

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño de línea de producción de yuca congelada para  
exportación”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero de Alimentos**

Presentado por:

Cesar Javier Durazno Flores

Michelle Azucena Espinoza Quimís

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2020

## DEDICATORIA

A Dios porque a él le debo mi vida.

A mis padres por brindarme incondicionalmente su apoyo y confianza en cada etapa durante mi formación personal y profesional.

A mis hermanas quienes me han acompañado, aconsejando a nunca desistir en mi crecimiento profesional.

A mis amigas, Karen, Silvia, y Andrea quienes me apoyaron con palabras de aliento en momentos difíciles.

A Adrián Polit por su sincero amor y cariño brindado que se convirtió en una persona especial en mi vida.

### **Michelle Espinoza Quimís**

A Dios, quien me ha dado salud y sabiduría y la valentía de seguir adelante a pesar de las dificultades.

A mi padre CESAR RANULFO DURAZNO PAREDES, quien fue mi mejor amigo, compañero, maestro y profesor de vida, te debo todo lo que soy y es gracias a ti, Papá.

A mi hijo, eres mi orgullo y mi gran motivación, ¡TE AMO!

### **César Durazno Flores**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, nuestras familias que nos han brindado su amor, bondad y confianza por habernos forjado como las personas que somos.

Nuestro más sincero agradecimiento al PhD. Patricio Cáceres por su experiencia académica e incentivarnos a ser eficientes y tener iniciativa en nuestro desarrollo como profesionales.

A nuestros profesores que fueron parte de este proceso y de guiarnos constantemente por la excelencia académica en esta maravillosa carrera.

**Michelle y César**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Cesar Javier Durazno Flores* y *Michelle Azucena Espinoza Quimís* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

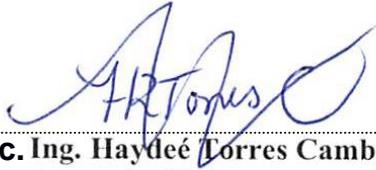
Cesar Javier  
Durazno Flores



---

Michelle Azucena  
Espinoza Quimís

## EVALUADORES



**MSc. Ing. Haydeé Torres Camba**

PROFESOR DE LA MATERIA



**PhD. Patricio J. Cáceres**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Actualmente existe una gran demanda de tubérculos y raíces que son producidos por pequeños y medianos productores y estos son comercializados como materia prima y que son transformados en productos mínimamente procesados. El presente proyecto propone una estrategia para evitar pérdidas de producto debido al pardeamiento enzimático. Esto se realizó mediante un análisis bibliográfico, en el cual se logró identificar las características más relevantes de la enzima polifenol oxidasa. Por medio de este conocimiento, se logró establecer parámetros de proceso para la producción de yuca congelada. En la metodología se planteó una simulación de cinética enzimática considerando el efecto de los inhibidores donde se determinó que el ácido ascórbico tuvo mayor efecto de inhibición para el control del pardeamiento enzimático seguido del ácido cítrico. Como complemento se revisó la norma NTE INEN-CODEX 192:2013 para el uso adecuado de los aditivos alimentarios. También se determinó que el tiempo necesario de congelación del producto fue de 1,26 horas en un túnel de congelación estático (Air Blast). Finalmente, para una producción diaria de 1225 Kg de yuca congelada, se estimó el precio de venta al público siendo este de \$21,62 por caja de 6 unidades de 2,27 Kg cada uno, con un punto de equilibrio 8663 unidades.

**Palabras Clave:** polifenol oxidasa, simulación, inhibidor, cinética enzimática, congelación.

## **ABSTRACT**

*Currently there is a great demand for tubers and roots that are produced by small and medium producers and these are commercialized as raw material and that are transformed into minimally processed product. The present project proposes a strategy to avoid losses of non-conforming product due to enzymatic browning. This was done by means of a bibliographic analysis, in which it was possible to identify the most relevant characteristics of the polyphenol oxidase enzyme. Through this knowledge, it was possible to establish process parameters for the production of frozen cassava. In the methodology, a simulation of enzymatic kinetics was proposed considering the effect of inhibitors, where it was determined that ascorbic acid had a greater inhibitory effect to control enzymatic browning followed by citric acid. As a complement, the NTE INEN-CODEX 192: 2013 standard was revised for the proper use of food additives. It was also determined that the necessary freezing time of the product was 1.26 hours in a static freezing tunnel (Air Blast). Finally, for a daily production of 2450 kg of frozen cassava, the retail price was estimated at \$ 21.62 per box of 6 units of 2.27 kg each. The breakeven point was reached at 8663 units.*

**Keywords:** *polyphenol oxidase, simulation, inhibitor, enzyme kinetics, freezing.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico .....	2
1.4.1 Yuca .....	2
1.4.2 Valor Nutricional .....	3
1.4.3 Variedades de Yuca.....	4
1.4.4 Producción de Yuca en el Ecuador .....	5
1.4.5 Pardeamiento Enzimático .....	5
1.4.6 Inhibidores Enzimáticos de la Polifenol oxidasa.....	6
1.4.7 Cinética Enzimática .....	8
CAPÍTULO 2 .....	9
2. METODOLOGÍA .....	9
2.1 Simulación de cinética enzimática .....	9

2.2	Modelo cinético Michaelis-Menten.....	9
2.3	Inhibición de la Polifenol oxidasa.....	10
2.4	Diseño de Plantas .....	10
2.4.1	Análisis de recorrido sencillo.....	10
2.4.2	Relación entre actividades .....	11
2.4.3	Determinación de los espacios .....	12
2.4.4	Distribución de planta .....	13
2.5	Costos.....	13
CAPÍTULO 3.....		15
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	15
3.1	Caracterización de la enzima Polifenol Oxidasa (PPO).....	15
3.1.1	pH óptimo .....	15
3.1.2	Temperatura óptima.....	16
3.2	Cinética enzimática y especificidad del sustrato.....	17
3.3	Efecto de los inhibidores .....	19
3.4	Diagrama de flujo del proceso de producción de yuca congelada .....	22
3.4.1	Recepción de materia prima .....	23
3.4.2	Selección.....	23
3.4.3	Lavado y sanitizado .....	23
3.4.4	Pelado y cortado.....	23
3.4.5	Sanitizado.....	23
3.4.6	Inmersión.....	24
3.4.7	Escurrido .....	24
3.4.8	Congelado .....	24
3.4.9	Empacado .....	24
3.4.10	Almacenamiento.....	24
3.5	Diseño de Plantas .....	25

3.5.1	Diseño de planta para producción de yuca congelada .....	25
3.6	Cálculos de tiempo de congelación .....	30
3.7	Estimación de costos .....	40
3.7.1	Costos de materia prima (Batch) y material de empaque.....	40
3.7.2	Costos de mano de obra directa .....	41
3.7.3	Costos indirectos .....	42
3.7.4	Costos de producción .....	45
3.7.5	Punto de equilibrio .....	45
CAPÍTULO 4 .....		47
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
4.1	Conclusiones.....	47
4.2	Recomendaciones.....	48
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior del Litoral
PPO	Polifenol oxidasa
SLP	Systematic Layout Planning
ASME	American Society of Mechanical Engineers
T.R.A.	Tabla relacional de actividades
Ss	Superficie estática
Sg	Superficie gravitacional
Se	Superficie de evolución
P.V.P.	Precio de venta al público

## SIMBOLOGÍA

msnm	Metros sobre el nivel de mar
$\mu\text{g}$	Microgramos
$\mu\text{m}$	Micrómetros
ppm	Partes por millón
Ton/ha	Toneladas por hectáreas
V	Velocidad
S	Sustrato
Km	Constante de Michaelis-Menten
mM	Milimolar
cm	Centímetro
$\text{m}^2$	Metro cuadrado
Kg	Kilogramo
Bi	Número de biot
Ste	Número de Stephan
$\Delta H^m$	Entalpía del producto congelado

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 El pelado y cortado estimula la oxidación celular causando pardeamiento en la zona dañada del tejido.....	6
Figura 2.1 Símbolos del recorrido sencillo del proceso.....	11
Figura 3.1 Efecto de pH sobre la actividad PPO de yuca ( <i>M. esculenta</i> ).....	16
Figura 3.2 Efecto de la temperatura sobre la actividad PPO de yuca ( <i>M. esculenta</i> )....	17
Figura 3.3 Actividad enzimática usando catecol como sustrato.....	18
Figura 3.4 Efecto de 1mM, 3mM y 5mM del Á. Cítrico sobre <i>M. esculenta</i> .....	21
Figura 3.5 Efecto de 1mM, 3mM y 5mM del Á. Ascórbico sobre <i>M. esculenta</i> .....	21
Figura 3.6 Diagrama de flujo del proceso de yuca congelada .....	22
Figura 3.7 Diagrama de recorrido sencillo para el proceso de yuca congelada .....	25
Figura 3.8 Diagrama de relación entre actividades del proceso .....	27
Figura 3.9 Diagrama de equipos para el proceso de yuca congelada .....	29
Figura 3.10 Layout codificado generado por el software CORELAP 1.0.....	29
Figura 3.11 Layout generado por el software CORELAP 1.0.....	29
Figura 3.12 Layout codificado y modificado.....	30
Figura 3.13 Layout propuesto para la producción de yuca congelada .....	30

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición química y nutricional de la yuca fresca y seca ( <i>M. esculenta</i> Crantz) .....	3
Tabla 1.2 Variedades de yuca en el Ecuador .....	4
Tabla 2.1 Escala de valoración de la tabla relacional de actividades (T.R.A.) .....	11
Tabla 2.2 Motivos de relación.....	12
Tabla 2.3 Porcentaje de permitido por relación .....	12
Tabla 3.1 Actividad de PPO (%) según la variación de pH .....	15
Tabla 3.2 Actividad de PPO (%) según la variación de temperatura.....	16
Tabla 3.3 Concentración de Catecol y velocidad inicial .....	18
Tabla 3.4 Valores de Km y Vmax de catecol para <i>M. esculenta</i> .....	19
Tabla 3.5 Velocidad de reacción a diferentes concentraciones del Ácido Ascórbico ....	19
Tabla 3.6 Velocidad de reacción a diferentes concentraciones del Ácido Cítrico .....	19
Tabla 3.7 Efecto de Inhibidores sobre la actividad de PPO en yuca <i>M. esculenta</i> .....	20
Tabla 3.8 Agrupación de las actividades del proceso .....	26
Tabla 3.9 Total de relaciones para proceso de yuca congelada .....	27
Tabla 3.10 Área necesaria para cada actividad.....	28
Tabla 3.11 Coeficientes de transferencia de calor .....	31
Tabla 3.12 Composición de la yuca fresca .....	31
Tabla 3.13 Temperaturas que influyen en el proceso de congelación de yuca .....	31
Tabla 3.14 Dimensiones del producto empacado .....	31
Tabla 3.15 Datos del calor específico de la yuca.....	34

Tabla 3.16 Datos de densidad de la yuca.....	34
Tabla 3.17 Datos de conductividad térmica de la yuca.....	35
Tabla 3.18 Costos de Materia Prima y Material de Empaque por (Batch).....	40
Tabla 3.19 Costos de Mano de Obra Directa .....	41
Tabla 3.20 Costos de Mano de Obra Indirecta .....	42
Tabla 3.21 Porcentaje - Depreciación .....	43
Tabla 3.22 Depreciación de equipos de producción .....	43
Tabla 3.23 Consumo de equipos durante el proceso .....	44
Tabla 3.24 Consumo de suministros .....	44
Tabla 3.25 Consumo de suministros y materiales .....	45
Tabla 3.26 Costos de producción final .....	45
Tabla 3.27 Punto de Equilibrio .....	46

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

Alrededor de 170.000 toneladas de yuca se cosechan anualmente en el Ecuador (Sabando & Aroca, 2016). La mayoría de este cultivo se exporta como raíces de yuca principalmente al mercado de Estados Unidos y Colombia (Sabando & Aroca, 2016). El cultivo de yuca mínimamente procesado o producto de IV gama requiere de una serie de tratamientos para su conservación puesto que, al pasar por las principales operaciones unitarias como pelado, corte y lavado, éstas influyen en el cambio de su apariencia visual, textura, sabor, olor y propiedades nutricionales. La yuca es un alimento altamente perecedero que después de su cosecha se deteriora rápidamente sufriendo un pardeamiento enzimático, esta sintomatología consiste en la aparición de estrías de coloración de blanco a pardo; dicha manifestación aumenta los costos y riesgos ocasionando pérdidas económicas a los productores (Cubas C. , 2009). Por tal motivo el control de la enzima polifenol oxidasa es una de las principales actividades en el control de calidad de la yuca. Este control es relevante porque las pérdidas de materia prima se dan principalmente por el pardeamiento enzimático.

