



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

**Evaluación del efecto de diferentes parámetros en la
obtención de maltodextrina mediante hidrólisis
enzimática del almidón de yuca (Manihot esculenta
Crantz) a través del diseño factorial**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Nancy VILLAVICENCIO SÁNCHEZ

ASESOR

Eder Clidio VICUÑA GALINDO

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Villavicencio, N. (2021). *Evaluación del efecto de diferentes parámetros en la obtención de maltodextrina mediante hidrólisis enzimática del almidón de yuca (Manihot esculenta Crantz) a través del diseño factorial*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Nancy Villavicencio Sánchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45273138
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Eder Clidio Vicuña Galindo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09069542
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4980-0490
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Waldir Desiderio Estela Escalante
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09548299
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Oscar Amado Crisóstomo Gordillo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10591421
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Eder Clidio Vicuña Galindo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09069542
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.3.2.1. Análisis multivariante
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento

Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Latitud: -12.060366° Longitud: -77.083700°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2014-2018
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia”

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUÍMICA

ACTA DE TITULACIÓN POR TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia del **Dr. Waldir Desiderio Estela Escalante**, el **Ing. Oscar Amado Crisóstomo Gordillo** (Miembro) y el **Ing. Eder Clidio Vicuña Galindo** (Asesor), habiendo presentado para el efecto la **TESIS**, titulada “**EVALUACION DEL EFECTO DE DIFERENTES PARÁMETROS EN LA OBTENCIÓN DE MALTODEXTRINA MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DEL ALMIDÓN DE YUCA (MANIHOT ESCULENTA CRANTZ) A TRAVÉS DEL DISEÑO FACTORIAL**”, después de **SUSTENTADA Y APROBADA LA TESIS** elaborada por la Bachiller en Ingeniería Química: **NANCY VILLAVICENCIO SÁNCHEZ**; para optar el **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**, acordando calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO

(LETRAS)

18

(NÚMEROS)

Lima, 18 de febrero del 2021



Firmado digitalmente por ESTELA ESCALANTE Waldir Desiderio FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 22.02.2021 18:02:18 -05:00

Dr. Waldir Desiderio Estela Escalante
Presidente de jurado



Firmado digitalmente por CRISOSTOMO GORDILLO Oscar Amado FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 22.02.2021 14:25:57 -05:00

Ing. Oscar Amado Crisóstomo Gordillo
Docente Revisor

Ing. Eder Clidio Vicuña Galindo
Asesor



Firmado digitalmente por PALOMINO INFA TE Ruben Alfredo FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 01.03.2021 19:16:25 -05:00

Dr. R. Alfredo Palomino
Director de la EPIQ

INFORME DE EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

1. Facultad: **Química e Ingeniería Química**
2. Escuela Profesional: **Ingeniería Química**
3. Autoridad académica que emite el informe de originalidad: **Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Química**
4. Apellidos y Nombres de la autoridad académica: **Rubén Alfredo Palomino Infante**
5. Operador del programa informático de similitudes: **María Verónica Carranza Oropeza**
6. Documento evaluado: **Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico.**
7. Autores del documento: **Nancy Villavicencio Sánchez**
8. Fecha de recepción del documento: **06 enero del 2022**
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: **10 enero del 2022**
10. Software utilizado: **Turnitin**
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Excluye bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
 - Otros criterios(especificar)
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes: **08 %**
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas: **FUENTES DE INTERNET, TRABAJOS DEL ESTUDIANTE.**
14. Observaciones: **ninguna**
15. Calificación de originalidad
 - Documento **SI** cumple criterios de originalidad.
16. Fecha del informe: **10 de enero del 2022**


Firma del Evaluador
Dra. Verónica Carranza



Firmado digitalmente por PALOMINO
INFANTE, Ruben Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08.08.2022 20:28:42 -05:00

Dr. R. Alfredo Palomino Infante
Director

Dedicatoria

A Jhoan, por acompañarme en cada paso, y motivarlos siempre con esa mirada llena de confianza, amor y admiración. Gracias por ser mi compañero, amigo y confidente y por dejar que me vea a través de tus ojos.

A mi madre, por sus consejos y apoyo incondicional. Gracias por enseñarme que siempre se puede sacar una mejor versión de uno mismo. Sin ti nada hubiese sido posible.

A mi abuelita Teodora, por haberme enseñado el valor del trabajo duro, y habernos inculcado la fe en Dios y a obrar, siempre, correctamente en la vida.

A Faby, sin cuya sonrisa mi vida no sería la misma. Gracias por haberme motivado en cada momento a querer ser la mejor hermana.

Al Ingeniero Eder Vicuña, por sus enseñanzas, perseverancia y constancia, sin las cuales no hubiese sido posible este trabajo. Muchas gracias por hacer que cada uno de sus alumnos siempre admiremos su pasión por la investigación y la forma correcta de actuar en cada aspecto de la vida, como ingenieros, pero sobretodo, como personas. Sé que siempre necesitaremos de sus consejos.

Agradecimiento

Al Dr. César Sánchez, quien desde el primer momento confió en mí para el desarrollo de este y posteriores trabajos.

Muchas gracias por ver capacidades que incluso yo desconocía y por la confianza que me dio para desarrollarme a nivel intelectual y laboral.

A cada uno de ustedes, les estaré eternamente agradecida...

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
NOTACIÓN	17
CAPÍTULO I	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.1. Identificación del problema	19
1.2. Formulación del problema	19
1.3. Justificación	20
1.4. Objetivos de la investigación	21
1.4.1. Objetivo principal	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
1.5. Hipótesis	22
CAPÍTULO II	23
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1. Yuca (<i>Manihot esculenta Crantz</i>)	23
2.1.1. Clasificación	23
2.1.2. Taxonomía	24
2.1.3. Biogeografía	24
2.1.4. Características	25
2.1.5. Información nutricional	27
2.1.6. Producción nacional	28
2.2. Almidón	30
2.2.1. Características	30

2.2.2. Estructura química	30
2.2.3. Propiedades	32
A. Gelatinización	32
B. Retrogradación	35
2.2.4. Fuentes de almidón	36
2.2.5. Almidones modificados	37
2.3. Maltodextrinas	38
2.3.1. Características particulares	39
2.3.2. Propiedades	39
2.3.3. Aplicaciones	41
2.3.4. Fuentes de obtención	42
2.3.5. Proceso de obtención de maltodextrina	42
2.4. ENZIMAS	44
2.4.1. Enzimología	44
2.4.2. Alfa-amilasas	50
2.4.3. Enzima Liquozyme Supra 2.2X	51
2.5. Diseño experimental	52
2.5.1. Diseños factoriales	53
2.5.2. Factores y sus niveles	53
2.5.3. Efecto de un factor	54
2.5.4. Interacción de factores y su efecto	54
2.5.5. Diagrama normal de los efectos	55
CAPÍTULO III	56
3. MATERIALES Y MÉTODOS	56
3.1. Lugar de ejecución	56
3.2. Equipos y materiales	56

3.2.1. Materia prima	56
3.2.2. Reactivos	56
3.2.3. Materiales	57
3.2.4. Equipos	57
3.3. Métodos	58
3.3.1. Análisis proximal	58
A. Determinación del porcentaje de materia comestible	58
B. Determinación del porcentaje de humedad	59
C. Determinación del porcentaje de cenizas	60
D. Determinación de fibra cruda	60
3.3.2. Análisis morfológico	62
A. Determinación de longitud promedio	62
B. Determinación de diámetro promedio	62
3.4. Proceso experimental	62
3.4.1. Extracción y caracterización del almidón	63
A. Determinación de la temperatura de gelatinización (Grace, 1977)	63
3.4.2. Obtención vía enzimática de maltodextrina a partir de yuca	64
A. Determinación de la respuesta	69
3.4.3. Evaluaciones preliminares (uno a la vez)	71
A. Antecedentes	71
B. Selección de variables	73
C. Ejecución de las evaluaciones preliminares	75
3.4.4. Diseño factorial 2^4 con dos repeticiones	75
3.4.5. Obtención del modelo matemático	78
3.4.6. Validación del modelo matemático	79
A. A través de la determinación del error	79

B. A través de la evaluación de otras investigaciones	79
CAPÍTULO IV	80
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
4.1. Evaluación preliminar	80
4.1.1. Evaluación del análisis proximal	80
A. Contenido de material comestible	80
B. Porcentaje de humedad	80
C. Contenido de cenizas	80
D. Cantidad de fibra cruda	81
4.1.2. Evaluación del análisis morfológico	81
A. Longitud promedio	81
B. Diámetro promedio	81
4.2. Proceso experimental	82
4.2.1. Temperatura de gelatinización	82
4.2.2. Evaluaciones preliminares (un factor a la vez)	83
A. Concentración de enzima y temperatura de digestión constantes	83
B. Concentración de sustrato y temperatura de digestión constantes	84
C. Concentración de enzima y de sustrato constantes	86
4.2.3. BALANCE DE MATERIA DE LOS EXPERIMENTOS	89
4.2.4. Determinación de los niveles de factores para el diseño factorial	94
4.2.5. Ejecución de pruebas definitivas	97
4.2.6. Resultados del efecto de los factores y sus interacciones	101
4.2.7. Modelo matemático del comportamiento de los factores en la obtención de maltodextrina	104
4.2.8. Validación del modelo matemático	106

A. A través de la determinación del error experimental (datos de Matriz Experimental)	106
B. A través del resultado de otras investigaciones	108
4.2.9. Evaluación del producto obtenido con uno comercial	112
CAPÍTULO V	115
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
5.1. Conclusiones	115
5.2. Recomendaciones	116
GLOSARIO	117
REFERENCIAS	120
Páginas Web	127
ANEXOS	130
Anexo 1: Ficha Técnica de enzima Alfa Amilasa Liquozyme Supra 2.2X	130
Anexo 2: Métodos de análisis	132
Anexo 2A: Determinación de Humedad - Método Oficial de Análisis de la AOAC (1990)	132
Anexo 2B: Determinación de cenizas – Método Oficial de Análisis de la AOAC (1990)	133
Anexo 2C: Determinación de fibra cruda - Método oficial de análisis de la AOAC (1990)	134
Anexo 2D: Determinación de la temperatura de gelatinización (Grace, 1977) – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura	135
Anexo 2E: Determinación de equivalentes de dextrosa en hidrolizados de almidón	136
Anexo 3	137
Anexo 3A: Evidencia fotográfica de los experimentos	137
Anexo 4: Tablas de resultados experimentales	144

Anexo 5: Tablas de interés en caso de escalamiento industrial	154
Anexo 5A: Precio promedio al productor de principales productos agrícolas (S//kg)	
154	
Anexo 5B: Rendimiento promedio de principales cultivos (t/ha) 2003-2012	155
Anexo 5C: Porcentaje de comercialización a lima metropolitana en función a la producción nacional	157
Anexo 5D: Volumen comercializado de principales productos agrícolas a Lima Metropolitana	158
Anexo 5E: Volumen de producción de principales productos agrícolas	160
Anexo 5F: Superficie sembrada de principales cultivos	162
Anexo 5G: Composición porcentual del VBP de principales productos	164
Anexo 5H: Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por vía de ingreso, dólares americanos	166
Anexo 5I: Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por vía de ingreso, dólares americanos	167
Anexo 6: Pre estudio de escalamiento industrial	170
Anexo 6A: Diseño preliminar de planta de producción de maltodextrina a partir de yuca	170
A. Recepción de materia prima	170
B. Lavadora – peladora	170
C. Rallador	170
D. Extractor	172
E. Tanque de gelatinización	172
F. Tanque de digestión	173
G. Filtro prensa	173
H. Atomizador	174

I. Molino de rodillos vertical	174
J. Selladora	175
K. Marmita con chaqueta	175

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Yuca cosechada	25
<i>Figura 2.</i> Planta de yuca	26
<i>Figura 3.</i> Estructura de la amilosa	31
<i>Figura 4.</i> Estructura de la amilopectina	31
<i>Figura 5.</i> Modificación de los gránulos de almidón durante el proceso de gelatinización	34
<i>Figura 6.</i> Estructura general de las maltodextrinas	38
<i>Figura 7.</i> Variación de las propiedades de almidón, maltodextrinas y jarabe de glucosa en función de su equivalente de dextrosa	40
<i>Figura 8.</i> Efecto de la α -amilasa sobre el almidón	43
<i>Figura 9.</i> Productos de la hidrólisis enzimática del almidón	44
<i>Figura 10.</i> Estabilidad a temperatura ambiente de la α -amilasa de <i>Aspergillus oryzae</i> soluble e inmovilizada en función del tiempo	48
<i>Figura 11.</i> Efecto de la enzima β -amilasa	49
<i>Figura 12.</i> Acción de las enzimas α -amilasa y la β -amilasa en la estructura del almidón	49
<i>Figura 13:</i> Variación de la estabilidad en función de la temperatura de Alfa-Amilasa de <i>Aspergillus oryzae</i>	51
<i>Figura 14.</i> Esquema del montaje para realizar la filtración por presión reducida	65
<i>Figura 15.</i> Diagrama del proceso de obtención de maltodextrina a partir de yuca y principales parámetros de control	67
<i>Figura 16.</i> Foto del equipo de secado por atomización utilizado para los experimentos	68
<i>Figura 17.</i> Foto del diagrama de componentes del equipo de secado por Atomización. Pantalla display del equipo atomizador	69

<i>Figura 18.</i> Curvas de comportamiento ED versus tiempo de las enzimas comerciales Termamyl 120L, Liquozyme X y Liquozyme Supra 2.2x	73
<i>Figura 19.</i> Gráfica de experimentos realizados variando la concentración de sustrato, a temperatura y concentración de enzima constantes	84
<i>Figura 20:</i> Gráfica de experimentos realizados variando la concentración de enzima, a temperatura y concentración de sustrato constantes	85
<i>Figura 21:</i> Gráfica de experimentos realizados variando la temperatura de digestión, concentración de sustrato y enzima constantes	88
<i>Figura 22:</i> Grafica de experimentos realizados variando la temperatura de digestión, concentración de sustrato y enzima constantes	88
<i>Figura 23.</i> Balance de materia del proceso de producción de maltodextrina	93
<i>Figura 24.</i> Gráfica normal de los efectos estandarizados obtenido mediante software Minitab 18	103
<i>Figura 25.</i> Diagrama de Pareto de los efectos de la matriz experimental, obtenido a través del software Minitab 18	104
<i>Figura 26.</i> Gráfico de residuos	108
<i>Figura 27.</i> Etapa de lavado y pelado de yuca	137
<i>Figura 28.</i> Cáscara residuo de la etapa de pelado	137
<i>Figura 29.</i> Material comestible de yuca luego de la etapa de rallado	138
<i>Figura 30.</i> Etapa de extracción de almidón de yuca	138
<i>Figura 31.</i> Gelatinización de almidón de yuca	139
<i>Figura 32.</i> Filtración de solución con contenido de maltodextrina	139
<i>Figura 33.</i> Secado por atomización de maltodextrina	140
<i>Figura 34.</i> Recipiente recolector de maltodextrina (atomizador)	140
<i>Figura 35.</i> Diagrama de funcionamiento del atomizador	141
<i>Figura 36.</i> Diagrama de control de temperatura del atomizador	141

<i>Figura 37.</i> Diagrama de controles del atomizador	142
<i>Figura 38.</i> Tratamiento estadístico en software Minitab 18	142
<i>Figura 39.</i> Tratamiento estadístico en software Minitab 18	143
<i>Figura 40.</i> Diagrama de Lavadora- Peladora de raíces de yuca.	171
<i>Figura 41.</i> Diagrama del Rallador de raíces de yuca	171
<i>Figura 42.</i> Diseño de Filtro prensa de placas y marcos	173
<i>Figura 43.</i> Esquema de equipo de secado por atomización	174
<i>Figura 44.</i> Marmita con chaqueta para procesamiento de subproducto barra energética	175
<i>Figura 45.</i> Diagrama de la planta de producción de maltodextrina	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Composición de yuca en base húmeda</i>	27
Tabla 2. <i>Composición de yuca en base seca</i>	28
Tabla 3. <i>Datos estadísticos recolectados entre los años 2003 y 2012</i>	29
Tabla 4. <i>Composición de las principales fuentes comerciales de almidón</i>	36
Tabla 5. <i>Relación de industrias mejoradas con el uso de enzimas</i>	46
Tabla 6. <i>Principales fuentes de obtención y propiedades de α-amilasas</i>	50
Tabla 7. <i>Cantidad de materia fresca utilizada en la extracción de almidón</i>	63
Tabla 8. <i>Matriz experimental para el diseño factorial 2^4</i>	77
Tabla 9. <i>Matriz experimental del proceso de obtención de maltodextrina</i>	98
Tabla 10. <i>Resultados finales para tratamiento estadístico en Software Minitab 18</i>	100
Tabla 11. <i>Tabla de efectos de factores y sus interacciones de la matriz experimental</i>	101
Tabla 12. <i>Resultados de análisis de varianza emitidos por Software Minitab 18</i>	105
Tabla 13. <i>Determinación del error entre los valores experimentales y los calculados a través del modelo matemático</i>	107
Tabla 14. <i>Valores de obtención de ED por medio de enzimas Novozymes en almidón</i>	111
Tabla 15. <i>Resultados de materia comestible en tubérculos de yuca</i>	144
Tabla 16. <i>Resultados de humedad en tubérculos de yuca</i>	144
Tabla 17. <i>Resultados de contenido de cenizas en yuca</i>	145
Tabla 18. <i>Resultados de contenido de fibra cruda</i>	145
Tabla 19. <i>Resultados de longitud promedio de yuca</i>	146
Tabla 20. <i>Resultados de diámetro promedio de yuca</i>	146
Tabla 21. <i>Resultados de Temperatura de gelatinización de almidón extraído de yuca</i>	147
Tabla 22. <i>Factor de Fehling para pruebas definitivas 15 minutos</i>	147
Tabla 23. <i>Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 15 minutos – Prueba 1</i>	148

Tabla 24. <i>Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 15 minutos – Prueba 2</i>	149
Tabla 25. <i>Respuesta promedio en pruebas definitivas de 15 minutos</i>	150
Tabla 26. <i>Factor de Fehling para pruebas definitivas 30 minutos</i>	150
Tabla 27. <i>Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 30 minutos – Prueba 1</i>	151
Tabla 28. <i>Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 30 minutos – Prueba 2</i>	152
Tabla 29. <i>Respuesta promedio en pruebas definitivas de 30 minutos</i>	153
Tabla 30. <i>Precio promedio al productor de principales productos agrícolas (S//Kg)</i>	154
Tabla 31. <i>Rendimiento promedio de principales cultivos (t/ha). Año: 2003-2012</i>	155
Tabla 32. <i>Porcentaje de Comercialización de principales productos agrícolas a Lima Metropolitana en función a la Producción Nacional</i>	157
Tabla 33. <i>Volumen comercializado de principales productos agrícolas a Lima Metropolitana</i>	158
Tabla 34. <i>Volumen de producción de principales productos agrícolas. Año: 2003-2012 (Miles de t)</i>	160
Tabla 35. <i>Superficie sembrada se principales cultivos según campaña¹ agrícola (Miles de ha)</i>	162
Tabla 36. <i>Composición Porcentual del VBP Agropecuario, según principales productos</i>	164
Tabla 37. <i>Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por Vía de ingreso, dólares americanos</i>	166
Tabla 38. <i>Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por país de procedencia, dólares americanos</i>	167

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue obtener, a través de un modelo matemático, la relación existente entre las diferentes variables (concentración de enzima, concentración de sustrato, temperatura de digestión y tiempo de digestión) en la obtención de maltodextrina mediante tratamiento enzimático del almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*). Para esto, se realizó una caracterización de la yuca, luego se llevó a cabo pruebas preliminares, extrayendo el almidón de la yuca y sometiéndolo a hidrólisis con una enzima comercial alfa amilasa 300 KNU/g, variando la concentración del sustrato a 10, 20 y 30% masa/masa, concentración de enzima a 0.01, 0.02 y 0.03% y temperaturas de digestión a 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100°C y determinando la respuesta de Equivalentes de dextrosa (ED). Para las pruebas definitivas se estableció los niveles de cada uno de los factores para el diseño: en el factor Temperatura de digestión (A) se tomaron los niveles mínimo y máximo de 40 y 60°C. Como concentración de sustrato (B) se definió los valores en 20 y 30 % m/m. La concentración de enzima (C) se determinó en los valores 0.01 y 0.03% y el tiempo de digestión en 15 y 30 minutos. El rendimiento del proceso resultó 91.5% en función a la yuca en base seca. Los factores y sus respuestas fueron evaluados mediante ANOVA en el software Minitab 18, resultando el modelo matemático predictivo: $DE = 0.454375 + 0.128781 \times \text{Temperatura} - 0.0601875 \times [\text{Sustrato}] - 10.25 \times [\text{Enzima}] + 0.065625 \times \text{Tiempo} + 5.75312 \times \text{Temperatura} \times [\text{Enzima}]$; con una desviación $S=0.196883$, coeficiente de determinación $R^2=99.78\%$ y porcentaje de error promedio de 1.20%. Para simplificar el modelo predictivo, se consideró los factores e interacciones significativos: Temperatura, Concentración de sustrato, Concentración de enzima, Tiempo de digestión y la interacción Temperatura – Concentración de enzima en la expresión.

INTRODUCCIÓN

La yuca –*Manihot esculenta Crantz*– es una raíz originaria de América del Sur principalmente cultivada en África y Sudamérica. Como cultivo tiene grandes ventajas como su alto rendimiento por hectárea, gran tolerancia a la sequía, crecimiento en suelos degradados y gran flexibilidad para la siembra y la cosecha. En Perú, la yuca se encuentra en segundo lugar como cultivo, luego de la papa, y es de vital importancia como alimento en la selva peruana.

Principalmente la yuca es comercializada bajo la forma de almidón para industria alimentaria, textil y papelera. La conversión a medios mecánicos de siembra y cosecha ha permitido que algunos países aumenten la rentabilidad de la yuca como materia prima y debido a la particularidad de permitir su utilización total. El tallo se puede volver a reproducir, la raíz es utilizada para consumo directo, exportación o generación de productos agroindustriales, así como sus hojas. Además, su alto peso en seco la convierte en un producto altamente factible para aprovecharse en otras diferentes industrias.

Debido a su alta eficiencia, gran porcentaje de utilización y altos rendimientos en la extracción de almidón, además, la yuca, posee un porcentaje de amilopectina muy alto (80 a 85% masa/masa de almidón seco), esto significa un alto número de cadenas ramificadas que permite una producción de maltodextrina de alta calidad, por lo que la yuca ha sido considerada como una de las materias primas más conveniente para la producción de dextrinas de alta calidad (Prime Quality Dextrins). La maltodextrina es un tipo de dextrina elaborada a partir del rompimiento de enlaces en el almidón (*hidrólisis*) pudiendo ser este rompimiento vía ácida, enzimática o mixta (una combinación de ambos métodos). La maltodextrina es importante como aditivo alimentario, agente espesante y para crear volumen en alimentos, además de usarse como sustituto de las grasas debido a una parecida sensación bucal. También es usada en industria de bebidas (extendiendo la

estabilidad de las emulsiones), base de salsas y aderezos debido a que funciona como agente de volumen y elimina la sensación pegajosa, como sustituto de azúcares y calorías en barras nutricionales y cereales, alargando los tiempos de vida debido a que reduce el proceso de oxidación (pigmentos, sabores y esencias), además de su uso en industria papelería y de pegamentos. Asimismo, en el 2014, también se innovó a través de la creación de una pila en base a recarga de maltodextrina.

Las propiedades de las maltodextrinas varían de acuerdo a su grado de conversión, el cual es expresado en Equivalentes de dextrosa (ED) y que mide, la conversión de 0 a 100, de almidón a jarabes de glucosa, pasando por las maltodextrinas. El grado ED es determinado como la relación de la cantidad de azúcares reductores en función a la base seca del producto. Un grado ED menor a 5 corresponde a un producto que aún se encuentra en estado de almidón, de 5 a 20 ED corresponde a la clasificación de maltodextrina, y un ED mayor a 20 a jarabes de glucosa. Sin embargo, una maltodextrina de 5 ED tendrá características diferentes a uno de 20; por ejemplo, propiedades como higroscopicidad, dulzor y solubilidad aumentan con el grado de conversión, mientras otras como estabilización de la espuma, viscosidad y cuerpo disminuyen. Comercialmente, las maltodextrinas más utilizadas son las del rango 10 a 14 ED, las cuales ofrecen en promedio una gama diversa de propiedades ampliamente aprovechadas por la industria alimentaria. Cabe mencionar, que no solo el grado ED determinará las propiedades de la maltodextrina, sino también el origen de su almidón, así, una maltodextrina de un mismo grado ED puede tener características diferentes si se obtiene de maíz, papa o yuca, debido a su composición molecular (relación de amilosa y amilopectina en la materia prima).

Actualmente, Perú no solo no cuenta con una empresa productora de Maltodextrina, es decir que toda la maltodextrina utilizada en la industria proviene de importaciones, sino que además es producida por hidrólisis ácida o mixta del almidón de maíz, siendo su

procesamiento menos delicado con el medioambiente, además de tener rezagos en la salud humana. También se resalta que mediante vía enzimática el procesamiento será elaborado a pH cercanos al neutro, teniendo requerimientos menos estrictos en cuanto a maquinarias. Este estudio se enfoca en la obtención enzimática y evalúa los parámetros que se debe considerar para la obtención de maltodextrina vía enzimática, teniendo como base el diseño factorial compuesto para un mejor entendimiento y manejo del proceso. Como factores importantes han sido considerados los parámetros de temperatura de digestión, concentración de sustrato, concentración de enzima y tiempo de digestión.

NOTACIÓN

t	Tonelada
ha	Hectárea
μm	Micrómetro
g	Gramos
g/mol	Gramos por cada mol
h	Hora
min	Minutos
M	Molar
mL	Mililitro
N	Normal
PM	Peso molecular
°C	Grado Celsius
BCRP	Banco Central de Reserva del Perú
US\$	Dólares Americanos
S/.	Nuevos soles
ED	Equivalentes de dextrosa
KNU	Unidades Kilo Novo
Q. P.	Químicamente puro
%	Porcentaje
L	Litro

m/m Relación de la masa / masa

v/v Relación volumen/ volumen

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

Actualmente las empresas dedicadas a la producción de maltodextrina la obtienen mediante vía ácida o mixta. La hidrólisis ácida posee algunos inconvenientes que son tratados a lo largo del proceso antes de la liberación del producto final, las cuales acarrea mayores costos y tiempos de producción. Entre los principales defectos de este tratamiento podemos nombrar los más perjudiciales:

- Tratamiento de materiales coloreados.
- Etapas adicionales para la eliminación de cenizas y contaminantes que afecta no solo la rentabilidad del proceso, sino también a la salud y al medioambiente.
- Baja especificidad. Es casi imposible la modificación de las características y cualidades de las maltodextrinas obtenidas.
- Se obtiene moléculas de diferentes pesos moleculares debido al efecto agresivo y de bajo control de los ácidos.
- Uso de temperaturas y pH bruscos que pueden dañar los equipos y la salud del personal a cargo del proceso y que puede arrastrar rezagos sobre el consumidor final.

1.2. Formulación del problema

Para poder evaluar la obtención de maltodextrina vía enzimática hay algunas preguntas que la investigación debe responder a fin de considerar que se tendrá no solo un proceso controlado, sino que además representa más beneficios que otras vías. Éstas se presentan a continuación:

- ¿Cómo se podrá determinar el rango de las condiciones experimentales y la forma de combinar las variables en el proceso de obtención de las maltodextrinas?
- ¿Qué metodología experimental se ha de seguir para obtener la maltodextrina con seguridad y confianza?
- ¿Cómo están relacionados los parámetros con el grado de conversión del almidón de yuca?

1.3. Justificación

Son muchos los beneficios de la producción de maltodextrina mediante medios enzimáticos por sobre otros medios, los cuales favorecen los rubros tecnológico, medioambiental e incluso los referidos a salud.

Tecnológicamente se puede nombrar los beneficios más resaltantes:

- El proceso industrial resulta más económico y rentable si se desea escalar.
- Manejo para la obtención de productos deseados en función al tipo de enzima, a diferencia de la hidrólisis ácida que forma diferentes productos debido a su baja especificidad.
- Gran flexibilidad en las características del producto según los requerimientos.
- Dado que se trabaja a pH cercanos al neutro no se requiere de equipos muy resistentes
- Puede obtenerse altos rendimientos de acuerdo a las condiciones y modo de operación trabajados.
- En el Perú, en específico, se permitiría la implementación de un proceso agroindustrial, los cuales se encuentran proporcionalmente escasos debido a la gran distribución de materia prima sin procesar o pocamente procesada

(generalmente se alcanza a procesar la yuca hasta almidón); reduciendo así la cantidad de maltodextrina importada.

Ambientalmente, el tratamiento que se realiza no utiliza insumos químicos que puedan dañar el medioambiente, sino enzimas, las cuales son obtenidas mediante síntesis bacteriana o a partir de mohos (*Aspergillus oryzae*). El proceso de obtención de maltodextrina propiamente dicho tampoco utiliza insumos químicos que puedan ser evaporados al aire y dañen el ambiente y la salud.

En salud, el consumo de insumos alimentarios provenientes de un tratamiento bioquímico y no de uno químico también tendrá menos rezagos sobre la salud del consumidor final.

1.4. Objetivos de la investigación

A continuación, se presentan los objetivos de esta investigación:

1.4.1. Objetivo principal

Evaluar el efecto de cuatro variables (concentración de enzima, de sustrato, temperatura de digestión y tiempo de digestión) en la obtención de maltodextrina mediante hidrólisis enzimática del almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*), a través de un modelo matemático para mejor entendimiento, manejo y control del proceso, usando un diseño factorial.

1.4.2. Objetivos específicos

- Efectuar pruebas exploratorias para determinar el espacio de experimentación de las variables bajo estudio y así establecer la matriz del diseño experimental factorial de acuerdo a los tratamientos.

- Obtener maltodextrina de acuerdo a la combinación de variables según el modelo del diseño experimental y aplicando un procedimiento eficiente que permita obtener resultados confiables.
- Obtener un modelo matemático que correlacione la obtención de las maltodextrinas con las cuatro variables estudiadas y luego proceder con un proceso de validación del modelo.

1.5. Hipótesis

Mediante un modelo matemático, desarrollado experimentalmente, que correlaciona el grado de conversión de la maltodextrina obtenida con cuatro variables operacionales, se tendrá un mejor manejo y control de la conversión a los requerimientos comerciales de los Equivalentes de Dextrosa (ED).

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Yuca (*Manihot esculenta Crantz*)

La yuca –*Manihot esculenta Crantz*– es una raíz que pertenece a la familia de las Euforbiáceas, familia compuesta por 7500 especies y caracterizada por la secreción de látex. Su origen se encuentra en la cuenca Amazónica y recibe diferentes nombres comunes en diferentes partes del mundo:

- Yuca: Norte y centro de América del Sur, América Central y las Antillas.
- Mandioca: Argentina, Brasil y Paraguay.
- Cassava: Países de habla inglesa.
- Guacamote: México.
- Aipi y macacheira: Brasil.
- Mhogo: Países de África oriental.

2.1.1. Clasificación

Crantz, en 1766, asignó el nombre científico a la yuca, posteriormente reclasificada por Pohl en 1827. Asimismo, en 1910, Pax la dividió en dos especies: yuca amarga (*Manihot utilissima*) y yuca dulce (*Manihot aipi*). Sin embargo, Ciferri (1938) reconoció prioridad al trabajo de Crantz en el que se propone el nombre utilizado actualmente (Aristizábal et al., 2007). El género *Manihot* posee alrededor de 98 especies, pero solo la yuca es cultivada y aprovechada económicamente.

2.1.2. Taxonomía

La posición taxonómica del género es la siguiente:

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida
- Orden: Malpighiales
- Familia: Euphorbiaceae
- Subfamilia: Crotonoideae
- Tribu: Manihotae
- Género: *Manihot*
- Especie: *Manihot esculenta Crantz*

2.1.3. Biogeografía

Se presenta las características más representativas, acerca del origen, cultivo y la geografía del género nativo de América del Sur. Se distribuye desde Estados Unidos hasta Argentina, concentrándose la yuca dulce en el norte y centro de Sudamérica y la yuca de sabor amargo en Brasil.

- El cultivo tiene principalmente dos áreas de producción: Brasil y México y aproximadamente 80 de las 98 especies del género *Manihot* reconocidas son sudamericanas.
- En el Perú se cultiva en la Costa Central durante los meses de Septiembre a Octubre y en la costa norte y selva durante todo el año. El consumo en Lima es aproximadamente el 3.5% de la producción nacional.

2.1.4. Características

La yuca constituye el alimento principal para millones de personas en África, Asia y América del Sur. Es una fuente alimenticia que está considerada dentro del grupo Insumo energético debido a que posee menos del 1% de proteína de la parte comestible, produciendo mayor cantidad de calorías en base seca que el arroz y el maíz.



Figura 1. Yuca cosechada. Fuente: Aguilar, E. (2017)

Es uno de los cultivos más eficientes debido a que la tierra no debe cumplir demasiados requerimientos, como en otros cultivos. Además, se cultiva durante todo el año, como el camote y son más tolerantes a los cambios de temperatura, en contraposición a la papa, la cual necesita de temperaturas altas para su tuberización en solo algunas épocas del año. Sus cultivos han aumentado desde 70 millones de toneladas (1960) hasta 255.7 millones de toneladas (2013).

El cultivo de la yuca es tolerante a suelos de baja productividad y presentan un gran poder de recuperación frente a la afección de enfermedades. No requieren una gran cantidad de fertilizantes debido a que la yuca se reproduce aún en suelos pobres (Ospina et al.) Las raíces pueden permanecer bajo tierra por varios meses y sirve como medio

de preservación. Su ciclo vegetativo dura entre 4 y 12 meses, ciclo más largo que el de la papa y el camote. El ciclo dependerá de la fertilidad del suelo y la temperatura ambiental. Como cultivo, la yuca tiene muchas ventajas, como, por ejemplo, su alto rendimiento por hectárea, gran tolerancia a las sequías y suelos de baja fertilidad, además de una gran flexibilidad para su siembra y cosecha (Aristizábal et al., 2007). El Perú tiene una gran producción de yuca, principalmente en los departamentos de Loreto y Amazonas.

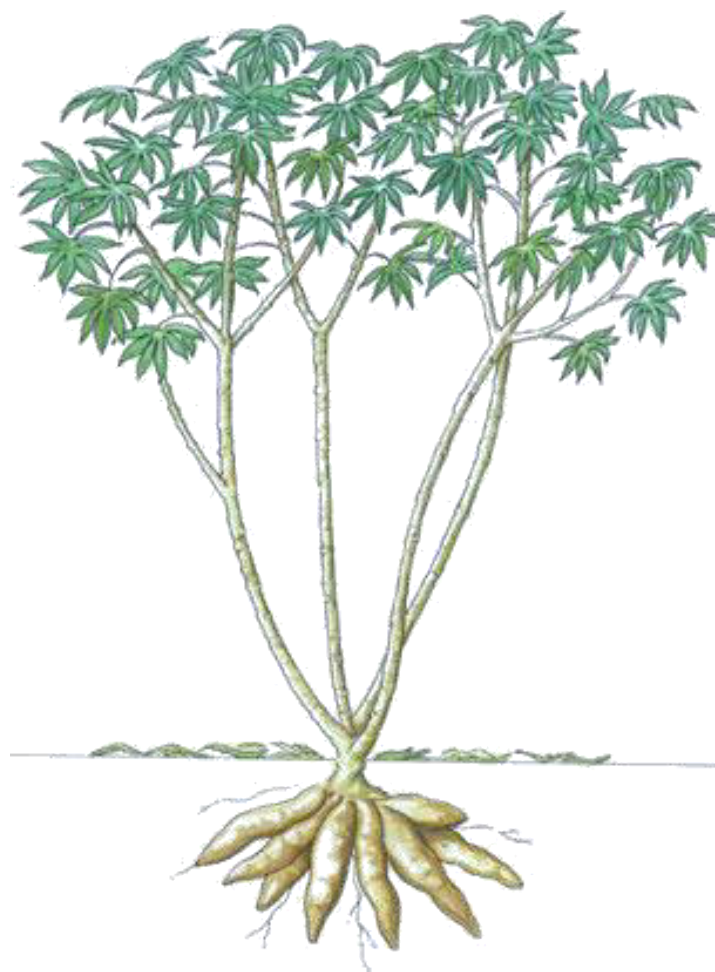


Figura 2. Planta de yuca. Fuente: Guía para los responsables de las políticas de intensificación sostenible de la producción agrícola. Fuente: Collette, L. (2011)

Respecto al porcentaje de materia seca, dentro de las principales fuentes de nuestro país se tiene que el mayor porcentaje (40%) lo tiene la yuca, seguida del camote con 30% y

luego la papa con 20%. Además, es una fuente de almidón muy competitiva, debido a su menor contenido de humedad respecto de otras fuentes, obteniéndose así un alto porcentaje de materia seca.

2.1.5. Información nutricional

Además de su gran potencial es sabido que fue muy importante para las culturas prehispánicas, como la Moche, de la cual se ha encontrado vasijas y reliquias arqueológicas dedicadas a este tubérculo.

La yuca representa una excelente reserva de energía debido a que sus raíces están compuestas principalmente de almidón, más del 30% de yuca fresca y 80% en base seca. Las tablas 1 y 2 muestran la composición de la yuca en base húmeda y seca, respectivamente:

Tabla 1. *Composición de yuca en base húmeda*

Yuca fresca	Composición en 100g de yuca
Agua	58,9
Proteínas	0,8
Grasa total	0,2
Carbohidratos totales	36,4
Carbohidratos disponibles	34,6
Fibra cruda	1,0
Fibra dietaria	1,8
Cenizas	0,9

Tablas Peruanas de Composición de Alimentos. Ministerio de Salud, Perú (2009)

Tabla 2. *Composición de yuca en base seca*

Yuca blanca seca	Composición en 100g de yuca
Proteínas	1,9
Grasa total	0,5
Carbohidratos totales	88,6
Carbohidratos disponibles	84,2
Fibra cruda	2,4
Fibra dietaria	1,8
Cenizas	2,2

Tablas Peruanas de Composición de Alimentos. Ministerio de Salud, Perú (2009)

2.1.6. Producción nacional

La yuca constituye el segundo tubérculo cultivado de mayor importancia en el Perú, teniendo en primer lugar a la papa. Su cultivo es de vital importancia como ingesta calórica principalmente en la selva, además de la preparación de fariña, masato y en algunas comunidades producción de Almidón de yuca.

