

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE PLÁSTICO BIODEGRADABLE A PARTIR DE
AJIPA (PACHYRHIZUS AHIPA WEDD) A ESCALA
LABORATORIO**

Por:

IDANIA CAZAS CHURA

Modalidad de Graduación (Investigación Aplicada) presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.

Agosto del 2025

TARIJA – BOLIVIA

VºBº

M. Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez

**DECANO FACULTAD DE CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA**

M. Sc. Ing. Fernando Erick Cortes Michel

**VICEDECANO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

ING. JOSE ERNESTO AUAD AGUIRRE

ING. JUAN CARLOS VEGA KNEZ

ING. ADRIANA AMEZAGA CARRASCO

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

Dedicatoria:

El presente trabajo está dedicado primeramente a Dios ya que gracias a Él he logrado concluir esta meta.

A mis padres Gonzalo Cazas y Eugenia Chura, porque este logro académico es un reflejo del sacrificio silencioso y el esfuerzo de cada día. Gracias por cada palabra de aliento, su amor incondicional ha sido mi fuerza y su apoyo el motor que me impulsó a seguir adelante. Me llena de orgullo poder honrarlos de esta manera.

Agradecimientos:

Doy gracias a Dios, por haber sido mi fortaleza y guía constante.

A mis padres y mi hermana Lineth Cazas por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento.

A mi pareja José Luis Saavedra por su comprensión y compañía a lo largo de este proceso.

A mis amigos por cada gesto de ánimo y por brindarme su compañía sincera durante estos años.

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo dondequiera que vayas”

Josué 1:9

ÍNDICE

Advertencia	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Pensamiento	iv
Resumen	v

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES.....	1
OBJETIVOS	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
JUSTIFICACIÓN	5
Justificación Económica.....	5
Justificación Social.....	5
Justificación Ambiental.....	5
Justificación Tecnológica.....	6

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO	7
1.1. Características de la materia prima.....	7
1.1.1. Origen.....	7
1.1.2. Descripción de la Ajipa	7
1.1.3. Descripción Botánica	8

1.1.4.	Cultivo o producción de ajipa	11
1.1.5.	Requerimientos para su cultivo	11
1.1.6.	Composición química y contenido nutricional	12
1.1.7.	Usos de la Ajipa	12
1.2.	Almidón.....	13
1.2.1.	Aspectos generales	13
1.2.2.	Almidón de Ajipa (<i>Pachyrhizus ahipa</i> (Wedd)).....	14
1.2.3.	Estructura del almidón	15
1.2.3.1.	Amilosa.....	15
1.2.3.2.	Amilopectina.....	16
1.2.4.	Gelatinización del almidón	17
1.2.5.	Aplicaciones industriales del almidón	18
1.3.	Bioplástico.....	19
1.3.1.	Aplicaciones del plástico biodegradable	21
1.3.2.	Componentes para la elaboración del bioplástico	21
1.3.2.1.	Plastificantes	22
1.3.3.	Fundamentos para la caracterización del bioplástico.....	23
1.4.	Descripción de las alternativas de procesamiento	24
1.4.1.	Extracción de almidón.....	25
1.4.2.	Proceso Tradicional.....	26
1.4.3.	Proceso con almidón modificado	28
1.4.4.	Proceso con matriz reforzada	30

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	33
2.1.	Caracterización de la materia prima Ajipa	33
2.1.1.	Propiedades fisicoquímicas	33
2.2.	Selección del proceso experimental	34
2.3.	Diseño Factorial	36
2.3.1.	Selección de variables del proceso experimental de extracción de almidón.....	37
2.3.1.1.	Diseño experimental para la extracción de almidón a partir de Ajipa.....	38
2.3.2.	Selección de variables del proceso experimental de obtención de plástico biodegradable	40
2.3.2.1.	Diseño experimental para la obtención de plástico biodegradable.....	40
2.4.	Equipos, materiales, reactivos e insumos necesarios para el desarrollo del diseño experimental	43
2.4.1.	Equipos.....	43
2.4.2.	Materiales.....	43
2.4.3.	Reactivos e insumos.....	44
2.5.	Descripción del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa a escala laboratorio.....	45
2.5.1.	Extracción de almidón.....	45
2.5.1.1.	Recepción de la materia prima (Ajipa)	45
2.5.1.2.	Lavado de la Ajipa con cáscara	45

