en el presente certificado, son tomados de la información suministrada por nuestro Proveedor, por lo tanto se fundamenta en sus técnicas de análisis autorizadas. Dicha información no exime a Nuestros Clientes de realizar sus propios análisis.

Av. Américas N° 63 - 05
PBX. 420 2097
Bogotá D.C.

cimpa@cimpa.com.co
www.cimpa.com.co

Parque Agroindustrial de la Sabana
Bod. 97/98 Cel. 315 310 7323
Km. 1 Vía Mosquera - Bogotá D.C.

FICHA TÉCNICA CELOCELL

Certificate of Analysis
(Hydroxypropyl Methyl Cellulose – Celocell)


Product Name: Celocell PM150H **Quantity:** 3600KG
Manufacture Date: DEC 20, 2017 **Invoice No:** YLSH-17324

Celocell PM150H (Hydroxypropyl Methyl Cellulose) 羟丙基甲基纤维素

Item / 项目	Unit / 单位	Specification / 规格	Result / 结果
Appearance / 外观	/	Whitish to yellowish even particle or powder / 乳白至黄色均匀颗粒或粉末	White powder / 白色粉末
Bulk Density / 堆积密度**	Kg/m ³	300-500	306.5
Finesness / 细度	%	<0.0	3.30
Drying Loss Ratio / 干燥失重率	%	<0.0	5.82
Viscosity / 粘度***	mPa·s	65,000-75,000	69,800
pH Value / pH值	/	5.0-9.0	5.50
Water Retention Ratio / 保水率	%	>90	92.70

LOT NO: 11712020
 EXPIRY DATE: DEC 19, 2018

FICHA TÉCNICA ALMIDÓN DE PAPA.

cimpa s.a.s. 
 Insumos y tecnología para la industria alimentaria

Certificate of Analysis
 (Fecula de Papa)

PRODUCT : C*GEL 30002 Potato Starch
CUSTOMER : Cimpa S.A.S.
 Av. Americas No. 63-05
 CO-000 Bogota
 Colombia
ORDER NO. : 77077162
DATE OF SHIPMENT : February 23rd, 2017
CARRIER : FCIU2907480
LOT NO. : 14LBG222 / 17,25 MT
PRODUCTION DATE : 01/02/2017
BEST BEFORE DATE : 01/02/2020

1. Inspection certificate

Tested Character	Result	Specification
Moisture / c.b.	19.5 %	18 - 20
pH (30% slurry)	7.5	6.5 - 8.5

We hereby confirm that this batch has been tested according to the quality requirements.

2. Certificate of compliance

Character	Unit	Limits
Ash	% (on c.b.)	Max 0.3
SO ₂	ppm	Max 10
Total plate count	/ g	Max 5,000
Yeast	/ g	Max 500
Mould	/ g	Absent
E.coli	/ g	Absent
Salmonella	/ 25 g	Absent

LOS ANTERIORES DATOS SON TRANSCRIPCIÓN EXACTA REPORTADA POR NUESTRO PROVEEDOR

Cimpa s.a.s., declara que los resultados reportados en el presente certificado, son tomados de la información suministrada por nuestro Proveedor, por lo tanto se fundamenta en sus técnicas de análisis autorizadas. Dicha información no exime a Nuestros Clientes de realizar sus propios análisis.

GESTION DE CALIDAD CIMPA S.A.S.

Av. Américas N° 63 - 05
 PBX. 420 2097
 Bogotá D.C.

cimpa@cimpa.com.co
 www.cimpa.com.co

Parque Agroindustrial de la Sabana
 Bod. 97/98 - Cel. 315 310 7323
 Km. 1 Vía Mosquera - Bogotá D.C.

FICHA TÉCNICA PARA EL ÁCIDO CLORHÍDRICO.



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo al Reglamento (CE) No. 1907/2006

Fecha de revisión 31.07.2018

Versión 9.12

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Artículo número	109970
Denominación	Ácido clorhídrico for 1000 ml, c(HCl) = 1 mol/l (1 N) Titrisol®
Número de registro REACH	Este producto es una mezcla. Número de registro REACH véase sección 3.

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados	Análisis químico En cumplimiento de las condiciones descritas en el anexo a esta hoja de datos de seguridad.
--------------------	---

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía	Merck KGaA * 64271 Darmstadt * Alemania * Tel: +49 6151 72-0
Departamento Responsable	LS-QHC * e-mail: prodsafe@merckgroup.com

1.4 Teléfono de emergencia Instituto Nacional de Toxicología * Madrid * Tel: 91 562 04 20

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Corrosivos para los metales, Categoría 1, H290
Irritación cutáneas, Categoría 2, H315
Irritación ocular, Categoría 2, H319
Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única, Categoría 3, Sistema respiratorio, H335

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

FICHA TÉCNICA ÁCIDO ACETICO



FICHA TÉCNICA ACIDO ACÉTICO

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

Nombre Químico	Ácido Acético
Formula Química	CH ₃ COOH
Peso molecular	60.053 g/mol.
Sinónimos	Ácido acético glacial catalítico Ácido del vinagre Ácido metanocarboxílico, Ácido etanoico