En el Anexo 5 se encuentra algunas tablas de apoyo ante un posible escalamiento industrial y que muestran información del cultivo de yuca obtenida del Ministerio de Agricultura y Riego entre el 2003 y el 2012, como el aumento de producción de yuca entre el 2003 y 2012; el volumen de producción de los principales productos agrícolas cultivados; el rendimiento de los cultivos en t/ha; la cantidad de toneladas comercializada a Lima de los principales productos agroindustriales y los porcentajes de estas cantidades en función a la producción nacional, la cual hasta el 2012 era el 1.9% en referencia a la yuca.

Tabla 3. *Datos estadísticos recolectados entre los años 2003 y 2012*

Descripción	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Precio promedio al productor (S//Kg)	0,27	0,29	0,28	0,30	0,34	0,43	0,43	0,44	0,55	0,54
Rendimiento promedio (t/ha)	10871	11072	10815	10930	11096	11149	11648	11765	11833	12099
Porcentaje comercializado a Lima Metropolitana	1.4	1.2	1.3	1.4	1.4	1.2	1.4	1.4	1.7	1.9
Volumen comercializado a Lima Metropolitana (t)	12827	11382	12979	15149	15388	13444	15922	17535	19495	21410
Volumen de producción (t)	909,3	971,0	992,3	1063,5	1091,7	1094,0	1166,0	1240,1	1115,7	1118,5
Superficie sembrada (miles de hectáreas)	87,6	98,5	98,7	99,4	101,4	102,3	105,5	102,6	102,9	102,5
Porcentaje de VBP agropecuario	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1	1,8	1,7

Gerencias-Direcciones Regionales de Agricultura-Sub Gerencia/Dirección de Estadística/DIA/Evaluación Agrícola Mensual. Elaboración: MINAGRI-Oficina de Estudios Económico y Estadísticos – OEEE.

2.2. Almidón

2.2.1. Características

El almidón es un polisacárido complejo de origen vegetal que es almacenado en los tubérculos, raíces y semillas de las plantas. Como alimento, puede ser hidrolizado hasta glucosa y brindar a los seres vivos la energía que se necesita para desarrollar diferentes actividades mediante el rompimiento de enlaces por agua (hidrólisis), para la formación de moléculas más pequeñas y fáciles de absorber. La energía que brinda cada gramo de glucosa es de 4 Kilocalorías.

Estructuralmente el almidón está compuesto por una cadena larga de polímeros de glucosa, insolubles en agua, pero que forman una suspensión temporal mientras se encuentran en agitación. Los gránulos de almidón se hinchan ligeramente mediante la absorción de agua, pero si se calienta el hinchamiento es irreversible (Hernández, 2008). Esto permite que se use como espesante.

El almidón es materia prima para la elaboración de numerosos productos, como glucosa, dextrosa, dextrinas, ácido láctico, sorbitol, entre otros, por lo mismo puede ser una fuente de desarrollo casi ilimitada para el desarrollo de insumos orgánicos que puedan ser aprovechados en diferentes industrias.

2.2.2. Estructura química

El almidón está constituido por amilosa y amilopectina, compuestos de diferentes estructuras moleculares. En cada tipo de almidón la relación de amilosa y amilopectina será diferente dependiendo de la materia prima de origen. Existen diferencias significativas entre ambos compuestos.

- **Amilosa.** Formada por una cadena lineal compuesta de muchas unidades de glucosa con uniones entre el carbono 1 y el carbono 4 del tipo glucosídicas α -1,4 (Figura 3). La

amilosa forma una red tridimensional cuando se asocian las moléculas al enfriarse, esta asociación es responsable de la gelificación de las soluciones frías de almidón.

Usualmente, la amilosa suele constituir del 15 al 30 % del almidón, aunque hay algunas variedades, como los almidones céreos que no poseen amilosa. Usualmente los porcentajes de amilosa varían de acuerdo a su procedencia.

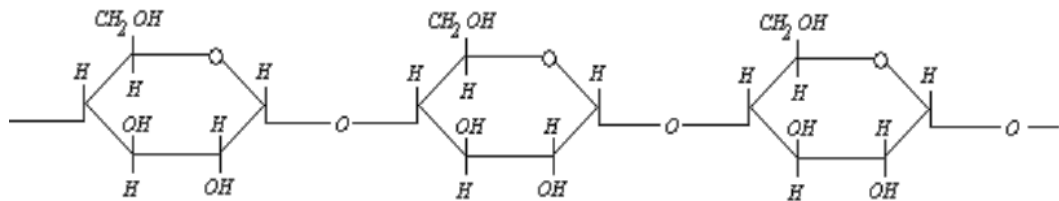


Figura 3. Estructura de la amilosa. Fuente: Melo, V. (2006)

- **Amilopectina.** Representa del 70 al 85 % del almidón generalmente. La cadena de glucosa de la amilopectina contiene uniones α -1,4 con ramificaciones α -1,6 cada 15 a 30 unidades de glucosa de la cadena (Figura 4). Las cadenas son ramificadas, aunque menos que la forma de carbohidrato de reserva animal, el glucógeno.

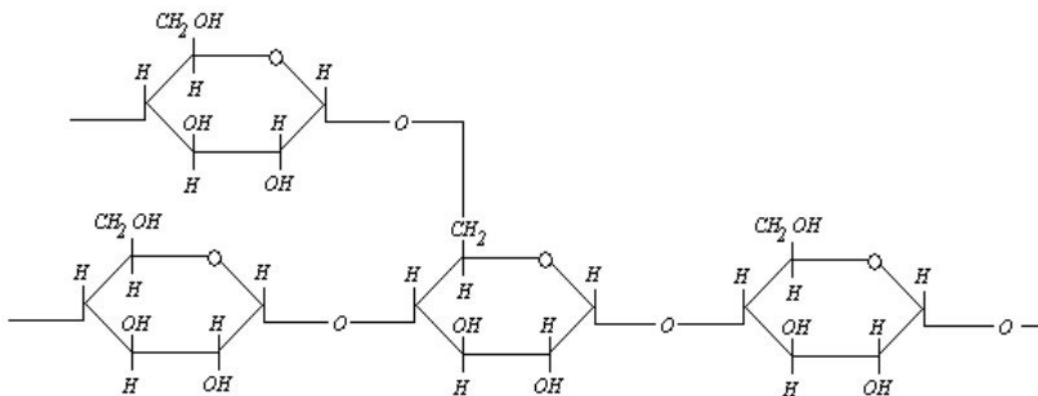


Figura 4. Estructura de la amilopectina. Fuente: Melo, V. (2006)

La proporción entre estos dos componentes varía según el organismo en el que se encuentre; los que tienen una mayor cantidad de amilosa tienen una gran importancia en el campo de las fibras y plásticos. Los almidones que posean una mayor concentración de amilopectina ocasionarán mayor espesamiento en una mezcla, pero no

gelificación porque, a diferencia de la amilosa, las moléculas de amilopectina no se asocian y forman enlaces químicos, por esto su importancia en el rubro alimentario.

2.2.3. Propiedades

A. Gelatinización

El almidón en su estado nativo es insoluble en agua. Cuando se encuentra frío o a temperatura ambiente en mezcla con agua forma una suspensión temporal y puede absorber cantidades pequeñas de agua. Esta absorción es reversible mediante secado mientras no haya cocción de por medio (Aristizábal et al., 2007)

Se conoce como *gelatinización* al proceso donde los gránulos de almidón, que son insolubles en agua fría debido a que su estructura es altamente organizada, se calientan (60-70°C) y empieza un proceso lento de absorción de agua denominado imbibición. La absorción se da primero en las áreas menos densas y posteriormente en las regiones más cristalinas de las moléculas de almidón hasta que el gránulo alcanza un volumen máximo (Vaclavik, 1998)

La gelatinización es la responsable del espesamiento de los sistemas alimenticios. Las soluciones de almidón gelatinizado son opacas, frágiles y no mantienen la estructura cristalina y ordenada del almidón (Peña, 2017). El rango de temperatura en el que tiene lugar el hinchamiento de los gránulos se conoce como rango de gelatinización y es distinto en cada variedad de almidón.

El aumento de calor a los gránulos hinchados ocasionará su ruptura parcial, dispersando la amilosa y amilopectina en la disolución. Esto generará un gel compuesto por cadenas de amilosa altamente hidratadas, y que a su vez rodean a otros agregados, también hidratados, del resto de gránulos. Conforme el almidón es liberado de los gránulos hinchados, la suspensión se convierte en un sol. Un sol es un sistema de dos fases

constituido por una fase líquida continua y una fase sólida dispersa (Vaclavik, 1998).

La siguiente expresión esquematiza este proceso.



El proceso de gelatinización se desarrolla en etapas específicas, que permiten la modificación de los gránulos:

- Se alcanza la temperatura de gelatinización entre 60 y 71°C (Vaclavik, 1998).
- La energía cinética de las moléculas de agua caliente rompe los enlaces entre las moléculas de almidón permitiendo que el agua pueda penetrar y dar lugar al hinchamiento. Es necesaria suficiente cantidad de agua para esta etapa. Los gránulos más grandes iniciarán antes esta etapa (Vaclavik, 1998).
- Se produce la difusión de cadenas de amilosa, conforme se liberan los gránulos de almidón (Vaclavik, 1998).
- Se pierde birrefringencia y la estructura cristalina ordenada del gránulo de almidón nativo. Es más traslúcido debido a que el índice de refracción del gránulo expandido está próximo al del agua (Vaclavik, 1998).
- El volumen del gránulo aumenta debido al hinchamiento, conforme al aumento de la temperatura (Vaclavik, 1998).
- Los gránulos se agrandan liberando amilosa y a veces amilopectina, la mezcla aumenta su viscosidad y se va haciendo más resistente al flujo a medida que gelatiniza (Vaclavik, 1998).
- El almidón desarrolla flavor a partir de los cinco minutos de cocción. Si se agita en exceso disminuirá el espesamiento de la mezcla, debido que gránulos de almidón

hinchados implosionan, y al romperse pierden líquido que retuvieron en su interior mientras estuvieron agrandados (Vaclavik, 1998).

La Figura 5 muestra la modificación que sufren los gránulos de almidón durante el proceso de gelatinización.

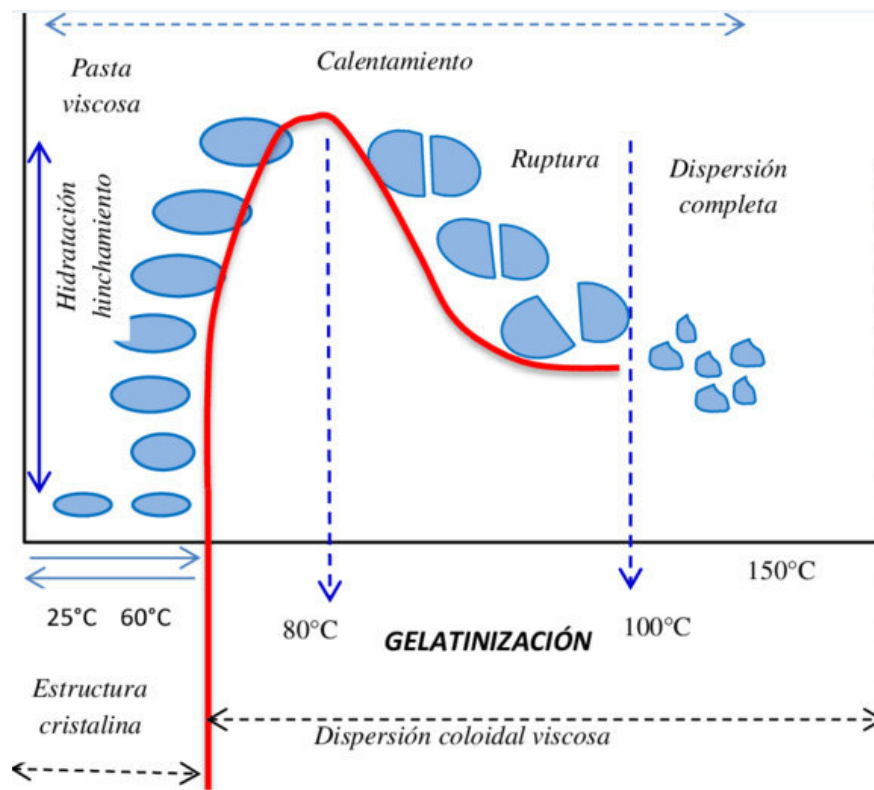


Figura 5. Modificación de los gránulos de almidón durante el proceso de gelatinización. Fuente: Ángeles, P. (2015)

Existen algunos factores que deben ser controlados para asegurar un buen proceso de gelatinización, según Vaclavik (1998). Entre ellos se puede mencionar:

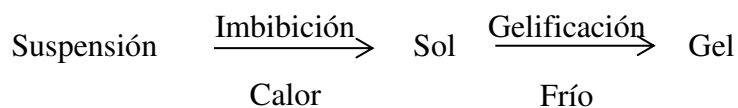
- Cantidad de ácido: si se agrega ácido a una mezcla antes de la gelatinización esto afectará su hinchamiento debido al rompimiento de gránulos. También la presencia de azúcar afecta el proceso, debido a que compite con el almidón por la absorción del agua.
- Velocidad de Agitación: la agitación afecta el proceso de gelatinización permitiendo a los gránulos de almidón hidratarse independientemente, creando así una mezcla homogénea y sin coágulos. Sin embargo, si ésta es excesiva una vez completada la

gelatinización puede romper estos gránulos y, por ende, disminuir la viscosidad de la mezcla.

- Aplicación de Enzima: el almidón puede ser hidrolizado por las enzimas que lo rompen, comúnmente son conocidas la α -amilasa, β -amilasa y β -glucoamilasa. Éstas deberán ser aplicada luego de haber llevado a cabo el proceso de gelatinización para causar el efecto correcto y obtener un mayor rendimiento del proceso de digestión (Medina, 2013). Si es aplicada antes puede afectar la temperatura de gelatinización, aumentándola, debido a que la enzima afectaría a algunos gránulos rompiendo sus cadenas de amilosa y amilopéctina y así, evitando la acumulación de moléculas de agua en el almidón.
- Contenido de grasas y proteínas: la presencia de grasa y/o proteínas inicialmente recubre o se adsorbe a la superficie de los gránulos, causando un retraso en la hidratación y por ende, en la gelatinización.
- Temperatura final: generalmente la gelatinización se completa de 88 a 90°C, pero esta temperatura varía de acuerdo al tipo de almidón.
- Tiempo: un exceso en el tiempo de calentamiento de la mezcla puede hacer que ésta pierda viscosidad debido a la rotura de los gránulos hinchados.

B. Retrogradación

La retrogradación es el proceso en el que el almidón gelatinizado revierte o se retrograda a una estructura más cristalina en el enfriamiento (Vaclavik, 1998)



Hay dos maneras por las que se puede llevar a cabo la retrogradación, las mismas que dependen de propiedades como concentración y temperatura de la mezcla:

- Vía rápida: calentando una solución concentrada de amilosa y enfriándola rápidamente a temperatura ambiente termina formando un gel rígido y reversible.
- Vía lenta: al calentar una solución diluida de almidón, esta se opaca y precipita. En el enfriamiento, se forman puentes de hidrógeno entre la amilosa, reasociándose y formando un gel. Por el contrario, las moléculas de amilopectina, debido a su estructura ramificada tienen menos tendencia que la amilosa a reasociarse, evitando así la formación de enlaces o geles.

Tabla 4. *Composición de las principales fuentes comerciales de almidón*

Fuente	Almidón ^{bh} (%)	Humedad (%)	Proteína (%)	Grasa (%)	Diámetro de gránulo (μm)	Almidón ^{bs} (%)
Maíz	60	16	9	4	15	71
Papa	18	78	2	0.1	33	82
Trigo	64	14	13	2.0	15	74
Maíz céreo	57	20	11	5.0	15	71
Arroz	78	12	8	0.5	5	89
Camote	23	68	1.5	0.3	15	72
Yuca*	33	56	1.8	0.2	17	75

^{bh}: Base húmeda; ^{bs}: Base seca. Fuente: Medina, L. (2013). * Tablas peruanas composición de alimentos. Minsa (2009)

2.2.4. Fuentes de almidón

Las principales fuentes conocidas y comerciales de almidón son los granos de cereales, como el trigo, el maíz y el arroz; raíces como el camote y la yuca y tubérculos como la papa.

Estas fuentes poseen alto contenido energético, debido principalmente a su contenido de almidón. Actualmente la mayor parte de almidón industrial es obtenido a partir de maíz, no solo por su alto contenido de almidón, sino también debido a su bajo costo y alta disponibilidad.

Los almidones suelen contener entre 15 a 30 % de amilosa. Sin embargo, algunos cereales como el maíz, trigo y arroz presentan variedades de almidones céreos, constituidos principalmente de amilopectina. La tabla 4 muestra la composición de las fuentes más importantes de obtención de almidón. Esta composición brinda contenidos de almidón en base húmeda, en base seca y se observa que luego del maíz y el arroz, la yuca es la fuente de almidón con menor contenido de humedad y luego del arroz el de mayor concentración de almidón en base seca.

2.2.5. Almidones modificados

Los almidones nativos se pueden modificar químicamente para producir cambios físicos que contribuyan a la estabilidad, apariencia, comodidad y funcionamiento en la preparación de alimentos de acuerdo al resultado que se desea sobre la aplicación. A continuación, se define el modo de obtención de los principales almidones modificados y su aplicación como insumos alimentario según Vaclavik (1998).

- Almidón pregelatinizado: almidón instantáneo gelatinizado y deshidratado, mediante un proceso irreversible. Este almidón se dispersa en agua fría, puede ser usado en budines instantáneos, puede espesar sin necesidad del aumento de temperatura, debido que reabsorbe agua, ofreciendo una sensación cremosa sin grasa.
- Almidones entrecruzados: se obtienen por una reacción entre grupos hidroxilo (OH^-) de dos moléculas adyacentes. Que tiene como propósito permitir al almidón resistir variaciones de los parámetros como bajos pH y altas temperaturas. Se usa en muchos alimentos ácidos como las salsas.

- Almidón ácido: almidón sometido a tratamiento en un ácido. Se somete a temperaturas por debajo de la temperatura de gelatinización con una baja concentración de ácido. Esto permite formar un almidón de baja viscosidad a temperaturas altas pero que se vuelve altamente gelificado al someterse a enfriamiento.

2.3. Maltodextrinas

La maltodextrina es un aditivo alimenticio que la FDA - U.S. Food and Drug Administration ha aprobado para su lista de GRASS, "Generally Recognized as Safe". Este insumo alimentario es el resultado de la hidrólisis del almidón, la cual produce varios oligómeros con contenido de 2 a 20 unidades de glucosa (Figura 6) que a su vez forman los azúcares reductores directos, expresados como Equivalentes de dextrosa, ED.

Comercialmente es presentada como polvo y en soluciones concentradas y clasificada por su contenido de ED (5, 10, 15 y 20 ED), ya que esta propiedad relaciona no solo la cantidad de azúcares reductores, sino también la cantidad de sólidos. Esta determinación es la más usada a nivel industrial, no solo por su rapidez, sino también por lo económico de la determinación.

La estructura de la maltodextrina dependerá del método de obtención, tiempo de digestión, temperatura de digestión y concentración de la enzima en la hidrólisis.

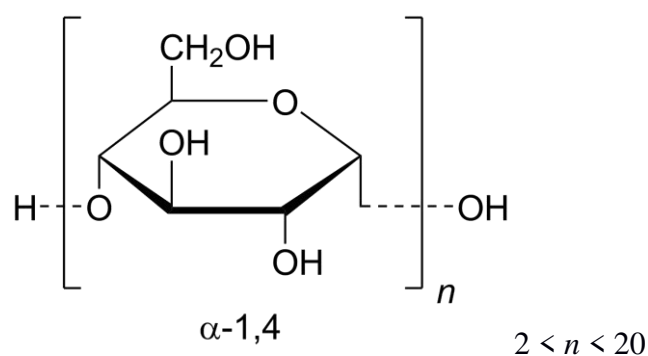


Figura 6. Estructura general de las maltodextrinas. Fuente: Cochi, F. (2018)

2.3.1. Características particulares

- Maltodextrinas 5% ED: son buenos agentes formadores de películas opalescentes, adicionan viscosidad, no son higroscópicas, no proporcionan dulzor, solubles a concentraciones 15% de sólidos a 20°C.
- Maltodextrinas 10% ED: poseen poder edulcorante mínimo, ligera higroscopicidad, solubles a concentraciones mayores al 30% de sólidos a 20°C.
- Maltodextrinas 15% ED: de ligero poder edulcorante, ligera higroscopicidad, forman soluciones claras a concentraciones superiores a 50% de sólidos a 20°C.
- Maltodextrinas 20% ED: poder edulcorante notorio, moderada higroscopicidad, sus soluciones son claras a concentraciones mayores de 60% de sólidos a 20°C.

2.3.2. Propiedades

Las maltodextrinas tienen muchas propiedades importantes, que las vuelven un aditivo alimentario único y que ofrecen características necesarias en muchos alimentos por su consistencia, apariencia y por las condiciones que pueda soportar. De sus propiedades se mencionará la más importante y la que gobierna la mayoría de cualidades de la maltodextrina: los equivalentes de dextrosa.

Los equivalentes de dextrosa se representan mediante un valor numérico que va de 0 a 100 y miden el porcentaje de conversión de almidón a glucosa. Mientras mayor sea el grado ED mayor será el porcentaje de conversión a glucosa.

Los equivalentes de dextrosa están relacionados directamente con los azúcares reductores, pero sin considerar la cantidad de agua que pueda contener (Ecuación 2.1). Su relación se debe a que todos los monosacáridos son azúcares reductores. Éstos poseen su grupo carbonilo intacto y a través de él reaccionan como reductores con otras moléculas.

$$\% \text{Equivalentes de Dextrosa (\%ED)} = \frac{\%AR}{\%BS} \times 100 \% \quad (2.1), \quad \text{donde:}$$

- %AR = Porcentaje de azúcares reductores
- % BS = Porcentaje en base seca

Las propiedades fisicoquímicas y funcionales de las maltodextrinas varían en función de sus equivalentes de dextrosa (%ED). Su utilización en la industria alimentaria y farmacéutica está ligada a propiedades para mejora del cuerpo y la textura, control del dulzor e higroscopicidad, incremento de la solubilidad en agua fría, y reducción de cristalización. La Figura 7 especifica la variación de las propiedades en función del equivalente de dextrosa (la dirección de la flecha indica aumento de la propiedad mencionada).

Equivalente de Dextrosa (%ED)	Almidón	Maltodextrinas					Jarabe de glucosa	
	0	5	10	15	20	25	100	
Viscosidad y cuerpo	←							
Reacciones de oscurecimiento	→							
Disminución del punto de congelación	→							
Cohesividad	←							
Higroscopicidad	→							
Dulzor	→							
Prevención de cristales gruesos	←							
Solubilidad	→							

Figura 7. Efecto de la α -amilasa sobre el almidón. Fuente: Aguirre, F. (2017)

2.3.3. Aplicaciones

La maltodextrina tiene una variedad de aplicaciones que son enormemente aprovechadas en la industria alimentaria y farmacéutica. A continuación, se presenta varias de ellas.

- Es componente en frutas enlatadas, postres, batidos de proteínas, salsas, lácteos, cremas, bebidas cítricas en polvo, en panificación, quesos procesados, cárnicos, helados, leche en polvo, mermeladas, tartas, medicamentos. Siempre deberá estar mencionada en la lista de ingredientes que figura en el envase de los alimentos.
- Es agregada en el proceso de secado por atomización (spray dryer) de diferentes alimentos, debido que tiene la capacidad de encapsular sabores y aromas, preservándolos para su posterior uso industrial.
- Es un excelente agente estabilizante en alimentos con alto contenido de grasa, alargando así su tiempo de vida. Esta estabilidad también está presente a altas temperaturas, a diferencia del almidón que se descompone rápidamente.
- Las maltodextrinas se utilizan como fuente de carbohidratos en bebidas energizantes y nutricionales para atletas. Esto debido a que están parcialmente digeridas y son de fácil absorción.
- Sirven como diluyentes en preparaciones instantáneas, tales como sobres con sustancias para dilución.
- Las maltodextrinas se utilizan como agente de revestimiento en las industrias farmacéuticas.
- Puede ser consumido por personas que padecen de celiaquía. Sin embargo, es recomendable que la maltodextrina provenga de otras fuentes de almidón diferentes al maíz, trigo y centeno.

- En 2014 un grupo de científicos de Virginia Tech realizó el diseño de una pila a base de maltodextrina. Ésta posee cuatro veces la duración de baterías alcalinas. Además de ser pilas biodegradables son recargables, se recarga la maltodextrina simulando un cartucho de impresión. Esta batería funciona con maltodextrina y aire para generar electricidad y agua como principales subproductos.

2.3.4. Fuentes de obtención

Industrialmente la maltodextrina puede ser a partir de las mismas fuentes de producción de almidón. La fuente más común es el almidón de maíz; sin embargo, se puede obtener a partir de otras fuentes como la papa, trigo, camote, centeno, arroz, plátano, mango y yuca. Las propiedades de las maltodextrinas pueden variar dependiendo de la fuente, el desarrollo para su producción a nivel industrial dependerá de la disponibilidad de la materia prima y las especificaciones deseadas en el producto final.

2.3.5. Proceso de obtención de maltodextrina

La producción de maltodextrina se obtiene a partir de la hidrólisis de cadenas de almidón. Esta hidrólisis consiste en el rompimiento de los enlaces de almidón, permitiendo que el oxígeno del agua se asocie a uno de los extremos de la molécula de azúcar y el OH al carbono libre del otro residuo de azúcar permitiendo así la formación de monosacáridos y oligosacáridos. Se puede producir maltodextrina por método ácido, utilizando ácido clorhídrico o sulfúrico para realizar la hidrólisis; método enzimático, mediante el uso de enzimas como amilasas o glucoamilasas o por la vía mixta, que es una mezcla de ambos métodos. La hidrólisis ácida produce que el almidón sea cortado al azar, lo que produce una mezcla descontrolada de moléculas con diferentes pesos moleculares. La hidrólisis enzimática ha reemplazado gradualmente los procesos de hidrólisis ácida debido a las ventajas que presentan (Wang, 2000):

- Condiciones de hidrólisis más suaves (temperatura, presión, pH).

- Menor cantidad de subproductos.
- No se obtiene materiales coloreados o de sabor amargo.
- Menor cantidad de etapas de refinamiento para eliminación de cenizas y aditivo coloreado, debido al proceso bioquímico.
- Mayor especificidad.
- Mayor control en el grado de hidrólisis deseado.

Para ambos métodos es necesaria una preparación de solución de almidón y la gelatinización de la misma, esto permite que el almidón se encuentre disponible, ya que los gránulos se disuelven y la amilosa y amilopectina quedan disueltas para facilitar la acción del ácido o de la enzima que se desea usar. Existen parámetros que deben ser supervisados para un llevar a cabo un proceso adecuado, como son: la temperatura de digestión, tiempo de hidrólisis, concentración de ácido o enzima y concentración del sustrato. La figura 8 muestra el efecto de una enzima α -amilasa sobre el almidón y la figura 9 los subproductos de la hidrólisis.

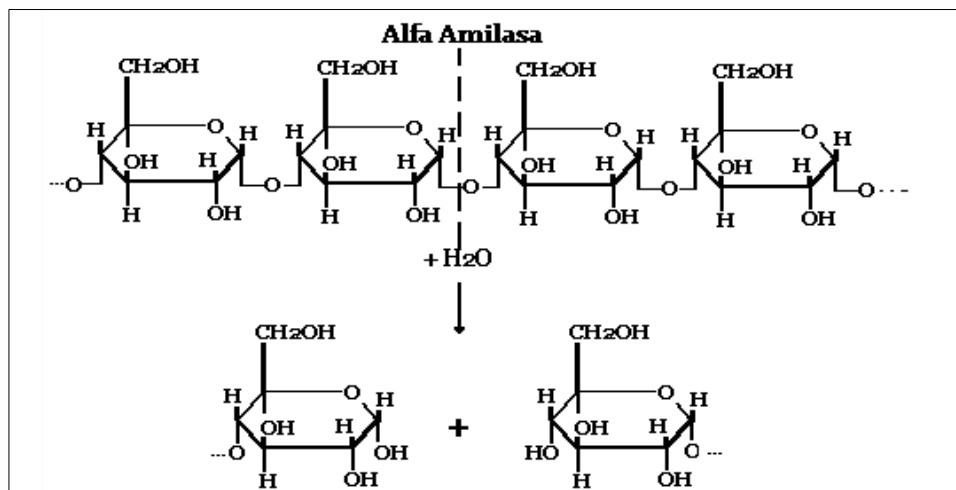


Figura 8. Efecto de la α -amilasa sobre el almidón. Fuente: Aguirre, F. (2017)

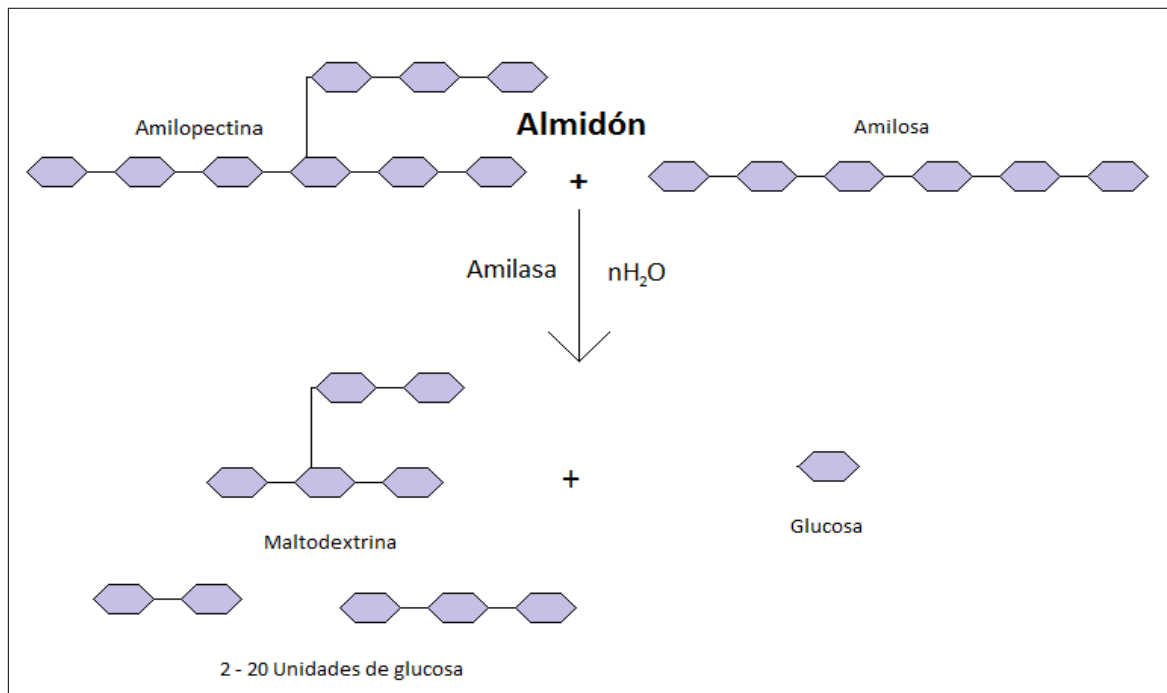


Figura 9. Productos de la hidrólisis enzimática del almidón. Fuente: Medina, L. (2013)

2.4. ENZIMAS

2.4.1. Enzimología

La enzimología es la rama de la bioquímica encargada del estudio de las enzimas. Las enzimas son moléculas proteicas o ribonucleicas, cuya función es la de acelerar reacciones químicas en sistemas biológicos.

La reacción química que es catalizada por una enzima utiliza la misma cantidad de sustrato y genera la misma cantidad de producto que una reacción no catalizada. Sin embargo, la diferencia está en el tiempo en el que es generado dicho producto, las reacciones en las cuales intervenga una enzima tendrán tiempo de reacción significativamente menores.

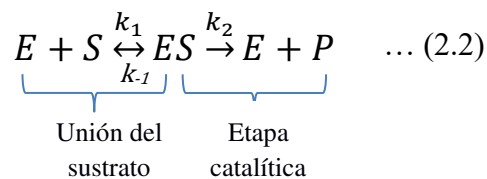
Existen diferentes factores que afectan la actividad de una enzima:

- Temperatura: las enzimas son sensibles a la temperatura, modificando su actividad enzimática. Normalmente la actividad de la enzima aumenta hasta que empieza a

desnaturalizarse, lo cual provoca una disminución progresiva de su actividad. La magnitud de esta desnaturalización será dependiente del calor y la intensidad del tratamiento térmico, la fracción de enzima que se desnaturaliza aumenta con el tiempo.

- pH: para cada enzima existe un rango de pH óptimo, en el cual la enzima alcanza su máxima actividad. Fuera de este rango la enzima se vuelve poco activa e incluso puede ser inactivada. Este efecto del pH sobre la enzima se debe a la ionización del sustrato y de los residuos aminoacídicos de la enzima, evidenciándose un cambio en la actividad enzimática, su estabilidad o el equilibrio de la reacción (Ruíz, 2009).
- Concentración de la enzima: es el factor limitante de la velocidad de reacción. La velocidad de reacción es directamente proporcional a la concentración de la enzima.
- Concentración de sales: las enzimas pueden ser afectadas por una presencia elevada de sales. Una concentración moderada de iones puede ayudar a mantener tanto la carga, como la estructura.

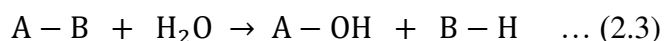
La Ecuación 2.2 muestra el mecanismo de unión entre una enzima y su sustrato



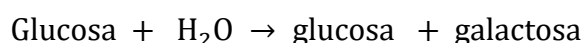
donde:

- E: Representación de la enzima.
- S: Representación del sustrato.
- P: Representación del producto.
- k_1 : constante de velocidad de formación del complejo ES.
- k_{-1} : constante de velocidad de disociación del complejo ES.
- k_2 : constante de velocidad de disociación del complejo ES para dar E y P.

La enzima que se estudia en esta investigación es la del tipo α -amilasa, la cual pertenece al grupo de las amilasas, o de manera más general al grupo de Hidrolasas. Las hidrolasas son un grupo de enzimas capaces de acelerar la hidrólisis de un enlace químico, las cuales se rigen bajo la reacción (2.3):



Donde A-B corresponde a una molécula de alto peso molecular de donde se puede obtener radicales A-H y B-OH a partir de la reacción con agua. Por ejemplo:



Las enzimas son uno de los principales transformadores de materia prima a nivel industrial. Las principales enzimas utilizadas, de acuerdo a su aplicación industrial, se especifican en la Tabla 5. Principalmente se tiene la participación de hidrolasas, dando una degradación de las moléculas y llevándolas a unidades más pequeñas capaces de ser aprovechadas por las células vivas.

Tabla 5. *Relación de industrias mejoradas con el uso de enzimas*

Industria	Enzimas
Alimentos	Amilasas, Glucosa isomerasa, pectinasas, proteasas, lipasas, lactasa.
Detergentes	Proteasas, lipasas, celulasas, amilasas.
Textiles	Amilasas, celulasas.
Curtiembre	Proteasas.
Pulpa y Papel	Xilanasas, ligninasas.
Farmacéutica	Acilasas, β -lactamasas, proteasas.
Biocombustibles	Celulasas, amilasas, lipasas.

Fuente: García, M. (2004)

A nivel industrial, la enzimología es una de las ramas que se ha desarrollado más rápidamente en los últimos años y sido un factor importante en la modificación de

alimentos, además de haberles brindado características específicas en beneficio de los seres humanos.

Actualmente las empresas que producen enzimas utilizan la “Tecnología de inmovilización de enzimas”, proceso que permite mantener su máxima actividad enzimática. Existen enzimas en forma soluble (generalmente se pueden usar una sola vez) y existe la forma de utilización de enzimas, a través de la inmovilización; la cual permite fijar la enzima a un soporte adecuado para que pueda actuar repetidas veces sobre una gran cantidad de moléculas de sustrato. Generalmente esta inmovilización consiste en atrapar la enzima dentro de un gel (Herrera, 2003).

Al realizar la inmovilización de una enzima se debe tomar en cuenta que el proceso no debe ser costoso ni excesivamente complejo, además, el producto deberá cumplir las expectativas industriales. La Figura 10 muestra la variación de la actividad de una enzima α -amilasa de *Aspergillus oryzae* inmovilizada y otra soluble, en la imagen se puede observar la diferencia entre los dos tipos de enzimas, y que permite evaluar en muchas industrias el uso del tipo inmovilizada.

Las enzimas pueden clasificarse de acuerdo al mecanismo de acción:

- Exoenzimas: realizan la ruptura del enlace desde el extremo de la cadena del polímero. Por ejemplo, la β -amilasa rompe el almidón en la cadena ramificada de la amilopectina, fuera del enlace α -1,6.
- Endoenzimas: realizan la ruptura del enlace en un punto interior de la molécula. Por ejemplo, la α -amilasa realiza la ruptura desde la parte interior de la molécula de amilopectina y en la cadena lineal de la amilosa. Dentro de las amilasas tenemos 3 enzimas que producen hidrólisis en el almidón: α -amilasa, β -amilasa y β -glucoamilasa.