### 1.2 Justificación del problema

Este proyecto busca diseñar una línea de producción de yuca congelada con la finalidad de reducir las mermas causadas por el pardeamiento, fenómeno ocasionado por acción de la enzima polifenol oxidasa; mejorando el rendimiento del proceso y evitar pérdidas económicas en la industria por rechazo de producto no conforme. Este trabajo de investigación evalúa aspectos de conservación y establece parámetros óptimos tanto en la postcosecha como en el proceso de transformación; y la preservación bajo

condiciones de temperatura, sanitización, y tiempo de congelación obteniendo un producto de calidad hasta el momento de su preparación.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar una línea de proceso de yuca congelada para mercado de exportación definiendo los parámetros de proceso para la reducción de pérdidas por pardeamiento enzimático.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Evaluar un modelo matemático que se ajuste al proceso de cinética enzimática para inhibir el pardeamiento.
2. Establecer los parámetros óptimos de proceso de yuca congelada de exportación para el diseño de la línea.
3. Determinar la viabilidad de la propuesta planteada del diseño en base al análisis de costo del producto que permita precisar la rentabilidad del proyecto.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Yuca**

La yuca también conocida como “mandioca o Cassava” es un tubérculo que proviene del reino *Plantae*, perteneciente a la familia *Euphorbiaceae*, denominada *Manihot esculenta* Crantz (Flores & García, 2016). Del género *Manihot* se han descrito unas 98 especies, del cual solo la yuca tiene relevancia en la economía. La yuca se desarrolla en diferentes condiciones tropicales que incluye a los trópicos de tierras bajas cálidos y húmedos, de altitud media y, subtrópicos con verano lluvioso e inviernos fríos. Su crecimiento prospera de mejor manera en suelos fértiles, con una ventaja ante otros cultivos ya que posee una capacidad de adaptación ante suelos ácidos

y períodos largos de sequía. Su desarrollo, una vez sembrada hasta ser cosechada, dependerá de las condiciones ambientales a las que se exponga el tubérculo; comprendiendo un período de 7 a 12 meses en área cálidas y 12 meses en regiones de alturas que logren los 1300 a 1800 msnm (Aristizábal, Sánchez, & Mejía, 2007).

La yuca es un producto de gran aceptación a nivel mundial como fuente alimenticia incorporándose en la dieta a más de 1.000 millones de personas. Además de la importancia socioeconómica que tiene, no solo como uno de los componentes principales de la canasta familiar, sino también contribuye en la generación de empleo como materia prima en la elaboración de balanceados para animales, fibra para los fabricantes de textiles, papel y adhesivos, el almidón o fécula para la industria de alimentos y a las farmacéuticas (Cubas C. , 2009).

#### 1.4.2 Valor Nutricional

La yuca está clasificada como la cuarta fuente de calorías después del arroz, azúcar y maíz. Forma parte de la alimentación de los ecuatorianos, debido a su aporte nutricional por contener hasta un 35% de carbohidratos y 1,5% de proteínas (Martín, 2014). La Tabla 1.1 muestra la composición química y nutricional de la yuca fresca y seca.

**Tabla 1.1 Composición química y nutricional de la yuca fresca y seca (*M. esculenta Crantz*) [Koch, 1992]**

<b>Contenido</b>	<b>Fresco congelado</b>	<b>Seco</b>
<b>Ingredientes</b>	<b>%</b>	
Agua	65	14
Proteína	0.95	2.3
Grasa	0.22	0.54
Carbohidratos	30.4	74.8

Fibra	2.8	6.8
Minerales	0.63	1.63
<b>Vitaminas</b>		<b>µg/100g</b>
Carotenoides	28	70
Vitamina B1	57	140
Vitamina B2	28	70
Vitamina Ca	28	70a
<b>Cianógenos</b>		<b>ppm</b>
Ácido hidrocianico	285	699
<b>Valor Nutricional</b>	<b>KJ/100 g</b>	
	526	1331

### 1.4.3 Variedades de Yuca

En la actualidad existen más de 5.000 variedades de yuca, éstas se clasifican en 2 grandes grupos: amargas o dulces, según el alto o bajo contenido de cianuro en las raíces respectivamente. El Ecuador posee gran diversidad de semillas de yuca; esto significa que, por la variedad de semillas, diversos tipos de yuca pueden crecer en todo el país (Vivanco, 2012). La Tabla 1.2 menciona algunas variedades de yuca en el Ecuador.

**Tabla 1.2 Variedades de yuca en el Ecuador [Vivanco, 2012]**

<b>VARIEDADES DE YUCA LOCALES EXISTENTES EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL ECUADOR</b>		
<b>COSTA</b>	<b>SIERRA</b>	<b>ORIENTE</b>
Tres meses	Crema	Lago Agrio
Taureña	Patucha	Puca lumu
Amarilla	Valencia	Llana lumu
Quevedeña	Montañés	Yura lumu
Espada	Crema Blanca	Accha lumu
Mulata	Crema Amarilla	Jatun lumu
Negra	Negra	Guagua lumu
Criolla	Morada pequeña	Ushpa lumu

Pata de paloma	Morada	Huacamayo lumo
Blanca	Criolla	Niña lumo
Chola	Para de paloma	Quilu lumo
Cema	Yema de huevo	
Crema Amarilla	Escancela	
Yema de huevo	Boliviana morada	
Morena		

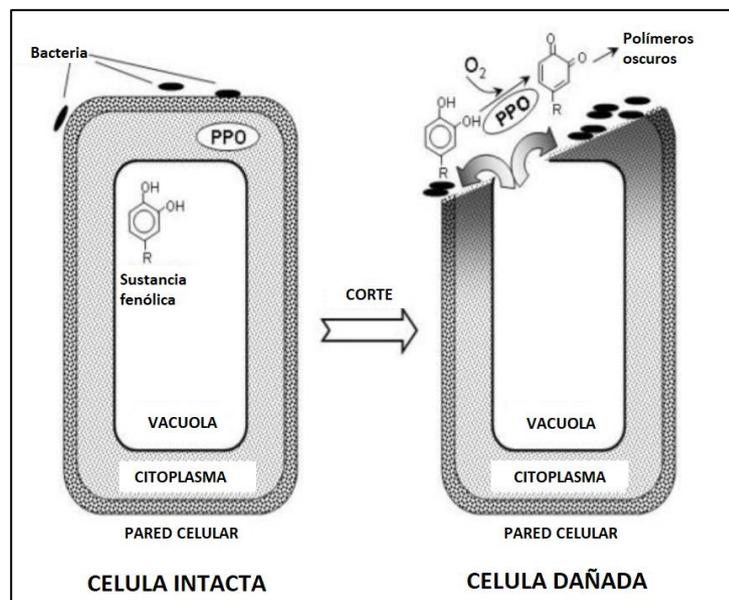
#### 1.4.4 Producción de Yuca en el Ecuador

El Ecuador es un país donde los productores cosechan aproximadamente 170.000 toneladas de yuca anualmente. La región de Manabí se destaca por ser mayor productor en la Costa, Cotopaxi en la provincia de la Sierra y Morona Santiago en la Amazonía (Viteri, 2014). Este tubérculo se exporta a más de 10 países, siendo el principal consumidor Estados Unidos con un 43% de la exportación ecuatoriana durante los años 2004-2008, seguido de Reino Unido, Canadá y Francia (Viteri, 2014). La variedad de yuca que ha obtenido un alto rendimiento de cosecha con más de 30 Ton/ha pertenecen al grupo de “Las Negras” siendo éstas la Escancela morada y la Valencia (Hinostroza, Mendoza, Navarrete, & Muñoz, 2014).

#### 1.4.5 Pardeamiento Enzimático

El pardeamiento enzimático es un fenómeno caracterizado por la transformación de sustratos fenólicos a o-quinonas por un proceso de oxidación. Las o-quinonas son compuestos altamente reactivos formando pigmentos oscuros o coloración parda – las melaninas. Esta reacción es catalizada por varias enzimas comunes: fenolasa, peroxidasa (POD) y polifenol oxidasa (PPO) que actúan sobre los polímeros de las paredes celulares provocando modificaciones en la textura y coloración (Silveira A. , 2017). La amplitud de este fenómeno sucede a causa de varios factores: climatológicos, manejo del tubérculo, recolección, por estrés mecánico durante la transformación

de materia prima y condiciones de almacenamiento. El proceso de pardeamiento enzimático inicia con la rotura de las membranas del tejido vegetal, puesto que, durante la operación unitaria de pelado y cortado muchas células sufren daños en sus membranas. Liberando así enzimas oxidativas que en presencia de  $O_2$  el pardeamiento ocurre caracterizado por la presencia de pigmentos marrones o pardos; afectando la apariencia del producto y convirtiéndolo comercialmente en indeseable (Bobo, 2014). En muchas de las ocasiones, las alteraciones enzimáticas se presentan durante el almacenamiento del producto, limitando la vida de estante (Martín, 2014). La Figura 1.1 muestra en detalle el pardeamiento que se da en la zona dañada del tejido vegetal.



**Figura 1.1 El pelado y cortado estimula la oxidación celular causando pardeamiento en la zona dañada del tejido [Martín, 2014].**

#### 1.4.6 Inhibidores Enzimáticos de la Polifenol oxidasa.

La actividad de la enzima polifenol oxidasa que evoluciona por la concentración de compuestos fenólicos, la temperatura, pH y oxígeno disponible en los tejidos vegetales puede ser inhibida a través de agentes reductores, quelantes y sustancias antioxidantes; éstas

últimas actúan reduciendo las quinonas a difenoles no coloreados. Los antioxidantes que destacan son los sulfitos, ácido cítrico, ácido ascórbico, dióxido de azufre y grupos tiol (L-cisteína, glutatión) (Inestroza, Marques, Gomez, Galati, & Ribeiro, 2015).

#### **1.4.6.1 Sustancias Antioxidantes**

Entre los inhibidores de la actividad polifenol oxidasa destacan el ácido ascórbico y cítrico, el dióxido de azufre y la L-cisteína. Los inhibidores actúan sobre el centro activo de la enzima mediante la reducción de las o-quinonas formada. Estas sustancias incorporadas deben ser altamente activos en concentraciones bajas y no ser tóxicos; además de no afectar negativamente en sabor y olor de los productos almacenados (Sikora & Swieca, 2018).

La utilización de ácidos tipo cítrico, ascórbico, málico son efectivos para la acidificación del medio con valores de pH por debajo de 4, sustentado su uso como inhibidor. La enzima polifenol oxidasa tiene una actividad enzimática a valores óptimos de pH 5 a 7, siendo sensible a pH bajos, por lo tanto, los acidulantes determinan en gran medida el control del pardeamiento (Silveira A. C., 2017). Generalmente las enzimas en su centro activo poseen iones metálicos como lo es el cobre. El ácido cítrico actúa como quelante con capacidad secuestrante de metales, removiendo aquellos iones y de esa forma lograr inhibir la actividad catalítica de la enzima polifenol oxidasa (Martín, 2014). El ácido L-ascórbico actúa como agente antioxidante para el antienviejecimiento en zumos de frutas, así como en verduras y frutas en conservas; por esta razón funciona como inhibidor de la actividad de la enzima polifenol oxidasa ya que reduce la etapa de polimerización de las reacciones de pardeamiento. (Wai & Lee, 2014)

#### **1.4.7 Cinética Enzimática**

La cinética enzimática se encarga del estudio de la velocidad de reacciones catalizadas por enzimas. Esta velocidad de reacción puede medirse con relativa facilidad puesto que en muchos casos no es preciso purificar la enzima. La medida se realiza en condiciones óptimas de temperatura, de pH y presencia de cofactores, además se utilizan elevadas concentraciones de sustrato (Navarro, 2019). La disminución de energía de activación de las reacciones enzimáticas señala que un descenso de temperatura tiene poco efecto sobre la velocidad de reacción. Así mismo, muchos catalizadores industriales no poseen cierta característica importante como lo es su especificidad, razón por lo cual impide su uso para alterar componentes específicos de un alimento (Ristoff, 2013).

Las enzimas son proteínas globulares y a su vez, catalizadores de mayor complejidad; en presencia de temperaturas que oscilan cerca de los 37°C, la velocidad de reacción química aumenta en un factor de  $10^{12}$  a  $10^{20}$  donde es contrarrestado por la pérdida de la actividad catalítica de la enzima debido a la desnaturalización térmica (Ristoff, 2013).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Simulación de cinética enzimática

La simulación sirvió como parte del algoritmo de cálculo de un estudio de control y optimización que se inició con datos obtenidos de un artículo científico realizado por Wai & Lee en el 2014, que permitió determinar los requerimientos de la herramienta de desarrollo. Se hizo uso del programa GetData Graph Digitizer, herramienta capaz de digitalizar diagramas gráficos lo cual permitió acceder a coordenadas estableciendo ejes por defecto. Además, el análisis de los datos experimentales de la actividad enzimática de la enzima polifenol oxidasa se realizó con el software Microsoft Office Excel.