2.5.1.3.	Pelado de Ajipa.....	46
2.5.1.4.	Corte y licuado.....	47
2.5.1.5.	Filtrado y lavado	47
2.5.1.6.	Centrifugado	48
2.5.1.7.	Lavado del almidón	49
2.5.1.8.	Secado.....	50
2.5.1.9.	Molienda	50
2.5.1.10.	Tamizado	51
2.5.1.11.	Almidón obtenido	52
2.5.2.	Obtención de plástico biodegradable	52
2.5.2.1.	Preparación de mezcla de plástico biodegradable	52
2.5.2.2.	Homogenización de mezcla.....	53
2.5.2.3.	Moldeado	54
2.5.2.4.	Secado.....	54
2.5.2.5.	Desmoldado	55
2.6.	Diagrama del proceso de obtención plástico biodegradable a partir de Ajipa.....	56
2.7.	Caracterización del plástico biodegradables	58
2.7.1.	Análisis Sensorial.....	58
2.7.2.	Determinación del espesor	58
2.7.3.	Determinación del contenido de humedad.....	59
2.7.4.	Determinación de la resistencia a la tracción.....	59
2.7.5.	Determinación de la biodegradabilidad	60
2.7.5.1.	Degradación en tierra.....	60

2.7.5.2.	Degradación en agua.....	61
----------	--------------------------	----

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
3.1.	Caracterización de la materia prima (Pachyrhizus Ahipa (Wedd)).....	62
3.1.1.	Propiedades fisicoquímicas	62
3.1.2.	Propiedades físicas	63
3.2.	Resultados del proceso de extracción de almidón a partir de Ajipa.....	64
3.3.	Caracterización del almidón de ajipa	65
3.3.1.	Análisis de humedad	65
3.3.2.	Análisis de amilosa y amilopectina.....	66
3.4.	Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de extracción de almidón a partir de Ajipa.....	67
3.4.1.	Análisis de varianza ANOVA del diseño factorial	67
3.4.2.	Regresión lineal del diseño factorial	70
3.5.	Caracterización del plástico biodegradables	75
3.5.1.	Análisis sensorial	75
3.5.2.	Determinación del espesor	78
3.5.3.	Determinación del contenido de humedad.....	79
3.5.4.	Determinación de resistencia a la tracción.....	80
3.5.5.	Determinación de biodegradabilidad	81
3.5.5.1.	Degradación en tierra.....	81
3.5.5.2.	Degradación en agua.....	84
3.6.	Curva de secado del plástico biodegradable.....	86

3.7.	Resultados de análisis estadístico para la obtención de plástico biodegradable a partir del almidón de ajipa.....	88
3.7.1.	Regresión lineal del diseño factorial	91
3.7.2.	Aplicabilidad del producto.....	96
3.8.	Balance de materia de extracción de almidón de ajipa.....	97
3.8.1.	Recepción de la materia prima (Ajipa)	97
3.8.2.	Balance de materia en la etapa de pelado.....	99
3.8.3.	Balance de materia para la etapa de corte y licuado	99
3.8.4.	Balance de materia para la etapa de filtrado y lavado de fibra	100
3.8.5.	Balance de materia para la etapa de centrifugado	101
3.8.6.	Balance de materia para la etapa de lavado de almidón.....	102
3.8.7.	Balance de materia para la etapa de secado	103
3.8.8.	Balance de materia para la etapa de molienda	104
3.8.9.	Balance de materia para la etapa de tamizado	105
3.8.10.	Cálculo de rendimiento del proceso de extracción de almidón de ajipa.....	105
3.9.	Balance de materia de obtención de plástico biodegradable a partir de almidón de ajipa....	106
3.9.1.	Balance de materia en la etapa de preparación de mezcla de bioplástico.....	106
3.9.2.	Balance de materia en la etapa de homogenización de mezcla con calentamiento	107
3.9.3.	Balance de materia en la etapa de moldeado	108
3.9.4.	Balance de materia en la etapa de secado	108

3.9.5.	Balance de materia en la etapa de desmoldado	109
3.9.6.	Cálculo de rendimiento de obtención de plástico biodegradable.....	110
3.10.	Balance de energía para la obtención de plástico biodegradable.....	113
3.10.1.	Balance de energía en la etapa de licuado.....	113
3.10.2.	Balance de energía en la etapa de centrifugación	114
3.10.3.	Balance de energía en la etapa de secado.....	115
3.10.4.	Balance de energía en la etapa de molienda.....	115
3.10.5.	Balance de energía en la etapa de tamizado.....	116
3.10.6.	Balance de energía en la etapa de preparación de mezcla de plástico biodegradable	117
3.10.7.	Balance de energía en la etapa de secado de plástico biodegradable..	118

CAPÍTULO IV

COSTOS DE PRODUCTO

4.	COSTOS DE PRODUCTO	120
4.1.	Costos de materiales y reactivos.....	120

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
5.1.	Conclusiones	125
5.2.	Recomendaciones	126