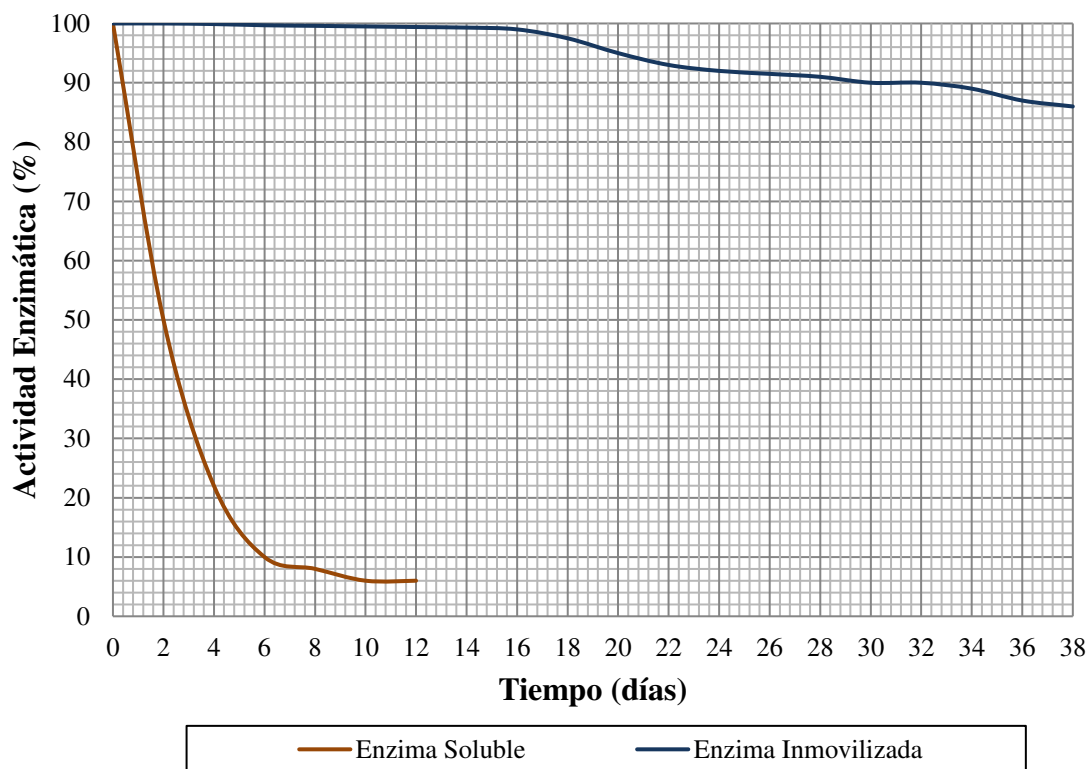


Figura 10. Estabilidad a temperatura ambiente de la α -amilasa de *Aspergillus oryzae* soluble e inmovilizada en función del tiempo. Fuente: Olivares (1996)

La enzima α -amilasa, es una endoenzima que actúa en cualquier punto de la cadena de almidón (amilos o amilopectina) y de los gránulos de almidón no dañados para degradarlos. Los productos que se obtienen a partir de la hidrólisis del almidón causada por la α -amilasa son glucosa y dextrinas (incluida la maltosa), y las cantidades de uno u otro subproducto dependerán de la intensidad con la que se produzca la hidrólisis (variación de parámetros).

La β -amilasa es una exoenzima y actúa sobre las uniones glucosídicas α -1,4 (Figura 11), su acción va desde el extremo no reductor y la amilosa o amilopectina alteradas, hidrolizando el almidón dos moléculas de glucosa por vez, produciendo maltosa. La β -amilasa no puede romper las cadenas de almidón fuera de los puntos de ramificación de la amilopectina. La Figura 12 muestra la acción de las enzimas α -amilasa y β -amilasa en la estructura del almidón.

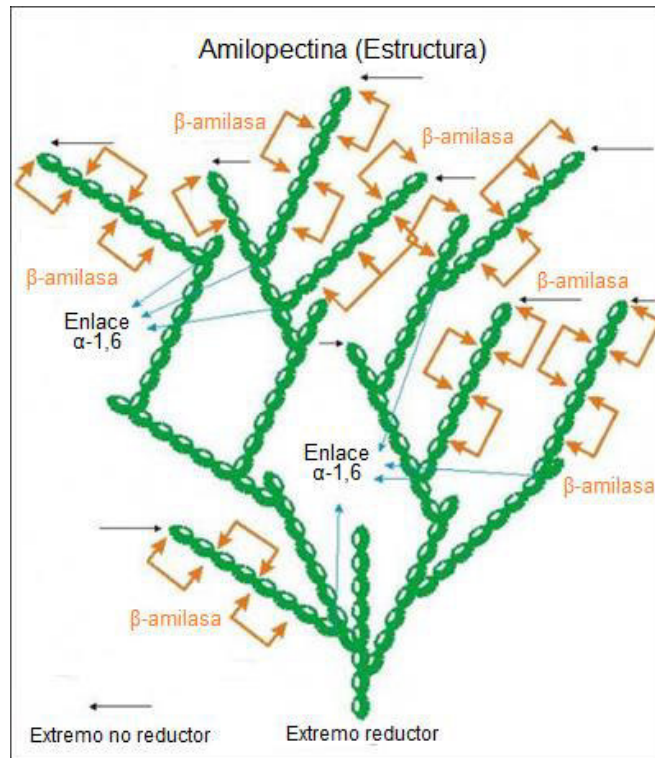


Figura 11. Efecto de la enzima β -amilasa. Recuperado de: <https://www.asturnatura.com/articulos/glucidos/polisacaridos.php>

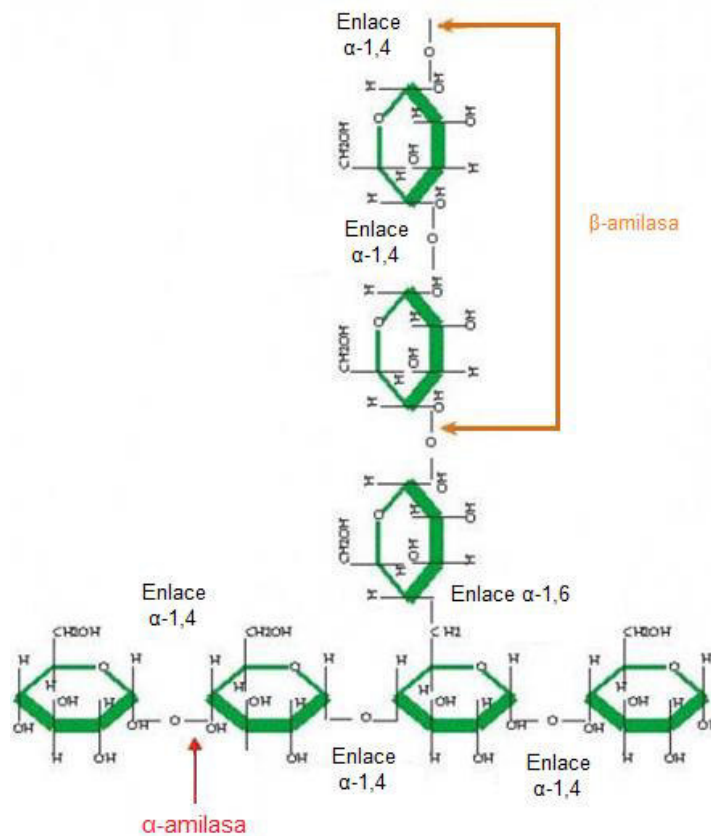


Figura 12. Acción de las enzimas α -amilasa y la β -amilasa en la estructura del almidón. Recuperado de: <https://www.asturnatura.com/articulos/glucidos/polisacaridos.php>

2.4.2. Alfa-amilasas

Las Alfa-amilasa de mayor importancia son las de malta. Se tiene dos organismos que tienen la tarea de su producción a nivel industrial: *Bacillus licheniformis* (bacteria) y *Aspergillus oryzae* (mohos) y cuatro fuentes de obtención adicionales. La Tabla 6 muestra las principales fuentes de obtención y las propiedades respectivas de las principales Alfa-Amilasa.

Durango (2008) realiza un estudio sobre la Producción de enzimas amilasa microbiana, e indica que la Alfa-Amilasa es estable entre 50 y 55 °C. A 60°C solo por 2 horas. Entre 65 y 70 °C su estabilidad disminuye significativamente. La inmovilización de la enzima permite que la enzima se encuentre estable incluso hasta los 45 días y que su estabilidad y actividad permanezcan constantes incluso entre 70 y 80°C.

Tabla 6. Principales fuentes de obtención y propiedades de α -amilasas

Fuente	pH óptimo	Temperatura óptima (°C)	Punto isoeléctrico	PM (g/mol)	Productos finales
Malta de cebada	5-6	50-60	5.75	60 000	G2, G4 y G5
Páncreas porcino	6-7	40-50	5.2-5.6	45 000	G2 y G3
<i>Aspergillus oryzae</i>	4.5-5.5	40-50	-	51 000	G2 y G3
<i>B. amiloliquefaciens</i>	5.9	70	5.2	49 000	G5, G6 y G7
<i>B. licheniformis</i>	7.7-9.0	70	5.2	62 000	G2, G3 y G5
<i>B. subtilis</i>	6.8	60	-	41 000	G2, G4 y G6

G2: Maltosa, G3: Maltotriosa, G4: Maltotetraosa, G5: Maltopentosa, G6: Maltohexosa, G7: Maltoheptaosa. Fuente: Medina, L. (2013)

La Alfa-Amilasa producida por *Aspergillus oryzae* presenta menor estabilidad a 80°C, solo mantiene el 1% de su actividad enzimática nativa. La Figura 13 nos muestra la

variación de la estabilidad de dicha enzima en función de la temperatura (Olivares, 1996).

La elevación de la temperatura provoca una ruptura entre las interacciones débiles que mantiene la estructura tridimensional, que trae como consecuencia la pérdida de la actividad enzimática, esta pérdida es más notoria conforme se incrementa el tiempo de la exposición. La pérdida de la estabilidad es mayor cuando el acoplamiento de la enzima al soporte de inmovilización no es muy estable, toda vez que un enlace bien compacto ayudará a retener la conformación activa de la enzima (Olivares, 1996).

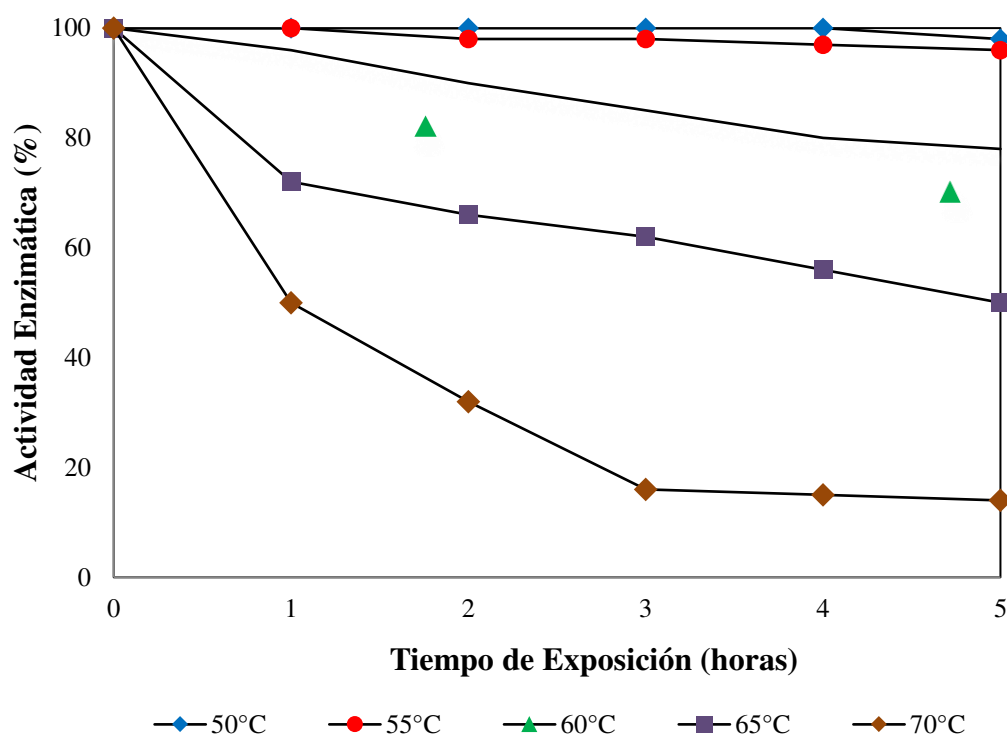


Figura 13: Variación de la estabilidad en función de la temperatura de Alfa-Amilasa de *Aspergillus oryzae*. Fuente: Olivares (1996)

2.4.3. Enzima Liquozyme Supra 2.2X

Es una enzima del tipo α -amilasa. Esta enzima comercial tiene como organismo de producción al *Bacillus licheniformis* (una bacteria del tipo Gram +). Es una enzima

termoestable, se presenta en estado líquido en una solución de color ámbar oscuro. Según las indicaciones del proveedor, del cual se adjunta la ficha técnica en el Anexo 1, la enzima se almacenó de acuerdo a sus especificaciones de almacenamiento (0 - 25°C), a una temperatura entre 6 y 8°C.

2.5. Diseño experimental

En el campo de la investigación es usual encontrar que las pruebas que se llevan a cabo se basan en suposiciones o hipótesis que son probados mediante procedimientos en base a prueba y error basados en la experiencia, el empirismo o referencias de investigaciones anteriores. Sin embargo, el diseño de experimentos nos permite minimizar la cantidad de datos que respondan cuestionamientos importantes y que representen un significado mayor de los parámetros que se desea evaluar.

Existen varios tipos de diseños experimentales, dependiendo de lo que se desea evaluar: Diseños para comparar diferentes tratamientos, para estudiar el efecto de uno o varios factores sobre una respuesta, diseños para optimizar procesos, diseños robustos y de mezclas. Además, de tener algunas características importantes que debe cumplir todo diseño experimental:

- Aleatorización: conjunto de condiciones que permite que un experimento se realice al azar, de tal manera que ninguna prueba anterior afecte la siguiente.
- Repetición: el repetir experimentos dentro de una matriz experimental permite asegurar la confiabilidad de una respuesta y minimizar el error humano o alguno propio del experimento.
- Bloqueo: consiste en eliminar factores que tengan un efecto sobre la respuesta o tomarlos en cuenta de forma que afecte a todos los experimentos por igual.

2.5.1. Diseños factoriales

El objetivo del diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas considerando que todos ellos son importantes y/o son de interés inicial. Los factores pueden ser de tipo cualitativo (condiciones, equipos, materiales y características), o cuantitativo (pH, humedad, concentraciones, cantidad de material, etc.). Para determinar el efecto de cada factor es necesario definir al menos dos niveles de prueba para ellos.

Para estudiar la influencia de cada factor, es necesario escoger al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. El diseño factorial completo es aquella que se prueba aleatoriamente con todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de factores motivos de la investigación (Gutiérrez, 2012).

Para esta investigación, nos enfocaremos en el Diseño Factorial, debido a que se desea conocer el efecto de varios factores de manera individual o conjunta sobre una respuesta, en donde se asume al inicio que todos los factores tienen la misma importancia. El tipo de análisis factorial dependerá de la cantidad de factores. Si se analiza “k” factores y 2 niveles, el tipo será 2^k y se llevará a cabo 2^k experimentos. Para poder entender el tratamiento que se dará a los datos, qué datos se debe tomar, bajo qué condiciones y el significado de las respuestas será necesario definir antes algunos términos básicos en el diseño factorial de experimentos: factor, niveles, interacción, efecto y diagramas.

El objetivo en este estudio factorial es encontrar el modelo matemático que prediga la combinación de factores para una determinada respuesta, basado en los resultados obtenidos en los experimentos.

2.5.2. Factores y sus niveles

El factor es la variable motivo de estudio, debido al efecto que pueda causar sobre la respuesta del experimento. Existen niveles que representan la existencia o medición del

factor y estos pueden cualitativos y cuantitativos. Cualitativamente se puede asignar diferentes características de un factor. De forma cuantitativa, se asigna diferentes valores para evaluar cómo varía la respuesta respecto a la variación del factor en referencia.

2.5.3. Efecto de un factor

El efecto de un factor se define como el cambio del valor de la respuesta debido a los cambios de los niveles en el factor evaluado. Matemáticamente, el efecto de un factor es la diferencia en la respuesta cuando el factor se encuentra en el nivel alto y en el nivel bajo.

El efecto de un factor puede ser significativo o no significativo, y la significancia tiene relación con cómo afecta la variación del factor sobre el valor de la respuesta.

El efecto puede ser positivo o negativo. Será positivo cuando el aumento o disminución del factor produzca un efecto igual sobre la respuesta. Será negativo cuando produzca el efecto contrario. Mientras más positivo o más negativo sea el efecto será más significativo respecto al resto de factores.

2.5.4. Interacción de factores y su efecto

La interacción es la combinación de dos o más factores en un mismo experimento a fin de determinar la significancia del efecto sobre la respuesta. Dos factores interactúan significativamente sobre la respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en el que está el otro.

Matemáticamente este valor es calculado como la diferencia entre la media de la respuesta cuando ambos factores se encuentran en el mismo nivel y cuando se encuentran en niveles diferentes. Y tiene las mismas características que las mencionadas en el efecto de un factor.

2.5.5. Diagrama normal de los efectos

Un diagrama normal permite comparar la magnitud y el significado estadístico de los efectos principales y sus interacciones, a través de un diseño factorial de dos niveles. La línea incluida en el diagrama indica dónde se esperaría que se ubiquen los puntos experimentales si los efectos fuesen nulos. Los efectos significativos se sitúan fuera de la línea, mientras más alejados de ella se encuentren serán más significativos. Así también, los efectos negativos se ubicarán de lado izquierdo de la gráfica, mientras que los positivos estarán en el lado derecho.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Los experimentos se desarrollaron en el Laboratorio de Biotecnología de la empresa MOLINOS ASOCIADOS S.A.C. (MASAC), ubicada en la Zona industrial del distrito de Villa El Salvador, Lima - Perú.

3.2. Equipos y materiales

3.2.1. Materia prima

Los tubérculos de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) fueron obtenidos de la cosecha de la Huerta Bellido en el Valle de Cañete, provincia de Cañete, Departamento de Lima, Perú.

3.2.2. Reactivos

- Enzima α -amilasa (Liquozyme Supra 2.2x)
- Ácido cítrico grado alimentario
- Dextrosa anhidra
- Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Azul de metileno (solución acuosa 1%)
- Hidróxido de sodio P.A. (NaOH)
- Hidróxido de potasio P.A. (KOH)
- Ácido sulfúrico grado reactivo
- Tartrato doble de sodio y potasio ($\text{C}_4\text{H}_6\text{NaK} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- Ácido sulfúrico 0.255N: agregar 1,25 g y aforar a 100 mL con agua desionizada

- Hidróxido de sodio 0.313N: agregar 1,25 g y aforar a 100 mL con agua desionizada
- Solución FEHLING A: 69.2 g de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) disuelto en agua desionizada y llevar a 1000 mL
- Solución FEHLING B: 346 g de tartrato doble de sodio y potasio se disuelven en agua desionizada, 100 g de NaOH también son diluidos en agua. Ambas soluciones se mezclan y se aforan a 1000 mL. Se deja reposar de 8 a 10 horas y se filtra.

3.2.3. Materiales

- Material de vidrio: fioles, baguetas, vasos de precipitado, matraces Erlenmeyer, pipetas, bureta.
- Crisoles de porcelana.
- Pinzas
- Regla de metal
- Hojas cuadriculadas
- Lapicero
- Termómetro escala 0-100 °C
- Cronómetro

3.2.4. Equipos

- Balanza analítica de sensibilidad 0.0001
- Balanza de capacidad 6 kg
- Cocinilla eléctrica.
- Equipo de baño maría.
- Atomizador de laboratorio (Spray dryer)

- Estufa.
- Mufla.
- Potenciómetro
- Vernier
- Desecador.
- Bomba generadora de vacío.
- Chiller de laboratorio con agitación.
- Equipo refrigerante.

3.3. Métodos

Las pruebas preliminares al diseño experimental comienzan por la caracterización del material biológico (yuca) realizando su análisis proximal y estudio morfológico. El proceso continúa realizando la extracción del almidón y procesándolo mediante vía enzimática para su conversión en maltodextrina. La evaluación de la respuesta se determina a través de los Equivalentes de Dextrosa. En las pruebas preliminares se planea variar un factor a la vez con el fin de determinar el comportamiento de cada factor sobre la respuesta. Con la evaluación del comportamiento será posible determinar los niveles de los factores en el diseño del experimento.

3.3.1. Análisis proximal

A. Determinación del porcentaje de materia comestible

Es importante determinar el porcentaje de materia comestible para cálculos de balance de materia, determinación del rendimiento del proceso. Para poder calcular el porcentaje de material comestible en los tubérculos, estos deben ser limpiados retirando impurezas y materiales de suelo resultado de la cosecha. El peso del tubérculo después de haber

realizado la limpieza y eliminación de la cáscara dividido entre el peso del tubérculo íntegro y multiplicado por 100 (Ecuación 3.1) representa el porcentaje deseado.

$$\% \text{ Materia comestible} = \frac{\text{Masa de tubérculo comestible (g)}}{\text{Masa de tubérculo íntegro (g)}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

B. Determinación del porcentaje de humedad

La cantidad de agua es medida en base a la materia comestible, esto debido a que la materia comestible es la que ingresa al proceso, la cáscara es separada para eliminación. También se determinará la humedad en la torta filtrante y en el producto terminado. Siguiendo el Método Oficial de Análisis de la AOAC 925.09 (15.^a Edición, 1990) el procedimiento para la Determinación de humedad es el siguiente:

- Se coloca el crisol lavado con agua destilada en la estufa a la temperatura de secado (98 - 100°C) hasta que el peso sea constante.
- El crisol se traslada, empleando pinzas al desecador en vacío hasta temperatura ambiente. Luego es pesado en Balanza analítica con aproximación 0.0001g (m_1).
- Se pesa 2 g de muestra y se registra dicho valor como m_2 .
- Se coloca el crisol con muestra en la estufa entre 98 y 100°C hasta peso constante, aproximadamente durante 5 horas.
- Se lleva al desecador en vacío hasta temperatura ambiente.
- El porcentaje de humedad en la muestra está determinado por la relación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.2)$$

donde:

m_1 : masa de crisol vacío y seco, en gramos.

m_2 : masa de crisol con muestra antes del secado, en gramos.

m_3 : masa de crisol con muestra seca, en gramos.

C. Determinación del porcentaje de cenizas

La cantidad de cenizas en un alimento corresponde a la materia inorgánica (minerales) de la muestra luego de haber sido quemada. Este análisis es importante en alimentos como muestra de la calidad del mismo. La determinación se realizó siguiendo el Método Oficial de Análisis de la AOAC 942.05 (15.^a Edición, 1990). El procedimiento que se debe seguir es el siguiente:

- Pesar 2 g de muestra ± 0.0002 g (m_2) en un crisol previamente calcinado y tarado (m_1).
- Debido a la humedad de la muestra (60%) debe ser previamente precalcinada.
- Luego se coloca en mufla a 600°C durante 2 horas hasta cenizas blancas o grisáceas. Cuando no se obtiene material de dichos colores ha de humedecerse con agua destilada, para diluir cualquier material orgánico que aún esté presente en la muestra, luego es secada a 105°C y nuevamente se somete a incineración.
- Se deja enfriar en desecador a vacío y se pesa (m_3).

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.3)$$

donde:

m_1 : masa de crisol con cenizas, en gramos.

m_2 : masa de crisol con muestra antes de incineración, en gramos.

m_3 : masa de crisol vacío, en gramos.

D. Determinación de fibra cruda

La fibra cruda corresponde a la porción que no es digerida por las enzimas. El procedimiento se desarrolló bajo el Método Oficial de Análisis de la AOAC 962.09 (15.^a Edición, 1990). El procedimiento fue el siguiente:

- Se pesó aproximadamente 20 g (m_1) de yuca fresca. La muestra fue llevada a matraz de digestión con 200 mL de ácido sulfúrico 0.255N, se llevó a hervir lentamente en el agitador con calefacción durante 30 minutos con agitación cada 5 minutos.
- Se filtró la solución a través de una tela de algodón y el residuo fue lavado con agua destilada caliente.
- Se llevó dicho residuo de nuevo al matraz y fue digerido con hidróxido de sodio 0.313N de la misma manera que con el ácido sulfúrico y se lavó con agua caliente el residuo.
- Se lavó nuevamente con etanol y se transfirió a un crisol (lavado, calcinado a 600°C y tarado).
- Se enfrió en el desecador en vacío durante 30 minutos.
- Se pesó (m_1) y se llevó a mufla a una temperatura de 600°C durante 5 horas.
- Se llevó al desecador en vacío nuevamente durante 30 minutos y se pesó (m_2).

El porcentaje de fibra cruda está determinado por la relación:

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \times 100 \% \quad (3.4)$$

donde:

m_1 : masa de crisol después de la estufa, en gramos.

m_2 : masa de crisol con muestra antes de incineración, en gramos.

m_3 : masa de la muestra fresca, en gramos.

3.3.2. Análisis morfológico

A. Determinación de longitud promedio

Como parte de la caracterización de los tubérculos utilizados en los experimentos se deberá evaluar la longitud promedio del tubérculo. Se toma la longitud de diez tubérculos adquiridos en compras diferentes y se promedia los resultados.

Para la determinación de la longitud es necesario trazar con lapicero una línea de extremo a extremo más largo de una hoja siguiendo sus cuadrículas. Se debe colocar el tubérculo, ubicando el eje imaginario más largo sobre la línea trazada. Se marcará con lapicero extrapolando ambos bordes del tubérculo de manera perpendicular hasta la hoja con un punto. La distancia entre ambos puntos será la longitud del tubérculo.

B. Determinación de diámetro promedio

Así como la longitud, se deberá determinar la medida promedio del diámetro. Para la determinación del diámetro es necesario trazar con lapicero una línea en una hoja cuadrículada, al igual que en la determinación de longitud. Se debe cortar el tubérculo a la mitad, siendo su corte transversal y colocar el tubérculo, ubicando el eje imaginario más largo perpendicular a la línea trazada. Se marcará con lapicero extrapolando ambos bordes del tubérculo de manera tangente hasta la hoja con un punto. La distancia entre ambos puntos será el diámetro del tubérculo.

3.4. Proceso experimental

Una característica importante del proceso experimental está el hecho de bloquear los factores que puedan afectar la respuesta y que no son deseables a lo largo de los experimentos. En esta investigación se realizará dos tipos de bloqueos. El primer bloqueo corresponde al hecho de aislar las probabilidades de afectar la respuesta debido al uso de materias primas de diferentes características. Razón por la cual se adquirió materia prima que provenga de una sola zona, exactamente de la Huerta Bellido en el

Valle de Cañete, Lima. El segundo bloqueo tiene que ver con el factor de corrección de cada analista. Para evitar variación en la respuesta por el factor humano solo una persona ha realizado los experimentos.

3.4.1. Extracción y caracterización del almidón

Para empezar el proceso de obtención del almidón se retira la cáscara de yuca, el material comestible debe ser rallado para formar las diferentes concentraciones de sustrato. Para las pruebas preliminares fue necesario realizar diluciones a 10, 20 y 30% m/m de sustrato. Esta concentración de sustrato corresponde a la concentración de yuca fresca en la solución. La Tabla 7 muestra la cantidad de materia prima y agua desionizada necesarias en la preparación de dichas soluciones.

La etapa de rallado tiene por objetivo desmenuzar la pulpa y así facilitar la liberación de los gránulos de almidón mediante el rompimiento de las paredes celulares. Todas las diluciones fueron llevadas a 1 Kilogramo de solución. Luego de la preparación de cada solución fue llevada a vasos de precipitado de 1 litro de capacidad y se dejó reposar por espacio de 40 minutos (Medina, 2013) para lograr una mayor extracción del almidón.

A. *Determinación de la temperatura de gelatinización (Grace, 1977)*

Tabla 7. *Cantidad de materia fresca utilizada en la extracción de almidón*

Concentración de Solución (%m/m)	Masa de sustrato (g)	Masa de Agua (g)	Masa de solución (g)
10%	100	900	1000
20 %	200	800	1000
30 %	300	700	1000

Una vez extraído el almidón es necesario convertirlo en una sustancia enzimáticamente disponible, los gránulos se disuelven y la amilosa y amilopectina quedan disueltas para facilitar la acción de la α -amilasa, a este proceso se le denomina gelatinización.

Normalmente la temperatura de gelatinización varía entre 57,5 y 70°C. La gelatinización se manifiesta visualmente como el aumento de la transparencia y espesamiento hasta que es muy difícil la fluidez en la solución, seguido por un estancamiento de la temperatura en este punto durante unos segundos.

Para la determinación de la temperatura de gelatinización se toma 10 g de muestra en base seca. Se disuelve en agua destilada hasta completar a 100 mL. En un vaso de precipitado de 250 mL se calienta agua a 85°C. Se toma 50 mL de la suspensión en un vaso de 100 mL y se introduce el segundo vaso en el primero. Se mantiene en agitación con el termómetro constantemente hasta que se forma una pasta y la temperatura no varíe durante unos segundos. Ésta será la temperatura de gelatinización.

3.4.2. Obtención vía enzimática de maltodextrina a partir de yuca

Se tomó como referencia investigaciones enfocadas en digestión enzimática. En general, para obtener la maltodextrina se extrae el almidón y éste deberá permanecer en reposo por 40 minutos para obtener un porcentaje mayor de extracción de almidón (masas especificadas en Tabla 7). La mezcla es llevada a gelatinización, manteniendo la temperatura de 88°C durante 20 minutos para completar la gelatinización y asegurar la disponibilidad enzimática. Se debe mantener agitación constante para evitar pérdidas de materia por exceso de calor en el fondo del recipiente o rotura del mismo.

Luego de asegurar la gelatinización la mezcla deberá aumentar o disminuir su temperatura de tal manera que alcance y mantenga la temperatura de digestión, para esto se debe utilizar una cocinilla eléctrica con agitación y control automático de temperatura. Inmediatamente la temperatura se encuentre estable a la temperatura de operación, se debe agregar la cantidad de enzima deseada, habiendo previamente realizado el cálculo para la cantidad de sustrato disponible en la mezcla y deberá

permanecer a estas condiciones durante el tiempo establecido para la prueba (tiempo de digestión).

La inactivación de enzima y detención de la digestión se puede realizar por aumento de temperatura a ebullición, disminución drástica a temperatura ambiente o disminución de pH. La solución luego pasa por una etapa de filtración con ayuda de una bomba de vacío, el material es colocado en un embudo Buchner y filtrado como muestra la Figura 14. La maltodextrina es soluble en agua, por lo cual la maltodextrina obtenida durante la digestión permanecerá con la solución filtrada para pasar a la siguiente etapa. La torta filtrante contiene carbohidratos no digeridos, fibra y proteínas; a ésta se le determina humedad antes de proceder a eliminar.

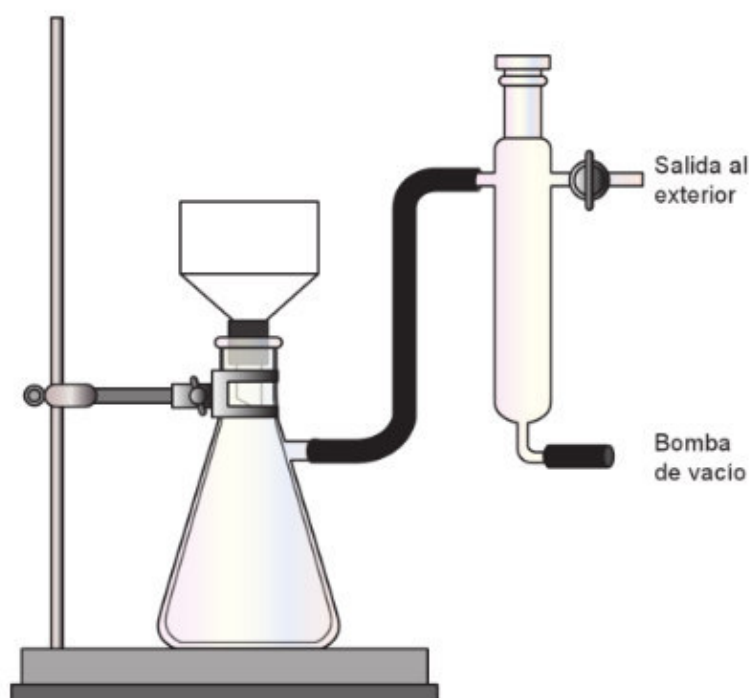


Figura 14. Esquema del montaje para realizar la filtración por presión reducida. Fuente: Posada, M. (2015)

La siguiente etapa consiste en llevar la solución filtrada a secado por atomización, también llamado secado por spray dryer. El atomizador de modelo SP-1500 LAB SPRAY DRYER de la marca SHANGHAY SUNYITECH debe trabajar con una

temperatura de ingreso de 140°C y salida de 90°C. El equipo producirá polvo de maltodextrina como producto terminado. La Figura 15 muestra el diagrama del proceso de obtención a nivel laboratorio y los parámetros controlados en cada una de las etapas, la Figura 16 muestra el equipo de secado por atomización utilizado para los experimentos y la Figura 17 el diagrama de los componentes del equipo mostrado en el panel de control.

Diagrama del proceso

Parámetros de control

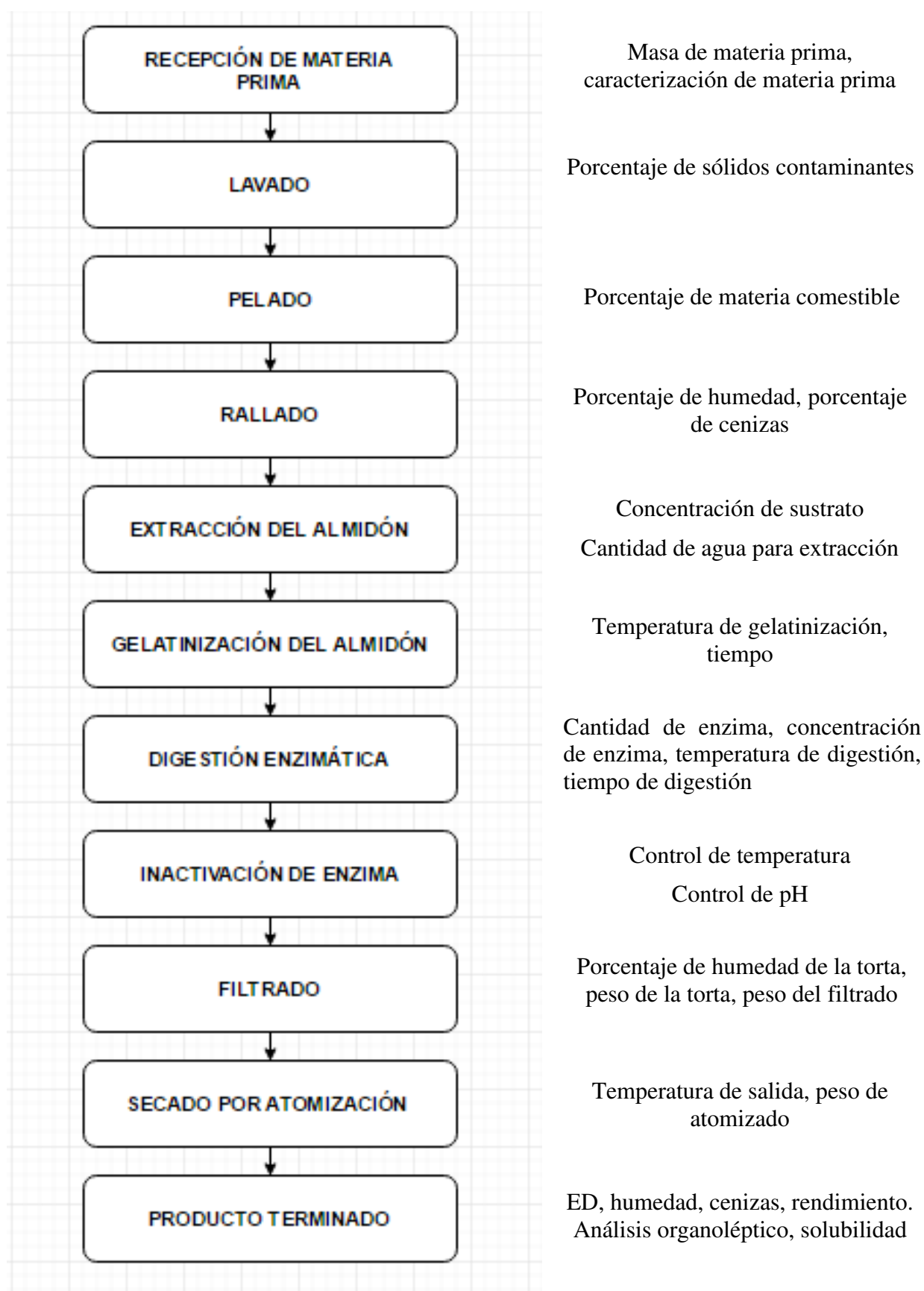


Figura 15. Diagrama del proceso de obtención de maltodextrina a partir de yuca y principales parámetros de control. Elaboración propia.



Figura 16. Foto del equipo de secado por atomización utilizado para los experimentos.
Propiedad de la empresa Molinos Asociados S.A.C.

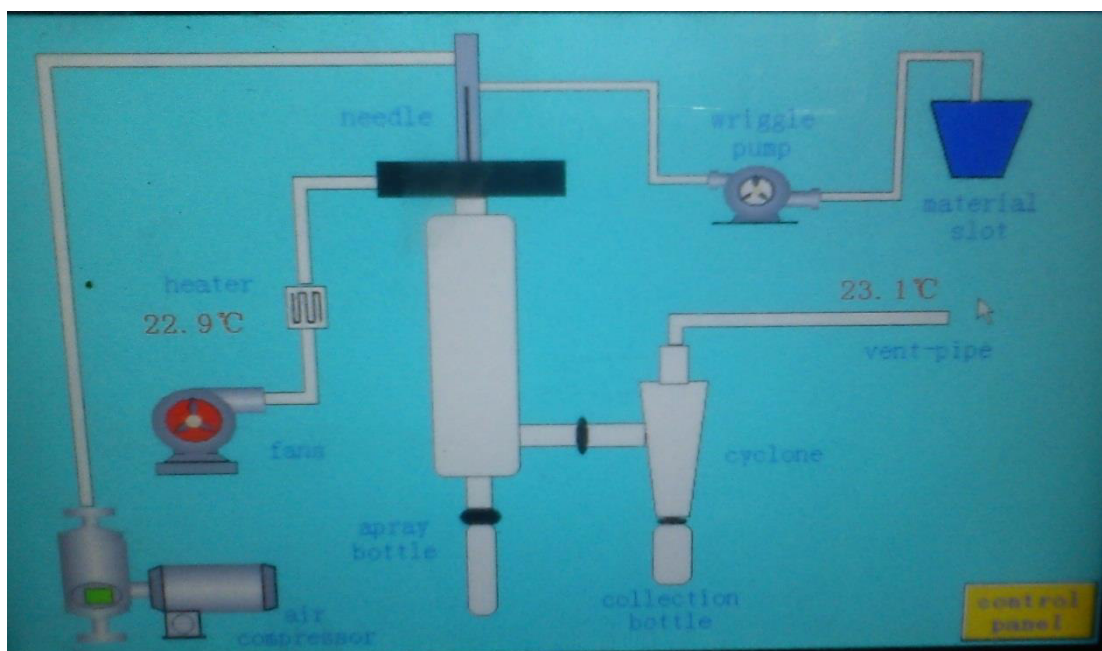


Figura 17. Foto del diagrama de componentes del equipo de secado por Atomización.
Pantalla display del equipo atomizador

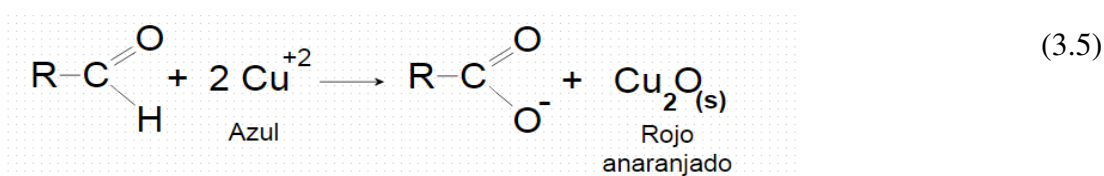
A. Determinación de la respuesta

Como ha sido explicado en el marco teórico, la principal propiedad que gobierna las características de la maltodextrina son los equivalentes de dextrosa, que representa el grado de conversión de la maltodextrina, y ésta será la respuesta que se determinará y evaluará en función al tiempo de digestión de cada experimento.