### 2.2 Modelo cinético Michaelis-Menten

El modelo de Michaelis-Mente se detalla en la ecuación 2.1 el cual se transformó algebraicamente en un modelo lineal como se describe en la ecuación 2.3. Las constantes cinéticas de Michaelis-Menten se determinaron mediante el desarrollo experimental calculados a través del diagrama de linealización Lineweaver-Burk  $\left(\frac{1}{v} \text{ vs. } \frac{1}{[S]}\right)$  utilizando como herramienta gráfica para calcular los parámetros cinéticos de la enzima. La representación gráfica de Lineweaver-Burk permitió estimar el  $K_m$ ,  $V_{max}$  y especificidad del sustrato  $\left(\frac{K_m}{V_{max}}\right)$ .

$$V_o = \frac{V_{m\acute{a}x} * [S]}{K_m + [S]} \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{V_o} = \frac{K_m + [S]}{V_{m\acute{a}x} [S]} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{V_o} = \left(\frac{K_m}{V_{m\acute{a}x}}\right) \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_{m\acute{a}x}} \quad (2.3)$$

$$y = mx + b \quad (2.4)$$

### **2.3 Inhibición de la Polifenol oxidasa**

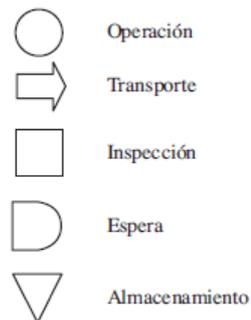
Se revisó la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-CODEX 192:2013 lo cual indica como se establece el adecuado uso de los aditivos alimentarios. Se analizó el estudio utilizando ácido cítrico y ascórbico como inhibidores de la enzima polifenol oxidasa, y los efectos de estos aditivos sobre el PPO haciendo uso de catecol como sustrato a una temperatura de 30°C (Manohan & Wong, 2012) y pH 7 según la bibliografía de Wai & Pei Lee (2014). La actividad PPO se determinó sin inhibidor y en presencia de inhibidores en diferentes concentraciones (1mM, 2mM y 3mM).

### **2.4 Diseño de Plantas**

Se siguió el modelo sistemático de Distribución en Planta SLP (Systematic Layout Planing) para la elaboración del diseño de plantas, el cual se establecen los diagramas relacionales tanto de actividades como de espacios, el recorrido de los productos, los factores a tener en cuenta y limitaciones para plantear la alternativa más conveniente de distribución para la línea de proceso (Vanaclocha, 2004).

#### **2.4.1 Análisis de recorrido sencillo**

Implica una secuencia de los movimientos de los materiales a lo largo de las diferentes etapas del proceso, así como la amplitud o la necesidad de aquellos desplazamientos. Para el diagrama de recorrido sencillo se usó de la simbología establecida por ASME (American Society of Mechanical Engineers), tal como se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Símbolos del recorrido sencillo del proceso [Vanaclocha, 2004]**

#### **2.4.2 Relación entre actividades**

La relación entre las actividades del proceso fue determinada utilizando una tabla relacional de actividades (T.R.A.) en el cual se enlistaron las actividades dentro del proceso y se agruparon las actividades afines, para evaluar la necesidad de proximidad entre las diversas actividades bajo diferentes puntos de vista. Posteriormente se otorgó un motivo y una valoración establecida en la necesidad de proximidad entre ellas. La codificación, motivo, relación y color asociado de la valoración se señala en la Tabla 2.1 y 2.2.

**Tabla 2.1 Escala de valoración de la tabla relacional de actividades (T.R.A.) [Vanaclocha, 2004]**

<b>Código</b>	<b>Indica relación</b>	<b>Color asociado</b>
A	Absolutamente necesaria	Rojo
E	Especialmente importante	Amarillo
I	Importante	Verde
O	Ordinaria	Azul
U	Sin importancia	-
X	Rechazable	Marrón

**Tabla 2.2 Motivos de relación [Vanaclocha, 2004]**

Motivo	
1	Proximidad del proceso
2	Higiene
3	Control
4	Frío
5	Malos olores, ruido...
6	Seguridad del producto
7	Utilización de material común
8	Accesibilidad

Para el total de relaciones permitida se determinó calculando los pares de relaciones utilizando la ecuación 2.5. Para evitar errores hay que limitar los porcentajes de clasificación posibles, lo cual se asignó un número dentro del rango detallado en la Tabla 2.3

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.5)$$

**Tabla 2.3 Porcentaje de permitido por relación [Vanaclocha, 2004]**

Relación	% de Clasificación
A	2-5
E	3-10
I	5-15
O	10-25
U	Restantes
X	Restantes

### 2.4.3 Determinación de los espacios

La estimación de la superficie total fue cuantificada teniendo en cuenta la superficie estática, que corresponde a instalaciones y equipos; la superficie de gravitación, correspondiente al espacio que será ocupado por los operarios y materiales para la operación; y la superficie de evolución, que corresponde al espacio necesario para el desplazamiento del personal y mantenimiento (Vanaclocha, 2004). Se elaboró un

diagrama de equipos de acuerdo con los equipos necesarios para cada proceso haciendo consideración del volumen de producción y parámetros del proceso.

Para la superficie estática ( $S_s$ ), se calculó tomando en cuenta la cantidad de equipos necesarios y dimensiones de estos por el área. Para el cálculo de la superficie de gravitación ( $S_g$ ) se aplicó la ecuación 2.6, donde N es el número de lados lo cual debe ser utilizado por el equipo.

$$S_g = S_s * N \quad (2.6)$$

Para el cálculo de la superficie de evolución ( $S_e$ ) se aplicó la ecuación 2.7, donde K es un coeficiente que varía entre 0,05 y 3. Para este proyecto se estableció valor de 1,5 a K.

$$S_e = (S_s + S_g) \times K \quad (2.7)$$

#### **2.4.4 Distribución de planta**

La generación del “layout” adecuado de la planta se realizó con el software CORELAP 1.0 (Computerized Relationship Layout Planning), lo cual se ingresó el número de departamentos a implementar y los datos establecidos en el diagrama de relación de actividades, obteniendo así la distribución de la planta.

### **2.5 Costos**

Para la estimación de costos se consideró la producción por batch tomando como referencia una capacidad de producción deseada, de 2450 Kg/día, con un total de 180 cajas, cada una con 13,62 Kg de producto. Los costos directos considerado fueron materia prima, equipos, material de

empaque y mano de obra directa e indirecta, para los costos indirectos se tomó en cuenta los servicios básicos como agua, gas, energía eléctrica.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Caracterización de la enzima Polifenol Oxidasa (PPO)

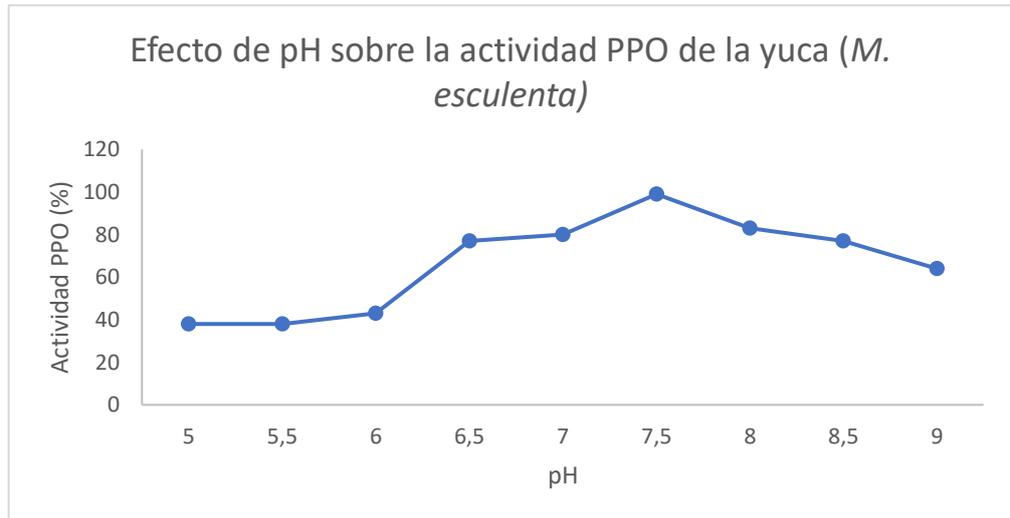
#### 3.1.1 pH óptimo

El efecto del pH sobre la actividad de la PPO en yuca que realizaron Wai & Lee en su estudio en el 2014, se analizó en un rango de 5,0 a 9,0. La actividad de la PPO fue expresada en forma de porcentaje residual (%), donde se utilizó el programa GetData Graph Digitizer para conocer los puntos de coordenadas. Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Actividad de PPO (%) según la variación de pH [Wei & Lee, 2014]**

pH	Actividad PPO (%)
5	38
5,5	38
6	43
6,5	77
7	80
7,5	99
8	83
8,5	77
9	64

En base a la información obtenida de la Tabla 3.1 se procedió a realizar una gráfica de líneas con la herramienta de Microsoft Office Excel como se muestra en la Figura 3.1, lo cual se observa que el pH óptimo de la enzima PPO era de 7,5. Esto significa que la actividad enzimática disminuye a pH inferiores e inclusive a valores de pH superiores al óptimo.



**Figura 3.1 Efecto de pH sobre la actividad PPO de yuca (*M. esculenta*) [Wei & Lee, 2014]**

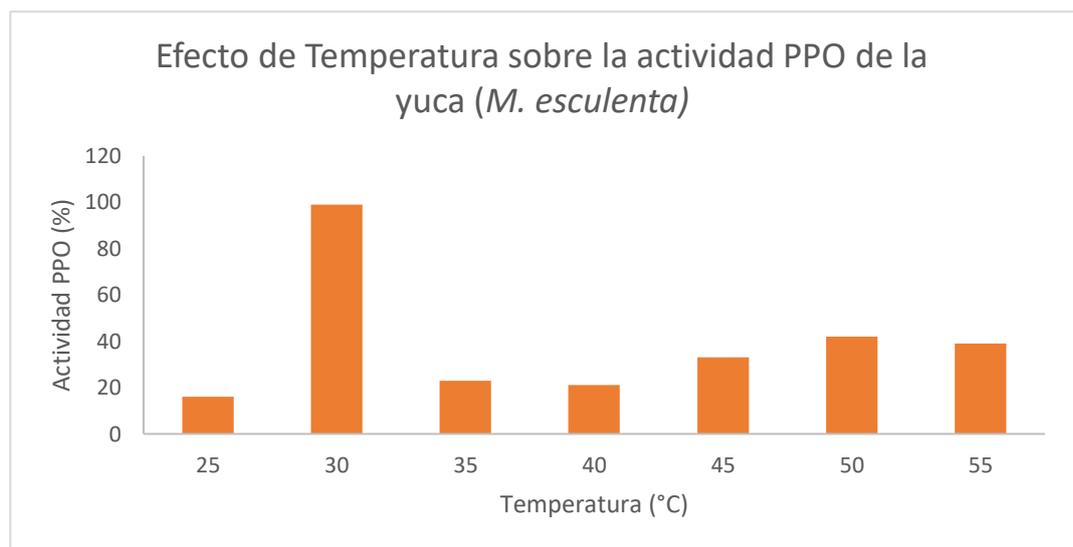
### 3.1.2 Temperatura óptima

La actividad de la PPO fue expresada en forma de porcentaje residual (%); los datos de los puntos de coordenadas que se obtuvieron con el programa GetData Graph Digitizer se detalla en la Tabla 3.2 a diferentes temperaturas que varían de 25°C a 55°C como mencionan Manohan & Wong en su estudio en el 2012.

**Tabla 3.2 Actividad de PPO (%) según la variación de temperatura [Manohan & Wong, 2012]**

Temperatura	Actividad PPO (%)
25	16
30	99
35	23
40	21
45	33
50	42
55	39

En base a la información obtenida de la Tabla 3.2 se procedió a realizar una gráfica de barras con la herramienta de Microsoft Office Excel como se muestra en la Figura 3.2. Se analizó la actividad de la PPO observando una máxima actividad en la yuca a 30°C y donde disminuye rápidamente al incrementar la temperatura; esto se debe posiblemente a una desnaturalización térmica de la PPO (Manohan & Wong, 2012).