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
---------------------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1: Taxonomía de la planta de Ajipa.....	8
Tabla I-2: Composición principal de Ajipa (P. Ahipa (Wedd)).....	12
Tabla I-3: Propiedades organolépticas del Almidón de Ajipa	15
Tabla I-4: Aplicaciones de los plásticos biodegradables	21
Tabla II-1: Propiedades fisicoquímicas de la raíz de Ajipa	33
Tabla II-2: Escala de puntuación.....	34
Tabla II-3: Selección del proceso para la obtención de plástico biodegradable	35
Tabla II-4: Variables de proceso para la extracción de almidón.....	38
Tabla II-5: Niveles de variación de factores	38
Tabla II-6: Matriz de experimentos.....	39
Tabla II-7: Variables de proceso para la obtención de plástico biodegradable.....	41
Tabla II-8: Niveles de variación de factores	41
Tabla II-9: Matriz de experimentos para bioplástico	42
Tabla II-10: Materiales utilizados para la obtención de plástico biodegradable a partir de ajipa	43
Tabla II-11: Escala de puntuación para análisis sensorial	58
Tabla III-1: Propiedades fisicoquímicas de la Ajipa.....	62
Tabla III-2: Propiedades físicas de la Ajipa	63
Tabla III-3: Resultados del rendimiento (%) del proceso de obtención de almidón a partir de Ajipa	64
Tabla III-4: Análisis humedad del almidón de Ajipa.....	66
Tabla III-5: Análisis de Amilosa y Amilopectina del almidón de Ajipa	67

Tabla III-6: Matriz de diseño experimental en el proceso de extracción de almidón a partir de Ajipa	68
Tabla III-7: Prueba de efectos inter-sujetos para almidón de Ajipa.....	69
Tabla III-8: Resumen del modelo ^b para almidón de Ajipa	70
Tabla III-9: Análisis de Varianza para almidón de Ajipa	71
Tabla III-10: Coeficiente del Modelo de regresión lineal para el almidón	72
Tabla III-11: Comparación entre % Rendimiento observado y % Rendimiento del modelo.....	74
Tabla III-12: Resultados de análisis sensorial del bioplástico	76
Tabla III-13: Medidas de espesor de bioplástico	78
Tabla III-14: Contenido de porcentaje de humedad de muestras de bioplástico	79
Tabla III-15: Resultados de Resistencia a la tracción	80
Tabla III-16: Degradación en tierra del plástico biodegradable.....	82
Tabla III-17: Porcentaje de degradación en tierra por día.....	83
Tabla III-18: Degradación en agua del plástico biodegradable	85
Tabla III-19: Tiempo de Secado del bioplástico	87
Tabla III-20: Matriz de diseño experimental en el proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa	89
Tabla III-21: Pruebas de efectos inter-sujetos para plástico biodegradable.....	90
Tabla III-22: Resumen del modelo ^b para plástico biodegradable	91
Tabla III-23: Análisis de Varianza para plástico biodegradable	92
Tabla III-24: Coeficiente del Modelo de regresión lineal para el plástico biodegradable	93

Tabla III-25: Comparación de la Resistencia observada y la Resistencia del modelo	95
Tabla III-26: Resumen del balance de materia	112
Tabla III-27: Valores del consumo energético del balance de energía	119
Tabla IV-1: Costo de materiales	120
Tabla IV-2: Costos de materia prima y reactivos.....	121
Tabla IV-3: Costos de análisis fisicoquímicos.....	122
Tabla IV-4: Costos de consumo energético	123
Tabla IV-5: Costos de material de apoyo y mano de obra.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Pachyrhizus ahipa (Wedd)	9
Figura 1-2: Flor de Ajipa.....	9
Figura 1-3: Vainas de Pachyrhizus ahipa (Wedd).....	10
Figura 1-4: Raíz de Pachyrhizus Ahipa	11
Figura 1-2: Almidón.....	14
Figura 1-3: Estructura de una molécula de amilosa	16
Figura 1-4: Estructura de una molécula de amilopectina.....	17
Figura 1-5: Proceso de biodegradación de una botella y un tenedor	20
Figura 1-6: Etapa de extracción del almidón	25
Figura 1-7: Diagrama del Proceso Tradicional	27
Figura 1-8: Diagrama del Proceso con almidón modificado	29
Figura 1-9: Diagrama del Proceso con matriz reforzada	31
Figura 2-1: Recepción de Ajipa	45
Figura 2-2: Lavado de Ajipa	46
Figura 2-3: Ajipa Pelada	46
Figura 2-4: Corte y licuado de Ajipa	47
Figura 2-5: Filtrado y lavado.....	48
Figura 2-6: Almidón centrifugado	49
Figura 2-7: Lavado de Almidón.....	49
Figura 2-8: Secado de Almidón	50
Figura 2-9: Molienda de almidón de Ajipa	51
Figura 2-10: Almidón tamizado	51