El método de titulación volumétrica se utilizará para determinar los Equivalentes de Dextrosa . La norma técnica peruana NTP 209.207:1983 (revisada el 2013) permite la medición de los azúcares reductores medidos como Dextrosa. Se basa en la acción reductora de las aldosas tipo azúcares cuando se encuentran junto con ciertas sales metálicas.

Este método es una modificación del procedimiento de Lane y Eynon, en donde los azúcares reductores reducen el sulfato de cobre que se encuentra en solución con el tartrato doble de Sodio y Potasio y con el Hidróxido de sodio.

El proceso se basa en el carácter reductor del glúcido. Este compuesto se oxidará dando lugar a la reducción del sulfato de cobre II (azul) a óxido de cobre I (rojo naranja). La Ecuación 3.5 muestra la reacción producida durante la titulación.



Donde R-COH corresponde a un azúcar (p.e. maltosa, glucosa, fructosa) con poder reductor debido a su grupo carbonilo y que puede ser oxidado a grupo carboxilo. El procedimiento experimental comienza con la preparación de la solución patrón, para esto se pesa 5 g de dextrosa anhidra, previamente secada a 100°C durante 2 horas, y se disuelve en agua destilada hasta 500 mL. La concentración de esta solución es 0.01 g de dextrosa por mililitro o 1% p/v.

Se titula 25 mL de la solución de Fehling con solución dextrosa 1%, se hierve agregando de una sola vez 0.5 mL menos de la cantidad requerida (determinada por una titulación previa). Se hierve durante 2 minutos utilizando azul de metileno, repitiendo el hervor mientras que el óxido cuproso se va asentando. Se completa la titulación rápidamente hasta que desaparezca el color azul en la solución sobrenadante. Esta titulación se debe realizar en un tiempo no mayor a 3 minutos.

Para la preparación de la muestra se pesa exactamente 7.5 g de muestra y ésta es trasvasada a un matraz aforado de 250 mL, ayudándose con porciones de agua caliente; se enfría a temperatura ambiente, se mezcla vigorosamente y se diluye con agua hasta el aforo de la fiola. Originalmente la técnica pide pesar 15 gramos, pero debido a limitación de reactivos se reducirá la muestra a la mitad, de la misma manera que el volumen gastado. Previamente se analizó 10 muestras con pesos de 7.5 y 15 gramos, resultando en todas la misma respuesta (ED).

En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se coloca 25 mL de solución "Fehling A" y 25 mL de solución "Fehling B ", se calienta y se titula con la solución problema siguiendo el mismo procedimiento que la solución patrón.

Para determinar los equivalentes de dextrosa se realiza los siguientes cálculos:

- Cálculo del factor de Fehling (Ecuación 3.6): el factor de la solución de Fehling se calcula multiplicando los mL gastados en la primera titulación por la concentración de dextrosa pura.

$$\text{Factor de Fehling} = \text{mL gastados en primera titulación} \times 0.01 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \quad (3.6)$$

- Cálculo de los equivalentes de dextrosa: Ecuaciones (3.7) y (3.8)

$$\% \text{Azúcares reductores (\%AR)} = \frac{\text{Factor de Fehling} \times 500}{V \times W} \times 100\% \quad (3.7)$$

$$\% \text{ Dextrosa equivalente} = \frac{\% \text{AR}}{\% \text{BS}} \times 100 \% \quad (3.8)$$

Donde:

- V: volumen gastado en la segunda titulación.
- W: cantidad en gramos de muestra problema.
- %BS: porcentaje en base seca. Se calcula como 100 - % Humedad

3.4.3. Evaluaciones preliminares (uno a la vez)

A. Antecedentes

En la obtención de maltodextrina vía enzimática se lleva a cabo reacciones del tipo bioquímico. Con el fin de tener una idea acerca del comportamiento de estas reacciones y de los parámetros que causan efectos representativos sobre la respuesta, se consultó algunas referencias de obtención de maltodextrinas vía enzimática (Medina, 2013; Ruiz, 2007; Wong, 2000; Díaz, 2002) y se realizó pruebas preliminares al diseño experimental

propriadamente dicho. Esto, con el fin de poder escoger correctamente los niveles a aplicar en el diseño. En este acápite se detalla la metodología utilizada en dichas pruebas y los métodos consultados.

Los factores fueron desarrollados en dos niveles. Se obtuvo información previa de diseños factoriales y los niveles evaluados en sus factores. Díaz (2002) realiza un diseño factorial en la hidrólisis de yuca y evalúa algunos factores y sus niveles:

- Temperatura (70 a 90°C): incluye temperaturas altas en su diseño, esto ocasionó que los tiempos de evaluación sean muy altos (20 a 280 minutos), siendo que a 40 y 50°C se puede obtener resultados similares dentro del rango de maltodextrinas (menor a 20 DE).
- pH: evaluó el pH de 5.5 a 6.5, obteniendo como resultado que el pH es significativo para la respuesta en valores de ED menor a 5 (como almidón) o mayores a 20 (jarabes de glucosa). Al no ser representativo en el rango de maltodextrinas (5 a 20 ED) no fue considerado como un factor en el diseño y se mantuvo constante este parámetro durante el desarrollo de los experimentos. Se trabajó un pH cercano al neutro (6.5), debido a que la teoría indica que un pH mayor tendrá como consecuencia un pequeño aumento en la rapidez de la reacción.
- Concentración de almidón: Díaz estableció los niveles a 30 y 40%, encontrando que no había un cambio significativo. Sin embargo, debido a la diferencia entre el tipo de materia prima, siendo el origen importante para la relación entre amilosa y amilopectina.

Concentración de enzima: Díaz (2002) trabajó a 0.003% de la presentación Termamyl 120 L. Esta investigación ha sido desarrollada con una enzima de los mismos fabricantes e igual concentración, pero mayor eficacia, y por tanto mayor velocidad de reacción (como muestra la Figura 18), manifestada como un aumento en los equivalentes de dextrosa. En la Figura 18 la curva inferior muestra la relación Equivalentes de dextrosa

versus tiempo, de la enzima utilizada por Díaz (2002), Termamyl 120L , y la curva punteada la desarrollada por Liquozyme Supra 2.2x.

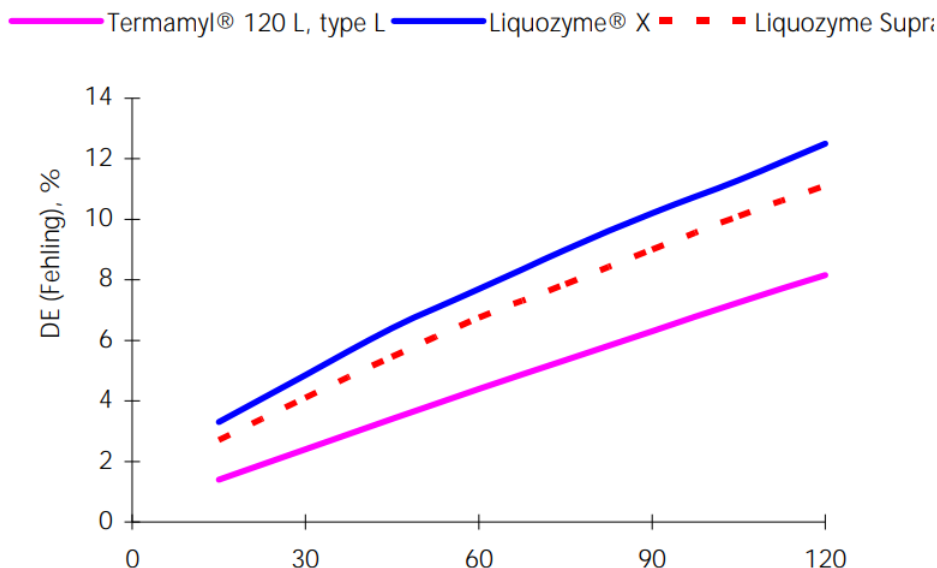


Figura 18. Curvas de comportamiento ED versus tiempo de las enzimas comerciales Termamyl 120L, Liquozyme X y Liquozyme Supra 2.2x. Fuente: Ficha Técnica Termamyl 120L

B. Selección de variables

En base a referencias se consideró cuatro parámetros a evaluar. Se intentó evaluar cada uno de ellos en el mayor rango posible, para confirmar si el comportamiento de la respuesta era constante en todo el rango.

- Temperatura de digestión.- Las referencias nos brindaron un rango de trabajo de 30°C a 100°C. Se buscará trabajar aumentando 10°C en cada cambio de temperatura.
- Concentración de sustrato.- Se plantea trabajar en el rango de 10 a 40% m/m considerando el peso de yuca fresca como sustrato con un aumento de 10% en cada experimento diferente.

- Concentración de enzima.- La concentración brindada por el fabricante es 300 KNU/g (*Kilo- Novo- alpha- amylase- Unit/g*) es la cantidad de enzima que dextriniza 5.26 g de almidón seco por hora a condiciones óptimas de trabajo.

Por ejemplo, la cantidad de enzima necesaria para dextrinizar la primera solución de 100 g de sustrato, considerando una concentración promedio de 33 % de almidón se da por el cálculo:

$$\text{Enzima (mg)} = P_a \times \frac{1 \text{ KNU}}{5.26 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ g}}{\text{KNU}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \quad (3.9)$$

$$\text{Enzima (mg)} = 33 \text{ g} \times \frac{1 \text{ KNU}}{5.26 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ g}}{300 \text{ KNU}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 20.9 \text{ mg}$$

Los cálculos indican que se necesita aproximadamente 20 mg de enzima para dextrinizar 33 gramos de almidón en una hora. Esto equivale a un porcentaje de 0.02% m/m, porcentaje de peso de enzima en función al peso de yuca fresca. Considerando que se va a tomar tiempos menores y también mayores a 1 hora de digestión en pruebas preliminares y a temperaturas mayores a la estándar, se puede variar la cantidad calculada. Se trabajará con 3 niveles de concentración: 0.01%; 0.02% y 0.03% m/m.

- Tiempo de digestión.- Existe referencia de investigaciones entre 20 y 280 minutos. En esta investigación se considerará el tiempo de digestión entre 5 y 120 minutos para luego determinar si se necesita tiempos mayores. Será necesario utilizar tiempos mayores si en su mayoría se observa puntos muy cercanos a 5 Equivalentes de dextrosa o inclinación a una respuesta constante.

Se planea monitorear el pH a 6.5 para verificar que esté en el rango de pH óptimo para el trabajo de enzima. Según ficha técnica, esto es entre 5.5 y 7.0. En caso de tener variaciones de pH se puede ajustar con pequeños volúmenes de soluciones de ácido cítrico o hidróxido de sodio o potasio.

C. Ejecución de las evaluaciones preliminares

Las repuestas obtenidas en las evaluaciones preliminares permitirán ver cómo actúan los factores sobre la respuesta para determinar un comportamiento previo de cada uno de los factores y verificar la viabilidad de los experimentos.

Para poder ver cómo se comporta cada factor se realizará una evaluación variando un factor constante a la vez a través del tiempo. Esto nos permitirá obtener tres tipos diferentes de gráficas:

Conservando la concentración de enzima y temperatura de digestión constantes

Manteniendo constantes estos dos factores a una concentración de 0.03% de enzima y 70°C se evaluará una digestión de 5 a 120 minutos variando la concentración de enzima a 10, 20, 30 y 40% m/m.

Conservando la concentración de sustrato y temperatura de digestión constantes

Variando la concentración de enzima a 0.01; 0.02 y 0.03% m/m se mantendrá una concentración de 30% de sustrato y una temperatura de digestión de 70°C se evaluará de 5 a 120 minutos de digestión.

Conservando la concentración de enzima y de sustrato constantes

Con una concentración de enzima de 0.03% m/m y una concentración de 30% m/m de sustrato se realiza la digestión enzimática variando la temperatura de 30 a 100°C y el tiempo de digestión de 5 a 120 minutos.

3.4.4. Diseño factorial 2^4 con dos repeticiones

Debido a que esta investigación no busca maximizar o minimizar una respuesta, y que la respuesta depende del grado de conversión que se desee obtener luego de la combinación de determinados factores en cada experimento, el tipo de diseño experimental escogido ha sido el de tipo factorial. Se busca predecir, a través de un

modelo matemático, los equivalentes de dextrosa obtenidos, para esto será necesario aplicar una correlación de los factores que describa su efecto.

Con el fin de minimizar errores se ha asegurado aplicar una réplica de todos los experimentos. El diseño experimental estará compuesto por 4 factores, 2 niveles y una réplica. La cantidad de experimentos corresponde a $2^4 \times 2 = 32$ experimentos. Así, la matriz experimental de las pruebas a realizar queda según la Tabla 8.

En las pruebas definitivas ya no se toma en cuenta los procedimientos de caracterización de yuca. Sin embargo, el método de obtención de maltodextrina es el mismo, salvo por los niveles, ya que se tomará 2 niveles para cada factor. En el capítulo Análisis y Discusión de resultados se detallan los resultados obtenidos. También se incluye una comparación cualitativa y cuantitativa de la maltodextrina obtenida en las pruebas y una maltodextrina comercial. Esta comparación incluye apariencia, aspecto en solución, sabor, equivalentes de dextrosa, humedad, cantidad de cenizas, solubilidad en agua, pH e higroscopicidad.

Tabla 8. *Matriz experimental para el diseño factorial 2⁴*

A	Factor				Respuesta
	B	C	D		
-	-	-	-	R1	
+	-	-	-	R2	
-	+	-	-	R3	
+	+	-	-	R4	
-	-	+	-	R5	
+	-	+	-	R6	
-	+	+	-	R7	
+	+	+	-	R8	
-	-	-	+	R9	
+	-	-	+	R10	
-	+	-	+	R11	
+	+	-	+	R12	
-	-	+	+	R13	
+	-	+	+	R14	
-	+	+	+	R15	
+	+	+	+	R16	
-	-	-	-	R17	
+	-	-	-	R18	
-	+	-	-	R19	
+	+	-	-	R20	
-	-	+	-	R21	
+	-	+	-	R22	
-	+	+	-	R23	
+	+	+	-	R24	
-	-	-	+	R25	
+	-	-	+	R26	
-	+	-	+	R27	
+	+	-	+	R28	
-	-	+	+	R29	
+	-	+	+	R30	
-	+	+	+	R31	
+	+	+	+	R32	

donde:

- “+” Representa el nivel máximo del factor.
- “-” Representa el nivel mínimo del factor.
- “R” Es la representación de la respuesta obtenida para cada combinación de factores. Cada R representa 2 experimentos (réplica).

Luego de la determinación de la respuesta, se evaluará el comportamiento de los factores y la posibilidad de llevar a cabo los experimentos en los rangos límite. Se analizará las gráficas que se obtenga para determinar los niveles máximo y mínimo del diseño experimental. Teniendo en cuenta también la fiabilidad de los resultados y la practicidad del desarrollo de los experimentos. El programa Minitab 18 permite realizar las combinaciones necesarias de los niveles de factores. Es importante dar a conocer que al momento de desarrollar los experimentos, éstos se llevaron a cabo de manera aleatoria, sin seguir el orden de los factores.

3.4.5. Obtención del modelo matemático

El tratamiento de los resultados en las pruebas definitivas difiere de los de las pruebas preliminares en el tratamiento estadístico. Se utilizará una correlación general que permita relacionar los factores con la respuesta en un modelo matemático. El Software Minitab 18 nos permite obtener el modelo a partir de un análisis de varianza (ANOVA). La matriz experimental se realizará con 16 tratamientos y una réplica (32 experimentos). Se usará un valor $\alpha = 0.05$ para el análisis estadístico.

El análisis de varianza, ANOVA por sus siglas en inglés, corresponde a la técnica estadística inferencial más aplicada para demostrar que los efectos muestrales son lo suficientemente grandes para garantizar diferencias significativas a nivel de proceso. Este análisis está basado en los valores F de Fisher y ρ . El software analiza si los valores

F y ρ representan a efectos significativos o no significativos. Si el valor ρ es mayor a 0.05 el efecto no es significativo en la respuesta. El software brinda coeficientes para cada efecto e interacción para construir el modelo matemático que prediga la combinación de factores para un ED deseado. A medida que el producto coeficiente efecto sea mayor, ejercerá un mayor efecto sobre el grado de conversión.

3.4.6. Validación del modelo matemático

A. A través de la determinación del error

Para comprobar el modelo matemático se reemplazará los niveles en el modelo de correlación y se determinará el error de los valores experimentales respecto a los teóricos, a partir de la ecuación 3.10.

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Valor}_{\text{Teórico}} - \text{Valor}_{\text{Experimental}}|}{\text{Valor}_{\text{Teórico}}} \times 100\% \quad \dots (3.10)$$

B. A través de la evaluación de otras investigaciones

Se evaluará las condiciones de operación de otras investigaciones de obtención enzimática de maltodextrina de yuca en el modelo matemático y se determinará el error a través de la respuesta esperada según el modelo matemático (valor teórico) y el generado por sus experimentos (valor experimental), los cuales serán reemplazados en la Ecuación 3.10 para calcular el error.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Evaluación preliminar

4.1.1. Evaluación del análisis proximal

A. Contenido de material comestible

La determinación de material comestible en yuca fue llevada a cabo por eliminación de materia extraña y cáscara, sin lavar el tubérculo, para que el agua no interfiera en los resultados. Como promedio se obtuvo un contenido de materia comestible de 95.06% con una desviación estándar de 1.29. Para este resultado se analizó 10 muestras de tubérculos, cada uno tomado en días de procesamiento diferentes. Los resultados han sido tabulados en la Tabla 15 del anexo 4.

B. Porcentaje de humedad

Se determinó la humedad a 100°C, encontrándose una humedad promedio de 59.31% con una desviación estándar de 1.81. La Tabla 16 en el Anexo 4 muestra los datos obtenidos en 10 tubérculos diferentes y evaluados de acuerdo a la metodología de la AOAC (925.09).

C. Contenido de cenizas

La determinación de cenizas, al igual que la humedad y el contenido de material comestible, ha sido determinada en 10 días diferentes en el material pelado y rallado. La evaluación fue realizada a través del método de la AOAC (942.05), resultando como promedio 0.78% con una desviación estándar de 0.15. Este contenido es cercano, pero menor, al contenido promedio (0.9%). La información de contenido de ceniza es también importante para determinar el porcentaje de ésta que es transferido al producto

terminado (maltodextrina) durante su obtención. En el Anexo 4 se detalla en la Tabla 17 los datos obtenidos en cada análisis.

D. Cantidad de fibra cruda

El contenido de fibra cruda se calculó utilizando el método oficial de la AOAC 962.09. El valor promedio obtenido fue 0.92% con una desviación estándar de 0.12. Esta fibra generalmente no es disuelta con la aplicación de la enzima, sino que es retenida en la torta filtrante. Sin embargo, se calculará la cantidad de fibra cruda contenida en el producto final para confirmar esta premisa. La Tabla 18 en el Anexo 4 muestra los resultados en cada muestra.

4.1.2. Evaluación del análisis morfológico

Este análisis nos permite evaluar la forma y tamaño del tubérculo. A nivel industrial es importante para, por ejemplo, calcular el volumen del tubérculo y su distribución en el transporte, también para calcular el tamaño y capacidad del pelador industrial.

A. Longitud promedio

La determinación de la longitud promedio del tubérculo arrojó un valor promedio de 28.1 cm con una desviación estándar de 2.25. Esta desviación no resulta representativa para el valor de 28.1, lo que permite un mejor cálculo en el tamaño de un rallador industrial (ancho), así como el ancho de las jabas que contengan la materia prima. La Tabla 19 del Anexo 4 muestra los resultados obtenidos en las 10 muestras tomadas de manera aleatoria.

B. Diámetro promedio

El diámetro promedio en 10 tubérculos resultó 8.97 cm, la determinación se realizó en el centro del tubérculo, luego de ser cortado transversalmente. La desviación estándar resultó 1.05, valor que a nivel industrial permite a grandes rasgos determinar longitud

de profundidad en transporte y rallador industrial. La Tabla 20 del Anexo 4 muestra los resultados en cada determinación.

4.2. Proceso experimental

El proceso experimental inicia con la obtención del almidón de yuca, mediante el cual se obtuvo datos para el balance de materia, pero también nos permitió identificar la temperatura de gelatinización de nuestro almidón; cada tubérculo tiene una temperatura o rango de temperaturas de gelatinización características. Siguiendo el proceso, se detallará los resultados de las pruebas preliminares, para el cálculo y desarrollo de la matriz experimental. El desarrollo de la matriz experimental nos permitirá el desarrollo del modelo matemático que finalmente nos brinda información sobre el comportamiento y efecto de cada factor sobre los equivalentes de dextrosa (respuesta).

4.2.1. Temperatura de gelatinización

La temperatura de gelatinización es determinada luego de la extracción del almidón, siguiendo el método Grace, 1977 (solución al 10% peso/volumen, 10 gramos de material comestible en base seca en 100 mL de solución). La gelatinización se evidenció con un aumento en la transparencia y espesamiento de la solución, además del aumento de su resistencia a la agitación. La temperatura de gelatinización fue registrada cuando se produjo un estancamiento de la temperatura, experimentalmente se detuvo entre 8 y 13 segundos a una misma temperatura.

Al realizar las pruebas por triplicado se encontró una temperatura de gelatinización promedio de 69.2°C, valor dentro del rango promedio de temperaturas de gelatinización (entre 57.5 y 70°C), con una desviación estándar de 0.05. La Tabla 21 del Anexo 4 muestra los resultados obtenidos.

4.2.2. Evaluaciones preliminares (un factor a la vez)

La evaluación preliminar nos permitirá evaluar un factor a la vez a través del tiempo de digestión. Se evalúa el comportamiento de un factor manteniendo los otros dos, constantes durante los experimentos. Los factores seleccionados son: **concentración de enzima, temperatura de digestión y concentración de sustrato**, siendo la **respuesta** los **equivalentes de dextrosa** evaluados a diferentes **tiempos de digestión** (5, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 y 120°C). Los valores de cada variable han sido seleccionados y detallados en el acápite 3.4.3, quedando como sigue:

- Concentración de enzima: 0.01; 0.02 y 0.03% m/m
- Temperatura de digestión: 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100°C
- Concentración de sustrato: 10, 20, 30 y 40% m/m

A. Concentración de enzima y temperatura de digestión constantes

Se seleccionó porcentajes de sustrato a 10, 20, 30 y 40 % de concentración de yuca fresca, pero experimentalmente no se pudo realizar la gelatinización del almidón a 40% debido a degradación de material en el fondo del recipiente y en ocasiones su rotura. La Figura 19 muestra la variación de la respuesta (equivalentes de dextrosa) por efecto de la concentración de sustrato en función del tiempo, en la cual se pudo observar que la variación en la respuesta no es significativa. Esto se debe a que al tener una cantidad suficiente de enzima (0.03%), ésta cubre la dextrinización de todo el almidón contenido de las soluciones y se evidencia que el grado de conversión es muy parecido, aunque se varíe la concentración de sustrato. Sí existe una pequeña diferencia: un menor porcentaje de sustrato ocasionará un mayor contenido de agua, que conlleva a una mayor liberación de amilosa y amilopectina y en consecuencia un pequeño aumento en la respuesta. Los factores que permanecieron constantes a lo largo de los experimentos fueron la temperatura de digestión a 70°C y la concentración de enzima a 0.03%. La Figura 19

muestra el comportamiento de los experimentos, tiene una parte sombreada que representa el rango de conversión del almidón que corresponde a maltodextrina, por debajo de la región sombreada el producto obtenido es almidón y por encima corresponden a jarabes de glucosa. Se mantiene comportamiento lineal a partir del minuto 15 y se puede observar que entre 5 y 60 minutos de digestión se obtiene maltodextrina, luego de esto jarabes de glucosa, a la concentración 0.03% de enzima.

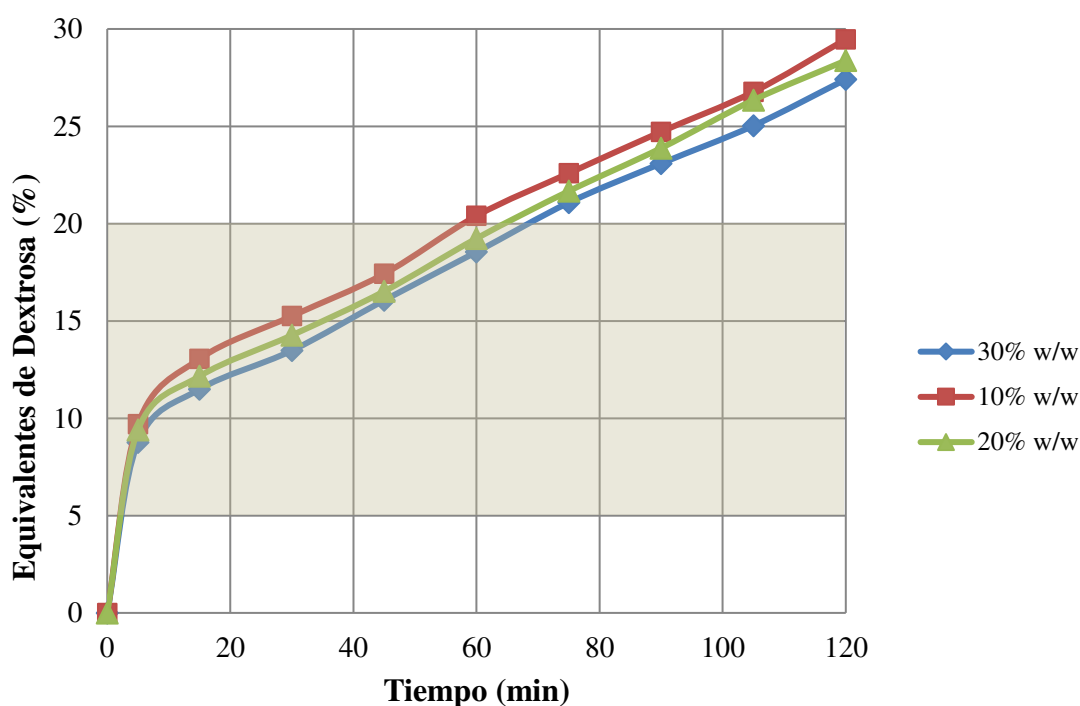


Figura 19. Gráfica de experimentos realizados variando la concentración de sustrato, a temperatura y concentración de enzima constantes

B. Concentración de sustrato y temperatura de digestión constantes

En base a los cálculos de cantidad de enzima se tomaron los porcentajes 0.01; 0.02 y 0.03% de concentración de enzima (factor variable) y se mantuvo la temperatura de digestión a 70°C y concentración de sustrato 30% masa/masa constantes.

- A concentración de enzima 0.01%: comienza con un grado de conversión 6 ED hasta 16 ED, todos los puntos obtenidos corresponden a maltodextrina.

- A concentración de enzima 0.02%: la conversión se desarrolla con respuestas de 7 a 21 ED, siendo solo el último punto clasificado como jarabe.
- A concentración de enzima 0.03%: las respuestas resultaron entre 7.7 y 27 ED, resultando maltodextrinas hasta el minuto 60, y a partir del minuto 75, jarabes de glucosa.

Se evidencia un aumento en la respuesta con el aumento de la concentración de enzima, esto debido a la mayor velocidad de conversión, proporcional a la cantidad de enzima. En las concentraciones evaluadas, entre 5 y 60 minutos de digestión se obtiene maltodextrinas. El punto “cero” fue asumido como cero grados de conversión, debido que no se completó la titulación en ninguno de los casos, y partir del minuto 15 se evidenció un comportamiento lineal. La Figura 20 evidencia los resultados analizados, donde se observa el comportamiento de grado de conversión con el aumento de concentración de enzima. La región sombreada corresponde a la región donde las respuestas resultaron maltodextrina.

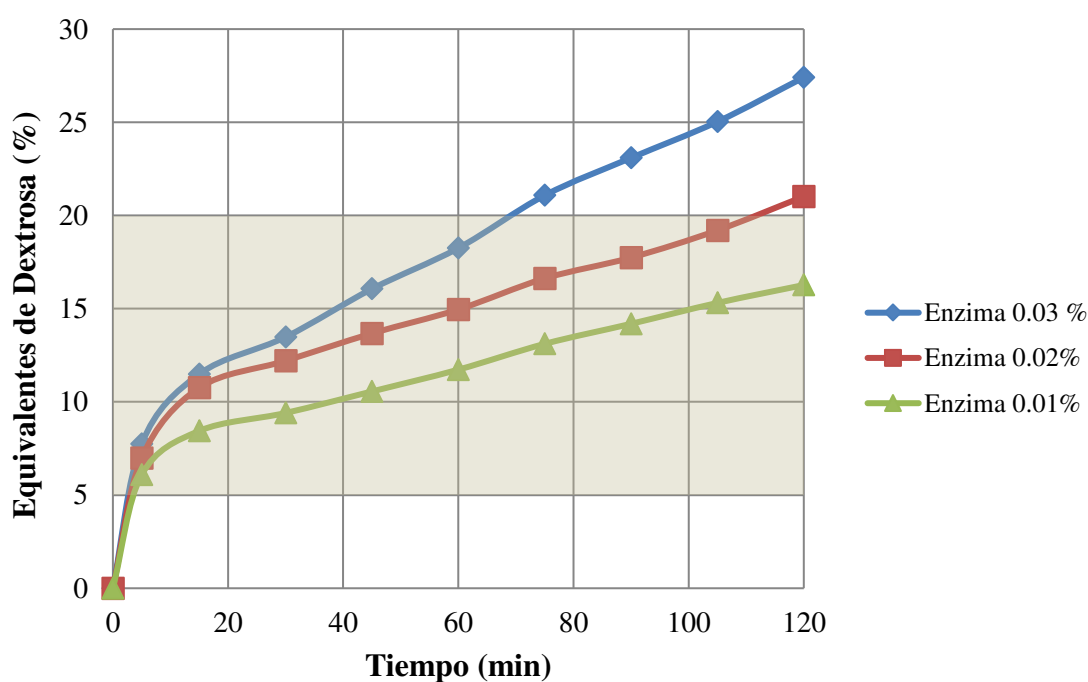


Figura 20. Gráfica de experimentos realizados variando la concentración de enzima, a temperatura y concentración de sustrato constantes

C. Concentración de enzima y de sustrato constantes

Se evaluó el efecto de la variación en la temperatura de digestión, manteniendo la concentración de enzima a 0.03% y la de sustrato a 30% constantes.

Se especifica el comportamiento de la respuesta en cada temperatura:

- A 30°C: se observó una baja actividad enzimática, evidenciada como puntos de valor de respuesta muy bajo, los primeros 12 experimentos (6 promedios) resultaron en almidón, es decir, un ED menor a 5, y los 3 promedios siguientes entre 5 y 5.65 ED.
- A 40°C: todos los puntos resultaron entre 6 y 15 ED. Primera temperatura en la que todos los experimentos resultaron maltodextrinas.
- A 50°C: en los primeros 8 promedios se obtuvo maltodextrina y el experimento con 120 minutos de digestión excedió en 0.87 ED el límite donde empieza a formarse jarabes de glucosa.
- A 60°C: los 6 primeros promedios resultaron maltodextrina con ED entre 10.9 y 19 ED (hasta los 75 minutos de digestión), los 3 puntos restantes resultaron jarabe de glucosa (de 90 a 120 minutos de digestión).
- A 70°C: se observa varios grados de conversión del tipo jarabe de glucosa (desde el minuto 60). Sin embargo, el punto inicial a tiempo de digestión 5 minutos empezó en 13.8 ED, rango superior de maltodextrinas. En las gráficas obtenidas los valores máximos se dieron a 70°C; sin embargo, un análisis más exhaustivo (intervalo de 1°C en cada experimento) nos hubiese brindado la actividad máxima de la enzima entre 60 y 80°C.
- A 80°C: a temperaturas mayores a 70°C la curva de respuesta empieza a descender a medida que aumenta la temperatura. La curva fue muy parecida a la obtenida a 60° y esto demuestra un mayor esfuerzo a nivel de proceso para lograr una conversión igual

que a la obtenida a 60°C. Los resultados fueron desde 12.7 ED a 5 minutos de digestión, hasta 19.7 a los 75 minutos (maltodextrinas) y desde el minuto 75 de 20.6 ED hasta 22.7 ED a 120 minutos (jarabes de glucosa).

- A 90°C: la curva fue muy parecida a la obtenida a 40°C, iniciando el 8.9 ED a los 5 minutos de digestión, hasta 13.9 ED a los 120 minutos.

- A 100°C: se observa una inactividad de la enzima, resultando la respuesta entre 3.4 y 4.7 ED (almidón). Experimentalmente el proceso fue complicado porque la temperatura no se pudo mantener todo el tiempo en 100°C, además que las pérdidas de agua debido a la temperatura eran muy rápidas, y se tuvo que completar el peso durante todo el experimento. Al aumentar el agua y además retirar el recipiente del calor para ser pesado la temperatura disminuía; en general se mantuvo entre 98 y 100°C. Este rango de temperatura también ocasionó pérdidas de material comestible en el fondo del recipiente debido a desintegración por calor. Este problema fue muy difícil de controlar a esta temperatura, pero empezó a mostrar complicaciones a partir de los experimentos a 70°C.

Entre 30 y 70°C se observa que los equivalentes de dextrosa aumentan de forma proporcional, mientras que entre 70 y 100°C la respuesta disminuye (tomando como referencia la temperatura, mas no el tiempo de digestión); para una mejor visualización del comportamiento de las gráficas, éstas han sido separadas en dos tramos, los experimentos variando la temperatura entre 30 y 70°C (Figura 21) y entre 70 y 100°C (Figura 22). Durante los experimentos a 30°C hasta el minuto 75 y todos a 100°C, los equivalentes de dextrosa evidencian que el producto obtenido permanece como almidón (de 0 a 5 ED), esto evidencia que la actividad de la enzima es prácticamente nula. También se observa una mayor cantidad de puntos dentro del área correspondiente a maltodextrina a las temperaturas 40, 50, 60, 80 y 90°C. En todos los casos se mantiene

comportamiento lineal a partir del minuto 15. Por encima de la región sombreada el producto obtenido es jarabe de glucosa y por debajo, almidón.

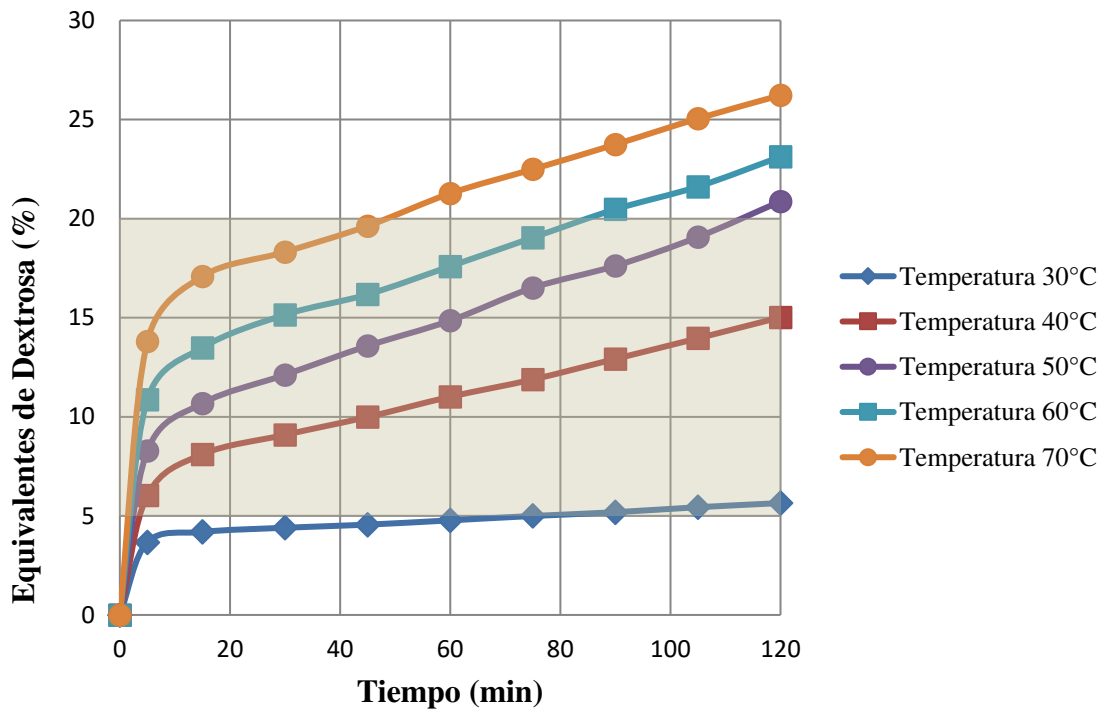


Figura 21. Gráfica de experimentos realizados variando la temperatura de digestión, concentración de sustrato y enzima constantes

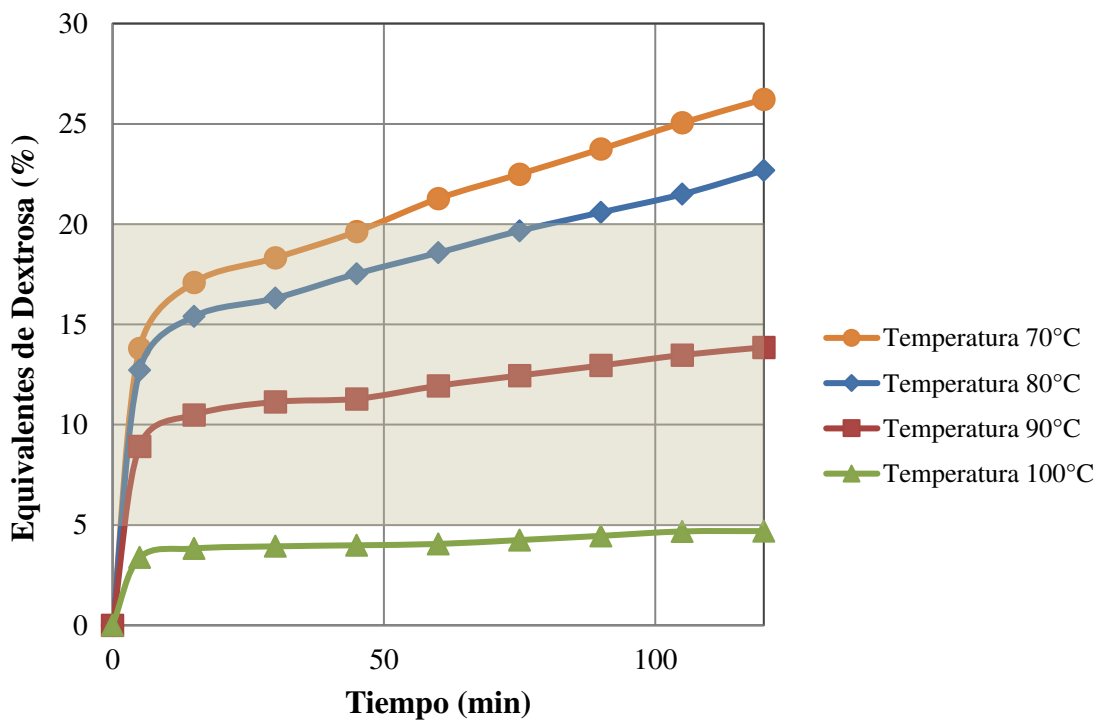


Figura 22. Gráfica de experimentos realizados variando la temperatura de digestión, concentración de sustrato y enzima constantes

4.2.3. BALANCE DE MATERIA DE LOS EXPERIMENTOS

Durante el proceso de obtención de maltodextrina se realizó el balance de materia, con el fin de determinar el rendimiento del proceso y especificar cada uno de los parámetros necesarios para la investigación. El balance total de materia fue evaluado en cinco procesos diferentes de obtención, y en cada prueba se aseguró que se tenga un solo día de procesamiento hasta producto final. Las pruebas para el balance de materia fueron realizadas independientemente de las experimentales para la evaluación de efectos de parámetros, esto debido a que se deseaba tener una base de 1000 gramos de materia prima fresca para el balance, mientras que para los experimentos se realizó en base a 1000 g de solución.