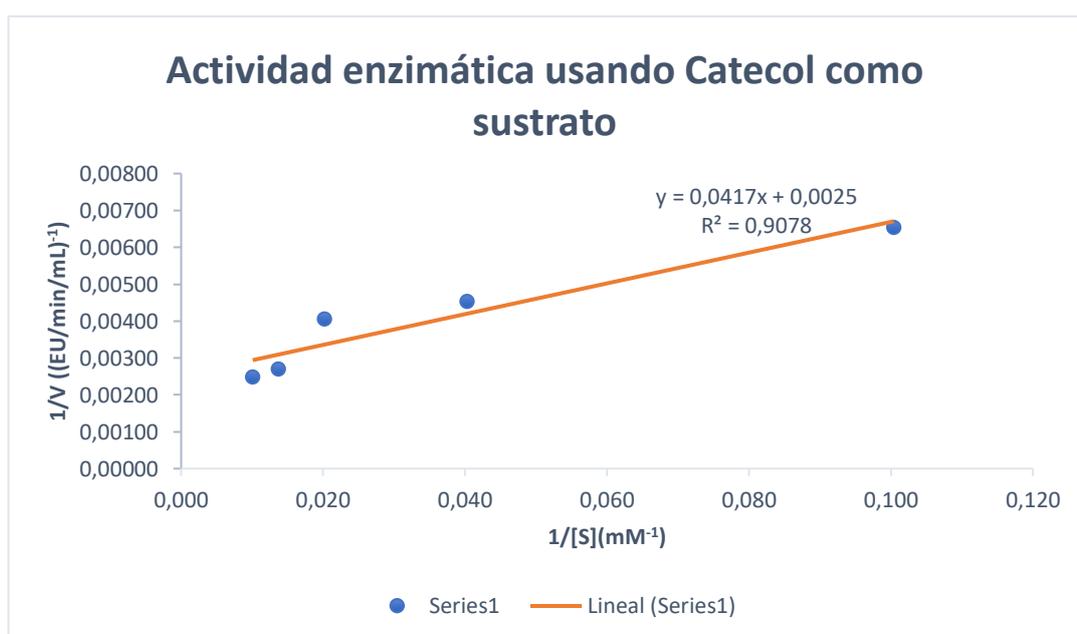
**Figura 3.2 Efecto de la temperatura sobre la actividad PPO de yuca (*M. esculenta*) [Manohan & Wong, 2012]**

### 3.2 Cinética enzimática y especificidad del sustrato

Se evaluó como guía el estudio que realizaron Wai & Pei Lee en el 2014, usando catecol como sustrato con un pH de 7 a 30°C (Manohan & Wong, 2012) a varias concentraciones de 10 mM a 100 mM. Para la obtención de los valores de la constante de Michaelis-Mente ( $K_m$ ) y la velocidad máxima ( $V_{max}$ ) de la enzima se determinó simulando un gráfico de Lineweaver-Burk con la herramienta de Microsoft Office Excel tal como se muestra en la Figura 3.3. y se calculó la especificidad del sustrato ( $K_m/V_{max}$ ). Los puntos de coordenadas fueron obtenidos mediante el programa GetData Graph Digitizer como de detalla en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Concentración de Catecol y velocidad inicial [Durazno & Michelle, 2020]**

S (mM)	V <sub>o</sub> (EU/min/mL)	1/[S] (mM <sup>-1</sup> )	1/V <sub>o</sub> ((EU/min/ml) <sup>-1</sup> )
99,200	403,410	0,010	0,00248
72,941	369,791	0,014	0,00270
49,600	246,528	0,020	0,00406
24,800	220,634	0,040	0,00453
9,960	153,017	0,100	0,00654



**Figura 3.3 Actividad enzimática usando catecol como sustrato [Durazno & Espinoza, 2020]**

La enzima exhibió un valor de  $K_m$  de 16,68 mM y una  $V_{max}$  de 400 EU/min/mL tal como se muestra en la Tabla 3.4 que fueron calculados con los valores del modelo matemático que se obtuvo de la gráfica descrita anteriormente.

**Tabla 3.4 Valores de Km y Vmax de la enzima PPO para *M. esculenta* [Durazno & Michelle, 2020]**

V <sub>max</sub> (EU/min/mL)	K <sub>m</sub> (mM)	V <sub>max</sub> /K <sub>m</sub> (min <sup>-1</sup> )
400	16,68	23,98

### 3.3 Efecto de los inhibidores

Siguiendo con la bibliografía de Wai & Pei Lee en el 2014, el ácido ascórbico y cítrico fueron analizados como inhibidores de la PPO. La actividad de la enzima fue determinada sin inhibidor y en presencia de inhibidor a tres diferentes concentraciones (1, 3 y 5 mM) usando catecol como sustrato. En la Tabla 3.5 y 3.6 se pueden observar los valores de velocidad inicial por cada concentración de los dos inhibidores de modo que se consiguió simular gráficas de Lineweaver-Burk lo que permite conocer cuál de los aditivos resultó ser competitivo.

**Tabla 3.5 Velocidad de reacción a diferentes concentraciones del Ácido Ascórbico [Durazno & Espinoza, 2020]**

	[V]	[V]	[V]	[V]	1/[V]	1/[V]	1/[V]	1/[V]
1/[S]	Inicial (A <sub>0</sub> )	1,0 mM	3,0 mM	5,0 mM	Inicial (A <sub>0</sub> )	1,0 mM	3,0 mM	5,0 mM
0,010	403,410	108,232	92,448	83,726	0,00248	0,00924	0,01082	0,01194
0,014	369,791	90,561	80,682	73,958	0,00270	0,01104	0,01239	0,01352
0,020	246,528	70,436	64,312	49,306	0,00406	0,01420	0,01555	0,02028
0,040	220,634	43,082	35,786	31,250	0,00453	0,02321	0,02794	0,03200
0,100	153,017	20,079	15,042	14,645	0,00654	0,04980	0,06648	0,06828

\*Inicial (A<sub>0</sub>) = actividad de la enzima sin inhibidor

**Tabla 3.6 Velocidad de reacción a diferentes concentraciones del Ácido Cítrico [Durazno & Espinoza, 2020]**

	[V]	[V]	[V]	[V]	1/[V]	1/[V]	1/[V]	1/[V]
1/[S]	Inicial (A <sub>0</sub> )	1,0 mM	3,0 mM	5,0 mM	Inicial (A <sub>0</sub> )	1,0 mM	3,0 mM	5,0 mM

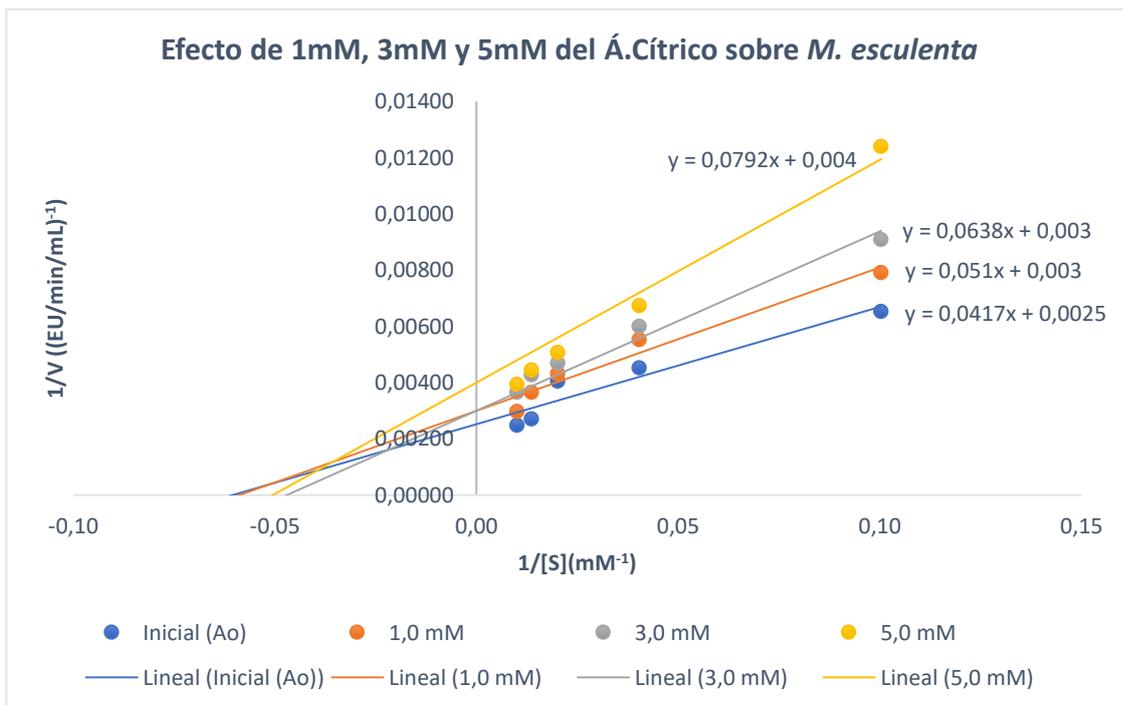
0,01	403,410	336,016	274,220	253,799	0,00248	0,0030	0,0036	0,0039
0,01	369,791	274,220	233,894	225,068	0,00270	0,0036	0,0043	0,0044
0,02	246,528	231,622	213,010	197,166	0,00406	0,0043	0,0047	0,0051
0,04	220,634	180,736	166,833	148,181	0,00453	0,0055	0,0060	0,0067
0,10	153,017	126,228	109,941	80,598	0,00654	0,0079	0,0091	0,0124

\*Inicial ( $A_0$ ) = actividad de la enzima sin inhibidor

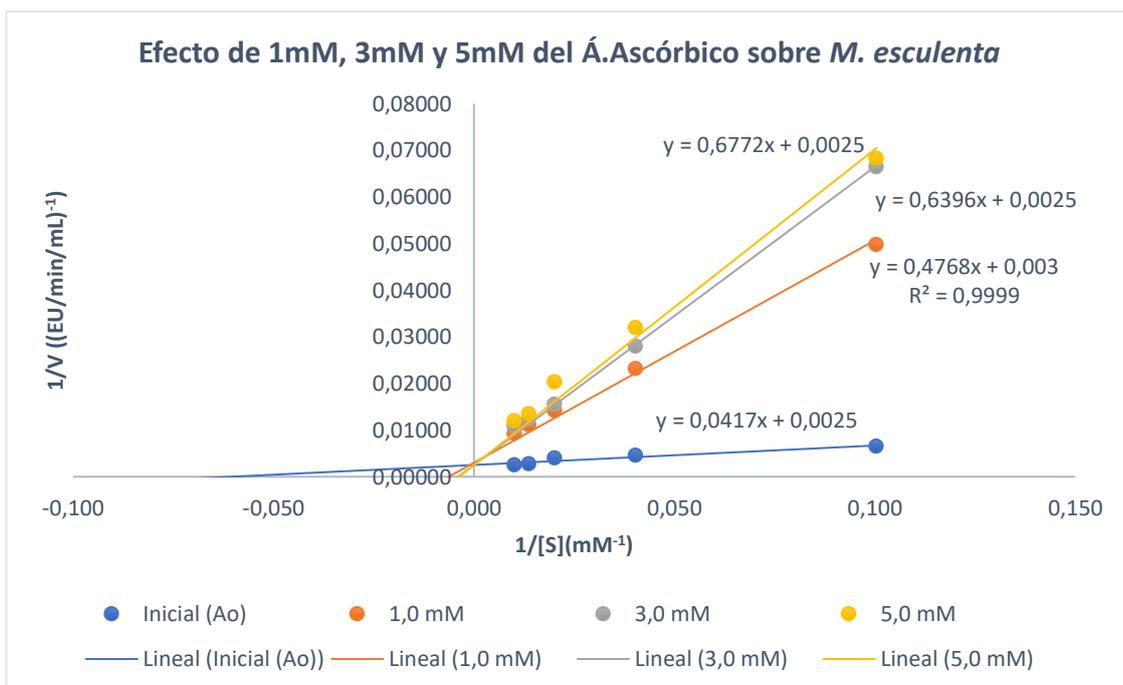
En la Figura 3.4 y 3.5 se observa a partir del diagrama de Lineweaver-Burk que el ácido ascórbico fue el inhibidor más efectivo, dado que explica un alto valor de  $V_{max}$  de la enzima polifenol oxidasa en yuca como se muestra en la Tabla 3.7. Un inhibidor competitivo puede disminuir la velocidad de catálisis al reducir la proporción de moléculas enzimáticas unidas a un sustrato. Por otro lado, el ácido cítrico resultó ser un inhibidor no competitivo puesto que no puede superarse aumentando la concentración del sustrato. Este estudio evidenció el uso del L-ascórbico como agente antioxidante para el tratamiento de la yuca.

**Tabla 3.7 Efecto de Inhibidores sobre la actividad de PPO en yuca *M. esculenta* [Wai & Lee, 2014]**

Inhibidor	Concentración (mM)	$V_{max}$ (EU/min/mL)	$K_m$ (mM)
Ácido Cítrico	1	333,33	17,00
	3	333,33	21,27
	5	250,00	19,80
Ácido Ascórbico	1	333,33	158,93
	3	400,00	255,84
	5	400,00	270,88



**Figura 3.4 Efecto de 1mM, 3mM y 5mM del Á. Cítrico sobre *M. esculenta***  
**[Durazno & Espinoza, 2020]**



**Figura 3.5 Efecto de 1mM, 3mM y 5mM del Á. Ascórbico sobre *M. esculenta***  
**[Durazno & Espinoza, 2020]**

### 3.4 Diagrama de flujo del proceso de producción de yuca congelada

A continuación, se detalla el diagrama de flujo del proceso en la Figura 3.6 donde se visualizará las actividades implicadas mostrando una relación secuencial entre ellas. Estas etapas fueron adaptadas en base a 2 estudios de línea de proceso de yuca mínimamente procesada, por Cubas en el año 2009 y Martín en el año 2014.



Figura 3.6 Diagrama de flujo del proceso de yuca congelada [Durazno & Espinoza, 2020]

#### **3.4.1 Recepción de materia prima**

Basado en la NTE INEN 1760:1990 establece los requisitos generales que debe cumplir la raíz fresca de mandioca para consumo humano. A fin de obtener una materia prima de buena calidad.

