

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El plátano pertenece a la familia de las musáceas, la cual incluye los plátanos comestibles crudos (***Musa cavendish***) plátanos enanos (***Musa × paradisíaca***) y los plátanos machos o para cocer (***Musa paradisíaca***). Al plátano macho también se lo conoce como “plátano de guisar o hartón” más grande y menos dulce que el resto de las variedades de su misma familia (MDPyEP, 2017).

El cultivo del plátano se extiende en los departamentos de La Paz (Alto Beni, conformada por Palos Blancos y parte de Caranavi), Cochabamba, Tarija, Santa Cruz, Beni, Pando. Sin embargo, se localiza la mayor producción en el Chapare, departamento de Cochabamba, localizada en la parte Norte-central de Bolivia. Esta región está dotada de bosques subtropicales y suelos favorables para el establecimiento del cultivo (MDRyT, 2012).

El área de cultivo de plátano en Bolivia sumó 19994 hectáreas durante el 2021 (3,7% más que el 2020) entre seis departamentos el país, generando una producción total de 300871 toneladas como un rendimiento promedio de 15 toneladas por hectárea. El crecimiento productivo desde el 2010 al 2021 fue del 40% en volumen, incentivado por un incremento en la demanda nacional e internacional principalmente, que favorecieron la aplicación de buenas prácticas incrementando su rendimiento (IBCE, 2022).

En cuanto a la producción por departamentos 2010-2021, Cochabamba concentró cerca del 71% de la producción de plátano, donde los principales municipios productores fueron Puerto Villarroel, Villa Tunari, Chimoré, Entre ríos y Shinahota representando el 99,5% de la producción Cochabambina. Asimismo, el departamento de La Paz también concentró el 25% de producción nacional sumando 75000 toneladas (IBCE, 2022).

El cultivo de plátano en Bolivia se amplió en 11% al 2021 alcanzando 40788 hectáreas, entre siete departamentos del país, generando una producción total de 476299 toneladas con un rendimiento promedio de 12 toneladas por hectárea. El crecimiento productivo desde el 2010 al 2021 fue de 38% en volumen, incentivado por un crecimiento de demanda nacional principalmente (IBCE, 2022).

En Tarija el plátano (*Musa paradisiaca*) o plátano macho es uno de los cultivos mas presentes en la región con una producción anual que supera las 8000 toneladas, según datos del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras y el INE. Este plátano se utiliza para freír, ya que su textura y sabor lo hacen ideal como verdura más que como fruta, siendo fundamental en la gastronomía local y fuente de ingresos para pequeños productores (MDRyT, 2012).

1.2 Justificación

- En vista de que existe un buen consumo y aprovechamiento del plátano verde en el departamento de Tarija se busca realizar un proceso de transformación de la cáscara de este, con la finalidad de obtener una harina la cual tenga una variedad de utilidades, desde productos horneados (panes y galletas), hasta espesantes para sopas y salsas.
- El presente trabajo de investigación tiene como finalidad utilizar la cáscara verde del plátano para darle un aprovechamiento a una parte de esta fruta que es desechada al medio ambiente, y así lograr la reducción del descarte ya que está provoca contaminación, malos olores e incluso la aparición de mosquitos.
- Dado a que existe un creciente interés por consumir alimentos ricos en nutrientes y que sean saludables, ya que desean mantener una buena salud y prevenir enfermedades, como también existe conciencia sobre cómo la mala alimentación puede impactar el bienestar físico y mental a largo plazo, se pretende elaborar una harina que contenga beneficios para la salud, como ser: normalizar la función del colon, ayudar a regular los niveles de azúcar en la sangre, promover las bacterias probióticas, entre otras.
- La razón por la que se planteó la obtención de harina a partir de la cáscara de plátano verde es porque en la actualidad no existe este tipo de harina en el mercado local de Tarija y es que la mayoría de personas no conocen los beneficios que tiene y que podría aportar al organismo, como ser el aporte de una buena fuente de potasio.

1.3 Objetivos

Los objetivos planteados para el presente Trabajo de Investigación se detallan a continuación:

1.3.1 Objetivo general

Obtener harina a partir de cáscara de plátano verde (*Musa paradisíaca*) a nivel experimental, mediante el proceso de secado por aire caliente, con el fin de lograr un producto de calidad en la provincia Cercado de Tarija.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y micronutrientes con el propósito de conocer su composición nutricional de la cáscara de plátano.
- Establecer las variables del proceso de secado por aire caliente para identificar las condiciones a nivel experimental del secado de la cáscara de plátano verde.
- Aplicar el diseño experimental para el proceso de obtención de harina a partir de la cáscara de plátano verde con la finalidad de establecer los factores que influyen en el proceso de secado.
- Realizar la molienda y tamizado para obtener harina de cáscara de plátano verde que sea de calidad.
- Realizar un análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la harina de cáscara de plátano verde.
- Realizar balance de materia y energía en el proceso de secado con el fin de conocer las entradas y salidas del proceso.