Los pesos de materia prima, fresca y productos intermedios y terminados fueron determinados en el instante de obtención, a fin de minimizar los errores como ganancia de humedad. Las cantidades que permanecieron constante a lo largo de los cinco experimentos fueron: peso de yuca, peso de agua total en la solución, peso de la enzima; los pesos variables: peso de agua de ingreso, debido a que la humedad en cada tubérculo era ligeramente diferente, peso de cáscara, peso y humedad de maltodextrina. En este caso se incluyeron los promedios de los valores y sus salidas.

El proceso inicia en la recepción de materia prima, en la cual se evalúa que el tubérculo sea del tipo deseado, y de apariencia promedio, para que los resultados en las cinco evaluaciones sean lo más cercanas posible. Luego, es procesada a través de las etapas de lavado y pelado. A nivel experimental se ingresó 1020 gramos de materia prima (yuca), de las cuales 950.6 gramos correspondía a yuca fresca como material comestible. Este material comestible (pulpa) fue rallado y los materiales enjuagados con 900 g de agua y diluido con 1433.3 gramos de agua. Para los cálculos fue asumido el peso de yuca fresca como peso de sustrato.

Para determinar la cantidad de agua necesaria para la etapa de extracción, se partirá de la concentración de sustrato deseado. En este caso, 30%; la ecuación 4.1 muestra el cálculo de agua necesaria para la etapa de extracción.

$$1000 \text{ g sustrato} \times \frac{100 \text{ g solución}}{30 \text{ g sustrato}} \times \frac{70 \text{ g agua}}{100 \text{ g solución}} = 2333.3 \text{ g agua} \quad (4.1)$$

La cantidad de agua a agregar en el experimento fue relacionada con la Ecuación 4.2 y los datos obtenidos reemplazados en la misma:

$$\text{Cantidad de agua a agregar} = \text{Agua necesaria} - \text{Agua existente} \quad (4.2)$$

$$\text{Cantidad de agua a agregar} = 2333.3 \text{ g} - 900 \text{ g} = 1433.3 \text{ g}$$

Con la solución deseada, 2333.3 g de agua y 1000 g de yuca fresca, se procede al proceso de extracción de almidón, manteniendo la solución en reposo durante 40 minutos (Medina, 2013) para una mejor extracción. Como se indicó anteriormente, no se debe agitar la solución, debido que los gránulos de almidón pueden romperse, evitando así una óptima gelatinización. Durante este proceso no hay intercambio de masa, salvo pequeñas pérdidas de humedad, que no fueron consideradas.

Completado el reposo, se procede con la etapa de gelatinización del almidón, aumentando la temperatura hasta mantenerla en 88°C durante 20 minutos para completar el proceso. Experimentalmente se verificó pérdidas de agua durante el calentamiento, por lo que se procedió a pesar la solución cada 2 a 3 minutos, completando el peso de agua. Esto evita variaciones en la concentración de enzima en la siguiente etapa, debido a variación en el peso de solución. Los pesos de sustrato y agua permanecen constantes durante esta etapa.

La etapa de digestión enzimática tiene en sus ingresos el peso de la enzima, 0.10 gramos. El cálculo se realiza en función a la cantidad de yuca fresca. El cálculo está determinado por la ecuación 4.3 con una concentración de 0.01% de enzima:

$$\text{Peso enzima (g)} = \text{Peso de solución (g)} \times 0.01 \% \quad (4.3)$$

$$\text{Peso enzima (g)} = 1000 \text{ g} \times 0.01 \% = 0.10 \text{ g}$$

Cuando la enzima es agregada se procede al enfriamiento a la temperatura de digestión, para el cálculo de balance de materia se utilizó una temperatura de 60°C, la cual es cercana a la temperatura de gelatinización y también pertenece a la matriz experimental. El tiempo de digestión fue de 15 minutos para las pruebas de balance de materia.

Luego de la etapa de digestión se debe inactivar la enzima para detener la conversión a equivalentes de dextrosa, para esto es necesario que el tiempo de inactivación sea lo más corto posible. Existieron pruebas preliminares no contempladas en esta investigación de inactivación de enzima por disminución de temperatura a través de un chiller, pero debido a la desviación de respuestas y que la maltodextrina seguía aumentando de grado ED mientras la temperatura disminuía. Gracias a la información que brindaron las pruebas preliminares se decidió realizar la inactivación por disminución de pH, se llevó a pH 3.0 a 3.5, agregando aproximadamente 2 gramos de ácido cítrico, luego de esto se procedió a disminuir la temperatura a 30°C (donde no hay conversión significativa durante al menos una hora), el motivo de la disminución de temperatura es básicamente la estandarización de condiciones en los experimentos. Luego de la acidificación no fue necesario el aumento de pH, dado que la presentación comercial normalmente se especifica en pH 4.0 a 5.5. Al atomizar el producto durante los experimentos el pH en el producto terminado fue de 4.3 a 4.7 (50 gramos de maltodextrina en 100 gramos de agua desionizada), dado que una parte del ácido cítrico agregado queda retenida en la etapa de filtrado.

La maltodextrina es altamente soluble, por lo que el producto obtenido se encuentra diluido en la fase líquida de la mezcla. La etapa de filtrado permite retener material que no ha sido convertido en maltodextrina, como fibra, proteínas, cenizas insolubles y otros

componentes no solubles en agua. Durante esta etapa se aumentó 500 gramos de agua para lavado de la torta filtrante y consecuente recuperación de maltodextrina retenida en esta fase. En esta etapa se tiene como desecho 355.2 gramos de material con un contenido de humedad de 90.03% (35.4 gramos de sólidos de yuca y 319.8 gramos de agua). A nivel industrial, esto podría ser secado, molido y utilizado como materia prima para barras energéticas, en virtud de un mayor contenido de proteínas y fibra dietaria. A nivel laboratorio se secó en horno y se testeó una buena sensación bucal en su consumo, ligeramente dulce, debido a la mezcla con maltodextrina durante su procesamiento.

Posteriormente de la etapa de filtrado se atomiza el producto, para esto se utilizó un atomizador de laboratorio, el equipo elimina el agua contenida en la solución, obteniendo maltodextrina como producto final. Como resultado se obtuvo 398.63 gramos de producto terminado con un contenido de 4.9% de humedad. Cada maltodextrina fue evaluada en su principal característica, los equivalentes de dextrosa y su humedad, para los cálculos requeridos.

El balance en general tuvo un ingreso de 1000 gramos de yuca fresca, de los cuales 536.1 gramos corresponden a humedad, ingresando 414.5 gramos de yuca en base seca. Como producto terminado se obtuvo 398.63 gramos (379.1 gramos de maltodextrina pura y 19.53 gramos de humedad). Considerando la maltodextrina pura, esto resultó en un rendimiento de 91.5%. La Figura 23 muestra los valores recolectados a partir de las pruebas experimentales. En el lado izquierdo del diagrama se presenta la materia prima ingresada en cada etapa, en el centro las etapas y las condiciones de operación y productos intermedios que permanecen a lo largo del proceso, mientras que de lado derecho se tiene los residuos del proceso y posibles opciones de procesamiento para obtención de subproductos.

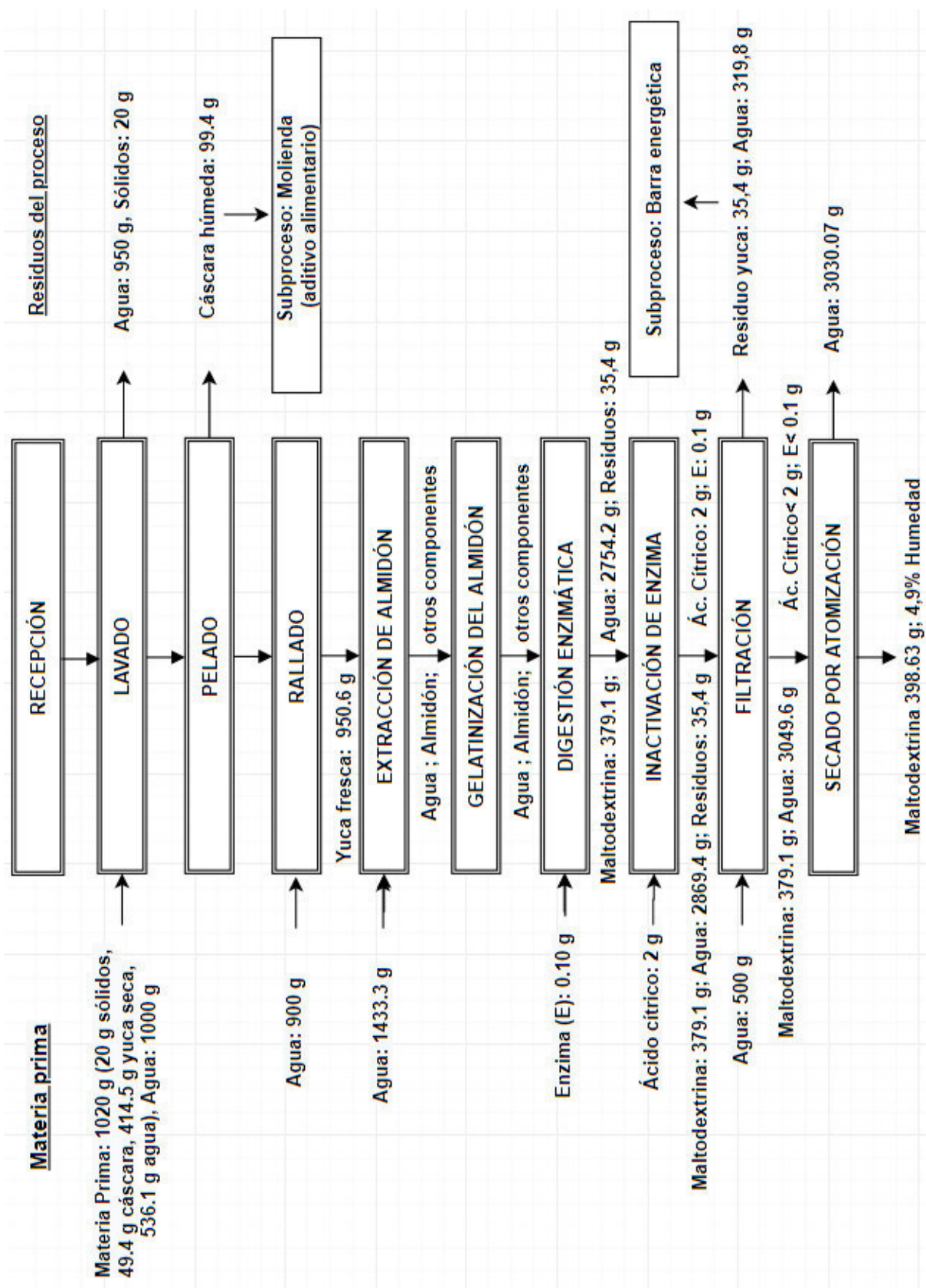


Figura 23. Balance de materia del proceso de producción de maltodextrina

4.2.4. Determinación de los niveles de factores para el diseño factorial

En base a los resultados obtenidos en el ítem 4.2.2. se evaluó el comportamiento de cada uno de los factores para la determinación de sus niveles. Se consideró que los niveles seleccionados deben tener como resultado maltodextrina, y no almidón o jarabe. También se tomó en cuenta el menor esfuerzo del sistema para obtener similares características que otro que requiere mayor cantidad de recursos y/o energía (se detalla mejor en la selección de la temperatura). Fue considerada la eficiencia del proceso: por ejemplo, un proceso que contiene 10% de sustrato brindará menos producto que uno de 30% usando los mismos recursos; en el caso de tiempos de digestión, un tiempo menor será más eficiente. Finalmente, se ha dado una preferencia por escoger niveles, en lo posible alejados, que permitan evaluar una diferencia representativa en la respuesta.

En el diseño experimental, finalmente, se ha considerado los siguientes niveles en cada factor:

Factor A: Temperatura de digestión (40°C; 60°C)

Se observó en las gráficas de los experimentos preliminares algunas características en cada temperatura. El análisis no incluye el punto “cero”, ya que en cada caso fue asumido que al inicio de digestión se tiene 0 ED (experimentalmente se intentó realizar la titulación del almidón, pero no se logró completar la titulación), así se incluyó los de tiempos de digestión de 5 a 120 minutos (9 promedios). También es necesario indicar que a medida que aumentó el tiempo de digestión o la temperatura fue necesario completar con mayores cantidades cada vez, los pesos de solución, dado que había pérdidas de agua durante el proceso.

Se especifica las características de la respuesta en cada temperatura:

- A 30°C: se observó baja actividad enzimática, 6 promedios almidón y 3, maltodextrina. Debido a esto, no se consideró esta temperatura.

- A 40°C: la única temperatura del primer rango de temperaturas (incremento en la respuesta) en el que todos los experimentos resultaron maltodextrinas. Debido a esto, fue considerado como uno de los niveles a evaluar en la matriz experimental.
- A 50°C: con ocho promedios como maltodextrina y uno como jarabe de glucosa, inicialmente fue una de las temperaturas para ser considerada el segundo nivel para la matriz. El motivo por el cual no fue seleccionado como nivel es porque se busca una mayor diferencia en los niveles seleccionados.
- A 60°C: seis promedios resultaron maltodextrina y tres promedios jarabe de glucosa. Al tener un mejor rango de temperatura, ésta fue escogida como nivel para este efecto. Escoger una temperatura mayor a 60°C se vería afectada por el “regreso” de la respuesta por aumento de temperatura.
- A 70°C: muchos puntos dentro de la clasificación de jarabes no permitieron seleccionar esta temperatura como nivel, dado que lo que se busca son promedios dentro del rango de maltodextrinas.
- A 80, 90 y 100°C: las curvas de respuesta empiezan a descender y son muy parecidas a las obtenidas entre 60°C y 30°C, en ese orden. Por este motivo, dichas temperaturas no fueron seleccionadas como nivel, ya que el análisis estadístico no hubiese evidenciado un efecto en el cambio de temperatura, cuando experimentalmente se ha demostrado que hay un gran efecto de este factor en el comportamiento de la respuesta. Además, a 100°C los puntos que se obtuvieron resultaron todos de almidón.

Factor B: Concentración de sustrato (20% m/m; 30% m/m)

A mayor concentración de sustrato el proceso será más eficiente, debido a que se utiliza la misma cantidad de recursos para obtener más producto. Las pruebas preliminares se desarrollaron con 10, 20 y 30% m/m de concentración de sustrato (materia fresca), pero a 40% no fue posible debido a limitaciones del experimento (degradación en el fondo

del recipiente ocasionado por el calor y espesamiento de la solución). Verificando la Figura 19, se puede observar una diferencia poco significativa (visualmente), por lo que, tomando en cuenta la eficiencia del proceso se seleccionó los niveles a 20 y 30% m/m.

Factor C: Concentración de enzima (0.01% m/m; 0.03% m/m)

Para seleccionar los niveles de la concentración de enzima, se analizó la Figura 20. En ella se puede apreciar una variación significativa con el aumento de la cantidad de enzima, esto debido a que a mayor cantidad de enzima se tendrá una mayor dextrinización del almidón. La primera proporción de enzima considerada para la matriz fue de 0.01%, debido a que todos sus experimentos resultaron maltodextrina. El segundo nivel seleccionado fue 0.03% de concentración de enzima: a pesar de que se tiene varios puntos en la región de jarabes de glucosa, se puede considerar como nivel si el tiempo de digestión es hasta 60 minutos, dado que bajo esas condiciones se obtuvo maltodextrina.

Factor D: Tiempo de digestión (15 minutos, 30 minutos)

A pesar de que no haber tomado el tiempo como premisa del análisis provisional, este factor ha sido evaluado en todos los experimentos, puesto que se ha desarrollado el comportamiento de los factores a través del tiempo de digestión.

Un menor tiempo permitirá un proceso más sencillo (evita pérdidas mayores de agua, permite la inclusión de los niveles de otros factores para obtener maltodextrina, utiliza menor cantidad de recursos), tanto experimentalmente como ante un posible escalamiento industrial. El tiempo 5 minutos no permite una evaluación lineal, debido a que este punto se ve afectado por el punto cero. Sin embargo, a partir de los 15 minutos se observa una tendencia lineal en el comportamiento. El segundo nivel tomado fue 30 minutos por practicidad de los experimentos. Se verificó gráficamente que sí hay una

variación considerable entre ambos tiempos. Tiempos mayores no fueron considerados para incluir la concentración de enzima de 0.03% sin generar jarabes de glucosa.

4.2.5. Ejecución de pruebas definitivas

Para la ejecución de las pruebas definitivas se consideró los siguientes factores y sus niveles:

- Temperatura de digestión (A): nivel mínimo (40°C), nivel máximo (60°C)
- Concentración de sustrato (B): nivel mínimo (20%), nivel máximo (30%)
- Concentración de enzima (C): nivel mínimo (0.01%), nivel máximo (0.03%)
- Tiempo de digestión (D): nivel mínimo (15'), nivel máximo (30')

Se realizó los experimentos siguiendo la matriz experimental de 32 experimentos y se calculó los %ED del producto en cada experimento. La Tabla 9 muestra la matriz experimental, desarrollada con los niveles seleccionados en el apartado anterior.

Tabla 9. *Matriz experimental del proceso de obtención de maltodextrina*

Temperatura	[Sustrato]	[Enzima]	Tiempo
40	20	0.01	15
60	20	0.01	15
40	30	0.01	15
60	30	0.01	15
40	20	0.03	15
60	20	0.03	15
40	30	0.03	15
60	30	0.03	15
40	20	0.01	30
60	20	0.01	30
40	30	0.01	30
60	30	0.01	30
40	20	0.03	30
60	20	0.03	30
40	30	0.03	30
60	30	0.03	30
40	20	0.01	15
60	20	0.01	15
40	30	0.01	15
60	30	0.01	15
40	20	0.03	15
60	20	0.03	15
40	30	0.03	15
60	30	0.03	15
40	20	0.01	30
60	20	0.01	30
40	30	0.01	30
60	30	0.01	30
40	20	0.03	30
60	20	0.03	30
40	30	0.03	30
60	30	0.03	30

La Tabla 22 (del Anexo 4) brinda los resultados del factor de Fehling, cuyo valor nos permitirá determinar los equivalentes de dextrosa. Como ya se indicó en el apartado 3.4.2 (Ecuación 3.7), se ha utilizado la siguiente relación:

$$\text{Factor de Fehling} = \text{mL gastados en primera titulación} \times 0.01 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Las Tablas 23 y 24 (Anexo 4) detallan los resultados de las pruebas definitivas con 15 minutos de digestión. Las pruebas se realizaron por duplicado para mejorar la precisión de los experimentos. En la determinación de estos valores se utilizó las relaciones expresadas en el apartado 3.4.2 (Ecuaciones 3.8 y 3.9):

$$\% \text{Azúcares reductores (\%AR)} = \frac{\text{Factor de Fehling} \times 500}{V \times W} \times 100 \%$$

$$\% \text{Dextrosa equivalente} = \frac{\% \text{AR}}{\% \text{BS}} \times 100 \%$$

La Tabla 25 (Anexo 4) muestra los valores promedio de ambas pruebas, y serán utilizados para la determinación del modelo matemático que prediga el comportamiento de los factores ya mencionados.

Asimismo, para 30 minutos de digestión se ha detallado las Tablas 26 (Factor de Fehling), 27 y 28 (resultados de los equivalentes de dextrosa de las pruebas por duplicado) y Tabla 29 (promedio de las pruebas para tratamiento estadístico).

La Tabla 10 muestra los valores de cada experimento y los promedios finales de ambas pruebas, a ser ingresados para su tratamiento estadístico en el software Minitab 18. En algunos casos, da la apariencia de no ser el promedio de los valores en el segundo decimal, pero esto se debe al ajuste de los siguientes decimales. Las figuras 38 y 39 del Anexo 3 muestran evidencia del uso del software y resultados importantes.

Tabla 10. *Resultados finales para tratamiento estadístico en Software Minitab 18*

Temperatura	[Sustrato]	[Enzima]	Tiempo	Respuesta
40	20	0.01	15	7.56
60	20	0.01	15	11.38
40	30	0.01	15	7.27
60	30	0.01	15	10.60
40	20	0.03	15	12.02
60	20	0.03	15	17.85
40	30	0.03	15	11.52
60	30	0.03	15	17.28
40	20	0.01	30	8.39
60	20	0.01	30	12.30
40	30	0.01	30	7.94
60	30	0.01	30	11.78
40	20	0.03	30	13.25
60	20	0.03	30	19.10
40	30	0.03	30	12.00
60	30	0.03	30	18.64
40	20	0.01	15	7.52
60	20	0.01	15	11.37
40	30	0.01	15	7.20
60	30	0.01	15	10.57
40	20	0.03	15	12.05
60	20	0.03	15	17.75
40	30	0.03	15	11.48
60	30	0.03	15	17.32
40	20	0.01	30	8.35
60	20	0.01	30	12.30
40	30	0.01	30	7.98
60	30	0.01	30	11.72
40	20	0.03	30	13.17
60	20	0.03	30	19.07
40	30	0.03	30	11.90
60	30	0.03	30	18.60

4.2.6. Resultados del efecto de los factores y sus interacciones

Las respuestas fueron ingresadas al software Minitab 18, el cual realiza el análisis estadístico de los valores ingresados, generando los valores de sus efectos e interacciones como principales resultados. La Tabla 11 muestra los efectos determinados por el software.

Tabla 11. *Tabla de efectos de factores y sus interacciones de la matriz experimental*

Término	Efecto	P
Temperatura (A)	4.87688	0.000
[Sustrato] (B)	-0.60188	0.000
[Enzima] (C)	5.54813	0.000
Tiempo (D)	0.98437	0.000
AB	0.02562	0.078
AC	1.15063	0.000
AD	0.18938	0.000
BC	-0.08812	0.000
BD	-0.06938	0.000
CD	0.07312	0.000
ABC	0.18188	0.000
ABD	0.13812	0.000
ACD	0.05563	0.001
BCD	-0.10312	0.000
ABCD	0.05187	0.002

En ella se puede ver dos valores importantes: los valores del efecto de cada factor y las interacciones y P. De los resultados se puede observar que los 4 factores, además de la interacción “Temperatura de digestión – Concentración de enzima” tienen los valores numéricos de efecto más altos, independientemente de su signo. Estos valores serán los más significativos y aquellos que serán tomados en cuenta para la determinación del modelo matemático. Sin embargo, el valor de P también muestra valores significativos y no significativos. Si el valor de P es mayor a 0.05, éste indica que dicho efecto no es significativo. Los valores mostrados muestran que solo la interacción AB (“Temperatura-Concentración de Sustrato”) no es significativa para el efecto en la respuesta y de manera consecuente tiene el menor de los efectos.

La gráfica normal de los efectos nos permite distinguir los efectos significativos de los que no lo son. Esta gráfica distribuye los factores en referencia a la línea proyectada. A medida que los efectos significativos se acercan a la línea proyectada en la gráfica se hacen menos significativos.

La Figura 24 muestra como los efectos más significativos los factores A (efecto positivo), B (efecto negativo), C, D y la interacción AC (efectos positivos). Los efectos de las interacciones AD, BC, BD, CD, ABC, ABD, ACD, BCD y ABCD son poco significativos, debido a su cercanía con la recta proyectada y el Efecto de la interacción AB no es significativo por estar contenida en la recta, esto debido a que tiene un valor $P > 0.05$ (0.078).

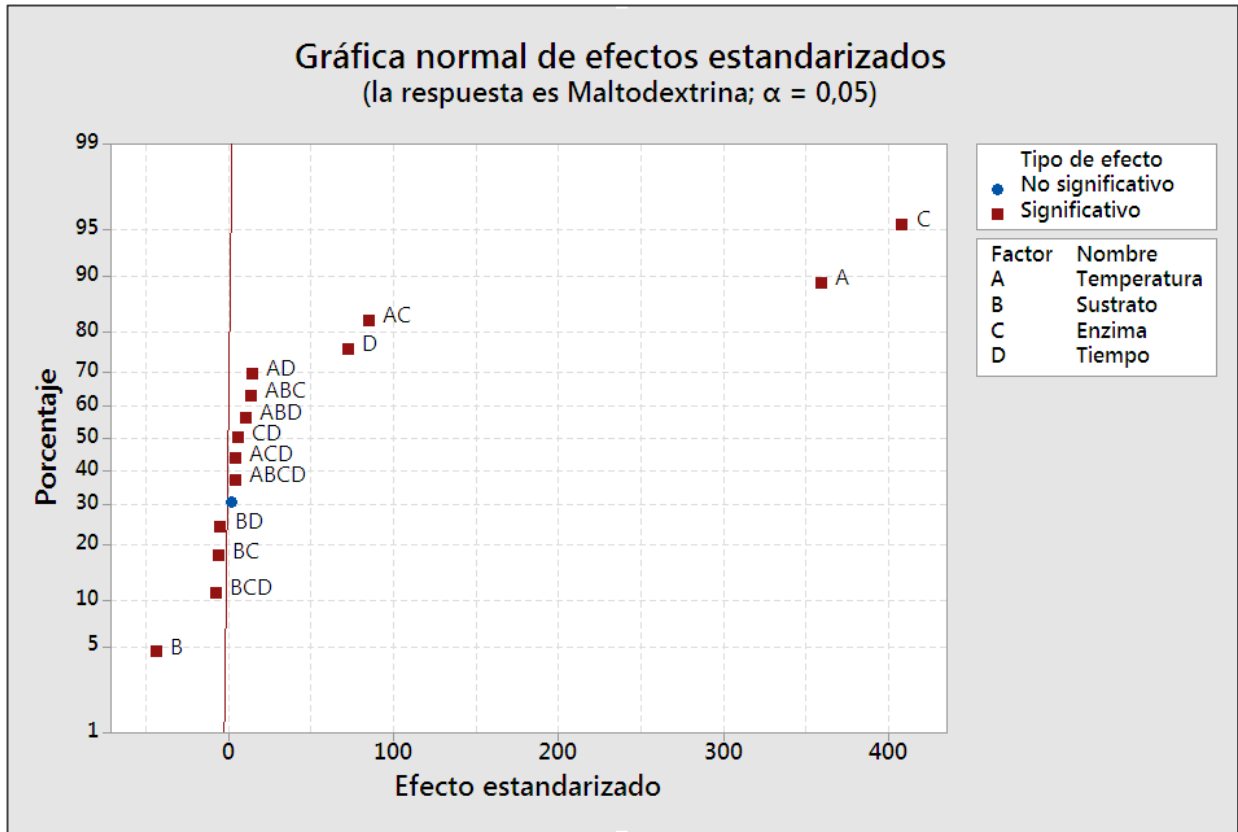


Figura 24. Gráfica normal de los efectos estandarizados obtenido mediante software Minitab 18

El software también nos permite obtener el diagrama de Pareto, el cual brinda una comparación con del valor estimado del límite para que los efectos se consideren significativos. Para los experimentos realizados se obtuvo el límite de 2,1. Los efectos que excedan este valor serán considerados como significativos. La Figura 25 muestra el Diagrama de Pareto obtenido. Los resultados del análisis de varianza emitido por Minitab 18 son detallados en la tabla 12.

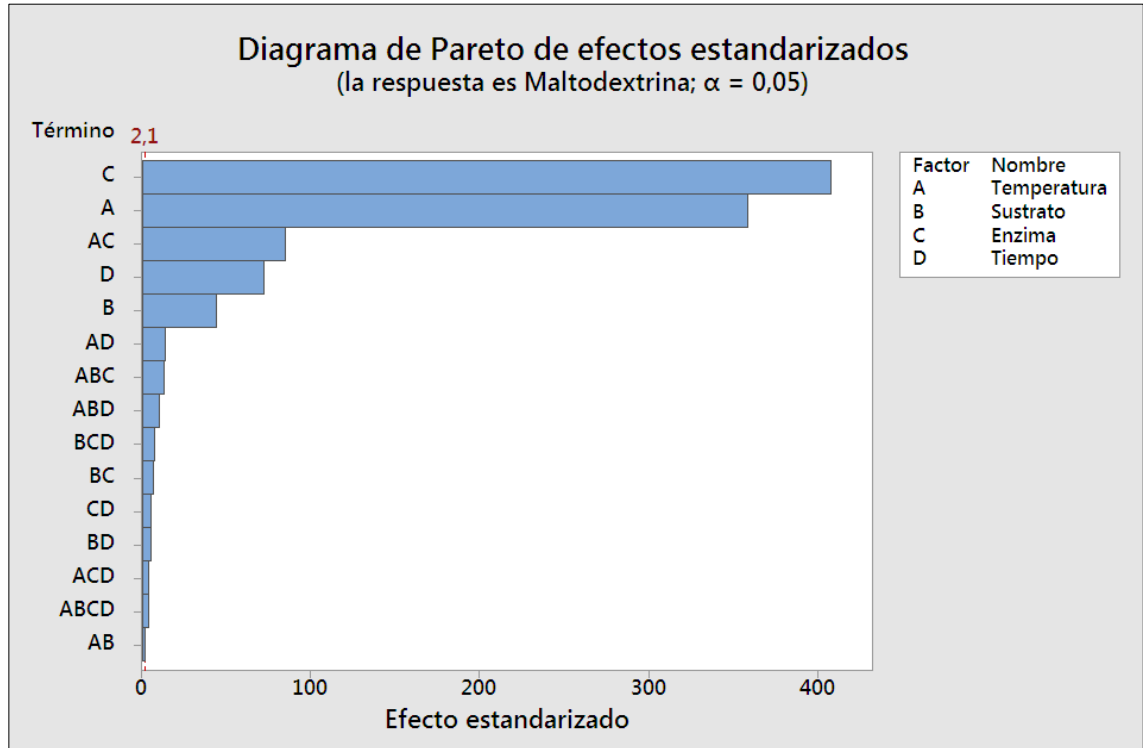


Figura 25. Diagrama de Pareto de los efectos de la matriz experimental, obtenido a través del software Minitab 18

4.2.7. Modelo matemático del comportamiento de los factores en la obtención de maltodextrina

Mediante el software Minitab 18 se aplicó el método de análisis de varianza (ANOVA) para determinar los coeficientes del modelo matemático que prediga el comportamiento de cada factor y sus interacciones con el grado de conversión de la maltodextrina. Para la expresión del modelo matemático y a fin de reducirlo, se ha considerado los factores e interacciones más significativos, siendo estos de mayor a menor significancia: C (Concentración de enzima), A (Temperatura de digestión), AC (Concentración de enzima - Temperatura de digestión), D (Tiempo de digestión) y B (Concentración de sustrato).

Tabla 12. Resultados de análisis de varianza emitidos por Software Minitab 18

Fuente	GL	SC Ajust.	CM ajust.	Valor F	P
Modelo	5	457,766	91,553	2361,89	0,000
Lineal	4	447,175	111,794	2884,05	0,000
Temperatura	1	190,271	190,271	4908,61	0,000
Sustrato	1	2,898	2,898	74,76	0,000
Enzima	1	246,254	246,254	6352,84	0,000
Tiempo	1	7,752	7,752	199,98	0,000
Interacción 2 términos	1	10,592	10,592	273,24	0,000
Temperatura *Enzima	1	10,592	10,592	273.24	0,000
Error	26	1,008	0.039		
Falta de ajuste	10	0,984	0,0984	66,58	0,000
Error puro	16	0,024	0,001		
Total	31	458,774			

El modelo del comportamiento determinado por Minitab 18 está determinado por la ecuación 4.4:

$$ED = 0.454375 + 0.12878 \times \text{Temperatura} - 0.0601875 \times [\text{Sustrato}] - 10.25 \times [\text{Enzima}] + 0.065625 \times \text{Tiempo} + 5.75312 \times \text{Temperatura} \times [\text{Enzima}] \quad (4.4)$$

El valor del Coeficiente de determinación R^2 resultó 99.78%, con una desviación de $S=0.196883$. Estos valores confirman una gran exactitud en la predicción de la respuesta utilizando el modelo matemático.

4.2.8. Validación del modelo matemático

A. A través de la determinación del error experimental (datos de Matriz Experimental)

A partir de las respuestas de la matriz experimental (Equivalentes de dextrosa), se calculó el error tomando como referencia las respuestas calculadas a partir del modelo matemático. La Tabla 13 muestra los valores experimentales de los parámetros A, B, C y D, la respuesta experimental y la calculada a través del modelo matemático (Ecuación 4.4), al tener un valor promedio de error de 1.20%, menor a 3.47%, se infiere que el modelo predictivo es idóneo.

Asimismo, la Figura 26 muestra el gráfico de residuos con los valores de cada error, en el cual se verifica que dos puntos (N°15 y N°31) se alejan con un mayor valor del valor cero de error, lo cual se interpreta como un error aleatorio, y que a su vez, el error depende de sí mismo y no de las variables.