#### **3.4.2 Selección**

El producto debe ser seleccionado, retirando raíces fisiológicamente deterioradas, aquellas que vienen dañadas por malas prácticas de cosecha o daños por insectos.

#### **3.4.3 Lavado y sanitizado**

Se realiza el lavado con agua potable y dióxido de cloro a 200 ppm, a 10°C por un tiempo de 10 minutos en una lavadora por aspersion con la finalidad de retirar las impurezas y reducir la carga microbiana superficial del producto.

#### **3.4.4 Pelado y cortado**

Esta etapa es manual con el uso de cuchillo afilados de acero inoxidable donde los operarios retiran totalmente la cáscara y se realizan cortes con dimensiones de 6-9 cm de largo, 4-5 de ancho y 2 cm de espesor.

#### **3.4.5 Sanitizado**

El producto cortado es sometido a un sanitizado rápido en agua con dióxido de cloro en concentración de 100 ppm, a 10°C por un tiempo de 10 segundos, posteriormente se hace un enjuague con agua potable para retirar residualidad de cloro.

#### **3.4.6 Inmersión**

Se procede a una inmersión en ácido ascórbico para control del pardeamiento enzimático. Se sumergen los trozos de yuca en tanques de inmersión con una concentración de 0,1% de a. ascórbico por un tiempo de 5 minutos (C., Luzbel, R., & Willy, 2015).

#### **3.4.7 Escurrido**

El producto debe ser colocados en gavetas por un tiempo de 3 minutos para retirar el exceso de líquido acumulado en la superficie del producto.

#### **3.4.8 Congelado**

Se realiza en túneles de congelación estático a una temperatura de -18°C a -25°C; bajo estas condiciones se estima tiempos de congelación de 1 a 2 horas aproximadamente.

#### **3.4.9 Empacado**

Se realiza el empaque en fundas de polietileno de baja densidad (PEBD), espesor 3  $\mu\text{m}$  que contendrá 5 libras de yuca mínimamente procesada.

#### **3.4.10 Almacenamiento**

El producto se mantendrá en óptimas condiciones de almacenamiento a una temperatura de -18°C hasta su respectiva distribución.

### 3.5 Diseño de Plantas

#### 3.5.1 Diseño de planta para producción de yuca congelada

##### 3.5.1.1 Diagrama de recorrido

A partir del diagrama de flujo del proceso mostrado en la Figura 3.6, se elaboró el diagrama de recorrido sencillo, la cual se visualiza en la Figura 3.7. En este se puede observar que la etapa de selección, cortado y pelado, y empacado se definieron como operaciones de inspección; por otro lado, la etapa de inmersión y congelación como operaciones de espera.

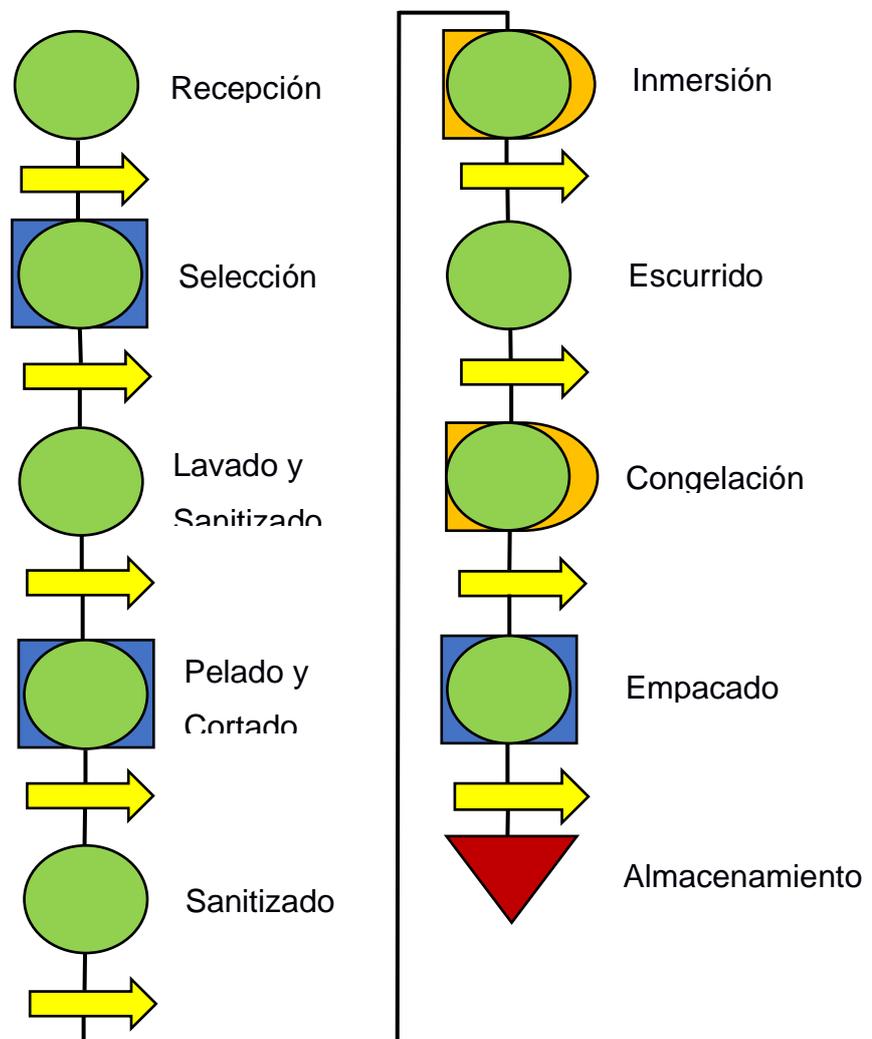


Figura 3.7 Diagrama de recorrido sencillo para el proceso de yuca congelada [Durazno & Espinoza, 2020]

### 3.5.1.2 Relación entre actividades

Las actividades del diagrama de flujo fueron agrupadas en etapas según el área que se lleva a cabo durante el proceso; en adición a esto se consideró un departamento de no proceso donde incluye el área administrativa, sanitaria y productos de limpieza para la distribución de la planta; teniendo en cuenta esto, se obtuvieron un total de 9 etapas como se detalla en la Tabla 3.8.

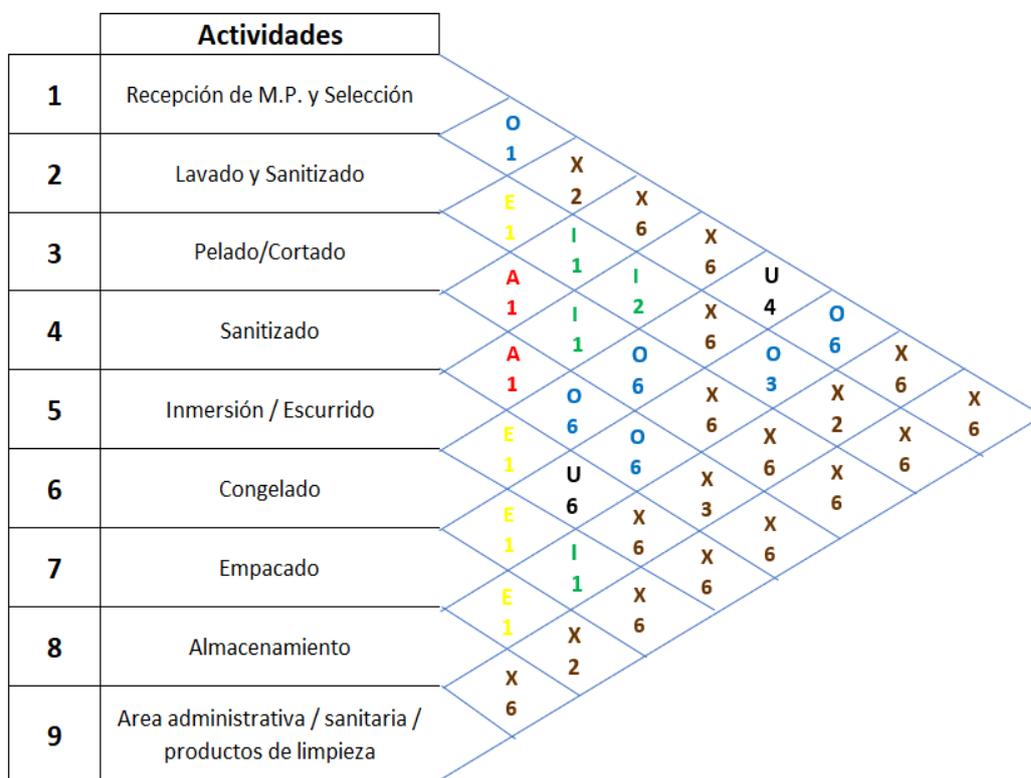
**Tabla 3.8 Agrupación de las actividades del proceso [Durazno & Espinoza, 2020]**

<b>Actividad</b>	<b>Etapas</b>
Recepción de M.P.	Recepción de M.P. / Selección
Selección	
Lavado y Sanitizado	Lavado y Sanitizado
Pelado y Cortado	Pelado y Cortado
Sanitizado	Sanitizado
Inmersión	Inmersión / Ecurrido
Ecurrido	
Congelación	Congelación
Empacado	Empacado
Almacenamiento	Almacenamiento / Distribución
Distribución	
Área administrativa/Sanitaria/Productos de limpieza	Área administrativa/Sanitaria/Productos de limpieza

Las relaciones entre las etapas se presentan en la Figura 3.8 que fueron calificadas bajo criterio con la valoración de necesidad de proximidad; para esto se realizaron cálculos que permitieron establecer el número de valoraciones A, E, I, O a ser asignados y los resultados se muestran en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9 Total de relaciones para el proceso de yuca congelada [Durazno & Espinoza, 2020]**

Código	Mínimo	Máximo	Total de Relaciones
A	0.72	1.80	2
E	1.08	3.60	4
I	1.80	5.40	4
O	3.60	9.00	6
U	Restantes	Restantes	2
X	Restantes	Restantes	18



**Figura 3.8 Diagrama de relación entre actividades del proceso [Durazno & Espinoza, 2020]**

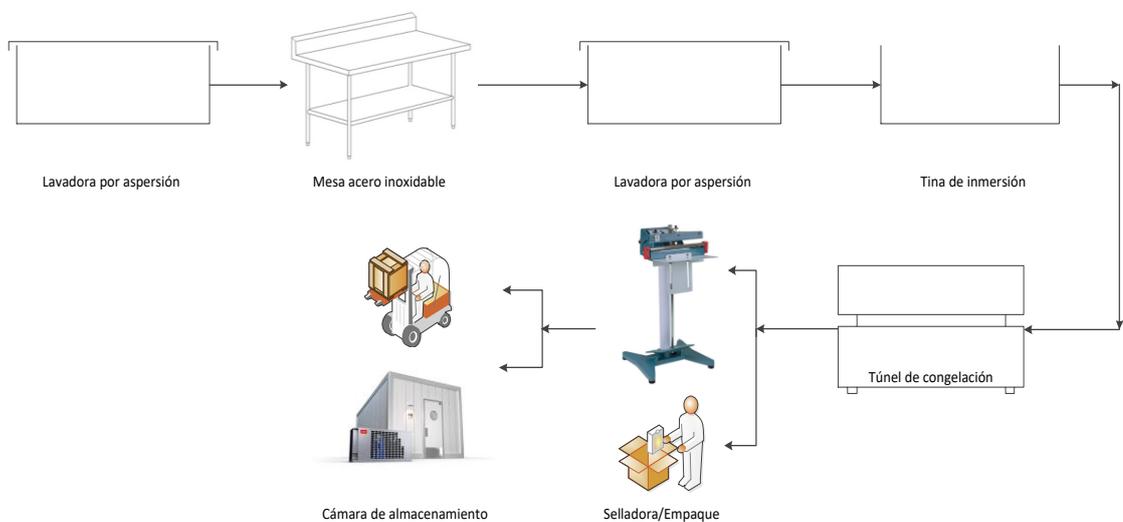
### 3.5.1.3 Determinación de los espacios

Teniendo en cuenta las necesidades en cada actividad, se establecieron equipos para el proceso que se detallan en el Apéndice A y se muestran gráficamente en la Figura 3.9. A

partir de las especificaciones de los equipos y dimensionamiento se hicieron los cálculos pertinentes de superficie estática (Ss), superficie de gravitación (Sg) y superficie de evolución (Se) la cual se detallan en el Apéndice B; a fin de obtener el área necesaria para cada departamento que se visualizan en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10 Área necesaria para cada actividad [Durazno & Espinoza, 2020]**

Actividad/Departamento	Área (m <sup>2</sup> )
Recepción M.P. y Selección	55.20
Lavado y Sanitizado	8.28
Pelado y Cortado	7.59
Sanitizado	8.28
Inmersión y Escurrido	6.99
Congelado	38.27
Empacado	0.51
Almacenamiento	138
Área administrativa / sanitaria / productos de limpieza	46
<b>Área Total</b>	<b>309.12</b>



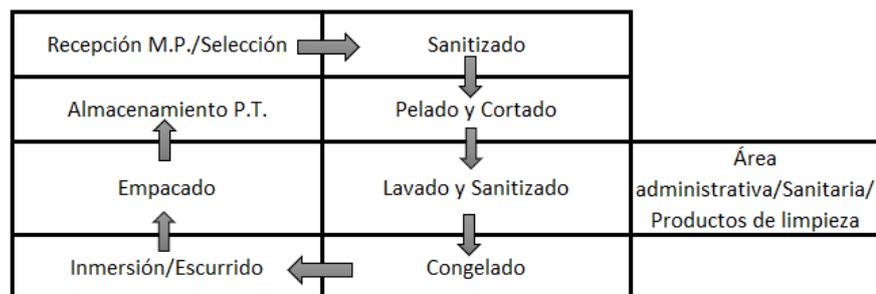
**Figura 3.9 Diagrama de equipos para el proceso de yuca congelada**  
 [Durazno & Espinoza, 2020]

### 3.5.1.4 Distribución de planta

A partir de la información obtenida en el diagrama de relación entre actividades y la determinación de espacios por cada departamento; se ingresaron aquellos datos en el software CORELAP 1.0 de manera que se obtuvo el layout sugerido de la planta tal como se muestra en la Figura 3.10 que se traduce a la codificación mostrada en la Figura 3.11.