Figura 2-11: Almidón de Ajipa	52
Figura 2-12: Preparación de mezcla de plástico biodegradable.....	53
Figura 2-13: Homogenización de mezcla	53
Figura 2-14: Moldeado de mezcla	54
Figura 2-15: Secado de láminas de Plástico biodegradable	54
Figura 2-16: Desmoldado y almacenado de lámina de plástico biodegradable	55
Figura 2-17: Diagrama de bloques del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa.....	56
Figura 2-18: Diagrama de flujo instrumentalizado de la obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa	57
Figura 2-19: Determinación del espesor	59
Figura 2-20: Degradación en Tierra.....	61
Figura 3-1: Análisis de Rendimiento por muestra	65
Figura 3-2: Análisis de humedad del almidón de Ajipa.....	66
Figura 3-4: Comparación gráfica del %Rendimiento observado y %Rendimiento modelo.....	75
Figura 3-5: Análisis sensorial del bioplástico	77
Figura 3-6: Porcentaje de degradación promedio por muestra en tierra	84
Figura 3-7: Representación gráfica de % degradación en agua	86
Figura 3-8: Curva de secado del bioplástico	88
Figura 3-9: Comparación gráfica de la Resistencia observada y Resistencia del modelo	96
Figura 3-10: Empaque protector (Forro de cuaderno y libro).....	97
Figura 3-11: Etapa de lavado de Ajipa con cáscara	98

Figura 3-12: Etapa de pelado	99
Figura 3-13: Etapa de Corte y licuado	100
Figura 3-14: Etapa de Filtrado y lavado de fibra	101
Figura 3-15 Etapa de centrifugado	102
Figura 3-16: Etapa de Lavado de almidón	102
Figura 3-17: Etapa de secado	103
Figura 3-18: Etapa de molienda	104
Figura 3-19: Etapa de tamizado	105
Figura 3-20: Etapa de preparación de mezcla de bioplástico.....	106
Figura 3-21: Etapa de homogenización de mezcla con calentamiento	107
Figura 3-22: Etapa de moldeado	108
Figura 3-23: Etapa de secado	109
Figura 3-24: Etapa de desmoldado.....	109
Figura 3-25: Resumen de balance de materia de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa	111

ANEXOS

ANEXO 1: Especificación de equipos utilizados	134
ANEXO 2: Análisis Fisicoquímico de Ajipa y Almidón de Ajipa	137
ANEXO 3: Propiedades mecánicas de los bioplásticos obtenidos	139
ANEXO 4: Galería de fotos	148
ANEXO 5: Análisis sensorial de las muestras de bioplástico	151

SIGLAS Y/O ABREVIACIONES

ICI = Imperial Chemical Industries (Industrias químicas industriales)

TPS = Thermoplastic Starch (almidón termoplástico)

INIAF = Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal

HMP = High Methoxy Pectin (Pectina de alto metoxilo)

LMP = Low Methoxy Pectin (Pectina de bajo metoxilo)

INEN = Instituto Ecuatoriano de Normalización

UNE = Una Norma Española

ISO = International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización o Estandarización)

ASTM = American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales)

EN = Normas Europeas

CEANID = Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo

CIPRES = Comisión de la Industria del Plástico Responsabilidad y Desarrollo Sustentable

NB = Norma Boliviana

IBM SPSS = Statistical Package for the Social Sciences (Paquete estadístico para las ciencias sociales)

°C = Grado Celsius

Mpa = Mega pascal

% = Porcentaje

t/ha = Tonelada por Hectárea

m.s.n.m. = Metros sobre el nivel del mar

cm = Centímetros

mm = Milímetros

kg = Kilogramo

kcal = Kilocalorías

g = Gramos

$(C_6H_{10}O_5)_n$ = Polímero de glucosa

CO₂ = Dióxido de carbono

H₂O = Agua

$C_3H_8O_3$ = Glicerina

$C_2H_4O_2$ = Ácido Acético

Rpm = Revoluciones por minuto

min = minuto

ρ = Densidad

ml = Mililitros

cm² = Centímetros cuadrados

W = vatios

kW = Kilovatios

KWh = Kilovatios hora

kJ = Kilojulios

h = Hora

Bs. = bolivianos