Tabla 13. *Determinación del error entre los valores experimentales y los calculados a través del modelo matemático*

Experimento	DE TEÓRICO	DE EXPERIMENTAL	Error
1	7,58	7,56	0,33%
2	11,31	11,38	0,60%
3	6,98	7,27	3,95%
4	10,71	10,60	1,03%
5	11,98	12,02	0,31%
6	18,01	17,85	0,90%
7	11,38	11,52	1,21%
8	17,41	17,28	0,74%
9	8,57	8,39	2,14%
10	12,30	12,30	0,04%
11	7,97	7,94	0,35%
12	11,69	11,78	0,73%
13	12,97	13,25	2,14%
14	18,99	19,10	0,55%
15	12,36	12,00	3,04%
16	18,39	18,64	1,33%
17	7,58	7,52	0,86%
18	11,31	11,37	0,52%
19	6,98	7,20	3,01%
20	10,71	10,57	1,32%
21	11,98	12,05	0,56%
22	18,01	17,75	1,46%
23	11,38	11,48	0,87%
24	17,41	17,32	0,51%
25	8,57	8,35	2,63%
26	12,30	12,30	0,04%
27	7,97	7,98	0,16%
28	11,69	11,72	0,22%
29	12,97	13,17	1,54%
30	18,99	19,07	0,40%
31	12,36	11,90	3,91%
32	18,39	18,60	1,12%
			1,20%

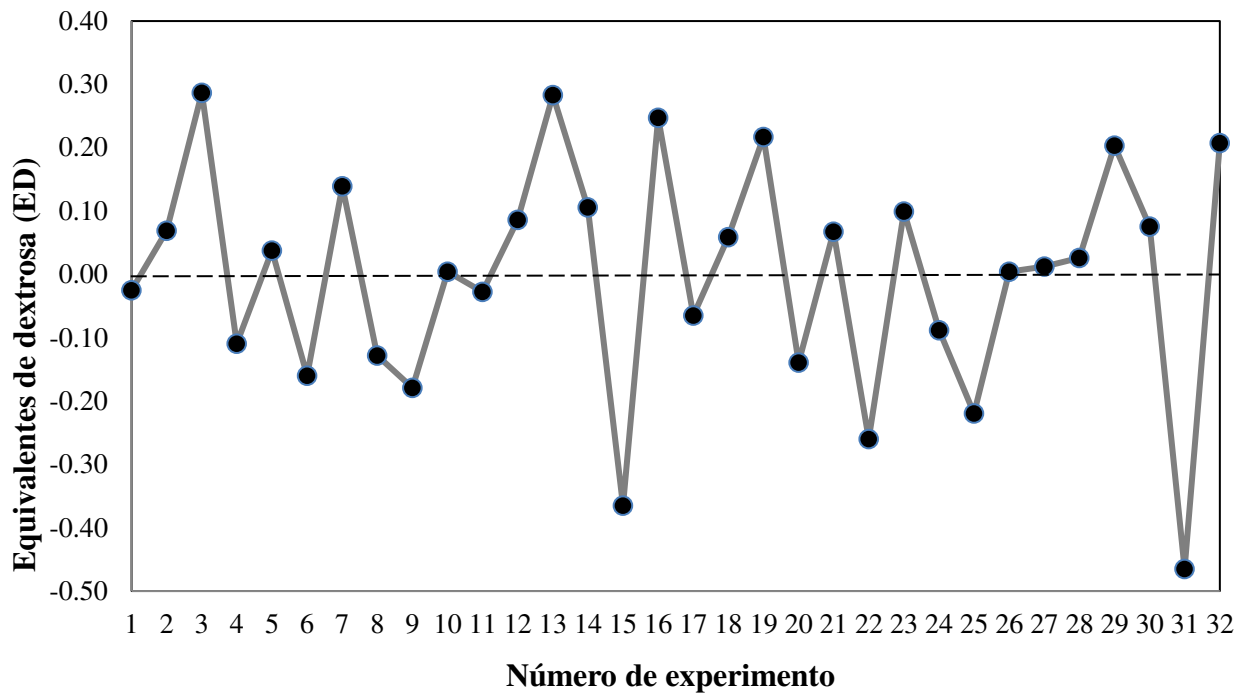


Figura 26. Gráfico de Residuos

B. A través del resultado de otras investigaciones

Las condiciones de trabajo varían mucho en la literatura mostrada. Sin embargo, se tomó algunas investigaciones que desarrollaron hidrólisis enzimática de almidón de yuca para la evaluación de sus respuestas en el modelo matemático (Ecuación 4.4):

$$ED = 0.454375 + 0.12878 \times \text{Temperatura} - 0.0601875 \times [\text{Sustrato}] - 10.25 \times [\text{Enzima}] + 0.065625 \times \text{Tiempo} + 5.75312 \times \text{Temperatura} \times [\text{Enzima}].$$

➤ *Ruiz, 2009.*

La primera evaluación se realizó en base al trabajo realizado por Ruiz (2009), cuyas condiciones de trabajo fueron:

- Sustrato: almidón de yuca

- Enzima: alfa amilasa Liquozyme Sc DS
- Método de análisis: determinación de azúcares reductores por espectrofotometría
- Parámetros: temperatura de digestión (65°C), concentración de sustrato en forma de almidón de yuca (10% m/m, esto equivale a 27.47% m/m de yuca fresca, tomando como referencia las Tablas peruanas de composición de alimentos), concentración de enzima (0.028 % m/m) y tiempo (20 minutos)
- Respuesta de la investigación: 18 ED

Reemplazando los valores brindados por la investigación en el modelo matemático (4.4), la respuesta esperada, en equivalentes de dextrosa da un valor de 18.67 ED, el valor experimental 18 ED y un porcentaje de error de 3.58%. La diferencia obedece a diferentes motivos: el uso de almidón de yuca en lugar de materia fresca (que brinda una cantidad diferente de amilosa y amilopectina liberados). A pesar de haber realizado la conversión, el factor utilizado es el tomado como promedio, pero experimentalmente no se tiene los valores exactos. También está el hecho de haber utilizado diferentes marcas de enzimas, y que a la vez pueden haber estado expuestas a diferentes condiciones de almacenamiento, lo que afecta su actividad, también de diferente manera. El método de análisis también puede haber ocasionado diferencias debido a factor del analista, metodología, estado de los insumos de análisis, calibración de equipos.

➤ *Montes et al, 2008*

Las condiciones experimentales de esta investigación fueron:

- Sustrato: almidón de ñame

- Enzima: alfa amilasa Termamyl 120L. Esta enzima tiene un factor de corrección de 0.74, en función a la enzima Liquozyme Supra 2.2, de acuerdo a la Ficha Técnica de aplicación en almidón del fabricante Novozymes.
- Método de análisis: determinación de azúcares reductores por espectrofotometría
- Parámetros: temperatura de digestión (93°C), concentración de sustrato (40% m/v, esto equivale a 34.98% m/m de ñame, asumiendo la densidad de ñame 1.56 g/mL), concentración de enzima (0.006 % m/m) y tiempo (60 minutos)
- Respuesta de la investigación: 12 ED

Reemplazando los valores brindados por la investigación en el modelo matemático (Ecuación 4.4), la respuesta esperada, en equivalentes de dextrosa da un valor de 12.86 ED, el valor experimental 12 ED y un porcentaje de error de 6.71%. Esta diferencia obedece a diferentes motivos: 1. Materia prima distinta: debido a la poca cantidad de artículos enfocados a la hidrólisis de yuca hasta maltodextrina, se tomó como referencia un estudio de tratamiento de ñame, una especie diferente. 2. Enzima diferente: en la ficha técnica de la aplicación de enzimas Novozymes se encontró una relación entre los equivalentes de dextrosa obtenidos a condiciones estándar (Tabla 14). Esta relación fue utilizada para convertir los equivalentes de dextrosa esperados mediante el modelo matemático a los que se obtendría utilizando la enzima Termamyl 120L (usada por el autor). Sin embargo, existen diferencias entre las condiciones utilizadas en el experimento y las condiciones estándar. 3. Valor de parámetros: se evidencia un mayor valor en las condiciones de operación que los niveles máximos de la matriz experimental para validar el modelo matemático (33°C mayor, 4.98% en sustrato y 30 minutos mayor en tiempo). 4. Método diferente de análisis. A pesar de la diferencia en las condiciones,

que ocasionaron una respuesta distinta, ésta solo resultó con una desviación de 6.71%, evidenciando que el modelo puede ser aplicado variando materias primas similares o parámetros y aun así obtener resultados cercanos.

Tabla 14. *Valores de obtención de ED por medio de enzimas Novozymes en almidón*

Característica/ Producto	Liquozyme Supra 2.2X / 2.8X	Termamyl 120L
Equivalentes de Dextrosa desarrollado bajo condiciones estándar	11.1	8.2

Fuente: Ficha Técnica de aplicación de enzimas Novozymes en almidon

➤ *Díaz et al, 2002*

Las condiciones experimentales de esta investigación fueron:

Sustrato: almidón de yuca

- Enzima: alfa amilasa Termamyl 120L. Esta enzima tiene un factor de corrección de 0.74, en función a la enzima Liquozyme Supra 2.2, de acuerdo a la Ficha Técnica de aplicación en almidón del fabricante Novozymes.
- Método de análisis: determinación de azúcares reductores por espectrofotometría
- Parámetros: temperatura de digestión (70°C), concentración de sustrato (40% m/m), concentración de enzima (0.003 % m/m) y tiempo (60 minutos)
- Respuesta de la investigación: 9 ED

Reemplazando los valores brindados por la investigación en el modelo matemático (4.4), la respuesta esperada, en equivalentes de dextrosa da un valor de 8.995 ED, el valor experimental 9 ED y un porcentaje de error de 0.05%. Para esta investigación se

puede verificar algunas diferencias, 1. Parámetros diferentes: temperatura 10°C mayor a la utilizada en la matriz experimental, sustrato: 10% mayor y tiempo de digestión 30 minutos mayor. A pesar de estas diferencias, se encontró una similitud de 99.95% en la respuesta, esto puede deberse al método de análisis, refuerza la premisa de que con Ruiz (2009) la diferencia pueda deberse al método de análisis y la calibración y verificación de equipos que ello implica, por ser un método espectrofotométrico. El método volumétrico permite estandarizar las respuestas con la competencia del analista, que va teniendo un mayor desempeño con el aumento de la cantidad de experimentos.

En las tres investigaciones evaluadas se obtuvo los porcentajes de error de: 3.58%, 6.71% y 0.05%, valores que validan notablemente la exactitud del modelo matemático que predice la respuesta de los equivalentes de dextrosa.

Finalmente, el modelo fue validado con muy buenos resultados usando técnicas estadísticas y datos experimentales de otras fuentes, los valores p resultaron inferiores a 0,05 y el modelo tuvo un excelente coeficiente de determinación, 99,78%, lo cual evidencia una alta correlación del mismo. Sin embargo, se debe tener en cuenta los valores de Falta de ajuste, siendo que el valor p es inferior a 0,05, se deduce que puede existir un mejor modelo de ajuste (considerando probablemente los cuadrados de las variables de estudio).

4.2.9. Evaluación del producto obtenido con uno comercial

Para la comparación de la maltodextrina obtenida a partir de almidón de yuca se adquirió una maltodextrina comercial 10 ED, lote 20131019, de la marca Frutarom, adquirido en la empresa Montana S.A.

Como maltodextrina experimental se escogió una maltodextrina cercana a 10 ED, experimentalmente obtenida a 40°C, 30% de concentración de sustrato y 0.03% de concentración de enzima y cuyo resultado de los equivalentes de dextrosa fue 9.99 ED

Se observó la similitud y características de las siguientes propiedades:

- Apariencia: ambas maltodextrinas tienen una apariencia de polvo blanco fino y uniforme. El tamaño de partícula de la maltodextrina comercial es menor. Esto se debe al diseño de la boquilla del aspersor.
- Aspecto en solución: ambas soluciones resultaron transparentes y sin sólidos insolubles en el fondo ni flotantes.
- Sabor: ambas de sabor ligeramente dulce y agradable al gusto.
- Equivalentes de dextrosa: la maltodextrina comercial tuvo un ED de 10.19, mientras que la seleccionada experimentalmente resultó con 9.99 ED. A nivel comercial se suele trabajar con un rango comercial de 9 a 12 ED. El análisis comprobó la especificación de Equivalentes de dextrosa en el producto comercial.
- Solubilidad: comercialmente la Ficha técnica de la maltodextrina indica una solubilidad mínima de 98 gramos en 100 gramos de agua. Las pruebas de solubilidad se realizaron disolviendo 80 gramos de producto en 100 gramos de agua, obteniendo soluciones claras, muy similares, sin sólidos en la superficie ni fondo, sin tonalidad amarilla a la vista, ambas soluciones fueron ligeramente espesas y resistentes a la agitación.
- pH: comercialmente se especifica en las fichas técnicas un pH de 4.0 a 5.5. La maltodextrina comercial resultó en pH 4.9, mientras que la maltodextrina resultante de los experimentos en pH 4.6, en ambos casos se realizó la disolución de 50 gramos en 100 gramos de agua desionizada.

- Humedad: la humedad de la maltodextrina comercial resultó en 5.5%, mientras que la obtenida experimentalmente 4.3%. No habiendo una diferencia drástica entre los resultados.
- Cenizas: al determinar la cantidad de cenizas de la maltodextrina comercial, esta resultó en 0.39%, mientras que la maltodextrina experimental obtuvo un resultado de 0.08%. Esto se debe a que el producto obtenido es de procedencia enzimática, y no de un procesamiento ácido, como se estila a nivel comercial. Además de la ausencia de insumos adicionales como conservantes para el producto terminado.
- Higroscopicidad: se midió esta propiedad colocando 5 gramos de ambas maltodextrinas en placas Petri, y midiendo los aumentos de peso debido a la ganancia de humedad. En el caso de la maltodextrina comercial se alcanzó una ganancia de 0.91 gramos (18.2%), y en la maltodextrina obtenida experimentalmente de 0.96 gramos (19.2%). Las condiciones a las que se sometió las muestras fue 21°C y 95% de humedad relativa hasta peso constante, en el distrito de Villa el Salvador, durante el mes de setiembre.

Las pruebas realizadas brindaron, en todos los casos, características similares en cada propiedad, indicio de contar con un producto competitivo a nivel de proceso. También mostró una cantidad de cenizas muy baja, debido al proceso de obtención enzimático, el cual es más limpio no solo con el producto, sino también con el medio ambiente.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los análisis exploratorios permitieron un mejor entendimiento del proceso para establecer los niveles de las variables: concentración de sustrato (20, 30% m/m), concentración de enzima (0.01, 0.03% m/m), temperatura de digestión (40, 60°C) y tiempo de digestión (15, 30 minutos), los cuales permitieron definir la matriz experimental para el tratamiento estadístico a través del diseño factorial.

Se realizó la comparación de la maltodextrina obtenida a partir de almidón de yuca con maltodextrina comercial 10 ED, lote 20131019, adquirido en la empresa Montana S.A. y se verificó propiedades de apariencia, aspecto en solución, sabor, equivalentes de dextrosa, humedad, cantidad de cenizas, solubilidad en agua, pH e higroscopicidad, encontrando valores dentro del rango estándar.

El tratamiento mediante diseño factorial de las respuestas en la matriz experimental, permitió, mediante análisis estadísticos, determinar los factores más importantes que correlacionan las cuatro variables y una interacción, la de mayor efecto: temperatura de digestión, concentración de sustrato, concentración de enzima, tiempo de digestión y la interacción temperatura - concentración de enzima, y que tienen una influencia significativa y mayor en la producción de maltodextrina mediante hidrólisis vía enzimática del almidón extraído de yuca.

Asimismo, se ha construido un modelo matemático que relaciona la conversión a Equivalentes de dextrosa con las variables e interacción anteriormente indicadas, para usar el modelo en el establecimiento de las condiciones de trabajo adecuados, de

acuerdo con requerimientos técnicos y comerciales que se planteen. El modelo matemático: $ED = 0.454375 + 0.12878 \times \text{Temperatura} - 0.0601875 \times [\text{Sustrato}] - 10.25 \times [\text{Enzima}] + 0.065625 \times \text{Tiempo} + 5.75312 \times \text{Temperatura} \times [\text{Enzima}]$ fue validado usando información interna, determinando un error experimental de 1.20%, y externa, a través de la aplicación del modelo en otras investigaciones, obteniendo las variaciones de 3.58% (Ruíz, 2009), 6.71% (Montes, 2008) y 0.05% (Díaz, 2002).

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio de factibilidad para verificar la rentabilidad del proceso a escala industrial.

En base al resultado obtenido del “valor de ajuste” del modelo, emitido por el Software Minitab 18, se recomienda el uso de puntos centrales en posteriores investigaciones, a fin de considerar los términos cuadráticos de las variables para que este valor sea mayor a 0,05, indicando un modelo más ajustado a los datos experimentales.

GLOSARIO

Adsorber: Adherencia de gases, líquido o sólidos a la superficie de un sólido.

Almidón céreo: Almidón proveniente de maíz, arroz y trigo.

Bacteria: Microorganismo más abundante del planeta, procariota (de núcleo no definido) de entre 0,5 y 5 μm de longitud. Imprescindibles para preservar la vida en el planeta debido a la diversidad de funciones bioquímicas.

Birrefringencia: Propiedad óptica de ciertos cuerpos de desdoblar un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí.

Catalítica: Relativo a la catálisis (aumento en la velocidad de reacción debido a la acción un agente, llamado catalizador).

Cristalización (de un azúcar): Proceso por el cual se forma una solución (almíbar) a partir de un compuesto orgánico sólido (azúcar) y un solvente líquido (agua).

Dispersar: Evitar la formación de grumos en una mezcla. Para el caso: Separar físicamente los gránulos de almidón para permitir su hinchamiento individual.

Endospermo: Tejido nutricional formado por el saco embrionario de las plantas con semilla.

Especificidad: Expresa la adecuación de algo para el fin al que se destina.

Fariña: Harina gruesa producida a partir de yuca.

Fibra: La fibra corresponde a la parte vegetal de los alimentos que no puede ser digerida por enzimas humanas como amilasas o proteasas

Filtrado: Líquido que pasa a través de una membrana.

Gram +: Aquellas que tiñen de color azul oscuro o violeta por el “Método de tinción de Gram”, esta tinción tiene que ver con el tipo natural de organización bacteriana ligada a la estructura de la envoltura celular.

Hectárea (ha): Denominada también hectómetro cuadrado. Corresponde al área que ocupa un cuadrado de 100 metros de lado ($10\,000\text{ m}^2$).

Masato: Bebida típica tradicional de la selva que consiste en la fermentación de una “chicha” de yuca (una solución de agua con yuca).

Megacaloría: Equivalente a 1 000 000 de calorías.

Micrómetro: Equivalencia de 10^{-6} metros.

Molar: Unidad equivalente a moles/Litro.

Multiespecífico: Aprovechamiento de cultivo de varias especies en una misma área de cultivo.

Multiestrata: Cultivos con especies de diferente altura en el mismo terreno.

Oligómero: Una molécula constituye un oligómero cuando los radicales asociados son distintos entre sí. Se diferencia de un polímero en que esta última es una molécula con dos o más radicales de la misma especie.

PEA: Población económicamente activa. Fuerza laboral efectiva de un país, constituidas por las personas en edad de trabajar y que están laborando o buscan hacerlo.

pH: Grado de acidez o basicidad de un compuesto. $\text{pH} < 7$ representa un compuesto ácido, $\text{pH} > 7$ una base y un $\text{pH} = 7$ representa un compuesto neutro.

Punto isoeléctrico: Es el pH en el cual un polianfólito (moléculas que tienen muchos grupos ácidos o básicos) tiene una carga neta promedio de cero.

Solución Buffer: Llamada también solución tampón o amortiguadora, es una combinación de un ácido débil y su base conjugada que ayuda a mantener estable un pH determinado.

Sorbitol: Alcohol de azúcar cuya fórmula empírica es $C_6H_{14}O_6$, se obtiene por reducción de glucosa. Es producido por la fotosíntesis en las hojas adultas de algunas plantas.

Sustrato: Sustancia sobre la cual actúa una enzima.

Termoestable: Que no se altera fácilmente por acción del calor.

Tonelada: Equivalencia de 1 000 kilogramos

Torta de filtración: Se le llama así a los sólidos separados o lo que queda en la parte superior del medio filtrante.

VBP (Valor Bruto de la Producción): Es el valor bruto de los bienes y servicios producidos en un periodo de tiempo. El VBP comprende tanto la producción intermedia como la producción final.

Viscosidad: La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares.

REFERENCIAS

Aguilar Brenes, Edgar; A. Segreda; D. Saborio; J. Morales; M. Chacón; L. Rodríguez; P. Acuña; S. torres; Y. Gómez (2017). Manual del cultivo de yuca: *Manihot esculenta Crantz*. Recuperado el 26, Mayo, 2020, de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10918.pdf>

Aguilar Gálvez, A. (1995). Estudio de cuatro métodos para la obtención de glucosa a partir de almidón de camote (*Ipomoea batatas*). Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Aguilar Gálvez, A.; Campos Gutiérrez, D. (2002). Sacarificación enzimática del almidón de camote (*Ipomoea batatas*). Anales científicos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Octubre- Diciembre, v. 53, 263-274.

Aguirre Falcón, F.; Castillo Segovia, C.; Chora Hernández, G.; Fuentes Ramírez, S.; Salas Carbajal, K. (2017). Producción, separación y purificación de la enzima alfa-amilasa a partir de *Sacharomyces cerevisiae* por fermentación de medio sumergido. Recuperado de: <http://bioconversionesequipo3.blogspot.com/2017/04/practica-2-y-3-produccion-separacion-y.html>. Recuperado el 26, mayo, 2020.

Aguirre Vargas, E. (1992). Obtención de jarabe de glucosa vía enzimática a partir de almidón de Umari (*Poraqueiba sericeae tulasne*). Tesis de Maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Ángeles Chero, Pedro (2015). Diseño de un proceso industrial para obtener plástico biodegradable (TPS) a partir de almidón de yuca *Manihot sculenta*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Alarcón M., F.; Dufour D.(1998). Almidón agrio de yuca en Colombia. Tomo I: Producción y recomendaciones. Publicación CIAT Núm. 268.

Arias Arroyo, G. (1992). Obtención de la enzima Alfa-Amilasa y su aplicación industrial. Revista del INNIA (Perú). V.4, 29-30.

Aristizábal, Johanna; Sánchez, Teresa; Mejía, Danilo (2007). Guía Técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de Servicio Agrícolas de la FAO. V. 163, 1-92.

Banks, W y Greenwood, C. (1975). Starch and its components. Escocia: Edinburgh University Press.

Centro Internacional de la Papa (2000). Roots and tubers in the global food system: A visión Statement to the year 2020. Volumen 1, 13-29. Recuperado el 26 de mayo del 2020, de: http://www.hubrural.org/IMG/pdf/book04_roots.pdf

CIAT (1993). Maquinaria y equipo tecnológico para la industria de extracción de almidón de yuca. Principio de funcionamiento, características y mejoras tecnológicas. CIAT A.A. 6713, Fichas 1-7.

Checa D.A., Luna D. C., Sánchez O. L., Díaz J. R., Restrepo A. R. (2013). Automatización para la producción de almidón de yuca en El Cauca. Universidad del Cauca. Recuperado el 26 de mayo del 2020, de <https://es.slideshare.net/danielsandoval1994/checa-luna>

Cochi, F.; Moitre, M.; Muzzio, M. (2018). Producción de maltodextrina a partir de almidón. Universidad Tecnológica Nacional.

Collette, Linda; Hodgkin, T.; Kassam, L.; Kenmore, P.; Lipper, L.; Nolte, C.; Stamoulis, K.; Steduto, P. (2011). Guía para los responsables de las políticas de intensificación sostenible de la producción agrícola en pequeña escala. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

De la Cruz Delgado, Miryey (2009). Evaluación técnico económica de la obtención de etanol a partir de yuca. Tesis de grado. Universidad Autónoma de Occidente.

Díaz, M.A., M.I. Filella y M.E. Velásquez. Study of cassava starch enzymatic modification for maltodextrins obtention. Rev. Col. Biotec. 2002, 4(1), pp. 79-88. ISSN 1909-8758

Do Nascimento, R; Pereira, F.; Neves, V.; Ramírez, E. (2010). Production of glucose and fructose syrups from cassava (*Manihot esculenta Crantz*) starch using enzymes produced by microorganisms isolated from Brazilian Cerrado soil. Revista científica Cienc. Tecnol. Aliment Vol. 30 N°1.

Durango B., Eder; Batista J., Alfonso; Cepeda J., Ibeth; Tobó G., Héctor (2008). Producción de enzimas amilasa microbiana, mediante fermentación en estado líquido. Trabajo de investigación en desarrollo de nuevos materiales y aplicaciones. Universidad Pontificia Bolivariana.

Espinosa Solis, Vicente (2008). Estudios estructurales del almidón de fuentes no convencionales: Mango (*Mangifera indica* L.) y plátano (*Musa paradisiaca* L.). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.

García Garibay, M.; Quintero Ramírez, R.; López Munguía, A. (2004). Biotecnología alimentaria. México D.F.: Limusa Noriega Editores.

González, Ubaldo (2009). El maíz y los productos de su industrialización. México D.F: Editorial Trillas.

Guevara Pérez A. (1993). Obtención de Chirimoya (*Annona cherimola*) en polvo por atomización. Boletín Sociedad Química del Perú. V. 59 (3), 175-183.

Gutiérrez P., Humberto; De la Vara S., Román (2012). Análisis y diseño de experimentos. México D.F.: Mc Graw Hill.

Hernández Medina, m., Torruco Uco j. G., Chel Guerrero, l., Betancur Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. Ciencia e Tecnología de Alimentos ISSN 0101 – 2061, 718-726.

Herrera, Carlos; Bolaños, Nuria; Giselle, Lutz (2003). Química de los Alimentos. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica. Págs. 39-48

Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (2001). Diversidad de Yuca en Jenaro Herrera. Documento Técnico N° 28. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. V. 28.

Hillocks R. J.; Thresh J.M.; Bellotti A.C. (2002). Cassava: Biology, production and utilization”. Londres: Cabi Publishing.

Iwamoto K., A.; Campos G. (1997). Influencia de la adición de enzimas en la elaboración de jarabe de malta de cebada. Revista Tecnología Alimentaria, V.3 N°5, 18-23.

Jiménez Vera, R., González Cortés N., Magaña Contreras A. y Irene Corona, A. (2011). Contenido de almidón resistente en alimentos consumidos en el Sureste de México. Unacar Tecnociencia. 5(2), 27-34.

Universidad Nacional Autónoma de México (2007). Fundamentos y técnicas de análisis de alimentos. Facultad de Química. Recuperado el 26 de mayo de 2020, de: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FUNDAMENTOSYTECNICASDEANALISISDEALIMENTOS_12286.pdf

Lambri, M.; Dordoni, R.; Roda, A. De Faveri, D (2014). Process Development for Maltodextrins and Glucose Syrup from Cassava. Revista científica CET: Chemical Engineering Transactions. Vol. 38, 469-474.

Lujan Rhenals, D.E.; Álvaro Molina, Durango Villadiego, Salcedo Mendoza (2001). Estudio preliminar para la obtención de jarabe de glucosa a partir de hidrólisis enzimática del almidón de yuca (*Manihot esculenta grantz*). Temas Agrarios, v.6-11/12, 64-72.

Medina García, Luis (2013). Obtención de maltodextrinas por vía enzimática a partir de almidón de camote (*Ipomoea batatas*). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.

Melo Ruiz, Virginia; Cuamatzi Tapia, Óscar (2006). Bioquímica de los Procesos Metabólicos. México D.F.: Editorial Reverté S.A., 41-74; 101-116.

Montaldo, A. (2017). La yuca o mandioca: Cultivo, Industrialización. INTA, Primera edición.

Montes M.; Salcedo M.; Zapata M.; Carmona C.; Paternina U. (2008). Evaluación de las propiedades modificadas por vía enzimática del almidón de ñame (d. trífida) utilizando α -Amilasa (TERMAMYL 120L, TIPO L). Revista de la Facultad de Química Farmacéutica Vol. 15 N°1, 51-60.

Montoya Villafane, Hugo H. (2008). Microbiología básica para el área de salud y afines. Medellín: Editorial Universidad de Antioquía, 58-96.

Morales Suárez, Y.; Sánchez Pacheco, I. (2004). Diseño conceptual y comparación técnica de los procesos de hidrólisis ácida y enzimática para la producción de glucosa a partir de almidón de yuca. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.

Murray, Daniel G.; Leslie R. Luft (1972). Food technology, corn starch hidrolizates. Food Technology, Vol.3 N° 27, 28- 40.

Novozymes (2003). Starch application sheet – Efficient Liquefaction of starch. Recuperado el 28 de junio del 2020, de: <https://pdfslide.net/documents/efficient-liquifaction.html>

Olivares de la Cruz (1996). Efecto de la temperatura y el tiempo sobre la estabilidad de la Alfa-Amilasa de *Aspergillus oryzae* inmovilizada en cáscara de arroz. REBIOL, V.16 (1/2), 5-9.

Ospina, Bernardo; Ceballos, Hernán (2002). Yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de Producción, Procesamiento, Utilización y Comercialización. Publicación CIAT N° 327, 17-48, 445-457.

Pagador Flores S., Rojas Padilla C. (2010). Tendencias de la Investigación en el Siglo XXI. Optimización del rendimiento del proceso de sacarificación en la obtención de bioetanol a partir de camote en función de la concentración de almidón y tiempo de hidrólisis de glucomilasa. I Congreso Internacional de Investigación Científica y el Curso Internacional.

Peña Carrasco, Elizabeth Fiorela (2017). Extracción y caracterización fisicoquímica y funcional de cinco variedades de papas nativas procedentes de Ilave (Puno). Tesis de grado. Universidad Nacional Agrario La Molina.

Posada Ayala, María (2015). Técnicas Generales de Laboratorio. España: Ediciones Paraninfo.

Puma L., L. (1999). Agroindustria de la yuca. Misión Rural, Vol. 9, 14.

Rodríguez, E.; Fernandez, A.; Alonso, L; Ospina, B. (2006). Reología de las suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. Revista científica Ingeniería & Desarrollo. Vol.19, 17-30.

Quintero, D.; Ramírez, J. (2013). Estudio del mecanismo de gelatinización del almidón de yuca”. Tesis de grado. Universidad de los Andes.

Rodríguez Paúcar, G. (1992). Estudio de la modificación de las propiedades fisicoquímicas del almidón de quinua (*Chenopodium quinoa willd*) por acción de Alfa-Amilasa. Tesis de maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Ruíz, M.; Molina, D.; Torres R.; Sánchez, C. (2007). Determinación de los parámetros hidrolíticos para la producción de jarabes de glucosa a partir de almidón de yuca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Vol. 3, N° 1, 54 - 63.

Ruíz, M. (2009). Obtención de jarabes de glucosa a partir de almidón de yuca por medio de hidrólisis enzimática, para ser usado como sustrato en la producción de bioetanol. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.

Salazar Castillo, M.; Arellano Barragán, J. (1996). Efecto del pH y temperatura sobre la actividad de Alfa-Amilasa. Rebiol, Vol.16, 1-4.

Sandoval, A.; Rodríguez, E.; Fernández, A. (2005). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. Dyna, N°146, 45-53.

Sarmiento Medina, E. (1969). Comparativo de rendimiento y descripción morfológica de 21 variedades de yuca (*Manihot esculenta grantz*). Tesis de maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Scott Gregory, J. (1992). Desarrollo de productos de raíces y tubérculos. Memorias sobre el taller de Procesamiento Comercial, Utilización de raíces y tubérculos en América Latina. Centro Internacional de la Papa. Vol. 2.

Scott Gregory, J. (2000). Raíces y Tubérculos para el Siglo 21: Tendencias, Proyecciones y Opciones de Política. Visión 2020: Alimentación, Agricultura y Medio Ambiente. Centro Internacional de la Papa. Vol. 31.

Shmuel Yannai (2003). Dictionary of Food Compounds: Additives, Flavors, and Ingredients. CRC Press. Pág. 695

Soto Ibanez, R. (1989). Obtención de Glucosa por Hidrólisis Enzimática de Almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*). Revista Boliviana de Química. Vol. 8(1), 17-21.

Vaclavik, Vickie A. (1998). Fundamentos de ciencia de los alimentos. Zaragoza: Editorial Acribia, Pág. 45-61

Velasco, Jorge W., Villaflor, Gloria del V., Flores, Jorge E., Bisonard, Eduardo (2014). Operación y simulación de un secador spray para la producción de Pentaborato de Sodio. Inf. Tecnol. Vol. 25 N°5.

Velasco, Reinaldo J., William A. Luna, Julián A. Mera y Héctor S. Villada (2008). Producción de dextrinas a partir de almidón nativo de yuca por ruta seca en una agroindustrial rural. Información Tecnológica Vol. 19 N°2, 15-22

Villacrés, E.; Salazar, D.; Peralta, E.; Ruilova, M. (2010). Tecnología de elaboración de un cereal instantáneo a base de quinua. Revista Tecnológica ESPOL – RTE. Vol. 23, N° 2, 9-15.

Wang Y., Wang L. (2000). Structures and properties of commercial maltodextrinas from corn, potato and rice starches. Starch, 52(9), 296-304.

Páginas Web

- Acceso al Sistema de Datos del Ministerio de Agricultura y riego

<http://frenteweb.minag.gob.pe/sisca/> 23 de Julio, 2014. 15:55.

http://frenteweb.minag.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult 23 de Julio, 2014. 14:47.

- Dinámica Agropecuaria 2003-2012. Ministerio de Agricultura y riego. Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos

- <http://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/dinamica/dinamicaagropecuaria2003-2012.pdf> 14 de Agosto, 2014. 06:48.
- Ficha Técnica Enzima Liquozyme Supra 2.2
http://www.lnf.com.br/downloads/liquozyme_supra.pdf 17 de Abril, 2014. 11:03.
 - Gelatinización y retrogradación
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Seminario-Gelatinizacionyretrogradacion_25483.pdf 04 de octubre de 2014, 08:39
 - Maltodextrina como alimento para personas q padecen celiacía
<http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=261> 24 de Setiembre, 2014. 23:12.
 - Normas Mexicanas. Dirección General de Normas
<http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-217-1975.PDF> 21 de Abril, 2014. 12:17.
 - Noticia: Baterías creadas que funcionan con maltodextrina
<http://laprensa.peru.com/tecnologia-ciencia/noticia-cientifico-crean-baterias-azucar-19334> 06 de Abril, 2014. 23:12.
 - Noticia: Baterías creadas que funcionan con maltodextrina
<http://www.europapress.es/ciencia/noticia-desarrollan-bateria-azucar-alta-densidad-energetica-20140121154237.html> 06 de Abril, 2014. 23:45.
 - Principales exportaciones del Perú
<http://desarrolloperuano.blogspot.com/2014/02/peru-las-principales-exportaciones-del.html> 25 de Abril, 2014, 21:06

- Tablas Peruanas de Composición de Alimentos – Minsa
<http://www.rvcta.org/Imagenes/TablasPeruanasDeComposicionDeAlimentos.pdf> 07 de Mayo del 2014
- Uso de la cáscara de yuca en raciones para cerdos en crecimiento
http://www.iiap.org.pe/upload/publicacion/folia8_2_articulo8.pdf 08 de Octubre del 2014, 22:17.
- Ficha técnica de aplicación de las enzimas Termamyl 120L y Liquozyme Supra 2.2x
<https://es.scribd.com/document/47295651/Efficient-Liquifaction> 25 de setiembre de 2019, 00:25
- Historia de la yuca – Constanza Morales, Oliver <https://abrecht-group.com/2019/11/13/la-historia-de-la-yuca/> 04 de marzo de 2020, 19:24
- Catálogo Tecnodac: <http://tecnodac.com.mx/product/marmita-con-agitacion/> 19 de mayo de 2020, 17:30

ANEXOS

Anexo 1: Ficha Técnica de enzima Alfa Amilasa Liquozyme Supra 2.2X



Liquozyme® Supra 2.2X

Valid From

2008-09-24

Características do produto:

Enzima Declarada	alfa-amilase
Atividade declarada	300 KNU/g
Cor	Âmbar A cor pode variar de um lote para outro. A intensidade da cor não é um indicativo da atividade enzimática.
Apresentação	Líquido
Densidade de aproximadamente (g/ml)	1,26
Viscosidade (cPs)	1-25
Estabilizantes	Metionina Cloreto de sódio Sacarose
Conservantes	Sorbato de potássio
Organismo de produção	Bacillus licheniformis
Método de produção	Produzido por fermentação submersa de um microorganismo geneticamente modificado. A proteína enzimática, que é uma proteína geneticamente modificada, foi separada e purificada do organismo produtor.

Especificação do produto:

	Limite Inferior	Limite Superior	Unidade
Alpha Amylase Units KNU	300		/g
pH a 25°C	5,5	7,0	
Contagem total de viáveis	-	50000	/g
Bactéria Coliforme	-	30	/g
E.coli enteropatogênica	Não detectado		/25 g
Salmonella	Não detectado		/25 g

O produto está em conformidade com as especificações de pureza recomendadas para enzimas de grau alimentício definidas pelo Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) e o Food Chemicals Codex (FCC).

Embalagem: Para maiores informações veja a lista de embalagens.

Armazenamento recomendado:

Melhor utilizar antes de	Quando armazenado conforme recomendado, o produto deve ser utilizado dentro de 3 meses a partir da data de entrega.
Temperatura de armazenamento	0-25°C (32°F-77°F)
Condições de armazenamento	Em embalagem inviolada - seca e protegida do sol. O produto foi formulado para possuir ótima estabilidade. O armazenamento prolongado ou condições adversas como temperatura ou umidade elevadas, podem fazer com que sejam necessárias maiores dosagens do produto.

Segurança e precauções de manuseio

Enzimas são proteínas. A inalação de poeira ou aerossóis pode induzir sensibilização e causar reações alérgicas em pessoas sensibilizadas. Algumas enzimas irritam a pele, olhos e mucosas após contato prolongado. O produto pode criar aerossóis facilmente inaláveis se derramado ou agitado vigorosamente. Produtos derramados podem secar e criar poeira. Material derramado deve ser removido com água (Evite utilizar água sob alta pressão). Material residual pode secar e gerar poeira. Utilizar roupa de proteção adequada, luvas e proteção ocular/facial, conforme orientado na etiqueta de aviso. Lavar as roupas contaminadas. Uma ficha de segurança é fornecida com todos os produtos. Veja o manual de segurança para mais informações sobre como manusear o produto com segurança.

Anexo 2: Métodos de análisis

Anexo 2A: Determinación de Humedad - Método Oficial de Análisis de la AOAC

(1990)

32. Cereal Foods

Ralph H. Lane, Associate Chapter Editor
University of Alabama

WHEAT FLOUR

925.08 Sampling of Flour Final Action

Sample number of sacks equiv. to sq root of number in lot, but ≥ 10 , i.e., 10 from ≤ 100 , 15 from 225, 20 from 400 sacks, etc.

Select sacks to be sampled according to their exposure in ratio of 4 from most exposed, 3 from next less exposed, 2 from next, and 1 from least exposed portion of lot.

From each sack to be sampled, draw core from one corner of top diagonally to center of sack by means of cylindrical, pointed, polished metal trier, $\frac{1}{2}$ " (13 mm) diam., with slit $\geq \frac{1}{3}$ of circumference. Draw second core from other top corner to $\frac{1}{2}$ distance to center of sack.

Deliver the 2 cores at once to clean, dry, air-tight container that has stood open for few min near lot of flour to be sampled, and seal immediately. Use sep. container for each sack sampled. Use one of following containers: (1) pt (500 mL) fruit jar provided with rubber gasket; (2) rubber or plastic pouch that can be tied or sealed to exclude moisture or air; (3) tin can or box with moisture- and air-tight friction top.

Before opening sample for analysis, alternately invert and roll each container ≥ 25 times to secure homogeneous mixt. Avoid extreme temps and humidities when opening containers for analysis. Keep sample tightly sealed at all other times.

Ref.: JAOAC 8, 424, 664(1925); 9, 39, 88, 423(1926).

dish, transfer to desiccator, and weigh soon after reaching room temp. Report flour residue as total solids and loss in wt as moisture (indirect method).

Refs.: JAOAC 8, 665(1925); 9, 39, 88(1926); 34, 278(1951).

925.10 Solids (Total) and Moisture in Flour Air Oven Method Final Action

(Results closely approximate those obtained by 925.09B.)

In cooled and weighed dish (provided with cover), 925.09A(a), previously heated to $130 \pm 3^\circ$, accurately weigh ca 2 g well mixed sample. Uncover sample, and dry dish, cover, and contents 1 hr in oven provided with opening for ventilation and maintained at $130 \pm 3^\circ$. (1 hr drying period begins when oven temp. is actually 130° .) Cover dish while still in oven, transfer to desiccator, and weigh soon after reaching room temp. Report flour residue as total solids and loss in wt as moisture (indirect method).

Refs.: JAOAC 8, 665(1925); 9, 40(1926).