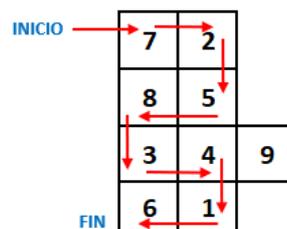


**Figura 3.10 Layout codificado generado por el software CORELAP 1.0**  
 [Durazno & Espinoza, 2020]



**Figura 3.11 Layout generado por el software CORELAP 1.0 [Durazno & Espinoza, 2020]**

Analizando el layout sugerido por el software ya antes mencionado, se procedió a realizar cambios en la distribución de los departamentos bajo el criterio de cumplir con el art. 76 de la Normativa Técnica Sanitaria de Alimentos Procesado (ARCSA, 2015), donde menciona que las áreas deben ser señalizadas y distribuidos siguiendo el principio de flujo hacia adelante, tal como se observa en la Figura 3.12 que se traduce a lo observado en la Figura 3.13.



**Figura 3.12 Layout codificado y modificado [Durazno & Espinoza, 2020]**



**Figura 3.13 Layout propuesto para la producción de yuca congelada [Durazno & Espinoza, 2020]**

### 3.6 Cálculos de tiempo de congelación

Se realizaron los cálculos de tiempos de congelación usando como datos el coeficiente de transferencia de calor del equipo, en este caso un túnel de congelación estático (Air Blast Freezer) como se muestra en la Tabla 3.11, la composición del producto, las temperaturas que influyen en el proceso de

congelación de yuca y las dimensiones del producto como se observan en la Tabla 3.12, Tabla 3.13 y Tabla 3.14 respectivamente.

**Tabla 3.11 Coeficientes de transferencia de calor [Singh & Heldman, 2014]**

Condición	Coeficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °C)
Túnel de congelación estático	22
Congelador de placas	56
Congelación por salmuera	56

**Tabla 3.12 Composición de la yuca fresca [Koch, 1992]**

Composición del Producto	
Agua	65
Proteína	0.95
Grasa	0.22
Carbohidratos	30.4
Fibra	2.8
Cenizas	0.63

**Tabla 3.13 Temperaturas que influyen en el proceso de congelación de yuca [Durazno & Espinoza, 2020]**

Temperaturas influyentes en el proceso	
Temperatura ambiente	25°C
Temperatura inicial	-25°C
Temperatura inicial de congelación	-1°C
Temperatura final del producto	-18°C

**Tabla 3.14 Dimensiones del producto empacado [Durazno & Espinoza, 2020]**

Dimensiones del producto empacado
-----------------------------------

Largo	9 cm
Ancho	5 cm
Espesor	2 cm

Determinación de las propiedades térmicas del alimento:

En la ecuación 3.1. se determinó la fracción de agua no congelada del producto a -18°C:

$$\ln X_A = \frac{\lambda}{R} * 0,018 * \left( \frac{1}{T_{AO}} - \frac{1}{T_A} \right) \quad (3.1)$$

$$\ln X_A = \frac{333,5}{8,314 \times 10^{-3}} * 0,018 * \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{255} \right)$$

$$e^{\ln X_A} = e^{-0,186}$$

$\therefore X_A = 0,83$  es el porcentaje de agua no congelada

Para conocer la fracción de agua congelada se determinó  $m_A$  a través de la ecuación 3.2; que está en función del contenido de agua expresada en fracción  $m_A$ , la masa de agua no congelada, ( $M_A$  y  $M_B$ ) como los pesos moleculares, y  $m_B$  como la masa de sólidos.

$$X_A = \frac{\frac{m_A}{M_A}}{\frac{m_A}{M_A} + \frac{m_B}{M_B}} \quad (3.2)$$

Como se desconoce  $M_B$ , se procedió a calcular tomando en consideración a  $T_A$  como temperatura inicial de congelación en la ecuación 3.1:

$$\ln X_A = \frac{\lambda}{R} * 0,018 * \left( \frac{1}{T_{AO}} - \frac{1}{T_A} \right) \quad (3.1)$$

$$\ln X_A = \frac{333,5}{8,314 \times 10^{-3}} * 0,018 * \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{272} \right)$$

$$e^{\ln X_A} = e^{-9,723 \times 10^{-6}}$$

$$X_A = 0,99$$

El valor de  $m_A$  sigue siendo toda la cantidad de agua (65%), por lo que se pudo calcular  $M_B$  a mediante la ecuación 3.2.

$$X_A = \frac{\frac{m_A}{M_A}}{\frac{m_A}{M_A} + \frac{m_B}{M_B}} \quad (3.2)$$

$$0,99 = \frac{\frac{65}{18}}{\frac{65}{18} + \frac{35}{M_B}}$$

$$M_B = 959,54$$

Reemplazando  $M_B$  en la ecuación 3.2 se pudo conocer la fracción de agua no congelada.

$$X_A = \frac{\frac{m_A}{M_A}}{\frac{m_A}{M_A} + \frac{m_B}{M_B}}$$

$$0,83 = \frac{\frac{m_A}{18}}{\frac{m_A}{18} + \frac{35}{959,54}}$$

$$m_A = 3,14$$

$$Masa_{hielo} = 65 - 3,14 = 61,86$$

Por lo que la masa de hielo resultó ser un 61,83%  $\approx$  62%.

Los alimentos al ser sometidos a un proceso de congelación sufren cambios en sus propiedades térmicas. Cuando el agua que se encuentra dentro del

producto pasa al estado sólido, cambia de forma gradual las propiedades como el calor específico, la densidad y la conductividad térmica tanto del producto congelado como el no congelado. Con los datos que se visualizan en la Tabla 3.15, Tabla 3.16 y Tabla 3.17 se pudo calcular el calor específico, densidad y conductividad térmica. Estos datos fueron determinados con la temperatura ambiente (25°C) y con la temperatura final del producto (-18°C) usando las ecuaciones de las propiedades térmicas de Choi y Okos que se visualizan en el Apéndice C (Ramirez, 1994).

**Tabla 3.15 Datos del calor específico de la yuca [Durazno & Espinoza, 2020]**

Composición de la yuca	25°C	-18°C
	Cp (kJ/kg°C)	
Proteína	1,738	1,986
Grasa	1,940	1,956
Carbohidratos	1,566	1,511
Fibra	1,89	1,813
Cenizas	0,922	1,057
Agua	4,176	4,179
Hielo	-	1,955

**Tabla 3.16 Datos de densidad de la yuca [Durazno & Espinoza, 2020]**

Composición de la yuca	25°C	-18°C
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	
Proteína	1280,9	1339,23
Grasa	914,95	933,11
Carbohidratos	2418,95	1604,59
Fibra	1302,352	1318,08
Cenizas	1737,3	2428,85
Agua	996	995,9
Hielo	-	919,4

**Tabla 3.17 Datos de conductividad térmica de la yuca [Durazno & Espinoza, 2020]**

Composición de la yuca	-18°C
	K (W/m°C)
Proteína	0,2051
Grasa	0,1762
Carbohidratos	0,2108
Fibra	0,212
Cenizas	0,1379
Agua	0,610
Hielo	2,41

A partir de los datos obtenidos de  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $K$  de la composición de la yuca; fueron reemplazados en la ecuación general para el cálculo de propiedades térmicas en cada uno de los estados, es decir bajo 25°C y -18°C.

En el caso del calor específico, se determinó mediante la ecuación 3.3.

$$C_p = C_{pProt.}m_{Prot.} + C_{pGra.}m_{Gra.} + C_{pCarb.}m_{Carb.} + C_{pFib.}m_{Fib.} + C_{pCen.}m_{Cen.} + C_{pAgua}m_{Agua} + C_{pHielo}m_{Hielo} \quad (3.3)$$

$$C_{pCongelado} = 1,88 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$C_{pNoCongelado} = 3,27 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

En el caso de la densidad, se determinó mediante la ecuación 3.4.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{m_{Prot.}}{\rho_{Prot.}} + \frac{m_{Gra.}}{\rho_{Gra.}} + \frac{m_{Carb.}}{\rho_{Carb.}} + \frac{m_{Fib.}}{\rho_{Fib.}} + \frac{m_{Cen.}}{\rho_{Cen.}} + \frac{m_{Agua}}{\rho_{Agua}} + \frac{m_{Hielo}}{\rho_{Hielo}} \quad (3.4)$$

$$\rho_{Congelado} = 1076,86 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{NoCongelado} = 1229,66 \frac{kg}{m^3}$$

En el caso de la conductividad térmica, se determinó mediante la ecuación 3.5.

$$k = k_{Prot.}m_{Prot.} + k_{Gra.}m_{Gra.} + k_{Carb.}m_{Carb.} + k_{Fib.}m_{Fib.} + k_{Cen.}m_{Cen.} + k_{Agua}m_{Agua} + k_{Hielo}m_{Hielo} \quad (3.5)$$

$$k_{Congelado} = 1,59 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Con los resultados anteriores, se obtuvo los números adimensionales: Stephan, Biot, Plank y Fourier. Para hallar el número de Biot, se usó la ecuación 3.6.

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (3.6)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor,  $L$  es la dimensión característica más pequeña y  $k$  es la conductividad térmica del producto congelado.

$$Bi = \frac{22 \left( \frac{W}{m^2^{\circ}C} \right) * 0,02m}{1,59 \frac{W}{m^{\circ}C}}$$

$$Bi = 0,28$$

Para hallar el número de Stephan, se usó la ecuación 3.7.

$$Ste = \frac{c_p(T_A - T_{\infty})}{\Delta H^m} \quad (3.7)$$

Donde  $C_p$  es el calor específico del producto congelado,  $T_\infty$  es la temperatura inicial,  $T_A$  es la temperatura inicial de congelación. Y  $\Delta H^m$  está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta H^m = m_{hielo} * \lambda$$

$$\Delta H^m = 206,77 \frac{kJ}{kg}$$

Por lo tanto,

$$Ste = \frac{\left(1,88 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right) (-1 + 25)^{\circ}C}{206,77 \frac{kJ}{kg}}$$

$$Ste = 0,22$$

Para hallar el número de Plank, se usó la ecuación 3.8.

$$Pk = \frac{C_p(T_i - T_A)}{\Delta H^m} \quad (3.8)$$

Donde  $C_p$  es el calor específico del producto no congelado.

$$Pk = \frac{\left(3,27 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right) (25 + 1)^{\circ}C}{206,77 \frac{kJ}{kg}}$$

$$Pk = 0,41$$

Con los resultados obtenidos del número de Biot, Stephan y Plank, se procedió a calcular los valores de P y R. Para obtener dichos valores se utilizaron las ecuaciones 3.9 y 3.10.

$$P = 0,5072 + 0,2018(Pk) + Ste \left(0,3224Pk + \frac{0,0105}{Bi} + 0,0681\right) \quad (3.9)$$

$$R = 0,1684 + Ste(0,2740Pk - 0,0135) \quad (3.10)$$

Una vez realizado el reemplazo de los valores, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$P = 0,5072 + 0,2018(0,41) + (0,22) \left( 0,3224(0,41) + \frac{0,0105}{0,28} + 0,0681 \right)$$

$$P = 0,64$$

$$R = 0,1684 + (0,22)[(0,2740 * 0,41) - 0,0135]$$

$$R = 0,19$$

Con los valores de P y R, se procedió a realizar el reemplazo en la ecuación 3.11 para obtener el número de Fourier.

$$F_o = \frac{P}{Bi * Ste} + \frac{R}{Ste} \quad (3.11)$$

$$F_o = \frac{0,64}{0,28 * 0,22} + \frac{0,19}{0,22}$$

$$F_o = 11,25$$

Determinación del tiempo de congelación.