2. DESCRIPCIÓN

Líquido incoloro con olor acre (penetrante, picante).
La sustancia es moderadamente ácida, volátil y cristaliza a baja temperatura.
Es completamente soluble en agua, alcohol, éter glicerina y benceno; e insoluble en sulfuro de carbono

3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Pureza	99.5 % mín.
Sulfatos	0.0003 % max
Acido fórmico	0.05 % max
Acetaldehído	0.05 % max
Hierro	10 ppm max

Otras

Plomo	1.0 ppm max
Cloruros	1 ppm max
Material no volátil	0.003 % max

4. PROPIEDADES

Apariencia:	líquido incoloro, transparente
Humedad (Método de Karl Fischer):	0.50% máx.
Densidad relativa (20/20°C):	1.052±0.003
Color (Unidades APHA):	10 máx.
Olor:	Característico

FECHA	REALIZO	REVISO	ACTUALIZO
2010/07/27	I.Q. Iván Darío Ospina	I.Q. Doría María Naranjo	I.Q. Iván Darío Ospina

Cra. 50C N° 10 Sur-18 Tels: 361 07 11 Fax: 285 64 74
iospina@dqisa.com Medellín - Colombia.

FICHA TÉCNICA CLORURO DE SODIO.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	106404
Denominación	Sodio cloruro p.a. EMSURE® ACS, ISO, Reag. Ph Eur

2.3 Otros peligros

Ninguno conocido.

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

Formula	NaCl	CINa (Hill)
No. CAS	7647-14-5	
No. CE	231-598-3	
Masa molar	58,44 g/mol	

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

Observaciones	Ningún ingrediente peligroso según la Reglamento (CE) No. 1907/2006
---------------	---

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Tras inhalación: aire fresco.

Tras contacto con la piel: aclarar con abundante agua. Eliminar ropa contaminada.

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua.

Tras ingestión: hacer beber agua (máximo 2 vasos), en caso de malestar consultar al médico.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Náusea, Vómitos

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

No hay información disponible.

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores.

Medios de extinción no apropiados

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

No combustible.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

ningún

Otros datos

Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Las Fichas de Datos de Seguridad para artículos del catálogo también se obtienen en www.merck-chemicals.com

FICHA TÉCNICA DEL HIDROXIDO DE SODIO.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Fecha de revisión 26.04.2012

Versión 1.1

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Artículo número	109959
Denominación	Hidróxido de sodio en solución for 1000 ml, c(NaOH) = 0.1 mol/l (0.1 N) Titrisol®
Número de registro REACH	Este producto es una mezcla. Número de registro REACH véase sección 3.

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados	Análisis químico Para informaciones adicionales a usos refiérase al portal Merck Chemical s (www.merck-chemicals.com).
--------------------	--

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía	Merck KGaA * 64271 Darmstadt * Alemania * Tel: +49 6151 72-0
Departamento Responsable	javier.davila@merckgroup.com
Representante regional	Merck S.A. Calle 10 No. 65-28 Bogotá D.C. Colombia
	Telf: 4254747 Fax: 4255407

1.4 Teléfono de emergencia

Línea Salvavidas SISTEMA-SURA
018000941414
018000511414
4055911

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Corrosión cutáneas, Categoría 1A, H314

Corrosivos para los metales, Categoría 1, H290

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

Clasificación (67/548/CEE o 1999/45/CE)

C Corrosivo R35

El texto completo de las frases R mencionadas en esta Sección, se indica en la Sección 16.

ANEXO B.

$$\text{Porcentaje de acetilo} = \frac{(\text{mL Blanco} - \text{mL muestra}) * \text{NHCL} * 0.043}{\text{Peso de muestra base seca (g)}}$$

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 * \% \text{Acetilo}}{4300 - (42 * \% \text{Acetilo})}$$

ALMIDÓN NATIVO

$$\text{Porcentaje de acetilo} = \frac{(13.9 \text{ mL} - 13.9 \text{ mL}) * 1 \text{ N} * 0.043}{1.0201 \text{ g}} = 0.0000 = 0 \%$$

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 * 0.0000}{4300 - (42 * 0.0000)} = 0$$

MODIFICADO 1

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de acetilo} &= \frac{(13.9 \text{ mL} - 10.4 \text{ mL}) * 1 \text{ N} * 0.043}{1.0232 \text{ g}} = 0.1481 \\ &= 14.8113 \% \end{aligned}$$

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 * 14.8113}{4300 - (42 * 14.8113)} = 0.6523$$

MODIFICADO 2

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de acetilo} &= \frac{(13.9 \text{ mL} - 10.3 \text{ mL}) * 1 \text{ N} * 0.0433}{1.0240 \text{ g}} = 0.1522 \\ &= 15.2226\% \end{aligned}$$

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 * 15.2226}{4300 - (42 * 15.2226)} = 0.6736$$

MODIFICADO 3

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de acetilo} &= \frac{(13.9 \text{ mL} - 10.4 \text{ mL}) * 1 \text{ N} * 0.043}{1.0009 \text{ g}} = 0.1514 \\ &= 15.1413 \% \end{aligned}$$

$$\text{Grado de sustitución} = \frac{162 * 15.1413}{4300 - (42 * 15.1413)} = 0.6694$$