938.03 Extract (Cold-Water Soluble) of Flour Final Action

Weigh 20 g flour into 500 mL erlenmeyer and gradually add 200 mL H_2O at ca 0° . Shake vigorously after ca 50 mL H_2O is added and continue shaking while adding remaining H_2O . Let mixt. stand 40 min at 0° , shaking occasionally. Filter rapidly, returning filtrate to filter until clear. Pipet 20 mL clear filtrate into weighed dish, evap. to dryness on steam bath, and dry in vac. oven at ca 100° for 30 min periods to const wt.

Ref.: JAOAC 21, 406(1938); 22, 76, 548(1939).

923.03 Ash of Flour Direct Method Final Action

Weigh 3–5 g well mixed sample into shallow, relatively broad ashing dish that has been ignited, cooled in desiccator, and weighed soon after reaching room temp. Ignite in furnace at ca 550° (dull red) until light gray ash results, or to const wt. Cool in desiccator and weigh soon after reaching room temp. Reignited CaO is satisfactory drying agent for desiccator.

Ref.: JAOAC 7, 132(1923).

925.09 Solids (Total) and Moisture in Flour Vacuum Oven Method Final Action

(Also applicable to flour mixes contg $NaHCO_3$ as ingredient)

A. Apparatus

(a) *Metal dish*.—Diam. ca 55 mm, ht ca 15 mm, with inverted slip-in cover fitting tightly on inside.

(b) *Air-tight desiccator*.—Reignited CaO is satisfactory drying agent.

(c) *Vacuum oven*.—Connect with pump capable of maintaining partial vac. in oven with pressure equiv. to ≤ 25 mm Hg (3.3 kPa) and provided with thermometer passing into oven in such way that bulb is near samples. Connect H_2SO_4 gas-drying bottle with oven to admit dry air when releasing vac.

B. Determination

Accurately weigh ca 2 g well mixed sample in covered dish previously dried at $98-100^\circ$, cooled in desiccator, and weighed soon after reaching room temp. Loosen cover (do not remove) and heat at $98-100^\circ$ to const wt (ca 5 hr) in partial vac. having pressure equiv. to ≤ 25 mm Hg (3.3 kPa). Admit dry air into oven to bring to atm. pressure. Immediately tighten cover on

**Anexo 2B: Determinación de cenizas – Método Oficial de Análisis de la AOAC
(1990)**

weigh quickly. Add ca 5 mL H₂O and distribute sample evenly on bottom of dish. Heat on steam bath, exposing max. surface of dish bottom to live steam until apparently dry. Heat at 98–100° in air oven 3 hr or to const wt. Cool in desiccator; then weigh quickly. Det. wt residue. Dil. with twice its vol. CO₂-free H₂O. Add 2 mL phthln, and titr. with 0.1N NaOH to first persistent pink. Calc. as % lactic acid by wt. (1 mL 0.1N NaOH = 0.0090 g lactic acid.). To compensate for H₂O formed when acid is neutzd by ZnO, add 0.1 g to residue wt for each g acid (as lactic) in weighed sample. Report % residue (corrected) as total solids.

Refs.: JAOAC 36, 213(1953); 37, 253(1954).

942.05 Ash of Animal Feed
Final Action

Weigh 2 g sample into porcelain crucible and place in temp. controlled furnace preheated to 600°. Hold at this temp. 2 hr. Transfer crucible directly to desiccator, cool, and weigh immediately, reporting % ash to first decimal place.

Refs.: JAOAC 25, 857(1942); 26, 220(1943).

935.11* Protein in Animal Feed
Qualitative Tests
Final Action
Surplus 1965

A. Biuret Test

See 22.012–22.013, 10th ed.

B. Millon Test

See 22.014–22.015, 10th ed.

C. Glyoxylic Acid Test (Hopkins-Cole)

See 22.016–22.017, 10th ed.

D. Adamkiewicz Test

See 22.018, 10th ed.

E. Xanthoproteic Test

See 22.019, 10th ed.

B. Reagents

(a) *Sodium hydroxide soln.*—Dissolve ca 450 g NaOH pellets or flakes (low N) in H₂O, cool, and dil. to 1 L; or use soln with sp. gr. ≥1.36.

(b) *Boiling stones.*—Alundum, 8–14 mesh (No. 1590-D18; Thomas Scientific Co.).

(c) *Methyl red indicator.*—Dissolve 1 g Me red (Na salt) in 100 mL MeOH.

(d) *Hydrochloric or sulfuric acid std soln.*—0.5N. Prep. as in 936.15 or 890.01.

(e) *Sodium hydroxide std soln.*—0.1N. Prep. as in 936.16.

After stdzng both acid and base by methods suggested in (d) and (e), also check one against the other. In addn, check entire method by analyzing NIST Std Ref. material No. 194, NH₄H₂PO₄, certified 12.15% N, and a high purity lysine-HCl.

C. Apparatus

(a) *Digestion.*—Kjeldahl flasks with capacity of 500–800 mL.

(b) *Distillation.*—Digestion flask (e.g., Corning Glass No. 2020) connected to distn trap by rubber stopper. Distn trap is connected to condenser with low-S tubing. Outlet of condenser tube should be <4 mm diam.

D. Determination

Weigh 0.250–1.000 g sample into digestion flask. Add 16.7 g K₂SO₄, 0.01 g anhyd. CuSO₄, 0.6 g TiO₂, 0.3 g pumice, 0.5–1.0 g Alundum granules, and 20 mL H₂SO₄. (Add addnl 1.0 mL H₂SO₄ for each 0.1 g fat or 0.2 g other org. matter if sample wt is >1 g.)

Include at least 1 sample of high purity lysine-HCl in each day's run as check of correctness of digestion parameters. If recovery is not complete, make appropriate adjustments.

To digest sample, first adjust heat to bring 250 mL H₂O at 25° to rolling boil in 5 min. Add a few boiling chips to prevent superheating. Then heat samples at this 5-min boil rate until dense white fumes clear bulb of flask (ca 10 min), swirl gently, and continue heating addnl 40 min. (Note: Reagent proportions, heat input, and digestion time are critical factors—do not change.) Cool, cautiously add about 250 mL H₂O, and cool to room temp. (Note: Add H₂O as soon as possible to reduce amt of caking. If excessive bumping occurs during distn, increase diln H₂O from 250 mL to ca 300 mL.)

Anexo 2C: Determinación de fibra cruda - Método oficial de análisis de la AOAC (1990)

80 ANIMAL FEED

AOAC OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS (1990)

to room temp. in desiccator, and weigh immediately. Correct this wt by blank detn on reagents used.

Refs.: JAOAC 37, 250(1954); 38, 225(1955); 59, 1218(1976); 60, 322(1977); 65, 456(1982).

**932.02 Fat (Crude) or Ether Extract
in Dried Milk Products**
Final Action

Proceed as in 932.06A(b) and 932.06B, using 8.5 mL H₂O and 1.5 mL NH₄OH.

Refs.: JAOAC 15, 524(1932); 17, 190(1934); 18, 351(1935); 28, 80(1945).

**948.04 Fat (Crude) or Acetone Extract
in Fish Meal**

See 948.16 and 969.24.

962.09 Fiber (Crude) in Animal Feed
Ceramic Fiber Filter Method
First Action 1962
Final Action 1971
Revised First Action 1982
AOCS-AOAC Method

A. Principle

Crude fiber is loss on ignition of dried residue remaining after digestion of sample with 1.25% H₂SO₄ and 1.25% NaOH solns under specific conditions. Method is applicable to grains, meals, flours, feeds, and fiber-bearing material from which fat can be extd to leave workable residue.

B. Reagents

(a) *Sulfuric acid soln.*—0.255 ± 0.005*N*. 1.25 g H₂SO₄/100 mL. Concn must be checked by titrn.

(b) *Sodium hydroxide soln.*—0.313 ± 0.005*N*. 1.25 g NaOH/100 mL, free, or nearly so, from Na₂CO₃. Concn must be checked by titrn.

(c) *Prepared ceramic fiber.*—Place 60 g ceramic fiber (Cerafiber, 8 lb/cu ft, E. J. Bartell Co., 700 Powell Ave, S.W., Renton, WA 98055) in blender, add 800 mL H₂O, and blend 1 min at low speed.

Det. blank by treating ca 2 g (dry wt) of prepd ceramic fiber with acid and alkali as in detn. Correct crude fiber results for any blank, which should be negligible (ca 2 mg).

(d) *Alcohol.*—95% or reagent alcohol, MeOH, or isopropanol.

(e) *Antifoam.*—Dow Corning Corp. Antifoam A compd dild 1+4 with mineral spirits or pet ether, or H₂O-dild Antifoam B Emulsion (1+4). Do not use Antifoam Spray.

(f) *Bumping chips or granules.*—Broken Alundum crucibles or equiv. granules (RR Alundum 90 mesh, Norton Co., 1 New Bond St, Worcester, MA 01606) are satisfactory.

C. Apparatus

(a) *Digestion apparatus.*—With condenser to fit 600 mL beaker, and hot plate adjustable to temp. that will bring 200 mL H₂O at 25° to rolling boil in 15±2 min. (Available from Labconco Corp., 8811 Prospect Ave, Kansas City, MO 64132.)

(b) *Ashing dishes.*—Silica, Vitreosil 70 × 16 mm; or porcelain, Coors Ceramics Co., 600 9th St, Golden, CO 80401, No. 60230, or equiv.

(c) *Desiccator.*—With efficient desiccant such as 4–8 mesh Drierite (CaCl₂ is not satisfactory).

(d) *Filtering device.*—With No. 200 type 304 or 316 stainless steel screen (C-E Tyler, Inc., 3200 Bessemer City Rd, Hwy 274, PO Box 8900, Gastonia, NC 28053), easily washed free of digested residue. Either Oklahoma State filter screen (see Fig. 962.09A; available from Labconco Corp.) or modified California plastic buchner. (See Fig. 962.09B; consists of 2 piece polypropylene plastic funnel manufactured by Nalge Co., 75 Panorama Creek Dr, PO Box 20365, Rochester, NY 14602, Cat. No. 4280-0700, 70 mm (without No. 200 screen), or equiv. (also available from Labconco Corp.). Seal screen to filtering surface of funnel, using small-tip soldering iron.)

(e) *Suction filter.*—To accommodate filtering devices. Attach suction flask to trap in line with aspirator or other source of vac. with valve to break vac.

(f) *Liquid preheater.*—For preheating H₂O, 1.25% H₂SO₄, and 1.25% NaOH solns to bp of H₂O. Convenient system, shown in Fig. 962.09C, consists of sheet Cu tank with 3 coils of 3/8" (10 mm) od Cu tubing, 12.5' (3.8 m) long. Solder inlets and outlets where tubing passes thru tank walls. Connect to reflux condenser and fill with H₂O. Keep H₂O boiling with two 750 watt thermostatically controlled hot plates. Use Tygon for inlet leads to reservoirs of H₂O, acid, and alkali; use gum rubber tubing for outlets. Capacity of preheater is adequate for 60 analyses in 8 hr.

D. Preparation of Sample

Reduce sample (riffle is suitable) to 100 g and place portion in sealed container for H₂O detn. Immediately det. H₂O. Grind remainder to uniform fineness. (Weber mill (Sargent-Welch Scientific Co. S-60870) with screen 0.033–0.040" (No. 18 or 20), Micro mill (Mikropul, Div. of Hosokawa Micron International, Inc., 10 Chatham Rd, Summit, NJ 07901) with screen 1/25–1/16" (No. 18–No. 12), and Wiley mill with 1 mm (No. 18) screen give comparable fineness.) Since most materials lose moisture during grinding, det. H₂O on ground sample at same time sample is taken for crude fiber detn.

E. Determination

Ext 2 g ground material with ether or pet ether (initial boiling temp., 35–38°; dry-flask end point, 52–60°; ≥95% distg

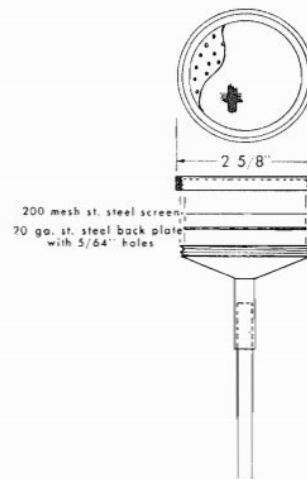


FIG. 962.09A—Oklahoma State filter screen

Anexo 2D: Determinación de la temperatura de gelatinización (Grace, 1977) –

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN

Técnica usada (Grace, 1977)

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría; cuando se calientan en solución a temperaturas altas alcanzan una temperatura específica en la cual se inicia el hinchamiento de los gránulos. Esta temperatura es llamada temperatura de gelatinización.

Preparación de la muestra

Cada cinco costales de 25 kg tomar muestras al azar, mezclar bien, cuartear, moler y tomar 100 g de almidón.

Materiales y equipos

- Balanza analítica con una precisión de 0,01 g
- Plancha de calentamiento
- Vasos de precipitado de vidrio de 100 y 250 mL
- Frascos volumétricos de 100 mL
- Pinzas de acero inoxidable
- Termómetro con escala de 0-100 °C

Análisis

- Pesar 10 g de almidón (bs) disolver en agua destilada y completar a 100 mL.
- Calentar agua en un vaso de precipitado de 250 mL a 85 °C.
- Tomar 50 mL de la suspensión en un vaso de precipitado de 100 mL.
- Introducir el vaso de precipitado con la muestra en el agua a 85 °C.
- Agitar con el termómetro constantemente la suspensión de almidón hasta que se forma una pasta y la temperatura permanezca estable por unos segundos.
- Leer la temperatura de gelatinización.

Cálculos e interpretación de los resultados

La temperatura de gelatinización se lee directamente en el termómetro.

Valores de referencia

El valor de la temperatura de gelatinización en almidones de yuca varía entre 57,5-70 °C.

Anexo 2E: Determinación de equivalentes de dextrosa en hidrolizados de almidón

NORMA TÉCNICA
PERUANA

NTP 209.207
4 de 6

6. PROCEDIMIENTO

6.1 Se pesan 15 g de glucosa de maíz y se disuelven completamente con agua destilada caliente ayudándose con una varilla de vidrio.

6.2 Se trasvasa a una fiola o matraz aforado y se completa con agua destilada a 500 cm³.

6.3 Se mide 25 cm³ de la solución de Fehling (apartado 5.3.1) en un balón de fondo plano de 250 cm³ y se calienta en el mechero de ebullición.

6.4 Se añade mediante una bureta, aproximadamente 8,0 cm³ de la solución de glucosa (apartado 6.2). (Se asume que la reducción total debe gastar entre 11,70 cm³ y 12,30 cm³).

6.5 Se continúa la ebullición por dos minutos agitando constantemente.

6.6 Se añaden enseguida 2 gotas de la solución de azul de metileno (apartado 5.3) y se continúa agregando gotas de la solución de glucosa, manteniendo la ebullición y agitando constantemente.

6.7 El punto final se aprecia cuando la precipitación del óxido cuproso es de un color rojo ladrillo característico.

6.8 El tiempo total de la reacción debe durar aproximadamente 3 minutos.

6.9 Se deben de realizar por lo menos dos ensayos por separado para promediar los resultados.

Anexo 3

Anexo 3A: Evidencia fotográfica de los experimentos



Figura 27. Etapa de lavado y pelado de yuca



Figura 28. Cáscara residuo de la etapa de pelado



Figura 29. Material comestible de yuca luego de la etapa de rallado

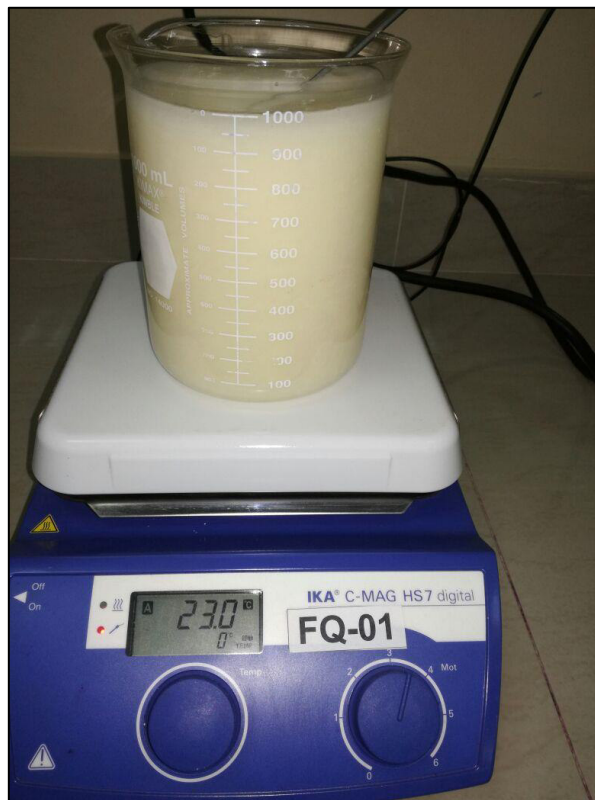


Figura 30. Etapa de extracción de almidón de yuca



Figura 31. Gelatinización de almidón de yuca



Figura 32. Filtración de solución con contenido de maltodextrina



Figura 33. Secado por atomización de maltodextrina



Figura 34. Recipiente recolector de maltodextrina (atomizador)

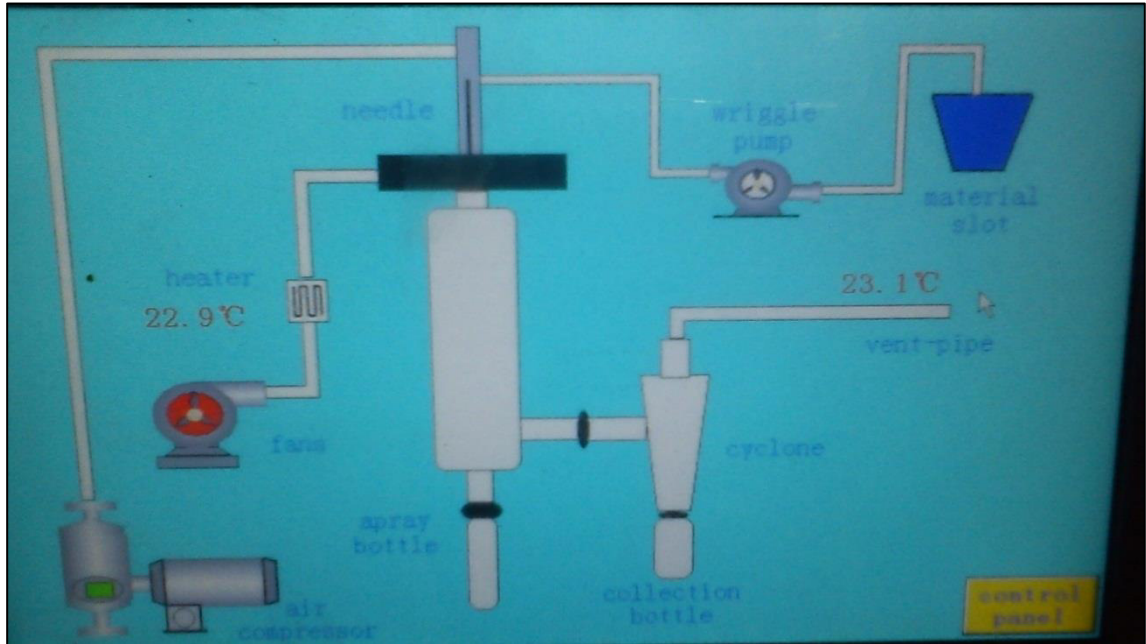


Figura 3519. Diagrama de funcionamiento del atomizador

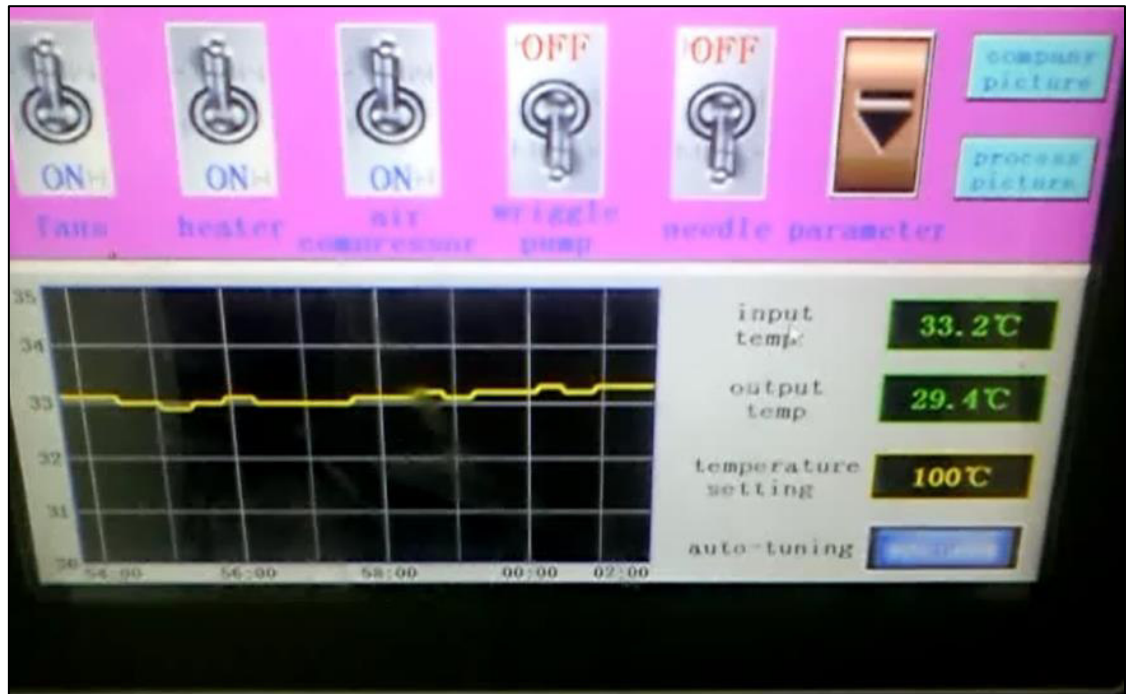


Figura 36. Diagrama de control de temperatura del atomizador



Figura 37. Diagrama de controles del atomizador

Sesión

Gráficas de residuos para Maltodextrina

Regresión factorial: Maltodextrina vs. Temperatura; ... Enzima; Tiempo

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	457,766	91,553	2361,89	0,000
Lineal	4	447,175	111,794	2884,05	0,000
Temperatura	1	190,271	190,271	4908,61	0,000
Sustrato	1	2,898	2,898	74,76	0,000
Enzima	1	246,254	246,254	6352,84	0,000
Tiempo	1	7,752	7,752	199,98	0,000
Interacciones de 2 términos	1	10,592	10,592	273,24	0,000
Temperatura*Enzima	1	10,592	10,592	273,24	0,000
Error	26	1,008	0,039		
Falta de ajuste	10	0,984	0,098	66,58	0,000
Error puro	16	0,024	0,001		
Total	31	458,774			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,196883	99,78%	99,74%	99,67%

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		12,4134	0,0348	356,66	0,000	

Figura 38. Tratamiento estadístico en software Minitab 18

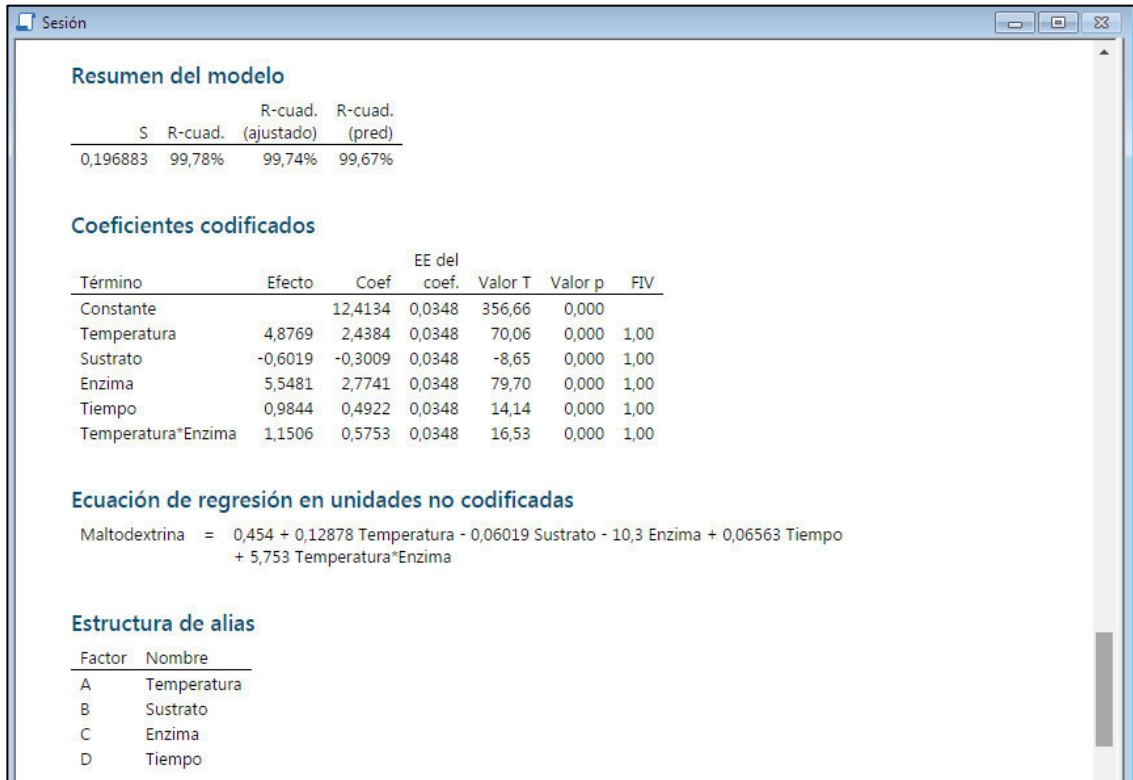


Figura 39. Tratamiento estadístico en software Minitab 18

Anexo 4: Tablas de resultados experimentales

Tabla 15. *Resultados de materia comestible en tubérculos de yuca*

Muestra	Cáscara (%)	Materia comestible (%)
1	5,74	94,26
2	5,21	94,79
3	7,20	92,80
4	6,72	93,28
5	3,46	96,54
6	5,14	94,86
7	4,17	95,83
8	2,93	97,07
9	4,79	95,21
10	4,02	95,98
Promedio		95,06
Desviación estándar		1.29

Tabla16. *Resultados de humedad en tubérculos de yuca*

Muestra (sin cáscara)	Humedad (%)
1	56,52
2	61,53
3	61,31
4	59,47
5	60,82
6	61,28
7	56,84
8	57,80
9	58,05
10	59,43
Promedio	59,31
Desviación estándar	1,81

Tabla 17. *Resultados de contenido de cenizas en yuca*

Muestra	Cantidad de cenizas (%)
1	0.79
2	0.45
3	0.84
4	0.69
5	0.94
6	0.83
7	0.64
8	1.02
9	0.86
10	0.71
Promedio	0.78
Desviación estándar	0.15

Tabla 18. *Resultados de contenido de fibra cruda*

Muestra	Contenido Fibra cruda (%)
1	0.76
2	0.81
3	1.12
4	0.99
5	0.85
6	0.76
7	0.97
8	0.94
9	0.91
10	1.06
Promedio	0.92
Desviación estándar	0.11

Tabla 19. *Resultados de longitud promedio de yuca*

Muestra	Longitud promedio (cm)
1	31.4
2	26.2
3	27.6
4	26.5
5	28.7
6	33.1
7	27.5
8	26.9
9	27.2
10	25.8
Promedio	28.09
Desviación estándar	2.25

Tabla 20. *Resultados de diámetro promedio de yuca*

Muestra	Diámetro promedio (cm)
1	9.4
2	10.1
3	6.7
4	9.2
5	9.9
6	8.2
7	8.5
8	9.1
9	10.4
10	8.2
Promedio	8.97
Desviación estándar	1.05

Tabla 21. *Resultados de Temperatura de gelatinización de almidón extraído de yuca*

Muestra	Temperatura de gelatinización (°C)
1	69.2
2	69.2
3	69.3
Promedio	69.2
Desviación estándar	0.05

Tabla 22. *Factor de Fehling para pruebas definitivas 15 minutos*

Dextrosa Pura		Volumen gastado			
Concentración					
Prueba	(g/mL)	V gastado 1	V gastado 2	V gastado 3	Promedio
1-2	0.01	10.52	10.5	10.53	10.52

Tabla 23. Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 15 minutos – Prueba 1

Valor de parámetros				Volumen gastado (mL)				Datos Experimentales			Resultados		
Tiempo (min)	T (°C)	[Sustrato] (% m/m)	[Enzima] (% m/m)	V gastado 1 (mL)	V gastado 2 (mL)	V gastado 3 (mL)	V Promedio (mL)	Peso Muestra (g)	Humedad (%)	Volumen Fiola (mL)	Factor de Fehling	%Azúcares Reductores	% Equivalentes de Dextrosa (ED)
15	40	20	0.01	49.32	49.35	49.37	49.35	7.5	6.0	250	0.1052	7.10	7.56
15	60	20	0.01	32.5	32.48	32.51	32.50	7.5	5.2	250	0.1052	10.79	11.38
15	40	30	0.01	51.49	51.42	51.45	51.45	7.5	6.3	250	0.1052	6.81	7.27
15	60	30	0.01	35.2	35.18	35.23	35.20	7.5	6.1	250	0.1052	9.96	10.60
15	40	20	0.03	30.84	30.84	30.78	30.82	7.5	5.4	250	0.1052	11.37	12.02
15	60	20	0.03	20.3	20.27	20.28	20.28	7.5	3.2	250	0.1052	17.28	17.85
15	40	30	0.03	32.00	31.99	32.04	32.01	7.5	4.9	250	0.1052	10.95	11.52
15	60	30	0.03	21.17	21.21	21.23	21.20	7.5	4.3	250	0.1052	16.53	17.28

Tabla 24. Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 15 minutos – Prueba 2

Valor de parámetros				Volumen gastado (mL)				Datos Experimentales				Resultados	
Tiempo (min)	T (°C)	[Sustrato] (% m/m)	[Enzima] (% m/m)	V gastado 1 (mL)	V gastado 2 (mL)	V gastado 3 (mL)	V Promedio (mL)	Peso Muestra (g)	Humedad (%)	Volumen Fiola (mL)	Factor de Fehling	%Azúcares Reductores	% Equivalentes de Dextrosa (ED)
15	40	20	0.01	49.37	49.32	49.36	49.35	7.5	5.5	250	0.1052	7.10	7.52
15	60	20	0.01	32.39	32.38	32.41	32.39	7.5	4.8	250	0.1052	10.82	11.37
15	40	30	0.01	51.97	52.01	52	51.99	7.5	6.3	250	0.1052	6.74	7.20
15	60	30	0.01	34.46	34.47	34.46	34.46	7.5	3.8	250	0.1052	10.17	10.57
15	40	20	0.03	30.57	30.59	30.54	30.57	7.5	4.8	250	0.1052	11.47	12.05
15	60	20	0.03	20.96	20.95	20.92	20.94	7.5	5.7	250	0.1052	16.74	17.75
15	40	30	0.03	32.10	32.14	32.09	32.11	7.5	4.9	250	0.1052	10.92	11.48
15	60	30	0.03	21.15	21.14	21.15	21.15	7.5	4.3	250	0.1052	16.58	17.32

Tabla 25. *Respuesta promedio en pruebas definitivas de 15 minutos*

Temperatura (°C)	[Sustrato] (% m/m)	[Enzima] (% m/m)	% Equivalentes de Dextrosa (ED)
40	20	0.01	7.54
60	20	0.01	11.37
40	30	0.01	7.23
60	30	0.01	10.59
40	20	0.03	12.04
60	20	0.03	17.80
40	30	0.03	11.50
60	30	0.03	17.30

Tabla 26. *Factor de Fehling para pruebas definitivas 30 minutos*

Dextrosa Pura		Volumen gastado			
Prueba	Concentración (g/mL)	V gastado 1	V gastado 2	V gastado 3	Promedio
1 -2	0.01	10.75	10.78	10.76	10.76

Tabla 27. Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 30 minutos – Prueba 1

Tiempo (min)	Valor de parámetros			Volumen gastado (mL)				Datos Experimentales			Resultados		
	T (°C)	[Sustrato] (% m/m)	[Enzima] (% m/m)	V gastado 1 (mL)	V gastado 2 (mL)	V gastado 3 (mL)	V Promedio (mL)	Peso Muestra (g)	Humedad (%)	Volumen Fiola (mL)	Factor de Fehling	%Azúcares Reductores	%Equivalentes de Dextrosa (ED)
30	40	20	0.01	44.25	44.26	44.3	44.27	7.5	3.4	250	0.1076	8.10	8.39
30	60	20	0.01	30.8	30.83	30.79	30.81	7.5	5.3	250	0.1076	11.65	12.30
30	40	30	0.01	48.12	48.11	48.19	48.14	7.5	6.1	250	0.1076	7.45	7.94
30	60	30	0.01	32.32	32.28	32.27	32.29	7.5	5.7	250	0.1076	11.11	11.78
30	40	20	0.03	28.9	28.94	28.87	28.90	7.5	6.3	250	0.1076	12.41	13.25
30	60	20	0.03	20.1	20.05	20.13	20.09	7.5	6.5	250	0.1076	17.86	19.10
30	40	30	0.03	30.83	30.77	30.79	30.80	7.5	2.9	250	0.1076	11.65	12.00
30	60	30	0.03	20.72	20.78	20.67	20.72	7.5	7.1	250	0.1076	17.31	18.64

Tabla 28. Cálculo de equivalentes de dextrosa pruebas definitivas de 30 minutos – Prueba 2

Tiempo (min)	Valor de parámetros			Volumen gastado (mL)				Datos Experimentales				Resultados	
	T (°C)	[Sustrato] (% m/m)	[Enzima] (% m/m)	V gastado 1 (mL)	V gastado 2 (mL)	V gastado 3 (mL)	V Promedio (mL)	Peso Muestra (g)	Humedad (%)	Volumen Fiola (mL)	Factor de Fehling	%Azúcares Reductores	%Equivalentes de Dextrosa (ED)
30	40	20	0.01	46.15	46.12	46.07	46.11	7.5	6.8	250	0.1076	7.78	8.35
30	60	20	0.01	31.32	31.35	31.29	31.32	7.5	6.9	250	0.1076	11.46	12.30
30	40	30	0.01	47.54	47.49	47.48	47.50	7.5	5.3	250	0.1076	7.55	7.98
30	60	30	0.01	32.15	32.13	32.19	32.16	7.5	4.8	250	0.1076	11.16	11.72
30	40	20	0.03	28.97	28.94	28.97	28.96	7.5	5.9	250	0.1076	12.39	13.17
30	60	20	0.03	19.33	19.42	19.39	19.38	7.5	2.9	250	0.1076	18.51	19.07
30	40	30	0.03	30.84	30.87	30.9	30.87	7.5	2.3	250	0.1076	11.62	11.90
30	60	30	0.03	20.29	20.21	20.27	20.26	7.5	4.8	250	0.1076	17.71	18.60

Tabla 29. *Respuesta promedio en pruebas definitivas de 30 minutos*

Temperatura (°C)	[Sustrato] (% m/m)	[Enzima] (% m/m)	% Equivalentes de Dextrosa (ED)
40	20	0.01	8.37
60	20	0.01	12.30
40	30	0.01	7.96
60	30	0.01	11.75
40	20	0.03	13.21
60	20	0.03	19.08
40	30	0.03	11.95
60	30	0.03	18.62

Anexo 5: Tablas de interés en caso de escalamiento industrial

Anexo 5A: Precio promedio al productor de principales productos agrícolas

(S//kg)

Tabla 30. Precio promedio al productor de principales productos agrícolas (S//Kg)

Año: 2003-2012

Rubro/ Cultivo	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Tubérculos										
Camote	0,29	0,35	0,28	0,36	0,44	0,53	0,37	0,52	0,49	0,65
Mashua	0,32	0,33	0,33	0,33	0,35	0,45	0,55	0,57	0,66	0,68
Oca	0,40	0,43	0,44	0,45	0,47	0,55	0,66	0,71	0,80	0,81
Olluco	0,42	0,51	0,49	0,51	0,48	0,71	0,69	0,70	0,80	0,81
Papa	0,44	0,40	0,37	0,49	0,45	0,59	0,66	0,62	0,68	0,72
Yuca	0,27	0,29	0,28	0,30	0,34	0,43	0,43	0,44	0,55	0,54

Nota: Corresponde al promedio ponderado a Nivel Nacional.

Elaboración: MINAGRI-Oficina de Estudios Económico y Estadísticos – OEEE. Fuente:

Gerencias-Direcciones Regionales de Agricultura-Sub Gerencia/Dirección de

Estadística/DIA/Evaluación Agrícola Mensual.