Luego de obtener el valor de  $F_o$  se procedió a encontrar el tiempo para una placa plana que se expresa en la ecuación 3.12.

$$F_o = \frac{\alpha * t_f}{L^2} \quad (3.12)$$

Donde  $\alpha$  está dado por;  $\alpha = k(\text{congelado}) / C_p(\text{congelado}) * \rho(\text{congelado})$ , para luego despejar  $t_f$  que sería el tiempo final de la placa plana. Una vez reemplazado los valores, se obtuvo:

$$t_f = 1,64h$$

Luego de obtener el valor de  $t_f$  se procedió a determinar el valor de  $E$ , que es una constante que está en función del alimento y va de 1 a 3. Este valor de obtiene mediante la ecuación 3.13.

$$E = 1 + W_1 + W_2 \quad (3.13)$$

Donde  $W_1$  y  $W_2$  son factores empíricos que se conocen mediante el gráfico que se encuentra en el Apéndice 3D y con los valores de  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , las cuales se obtienen a través de las ecuaciones 3.14 y 3.15 respectivamente.

$$\beta_1 = \frac{d_1}{L} \quad (3.14)$$

$$\beta_2 = \frac{d_2}{L} \quad (3.15)$$

Obteniendo los resultados de:

$$\beta_1 = 2,5$$

$$\beta_2 = 4,5$$

$$W_1 = 0,25$$

$$W_2 = 0,08$$

Después de reemplazar en la ecuación 3.13, se obtuvo:

$$E = 1.33$$

Para determinar el tiempo real de congelación del producto, se tuvo que aplicar un factor de corrección que está dado por la ecuación 3.16.

$$Tiempo\ real = \frac{t_f}{E} \quad (3.16)$$

$$Tiempo\ real = \frac{1,64\ h}{1.33}$$

$$Tiempo\ real = 1,26\ horas$$

### 3.7 Estimación de costos

#### 3.7.1 Costos de materia prima (Batch) y material de empaque

Los costos de materia prima y material de empaque se determinaron por Batch, donde se requiere una cantidad inicial de 4084 Kg de yuca, la cual se detalla en la Tabla 3.18 por producción diaria.

**Tabla 3.18 Costos de Materia Prima y Material de Empaque por (Batch)**  
[Durazno & Espinoza, 2020]

<b>Ingrediente</b>	<b>Cantidad (Kg)</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Yuca	4084	\$0,44	\$1.796,96
Acido ascórbico	1,53	\$5,80	\$8,874
<b>Total costo de materia prima</b>			<b>\$1.805,93</b>
<b>Empaque</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Fundas PEBD	540	\$0,07	\$37,80
Cajas	90	\$0,541	\$48,690
<b>Costo total de material de empaque</b>			<b>\$86,49</b>

### 3.7.2 Costos de mano de obra directa

Para el cálculo de costos de mano de obra directa se consideró 14 obreros generando un costo total por mes de \$7.243,31. En la Tabla 3.19 se detallan los costos de mano de obra directa y se establecen valores para cada una de las operaciones que se realizarán para el proceso.

**Tabla 3.19 Costos de Mano de Obra Directa [Durazno & Espinoza, 2020]**

<b>Mano de obra directa</b>	<b>Total de obreros</b>	<b>Costo mensual (\$)</b>	<b>Costo décimo tercero (\$)</b>	<b>Costo décimo cuarto (\$)</b>	<b>Costo de aportaciones (\$)</b>	<b>Costo anual sueldo (\$)</b>	<b>Costo total mes (\$)</b>
Recepción de MP	3	\$1.204,92	\$1.204,92	\$1.204,92	\$1.756,77	\$18.625,65	\$1.552,14
Lavado Sanitizado	2	\$803,28	\$803,28	\$803,28	\$1.171,18	\$12.417,10	\$1.034,76
Pelado y Cortado	7	\$2.811,48	\$2.811,48	\$2.811,48	\$4.099,14	\$43.459,86	\$3.621,65
Sanitizado	2	\$803,28	\$803,28	\$803,28	\$1.171,18	\$12.417,10	\$1.034,76
Inmersión y Escurrido	1	\$401,64	\$401,64	\$401,64	\$585,59	\$6.208,55	\$517,38
Congelado	2	\$803,28	\$803,28	\$803,28	\$1.171,18	\$12.417,10	\$1.034,76
Empacado	7	\$2.811,48	\$2.811,48	\$2.811,48	\$4.099,14	\$43.459,86	\$3.621,65
<b>Costo total de mano de obra directa</b>							<b>\$12.417,10</b>

### 3.7.3 Costos indirectos

#### Mano de obra indirecta

En la Tabla 3.20 se estimaron los costos de mano de obra indirecta mensual para una jornada laboral de 8 horas diarias durante 5 días a la semana.

**Tabla 3.20 Costos de Mano de Obra Indirecta [Durazno & Espinoza, 2020]**

<b>Mano de obra indirecta</b>	<b>Cantidad de personas</b>	<b>Costo mensual (\$)</b>	<b>Costo décimo tercero (\$)</b>	<b>Costo décimo cuarto (\$)</b>	<b>Costo aportaciones (\$)</b>	<b>Costo anual sueldo (\$)</b>	<b>Costo total mes (\$)</b>
Gerente General	1	\$1.200,00	\$1.200,00	\$401,64	\$0,00	\$16.001,64	\$1.333,47
Supervisor de producción	1	\$800,00	\$800,00	\$401,64	\$0,00	\$10.801,64	\$900,14
Secretaria	1	\$450,00	\$450,00	\$401,64	\$0,00	\$6.251,64	\$520,97
Personal de Mantenimiento	1	\$401,64	\$401,64	\$401,64	\$0,00	\$5.622,96	\$468,58
<b>Costo total de mano de obra indirecta</b>							<b>\$3.223,16</b>

El SRI mantiene los índices de depreciación con respecto a los equipos de producción y los equipos de oficina (computadoras) como se detallan en la Tabla 3.21. Estos índices de depreciación son fijados de forma anual a un porcentaje del costo de compra de los equipos.

**Tabla 3.21 Porcentaje - Depreciación [SRI, 2018]**

Activos Fijos	% Depreciación anual
Equipos de producción	10
Equipos de cómputo y Software	33

En la tabla 3.22, se muestra la tabla de depreciación de los activos fijos, que en este caso se consideraron equipos de producción y equipos de cómputo utilizados en la producción del producto.

**Tabla 3.22 Depreciación de equipos de producción [Durazno & Espinoza, 2020]**

Máquina	Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)	Tiempo de vida útil	Depreciación de activos (%)	Valor residual (\$)	Depreciación anual (\$)
Balanza	3	200,00	600,00	10	10%	\$60,00	54
Lavadora por aspersión	2	7000,00	14000,00	10	10%	\$1.400,00	1260
Tina de inmersión	1	10500,00	10500,00	10	10%	\$1.050,00	945
Banda transportadora	1	700,00	700,00	10	10%	\$70,00	63
Túnel de congelación	1	15000,00	15000,00	10	10%	\$1.500,00	1350
Selladora	7	500,00	3500,00	10	10%	\$350,00	315
Computadoras	3	600,00	1800,00	3	33%	\$594,00	397,98
<b>Total</b>	18	34500	46100,00			<b>\$5.024,00</b>	<b>\$4.384,98</b>

Se estimó el consumo de kW al año del gasto energético de las maquinarias y el tiempo dedicado a la producción, para determinar el costo total por el consumo de energía eléctrica donde se visualiza en la Tabla 3.23, también se consideró la potencia de los equipos según las especificaciones técnicas, para una jornada de 8 horas con 2 Batch por día.

**Tabla 3.23 Consumo de equipos durante el proceso [Durazno & Espinoza, 2020]**

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo de operación por Batch (min)	Tiempo de operación total al día (min)	Consumo de kW al año
Balanza	4,2	5	15	252
Lavadora por aspersión	2,6	10	20	208
Tina de inmersión	0,37	10	20	29,6
Banda transportadora	1,5	3	6	36
Túnel de congelación	30,9	78	1440*	177984
			<b>Total</b>	<b>178509,68</b>
<b>Número de Batch</b>			2	

\*Operación de túnel de congelación de 24 horas

En la Tabla 3.24 se muestra el consumo de energía eléctrica correspondiente para el área administrativa y los equipos para el control del proceso.

**Tabla 3.24 Consumo de suministros [Durazno & Espinoza, 2020]**

Equipo	Número de equipos	Potencia (kW)	Tiempo total de operación al día. <sup>a</sup> (min)	Total de kW al año
Computadoras	3	0,2	500	1200
Aires acondicionados	5	6,1	500	61000
Luces	20	0,08	500	3200
Total			65400	
Costo del kW <sup>b</sup>			\$0,09	

a: Valor obtenido del tiempo total de operación

b: Costo de kW comercial

El costo del consumo de suministros como teléfono, materiales de limpieza, y otros utilizados para la producción del producto, se muestran en la Tabla 3.25.

**Tabla 3.25 Consumo de suministros y materiales [Durazno & Espinoza, 2020]**

Servicios	Consumo anual	Unidad	Precio unitarios (\$)	Total
Energía eléctrica	65400	kW	0,09	21951,86
Teléfono	21600	min	0,01	216
Agua	312000	l	0,016	4992
Detergente - Maquinarias	240	l	6,65	1596
Detergente - pisos	200	Kg	4,00	800
<b>Total</b>				<b>\$29.555,86</b>

### 3.7.4 Costos de producción

El costo de producción es de \$396.075,744 anual, tomando en consideración los costos detallados en Tabla 3.26. Un costo unitario de fabricación por caja es de \$9,18 con una ganancia del 36%, resulta un Precio de Venta al Público (P.V.P.) de \$12,48 por caja.

**Tabla 3.26 Costos de producción final [Durazno & Espinoza, 2020]**

Producción por día en Kg	2450
Cantidad de cajas por día (kg)	180
Demanda anual en Kg	43200
Producción anual en Kg	588000
<b>COSTO DIRECTO</b>	
Materia prima y Empaque	\$454.157,76
Mano de obra directa	\$12.417,10
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
Mano de obra indirecta	\$3.223,16
Materiales y suministro	\$29.555,86
Depreciación	\$4.384,98
<b>Total costos de fabricación anual</b>	<b>\$503.738,86</b>
<b>Costos en Kg de producto final</b>	<b>\$1,167</b>
<b>Costos de fabricación unitario (13,62 Kg)</b>	<b>\$15,90</b>
Ganancia propuesta %	36%
<b>P.V.P.</b>	<b>\$21,62</b>

### 3.7.5 Punto de equilibrio

En la Tabla 3.27 se muestra el análisis de punto de equilibrio, donde se necesitaron los costos fijos (mano de obra directa, mano de obra indirecta, depreciación de equipos y los costos de suministros y materiales) y los costos variables (costo de materia prima y empaque) utilizados para la producción de cajas de 13,62 Kg de producto, la cual posee 6 paquetes de

2,27 Kg cada uno, por lo tanto se requiere producir al menos 8663 unidades (cajas) para equilibrar costos fijos y variables de la producción, sin embargo, se debería laborar un tiempo de 2,4 meses aproximadamente, para posteriormente generar ganancias para la empresa.

**Tabla 3.27 Punto de Equilibrio [Durazno & Espinoza, 2020]**

<b>Costos fijos</b>	\$49.581,10
<b>Precio</b>	\$21,62
<b>Costos variables</b>	\$15,90
<b>P.E. (unidades)</b>	8663
<b>P.E. (valor)</b>	\$187.306,39

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se determinó que las mejores condiciones para medir la actividad de la enzima polifenol oxidasa en yuca (*M. esculenta*) usando catecol como sustrato fueron a pH 7,5 a 30°C. Demostrando que la actividad de la enzima es sensible a pH bajos y disminuye debido a la desnaturalización por calor al aumentar la temperatura.
- El ácido ascórbico fue el inhibidor más efectivo en relación con el ácido cítrico, exhibiendo un alto valor de  $V_{max}$  a mínimas concentraciones, a dicho tratamiento se recomienda una temperatura de 30°C en tiempo de 5 minutos.
- A través del análisis de relación entre las actividades, se estableció una distribución para la línea de producción de yuca congelada que cumple con las condiciones estipuladas en el art. 76 de la Normativa Técnica Sanitaria de Alimentos Procesados. Obteniendo un área total de 309,12 m<sup>2</sup>.
- El costo estimado de fabricación para una caja de 13,62 Kg (6 unidades de 2,27 Kg) es de \$15,90, mientras que el P.V.P. es de \$21,62 con el propósito de generar ganancias a la empresa a partir de los 2,4 meses aproximadamente con una producción de 180 cajas al día.

## 4.2 Recomendaciones

- Efectuar un diseño de experimento donde se incluya la actividad enzimática como la variable de respuesta, para evaluar la incidencia de inhibidores frente a la enzima PPO.
- Desarrollar un análisis del producto que permita estimar su tiempo de vida útil en el anaquel.
- Considerar el impacto ambiental debido a los residuos sólidos (cáscaras y venas) generados por la empresa que deberán ser utilizados como materia prima para procesos de otras industrias como las de alimentación animal y productos biodegradables.

# BIBLIOGRAFÍA

- ARCSA. (2015). *Normativa Técnica Sanitaria de Alimentos Procesados*.
- Aristizábal, J., Sánchez, T., & Mejía, D. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Bobo, G. (Junio de 2014). Estudio de Estrategias para la Conservación de Patatas (cv. Monalisa) Mínimamente Procesadas. Pamplona.
- Brito, F., M., A., Andrade De, D., Puschman, R., & Simoes, A. (17 de september de 2013). Influence of minimum processing procedures on the quality of sweet cassava. Talhada-PE, Brazil: Internacional Journal of Agriculture Innovations and Research.
- C., C., Luzbel, P., R., V., & Willy, J. (2015). *Efecto del ácido ascórbico en el pardeamiento enzimático y características organolépticas de la papa seca obtenida de tres variedades*. Junín, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Cubas, C. (Octubre de 2009). Procesado mínimo de yuca. España: Universidad de la Laguna.
- Cubas, C., Lobo, G., & González, M. (2007). Influencia de la temperatura y tiempo de conservación de la yuca entera sobre la calidad del tubérculo mínimamente procesado. *V Congreso Iberoamericano de tecnología postcosecha y agroexportaciones*, 643-649.
- Escobar, A., Márquez, C., Restrepo, C., Cano, J., & Patiño, J. (2014). Aplicación de tratamiento térmico, recubrimiento comestible y baño químico como tratamientos poscosecha para la conservación de hortalizas mínimamente procesadas. *Agroindustria*.
- FAO. (24 de noviembre de 2012). Ecuador fortalece la investigación del cultivo de yuca.
- Flores, G., & García, P. (2016). *Obtención de masa congelada de yuca (Manihot Escualenta) a partir de variedades ecuatorianas*. Guayaquil.
- Hinostroza, F., Mendoza, M., Navarrete, M., & Muñoz, X. (Agosto de 2014). Cultivo de yuca en el Ecuador. Manabí, Ecuador: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- Inestroza, C., Marques, K., Gomez, H., Galati, V., & Ribeiro, J. (2015). Principales consideraciones en el procesamiento mínimo de tubérculos y raíces para

industrias pequeñas y medianas (artesanales). *Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*.

- Koch, A. (1992). Einfluss der Trocknung auf die technologischen und ernährungsphysiologischen Eigenschaften von Maniok. *Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreisses Forschung und Lehre der Max-Eyth-ges*(211).
- Manohan, & Wong, C. (2012). Characterization of polyphenol oxidase in sweet potato (*Ipomoea Batata* (L.)). *Journal for the advancement of science & arts*, 3(1), 14-31.
- Martín, T. (2014). Efecto del ácido cítrico en la inhibición del oscurecimiento enzimático de la yuca blanca (*Manihot esculenta* Crants) mínimamente procesada, envasada y almacenada en refrigeración. Yarinacocha, Perú: Departamento de Ucayali.
- Navarro, G. (2019). Determinación de la cinética enzimática de la obtención de jarabe de glucosa a partir de papa. Junín, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- NTE INEN. (1990 ). *Hortalizas frescas. Yuca. Requisitos*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1760.pdf>
- NTE INEN-CODEX. (2013). *Norma General del Códex para Aditivos Alimentarios (MOD)*. Obtenido de <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/ACTUALIZACION/04112014/192-CODEX-UNIDO.pdf>
- Pérez, C. J., Santos, M. V., & Zaritzky, N. (june de 2019). Processing of pre-cooked frozen brussels sprouts: heat transfer modelling as related to enzyme inactivation and quality stability. Argentina.
- Ramirez, J. (1994). *Refrigeración de Alimentos*. Barcelona: CEAC, SA.
- Ristoff, M. (2013). Determinación de carbohidratos en jugos de fruta con electrodos enzimáticos. Bahía Blanca, Argentina.
- ROSSES, M. (4 de Abril de 2008). *Consultoría de canales y márgenes de comercialización de la yuca* . Obtenido de [http://www.magfor.gob.ni/servicios/descargas/Canales\\_Margenes\\_Yuca.pdf](http://www.magfor.gob.ni/servicios/descargas/Canales_Margenes_Yuca.pdf)
- Sabando, M. M., & Aroca, C. J. (2016). Plan de exportación de almidón de yuca desde el cantón Chone - Manabí al mercado de Florida - Estados Unidos. Guayaquil, Ecuador: Universidad Laica Vicente Rocafuerte.
- Sikora, M., & Swieca, M. (2018). Effect of ascorbic acid postharvest treatment on enzymatic browning, phenolics and antioxidant capacity of stored mung bean sprouts. *Food Chemistry*, 1160-1166.

- Silveira, A. (2017). Uso de aditivos y métodos físicos para mantener la calidad de los productos de IV gama o mínimamente procesados. *Agrociencia Uruguay*, Volumen 21.
- Silveira, A. C. (junio de 2017). Uso de aditivos y métodos físicos para mantener la calidad los productos de IV gama o mínimamente procesados. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Agronomía.
- Singh, P., & Heldman, D. (1984). *Introduction to food engineering*. Oval Road, London: Academic PRESS, INC.
- Singh, P., & Heldman, D. (2014). *Introduction to Food Engineering*. Lincoln, USA: Food Science and Technology International Series.
- Vanaclocha. (2004). *Diseño de industrias agroalimentarias*. Mundi-Prensa.
- Viteri, M. (2014). Plan de Negocios para la Exportación de Yuca Congelada a Helsinki-Finlandia. Quito, Ecuador.
- Vivanco, J. (2012). *Proyecto de Factibilidad para la Producción y Comercialización de Almidón de Yuca a Estdos Unidos*. Quito, Ecuador.
- Wai, C., & Lee, P. (2014). Characterization of polyphenol oxidase from cassava leaf (MANIHOT ESCULENTA CRANTZ). *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 4(2), 546-553.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A

$$\text{Inhibición (\%)} = \frac{A_0 - A_i}{A_0} * 100\%$$

$A_0$ ; fue la actividad de la enzima PPO (sin inhibidor) y

$A_i$ ; fue la actividad de la enzima PPO con inhibidor

### Porcentaje de inhibición sobre la actividad enzimática [Wei & Lee, 2014]

Inhibidor	[I] (mM)	Inhibición (%)
L-ácido ascórbico	1,0	70,51
	2,0	78,51
	3,0	79,48
Ácido Cítrico	1,0	60,69
	2,0	76,92
	3,0	81,03

## APÉNDICE B

### Especificaciones de los equipos [Durazno & Espinoza, 2020]

<b>Equipo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Capacidad</b>	<b>#</b>	<b>Largo (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>
Mesa	DM09-8-1800	-	4	2000	1100	700
Lavadora por aspersión	MY02	1000-1500 kg/h	2	3000	1200	1350
Tina de inmersión	Tanque de inmersión DT	1000-4500 kg/h	1	1600	1900	1800
Túnel de congelación	GLA-0.5	1000-1500 kg/h	1	8000	2080	2300
Selladora	PFS-450	-	4	450	490	880

## APÉNDICE C

### Especificaciones de las superficies estáticas, de gravitación y de evolución [Durazno & Espinoza, 2020]

<b>Actividad</b>	<b>Ss (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Sg (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Se (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ss+Sg+Se (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Stotal (m<sup>2</sup>)</b>
Recepción M.P. y Selección	48,00	0,00	7,20	55,20	55,20
Lavado y Sanitizado	3,60	3,60	1,08	8,28	8,28
Pelado y Cortado	2,20	4,40	0,99	7,59	7,59
Sanitizado	3,60	3,60	1,08	8,28	8,28
Inmersión y Escurrido	3,04	3,04	0,91	6,99	6,99
Congelado	16,64	16,64	4,99	38,27	38,27
Empacado	0,22	0,22	0,07	0,51	0,51
Almacenamiento	60,00	60,00	18,00	138,00	138,00
Área administrativa / sanitaria / productos de limpieza	40,00	0,00	6,00	46,00	46,00
					<b>309,12</b>

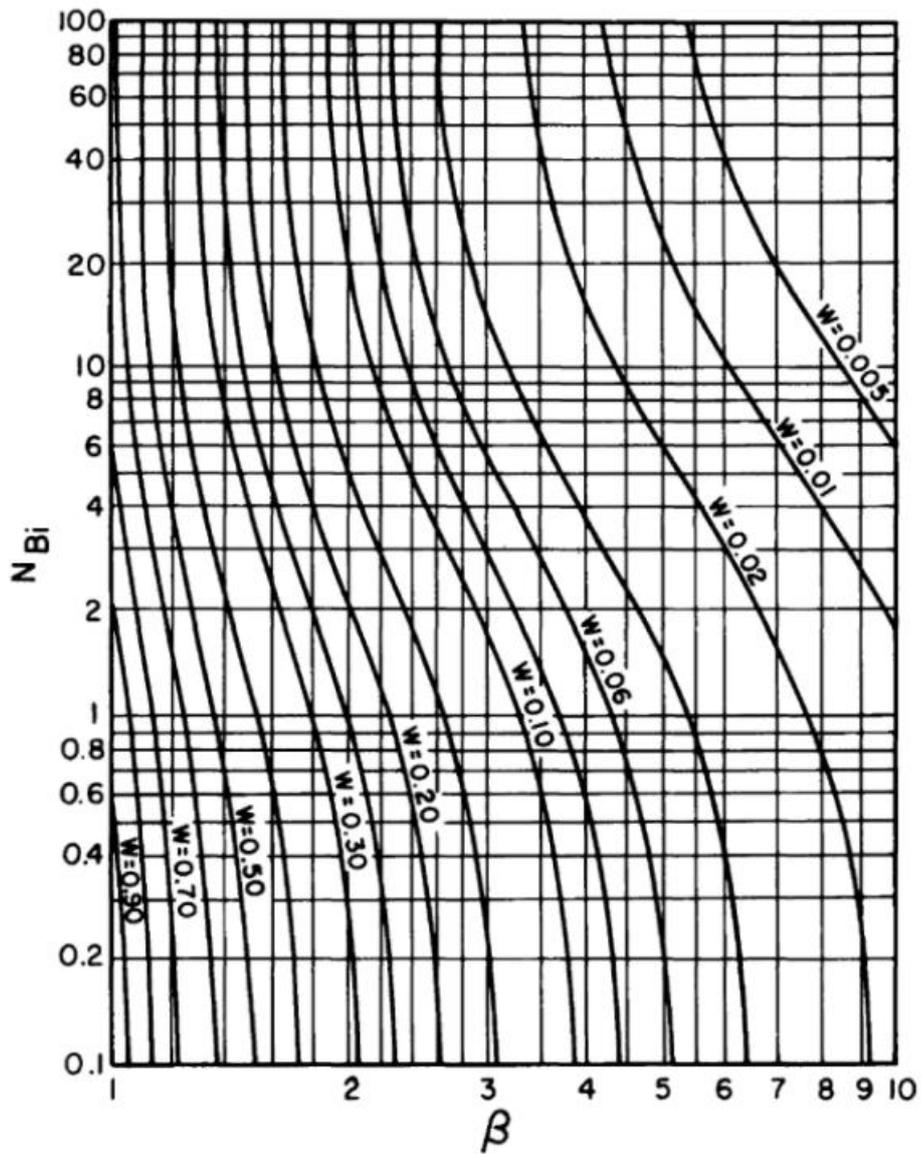
## APÉNDICE D

**Coefficientes para estimar las propiedades térmicas de los alimentos (-40°C ≤ t ≤ 150°C) –  
Choi y Okos [Singh & Heldman, 1984]**

Propiedad	Componente	Función de la temperatura
$k$ (W/m°C)	Proteína	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$
	Grasa	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$
	Carbohidrato	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$
	Fibra	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$
	Ceniza	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$
	Agua	$k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$
	Hielo	$k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Proteína	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$
	Grasa	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$
	Carbohidrato	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$
	Fibra	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T$
	Ceniza	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$
	Agua	$\rho = 9.9718 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$
	Hielo	$\rho = 9.1689 \times 10^2 - 1.3071 \times 10^{-1}T$
$C_p$ (kJ/kg°C)	Proteína	$C_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$
	Grasa	$C_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$
	Carbohidrato	$C_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$
	Fibra	$C_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$
	Ceniza	$C_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$
	Agua	$C_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$
	Hielo	$C_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$

## APÉNDICE E

Gráfico para la determinación de  $W$  a partir del número de Biot y el factor  $\beta$  [Singh & Heldman, 1984]



## APÉNDICE F

### Costo Unitario de Materia Prima [Durazno & Espinoza, 2020]

Materia prima	Precio (\$)	Unidad
Yuca	\$0,44	Kg
Acido ascórbico	\$5,80	Kg
Fundas PEBD	\$0,07	unidad
Cajas	\$0,541	unidad

### Punto de Equilibrio [Durazno & Espinoza, 2020]