Anexo 5B: Rendimiento promedio de principales cultivos (t/ha) 2003-2012

Tabla 31. Rendimiento promedio de principales cultivos (t/ha). Año: 2003-2012

Rubro/ Cultivo	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Cereales y menestras										
Arroz cáscara	6,794	6,440	6,897	6,873	7,212	7,357	7,393	7,285	7,298	7,726
Arveja grano seco	1,074	1,001	0,993	1,005	0,976	0,999	0,995	1,013	0,993	1,002
Cebada grano	1,282	1,238	1,281	1,278	1,241	1,266	1,361	1,404	1,359	1,418
Haba grano seco	1,213	1,153	1,177	1,228	1,243	1,225	1,274	1,254	1,243	1,320
Maíz amiláceo	1,238	1,203	1,231	1,294	1,229	1,236	1,337	1,279	1,289	1,342
Trigo	1,378	1,387	1,344	1,336	1,256	1,384	1,431	1,422	1,472	1,489
Hortalizas										
Tomate	29,585	34,119	32,384	31,405	33,985	35,241	37,060	37,234	36,139	41,097
Ajo	7,864	7,834	8,509	9,319	10,146	10,073	9,802	9,899	10,299	10,725
Alcachofa	15,438	14,928	16,015	16,741	17,257	17,279	18,115	18,592	19,066	17,952
Cebolla	26,210	29,330	30,891	31,727	33,604	35,417	33,799	33,571	36,746	38,883
Espárrago	10,265	10,180	11,325	12,971	12,065	11,035	10,652	10,850	11,836	11,372
Maíz choclo	8,586	8,284	8,414	8,569	8,041	8,500	8,794	8,764	8,516	8,329
Tubérculos y Raíces										
Camote	15,459	15,731	16,350	17,659	16,470	15,658	16,414	16,792	18,091	17,459
Oca	5,977	5,683	5,797	5,868	5,846	5,872	5,913	5,830	6,031	6,303
Olluco	5,925	5,491	5,659	5,723	5,804	5,843	6,022	5,933	6,131	6,543
Papa	12,185	12,190	12,458	12,453	12,616	12,909	13,335	13,159	13,738	14,325

Yuca	10,871	11,072	10,815	10,930	11,096	11,149	11,648	11,765	11,833	12,099
Frutales										
Mango	16,867	17,481	14,598	14,142	12,838	13,245	6,761	18,008	14,440	6,863
Naranja	13,464	13,569	13,453	13,951	13,256	14,415	14,429	14,935	15,489	15,730
Palta	8,956	9,271	8,793	9,041	8,948	9,485	9,662	10,387	11,048	11,358
Papaya	13,972	14,419	12,531	14,948	14,287	14,658	14,107	14,400	13,684	12,767
Plátano	11,976	11,901	11,963	12,313	12,411	11,955	11,928	12,858	13,239	13,252
Uva	13,271	13,606	14,772	16,653	16,106	16,858	18,955	18,698	17,915	17,621
Industriales										
Algodón Rama	2,044	2,111	2,223	2,325	2,409	2,374	2,361	2,280	2,664	2,189
Cacao	0,486	0,509	0,502	0,558	0,525	0,534	0,555	0,604	0,671	0,683
Café	0,696	0,784	0,626	0,850	0,697	0,821	0,711	0,757	0,903	0,805
Maíz amarillo duro	3,917	3,661	3,610	3,667	3,971	4,138	4,230	4,339	4,543	4,724

Elaboración: MINAGRI-Oficina de Estudios Económico y Estadísticos – OEEE. Fuente:

Gerencias-Direcciones Regionales de Agricultura-Sub Gerencia/Dirección de

Estadística/DIA/Evaluación Agrícola Mensual

Anexo 5C: Porcentaje de comercialización a lima metropolitana en función a la producción nacional

Tabla 32. Porcentaje de Comercialización de principales productos agrícolas a Lima Metropolitana en función a la Producción Nacional

Rubro/ Producto	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Ajo	34.7	42.6	41.7	35.1	33.4	39.1	39.9	37.3	32.7	29.5
Cebolla	26.4	23.4	23.7	21.9	20.4	20.2	20.2	18.9	19.1	17.7
Choclo	28.2	29.3	31.7	35.9	36.3	32.5	32.3	34.5	35.6	33.6
Limón	33.4	38.8	39.7	39.0	37.2	46.1	55.1	49.1	47.8	47.7
Tomate	12.7	10.3	11.7	9.6	11.5	8.5	8.1	8.0	10.3	12.5
Arveja	64.7	67.7	68.7	58.9	73.1	65.1	64.3	62.3	68.0	67.3
Frijol	7.5	6.0	4.6	4.1	2.6	2.4	1.5	1.6	1.8	2.2
Haba	17.4	21.7	19.5	17.9	22.1	19.1	19.4	18.2	21.9	18.1
Camote	39.2	39.6	41.0	28.3	34.4	34.2	26.3	24.2	23.4	20.7
Olluco	6.9	6.3	7.2	8.3	7.8	5.5	8.0	7.8	8.8	8.9
Papa	14.5	16.0	14.6	14.9	15.5	14.6	13.8	13.8	13.2	11.2
Yuca	1.4	1.2	1.3	1.4	1.4	1.2	1.4	1.4	1.7	1.9

Fuente: Empresa de Mercados Mayoristas S.A. – EMMSA. Elaboración: MINAGRI – Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos – OEEE.

Anexo 5D: Volumen comercializado de principales productos agrícolas a Lima

Metropolitana

Tabla 33. Volumen comercializado de principales productos agrícolas a Lima Metropolitana

Año: 2003-2012 (t)

Rubro/ Producto	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Hortalizas										
Ají	39 042	38 500	39 364	41 720	40 144	47 541	45 959	42 032	48 123	49 684
Ajo	20 111	20 940	22 887	25 727	27 018	26 485	23 141	23 474	28 973	24 273
Cebolla	125 069	120 774	116 797	126 361	129 276	129 486	122 689	136 751	138 518	137 630
Choclo	114 722	110 880	111 315	129 398	120 482	121 629	127 440	140 658	130 924	121 676
Limón	80 914	78 618	86 243	97 905	100 402	102 977	108 697	109 243	102 293	106 661
Pimiento	10 017	9 906	10 146	10 996	12 974	11 479	13 793	14 803	15 312	15 239
Tomate	19 020	18 846	18 549	16 337	19 945	17 832	17 882	17 946	19 142	28 659
Zanahoria	65 320	73 929	63 920	67 519	75 625	79 991	77 565	81 740	79 791	82 770
Zapallo	18 886	16 186	14 387	15 027	14 312	13 893	13 603	12 371	11 098	14 337
Legumbres										
Arveja	26 482	25 386	26 731	26 394	31 637	30 400	32 407	31 909	33 029	35 644
Frijol	4 445	3 539	3 298	3 369	2 097	2 063	1 248	1 446	1 576	2 067
Haba	8 960	10 249	10 319	10 302	13 519	12 292	13 471	12 200	14 146	13 366
Vainita	12 211	11 424	12 569	10 913	12 941	13 016	13 928	12 484	14 269	13 463
Tubérculos										
Camote	75 699	73 092	75 665	56 238	63 535	64 969	69 057	63 816	69 946	62 975

Olluco	9 420	7 555	9 678	12 088	12 211	8 707	13 035	12 441	14 189	16 032
Papa	455 743	481 571	480 015	485 145	523 324	524 898	521 327	527 316	537 781	499 980
Yuca	12 827	11 382	12 979	15 149	15 388	13 444	15 922	17 535	19 495	21 410

Fuente: Empresa de Mercados Mayoristas S.A. – EMMSA. Elaboración: MINAGRI -

Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos – OEEE.

Anexo 5E: Volumen de producción de principales productos agrícolas

Tabla 34. *Volumen de producción de principales productos agrícolas. Año: 2003-2012 (Miles de t)*

Rubro/ Producto	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Cereales y menestras										
Arroz cáscara	2132,4	1844,9	2468,4	2363,5	2435,1	2794,0	2991,2	2831,4	2624,4	3043,3
Arveja grano seco	40,9	37,5	38,9	44,8	43,3	46,7	50,4	51,2	48,6	53,0
Cebada grano	193,7	177,2	193,1	191,6	177,5	186,0	213,3	216,2	201,2	214,5
Frijol Grano seco ¹	59,2	58,5	71,7	82,5	82,0	86,1	83,8	92,8	87,8	92,5
Haba grano seco	51,6	47,2	52,9	57,5	61,3	64,3	69,6	67,1	64,6	73,7
Maíz amiláceo	256,5	216,9	241,5	249,2	245,3	249,4	285,8	257,6	255,6	280,9
Trigo	190,5	170,4	178,5	191,1	181,6	206,9	226,3	219,4	214,1	226,2
Hortalizas										
Cebolla	472,9	515,5	493,3	576,7	634,4	641,5	606,1	724,0	727,0	775,5
Espárrago	189,6	192,5	206,0	260,0	284,1	328,4	313,9	335,2	392,3	376,0
Maíz choclo	407,1	377,9	351,3	360,6	332,3	374,1	394,2	408,2	368,0	361,6
Páprika	16,9	33,0	65,9	50,7	40,1	56,2	49,5	37,2	45,0	46,8
Tomate	149,4	183,5	159,2	169,7	173,3	210,7	221,6	224,9	186,0	229,4
Tubérculos										
Camote	192,9	184,4	184,4	198,6	184,8	189,9	262,7	263,4	299,1	304,0
Mashua	37,1	35,5	33,6	32,2	30,4	29,0	32,9	29,2	29,1	31,4
Oca	116,1	105,8	114,1	103,0	96,9	93,0	100,6	94,0	90,0	92,9
Olluco	135,6	120,6	135,3	144,9	156,4	157,4	162,6	158,7	161,9	180,7

Papa	3143,9	3008,2	3289,7	3248,4	3383,0	3597,1	3765,3	3814,4	4072,5	4474,7
Yuca	909,3	971,0	992,3	1063,5	1091,7	1094,0	1166,0	1240,1	1115,7	1118,5
Frutales										
Aceituna	38,0	42,5	54,6	52,5	52,4	114,4	7,2	75,0	73,1	92,5
Limón Sutil	241,9	202,4	217,3	251,3	269,8	223,4	197,4	222,3	214,2	223,8
Mango	198,5	277,9	235,4	320,3	294,4	322,7	167,0	454,3	351,9	185,2
Naranja	305,8	330,4	334,5	353,9	344,3	380,0	377,6	394,6	418,6	428,8
Palta	100,0	108,5	103,4	113,3	121,7	136,3	157,4	184,4	213,7	268,5
Papaya	189,8	193,9	171,1	175,4	157,8	167,4	173,9	186,8	125,8	123,8
Plátano	1621,0	1664,1	1697,1	1777,3	1834,5	1792,9	1866,6	2007,3	1968,1	2082,1
Uva	146,0	155,4	169,5	191,6	196,6	223,4	264,4	280,5	296,9	361,9
Industriales										
Algodón Rama	138,6	187,7	207,3	213,4	215,4	167,4	96,0	63,8	122,0	111,0
Cacao	24,2	25,9	25,3	31,5	31,4	34,0	36,8	46,6	56,5	62,5
Café	203,1	231,4	188,6	273,2	226,0	273,8	243,5	264,6	331,5	314,5
Caña de azúcar ²	8864,0	6945,7	6304,1	7245,8	8228,6	9396,0	9936,9	9660,9	9884,9	10369
Maíz amarillo d.	1097,3	983,2	999,3	1019,8	1122,9	1231,5	1273,9	1283,6	1260,1	1393,3

¹ Incluye frijol bayo, caballero, canario, cocacho, panamito, larán.

² No incluye caña de azúcar para alcohol ni para fruta.

Fuente: Gerencias-Direcciones Regionales de Agricultura-Sub Gerencia/Dirección de Estadística/DIA/Evaluación Agrícola Mensual. Elaboración: MINAGRI-Oficina de Estudios Económico y Estadísticos – OEEE.

Anexo 5F: Superficie sembrada de principales cultivos

Tabla 35. Superficie sembrada de principales cultivos según campaña¹ agrícola (Miles de ha)

Rubro/ Cultivo	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Total Nacional	1860	2005	2040	2062	2110	2146	2126	2098	2190	2185
Cereales										
Arroz	286,9	354,4	347,1	342,8	369,3	406,1	396,5	367,3	388,7	399,2
Cañihua	6,5	6,6	7,3	5,9	6,6	7,1	6,8	7,0	6,7	6,4
Cebada	145,8	152,1	152,1	150,6	151,2	156,6	154,6	154,0	156,0	156,8
Maíz amarillo duro	270,5	288,6	288,6	295,1	303,8	308,8	308,8	286,1	302,7	296,9
Maíz amiláceo	232,1	239,1	239,1	246,8	250,2	253,8	253,8	248,9	256,2	262,4
Quinua	28,7	30,4	30,4	31,3	33,1	34,1	34,1	38,1	42,1	47,7
Trigo	124,7	144,7	144,7	147,7	151,7	157,3	157,3	149,4	152,7	154,7
Menestras										
Arveja grano	59,1	63,7	71,2	76,9	77,9	81,0	82,0	80,6	86,8	88,6
Choclo	8,5	8,7	7,5	7,6	8,0	9,3	9,4	10,0	9,7	9,8
Frijol Castilla	16,6	16,9	24,7	16,6	24,4	20,9	20,2	16,0	26,4	17,5
Frijol Grano seco ²	65,0	74,2	79,8	80,8	82,8	87,3	85,4	84,7	87,4	89,0
Haba grano	53,8	57,4	60,1	65,4	69,1	68,6	68,6	68,6	72,3	73,5
Lentejas	4,3	3,6	3,7	3,9	3,7	3,9	4,2	2,7	3,8	4,1
Hortalizas										

Ajo	6,1	6,4	8,2	8,0	6,8	5,8	6,4	8,6	7,9	7,6
Cebolla	17,2	16,1	18,1	18,6	18,3	17,9	21,8	20,2	19,2	20,5
Páprika	8,4	13,9	11,0	7,7	10,8	9,0	6,6	7,3	7,1	5,3
Tomate	5,4	5,1	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	5,1	5,8	5,9
Tubérculos										
Camote	11,6	10,2	12,1	11,2	12,0	15,8	16,3	15,8	17,3	16,8
Mashua	6,7	6,6	5,4	5,7	5,3	5,5	5,1	5,1	5,1	5,0
Oca	19,8	19,9	17,6	17,2	16,2	17,0	16,4	15,2	14,8	14,7
Olluco	23,4	24,6	26,2	28,0	27,1	27,2	27,4	26,4	28,2	29,2
Papa	261,1	267,9	264,9	286,3	286,4	286,7	299,1	309,1	319,6	323,3
Yuca	87,6	98,5	98,7	99,4	101,4	102,3	105,5	102,6	102,9	102,5
Industriales										
Algodón rama	89,2	92,9	92,4	86,3	68,3	36,9	28,4	51,9	49,4	30,4
Marigold	7,4	6,1	2,7	1,0	0,6	0,3	0,5	1,2	2,6	0,8
Otros ³	13,2	10,7	21,0	15,9	20,2	21,4	15,9	16,3	18,7	16,8

¹ Campaña agrícola corresponde a una campaña de siembra. Comprende 12 meses (Desde Agosto a Julio del año siguiente)

² Incluye frijol bayo, caballero, canario, cocacho, panamito, larán.

³ Incluye kiwicha, sorgo, pallar, frijol de palo, zarandaja, garbanzo, frijol loctao y soya.

Fuente: Gerencias- Direcciones Regionales de Agricultura- SubGerencia/ Dirección de Estadística/ DIA/ Evaluación Agrícola Mensual. Elaboración: MINAGRI- Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos – OEEE.

Anexo 5G: Composición porcentual del VBP de principales productos

Tabla 36. *Composición Porcentual del VBP Agropecuario, según principales productos*
Año: 2003-2012.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Sector Agropecuario	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Subsector agrícola	62,3	61,2	60,5	60,5	59,8	60,1	59,0	59,3	58,8	58,8
Aceituna	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	1,4	0,1	0,9	0,8	1,0
Ajo	0,8	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,6	0,6	0,8	0,7
Alfalfa	6,2	6,2	5,9	5,5	5,4	5,1	5,2	5,1	5,0	5,0
Algodón Rama	1,5	2,0	2,1	2,0	2,0	1,4	0,8	0,5	0,9	0,8
Arroz cáscara	5,1	4,4	5,6	5,0	5,0	5,3	5,6	5,0	4,5	4,9
Cacao	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6
Café	4,3	4,9	3,8	5,1	4,1	4,7	4,0	4,4	5,0	4,5
Caña de Azúcar	4,0	3,1	2,7	2,9	3,2	3,4	3,5	3,3	3,2	3,1
Cebada Grano	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Cebolla	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
Espárrago	1,5	1,5	1,5	1,8	1,9	2,1	1,9	2,0	2,2	2,0
Frijol Grano seco	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,5
Limón	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3
Maíz A. Duro	3,0	2,7	2,6	2,4	2,6	2,7	2,7	2,6	2,4	2,5
Maíz amiláceo	1,2	1,0	1,1	1,0	1,0	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9
Maíz Choclo	1,1	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
Mandarina	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7

Mango	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,3	0,9	0,6	0,3
Manzana	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Naranja	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
Palta	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
Papa	8,5	8,1	8,4	7,7	7,7	7,7	7,8	7,6	7,7	8,1
Piña	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9
Plátano	3,2	3,3	3,2	3,1	3,1	2,8	2,8	2,9	2,7	2,7
Trigo	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5
Uva	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,6
Yuca	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1	1,8	1,7
Otros	11,6	11,2	11,2	11,3	11,5	11,2	12,3	12,1	11,6	11,7
Subsector pecuario	37,7	38,8	39,5	39,5	40,2	39,9	41,0	40,7	41,2	41,2

Fuente: Gerencias-Direcciones Regionales de Agricultura-Sub Gerencia/Dirección de Estadística/DIA/Evaluación Agrícola Mensual. Elaboración: MINAGRI-Oficina de Estudios Económico y Estadísticos – OEEE.

Anexo 5H: Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por vía de ingreso, dólares americanos

Tabla 37. *Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por Vía de ingreso, dólares americanos*

Vía de ingreso	2014*	201	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
Aérea del Callao	39 850	59 747	68 479	81 506	30 699	33 307	48 256	42 006	39 899	45 135	55 393	44 782
Desaguadero	0,00	34 039	0,00	0,00	0,00	4 631	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ilo	0,00	140	0,00	0,00	644	227	925	370	206	598	579	156
Iquitos	0,00	0,00	0,00	0,00	97 844	43 801	56 577	15 985	72 989	125 347	0,00	91 082
Marítima del	3 098	5 731	3 994	4 317	2 524	2 455	3 486	2 571	1 964	3 772	3 677	1 721
Callao	646	482	579	272	631	385	111	302	662	983	662	220,89
Paita	0,00	0,00	10 157	13 002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tacna	1,39	4,00	21 060	78	0,00	0,00	0,00	189	61,92	0,00	0,00	0,00
Tumbes	0,00	0,00	0,00	10 746	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	3 138	5 825	4 094	4 422	2 653	2 537	3 591	2 629	2 077	3 944	3 733	1 857
	498	413	276	605	820	353	870	854	819	064	635	242

Elaboración propia. Fuente: Sunat (Número de partida: 3505100000). *Hasta agosto, 2014

Anexo 5I: Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por vía de ingreso, dólares americanos

Tabla 38. *Importación de maltodextrina al Perú (2003-2014) por país de procedencia, dólares americanos*

Por país de procedencia	2014*	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
Alemania	410 885	531 060	345 939	583 947	407 034	202 861	682 523	593464	257 106	264 747	540 445	390 563
Argentina	12 629	60 221	34 910	39 179	0,00	44 315	221 701	344 692	340 102	916 317	1331623	656 998
Austria	132,94	0,00	0,00	1 366,78	521,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bélgica	14 527	73 404	44 210	28 247	11 844	31 254	20 473	10 908	10 525	21 801	17 996	7 472
Brasil	309 199	566 957	396 320	264 259	238 271	295 259	404 686	239 952	171 791	243 674	249 614	51 914
Canadá	154 486	366 709	156 120	121 284	68 601	104 070	20 442	10 658	36 257	679 555	317 503	84 505
Chile	1,39	2 752	21 060	96,16	0,00	100,00	2 393,12	12 277	21 636	30 085	7 800	3 595
China	17 983	529 209	205 417	337 379	13 868	13 707	297 010	39 904	12 484	4 245	28 260	4 900
Colombia	0,00	281 359	165 087	153 066	68 683	74 139	41 071	236 600	303 915	295 324	35 064	0,00
Dinamarca	0,00	142,75	0,00	4 436,68	3 985,79	610,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Eslovaquia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5 479,00	0,00	0,00	0,00	0,00

España	22 655	67 525	2 059	1 651	552	411	0,00	766	2 210	513	1 234	632
Estados Unidos	1832	2 737	2 116	2 270	1 441	1 363	1 295	654	607	875	851	448
Francia	820,74	770,66	844,69	770,06	739,10	815,46	910,48	621,96	947,32	819,53	352,02	710,04
India	43 477	19 528	235	0,00	92,00	534	1 415	12 720	4 948	31 444	5 400	0,00
Italia	36 858	1 236	974	0,00	1 748	591	1 012	7 626	9 471	9 846	7 800	2 260
Japón	29 159	18 427	53 602	61 028	21 401	11 370	9 313	0,00	1 081	23 076	0,00	3 082
México	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 883,97	130,93	0,00	0,00	0,00	0,00
Nigeria	83 511	97 446	109 309	110 813	25 870	89 293	74 946	105 997	41 857	127 851	105 107	41 644
Países bajos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	516,91	0,00	0,00
Reino Unido	87 668	260 038	173 993	230 185	228 907	108 737	295 773	273 447	223 020	401 987	226 631	160 961
República Checa	0,00	0,00	0,00	50,54	405,34	99,63	709,68	683,93	0,00	0,00	0,00	0,00
Suecia	0,00	0,00	0,00	0,00	2 132,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suiza	0,00	462,32	47,17	25 127	29 903	46 196	43 169	19 779	25 365	17 258	2 600	0,00
Tailandia	0,00	27 000	18 270	0,00	0,00	68,17	0,00	51,08	0,00	0,00	0,00	0,00
	61 976	158 985	225 396	189 713	63 692	142 300	171 749	59 953	8 095	0,00	0,00	0,00

Taiwán	42 868	25 869	24 478	0,00	24 563	7 617	4 683,52	0,00	0,00	0,00	5 202	0,00
Vietnam	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	3'138498	5'825413	4'09427 6	4'422605	2'653820	2'537353	3'591870	2'629854	2'077819	3'944064	3'733635	1'857242

Elaboración propia. Fuente: Sunat (Número de partida: 3505100000). *Hasta agosto, 2014.

Anexo 6: Pre estudio de escalamiento industrial

Anexo 6A: Diseño preliminar de planta de producción de maltodextrina a partir de yuca

El diseño de la planta, y por ende de los equipos, está planteado para una demanda inicial de 1.34 TM/día de maltodextrina durante el primer año y con la capacidad de producción de 4.02 TM/ día en el quinto año. El estudio tiene la posibilidad de mantener el volumen de producción inicial.

A. Recepción de materia prima

Se plantea el uso de bandas transportadoras hasta el equipo de lavado-pelado.

B. Lavadora – peladora

Se plantea el uso de una lavadora / peladora de raíces de yuca, de cuerpo cilíndrico (tambor) y semieje para carga lateral. El equipo posee una tolva de carga y descarga de yuca, entrada para agua y salida para impurezas. La capacidad es de 1000 kg de raíces por hora con un requerimiento de 1 kg de agua por cada kilogramo de yuca. La Figura 40 muestra un diagrama sencillo del equipo.

C. Rallador

El rallador posee una capacidad de 1500 kg de yuca por hora. Consta de un cilindro que posee una lámina metálica externa perforada, una tolva para el ingreso de raíces y un tambor rallador. El equipo necesita de 9 kg de agua por cada 10 kg de yuca para su correcto funcionamiento. La figura 41 representa el equipo y su funcionamiento.

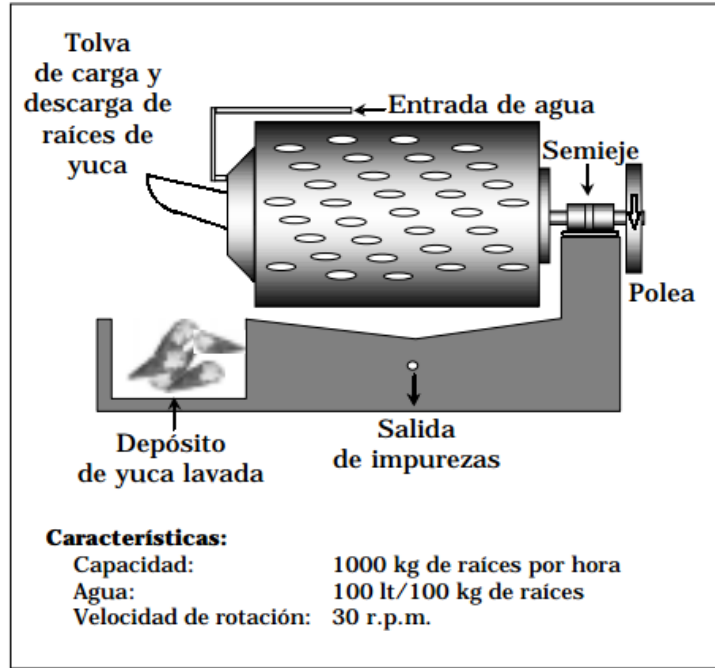


Figura 40. Diagrama de Lavadora- Peladora de raíces de yuca.

Fuente: Checa, A. (2013)

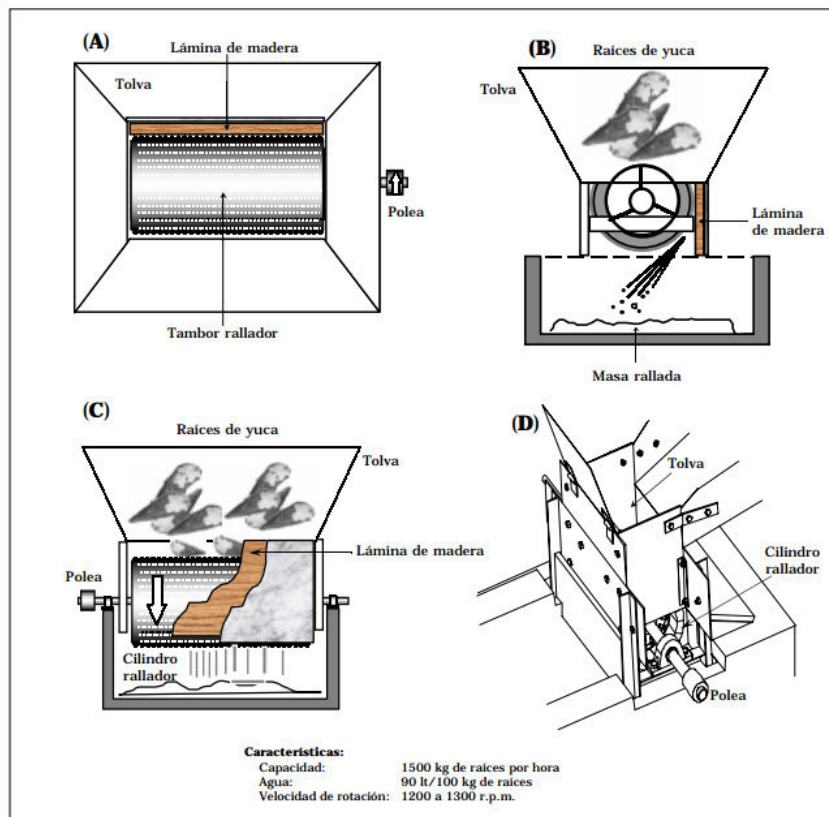


Figura 41. Diagrama del Rallador de raíces de yuca. (A) Vista superior. (B) Vista lateral. (C) Vista frontal. (D) Dibujo técnico del rallador. Fuente: De la Cruz, M. (2009)

Se debe tomar en cuenta que la lámina metálica que lleva a cabo el rallado debe ser de acero inoxidable de muy buena calidad, de lo contrario el ácido cianhídrico que contiene la yuca reacciona con el fierro para dar lugar a ferrocianuros, compuesto que provocaría una coloración azul en la lechada del almidón.

D. Extractor

El extractor es usado en la etapa de extracción de almidón, se plantea el uso de este equipo para obtener la mayor cantidad de almidón disponible. Se plantea el uso de 4 etapas para su funcionamiento. Cada etapa recibe el extracto y el residuo para su máximo aprovechamiento y la máxima cantidad de agua, de acuerdo a lo que soporta cada uno de los tanques, es agregado progresivamente a través de los 4 ingresos de agua. Los equipos son planteados bajo el diseño de un acero inoxidable de muy buena calidad. Se plantea el uso de un extractor de 4TM/hora de capacidad, ya que si después de los 5 años se necesita un aumento adicional de producción este equipo podría formar parte de la posible planta.

E. Tanque de gelatinización

Tanque de acero inoxidable de capacidad 4 TM con agitación. La relación volumen/masa es de 1.15 (determinado experimentalmente), con lo cual por seguridad se escogerá tanques de 4000 L de capacidad. Las dimensiones del tanque comercial son: diámetro: 1.62 m; altura: 2.00 m; altura total: 4.25 m; diámetro de salida y entrada: 0,06 m; espesor de chaqueta: 5,1 cm.

F. Tanque de digestión

Tanque de acero inoxidable de capacidad 4 TM con agitación. Volumen: 4000 L, diámetro: 1.62 m; altura: 2.00 m; altura total: 4.25 m; diámetro de salida y entrada: 0,06 m; espesor de chaqueta: 5,1 cm.

G. Filtro prensa

Capacidad de alimentación de 8.5 m³/h. Las medidas del equipo son están representadas en la figura 42: A: 87 cm; B: 102 cm; C: 115 cm; D: 135 cm. Con un total de 9 platos y 8 marcos.

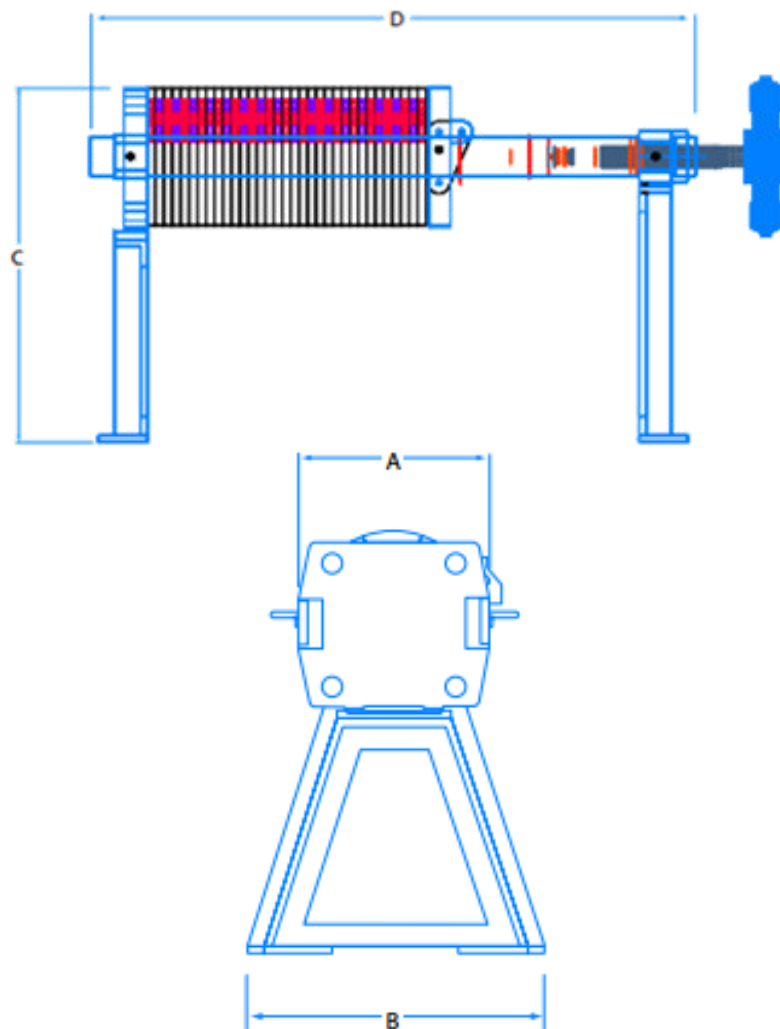


Figura 42. Diseño de Filtro prensa de placas y marcos. Fuente: De la Cruz, M. (2009)

H. Atomizador

El equipo atomizador debe tener la capacidad para atomizar 200 litros por hora. El equipo debe ser de acero inoxidable, con tanque de recuperación de finos. La figura 43 muestra un esquema del equipo necesario.

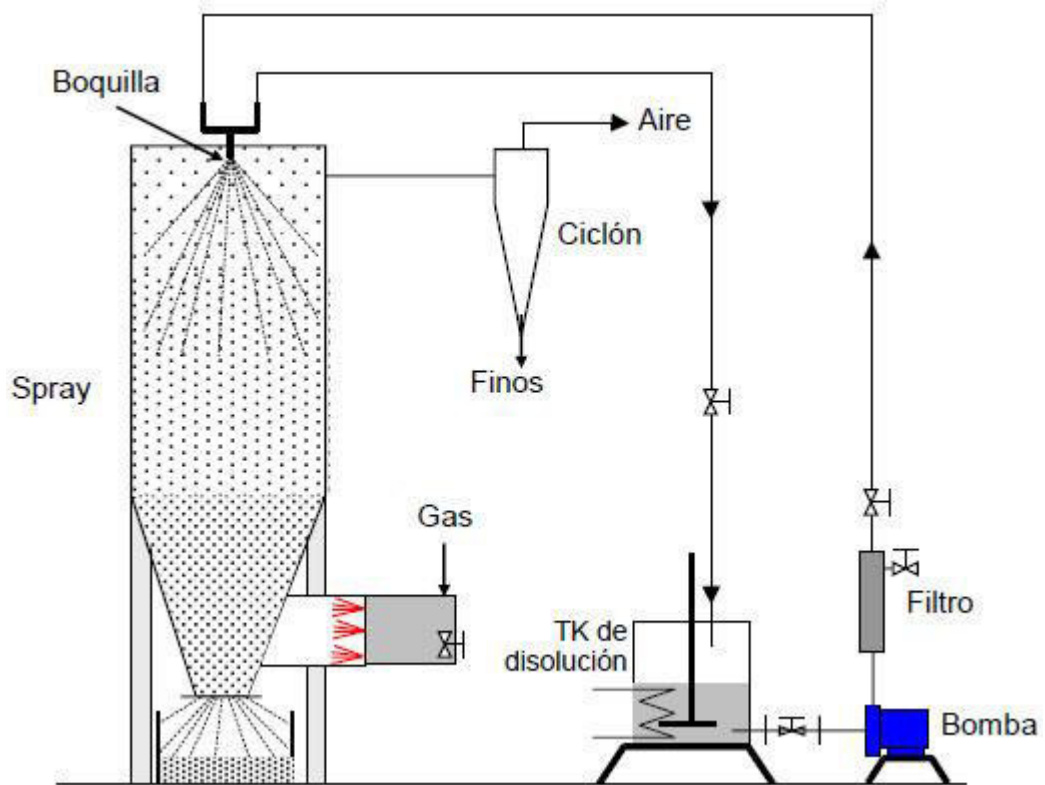


Figura 43. Esquema de equipo de secado por atomización (Velasco, 2014)

I. Molino de rodillos vertical

Se plantea el uso de este equipo para la obtención de cáscara húmeda molida como subproducto de la planta. Este producto deberá ser vendido a las industrias productoras de alimento balanceado para animales (piensos). Capacidad del equipo: 150 kg/ hora. Altura: 3.56 m; ancho: 2.50 m; profundidad: 0.80 m.

J. Selladora

El pesado se da en una balanza de plataforma y se realizará el sellado por medio de una selladora de bolsas. Las bolsas deben ser de papel craft con plástico interno para preservar mejor la maltodextrina de humedad y demás contaminantes. Luego del sellado del plástico se deberá

K. Marmita con chaqueta

Del proceso de filtrado se genera un subproducto con alto contenido nutricional. Esta torta filtrante puede ser utilizada, junto a otros cereales en la elaboración de una barra energética. Para este procesamiento se sugiere el uso de una marmita con chaqueta y agitación (Figura 44).

La Figura 45 muestra un resumen de los equipos mencionados en este anexo y el diagrama del proceso de producción de maltodextrina a partir de yuca.



Figura 44. Marmita con chaqueta para procesamiento de subproducto barra energética. Fuente: Catálogo Tecnodac

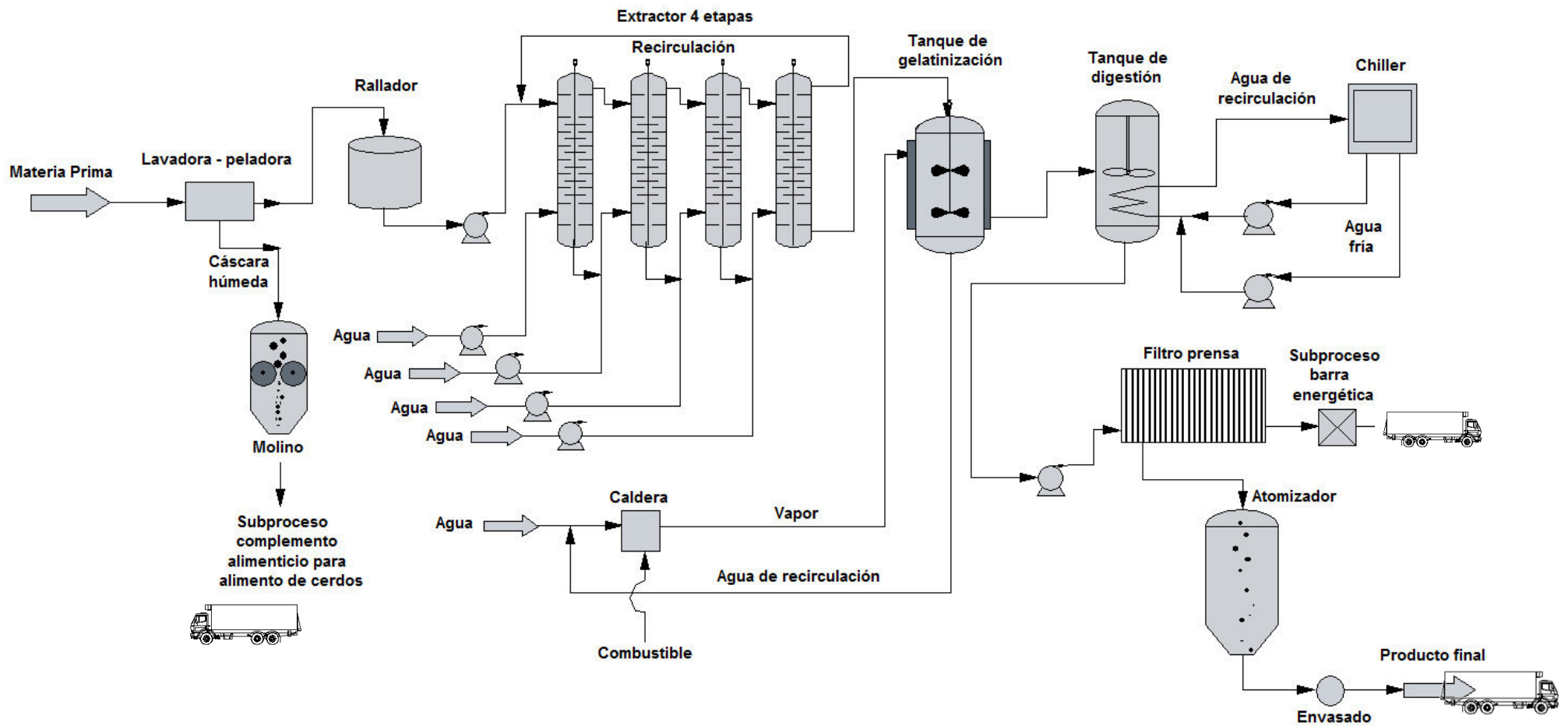


Figura 45. Diagrama de la planta de producción de maltodextrina. Elaboración propia