1.4 Objeto de estudio

Elaboración de harina de cáscara de plátano verde, por el proceso de secado por aire caliente.

1.5 Campo de acción

El presente trabajo de investigación tiene el siguiente campo de acción:

- ✓ **Espacial:** El presente trabajo se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS). “Carrera de Ingeniería de Alimentos”.
- ✓ **Temporal:** El periodo de tiempo en el que se desarrolló el trabajo de investigación fue entre las gestiones 2024 - 2025.
- ✓ **Institución:** El trabajo de investigación se desarrolló en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA), perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología (FCyT), de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

1.6 Planteamiento del problema

El presente trabajo de investigación busca incorporar la harina de cáscara de plátano, utilizando la cáscara de plátano verde variedad (***Musa paradisiaca***), ya que la misma es desechada por la industria alimentaria y doméstica, generando contaminación al medio ambiente, malos olores e incluso la aparición de mosquitos. Sin saber que tiene propiedades benéficas y bondades nutricionales para la salud, es por eso también que no es valorada como materia prima de gran consumo.

Por esta razón se pretende realizar un proceso de transformación de este subproducto en harina, mediante el proceso de secado por aire caliente, con la finalidad de así lograr la reducción del descarte de este, además de que en el mercado local de Tarija no existe harina de cáscara de plátano.

1.7 Formulación del problema

¿Se podrá elaborar harina de cáscara de plátano verde (***Musa paradisiaca***), mediante el proceso de secado por aire caliente a nivel experimental, para obtener un producto de calidad en la provincia Cercado de Tarija?

1.8 Hipótesis

Mediante el proceso de secado por aire caliente a nivel experimental se obtiene harina de cáscara de plátano verde (***Musa paradisiaca***), producto de calidad en la provincia cercado de Tarija.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Origen del plátano (*Musa paradisiaca*)

Según el nuevo libro del destacado historiador santacrucero, Manuel de Paz Sánchez en el cual analiza la expansión de este fruto desde Papua-Nueva Guinea y el sudeste de Asia, de donde es originario y donde se produjo su domesticación, a China y la India y, más tarde, desde el subcontinente a Mesopotamia, Palestina, África y el sur de la Península Ibérica, a donde fue llevado por los árabes, que extendieron su cultivo especialmente en Almería durante la existencia de Al-Andalus. Desde allí la planta sería introducida en las islas Canarias y, en general, en el conjunto de archipiélagos del Atlántico Norte (Azores, Madeira), conocido genéricamente como Macaronesia posteriormente llevados al Caribe y a la América continental (Sánchez, 2016).

2.2 Definición del plátano (*Musa paradisiaca*)

El plátano es una fruta tropical procedente de la planta herbácea que recibe el mismo nombre o banano, perteneciente a la familia de las Musáceas. Tiene forma alargada o ligeramente curvada, de 100-200 g de peso. La piel es gruesa, de color verde o amarillo y fácil de pelar, y la pulpa es blanca o amarillenta y carnosa (FEN, 2013).

Los bananos y plátanos se encuentran entre los alimentos más importantes a nivel mundial. Los bananos son consumidos crudos y se distinguen por el dulce sabor de la fruta; mientras que los plátanos se consumen después de procesados o cocidos (Castro, 2014).

2.3 Clasificación taxonómica del plátano (*Musa paradisiaca*)

En el cuadro 2.1, se muestra la clasificación taxonómica del plátano (*Musa paradisiaca*).

Cuadro 2.1

Clasificación taxonómica del plátano (*Musa paradisiaca*)

Reino	Plantea
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Musaceae
Genero	Musa
Nombre científico	<i>Musa × paradisiaca</i>

Fuente: Chilig y Chiluisa, 2015

2.4 Composición fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca*)

En la Tabla 2.1, se muestra la composición fisicoquímica del plátano en 100 gramos.

Tabla 2.1

Composición fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca*)

Componentes	Unidad	Cantidad
Cenizas	g	0,90
Calorías	g	101
Humedad	g	74,50
Proteína	g	3,05
Grasa	g	0,10
Carbohidratos	g	20,45

Fuente: Arboleda et al, 2023

2.5 Caracterización de la cáscara de plátano

La cáscara de plátano posee un elevado valor nutricional, principalmente desde el punto de vista energético. Entre sus características, se encuentra su elevado contenido de materia seca y alta concentración de carbohidratos no fibrosos. La cáscara de plátano representa alrededor del 30% del fruto, esta se descarta y pudiera ser utilizada para el desarrollo de alimentos, debido a su composición química y antioxidante. Es rica en fibra, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados, potasio y en compuestos fenólicos (Chumo y Pin, 2023).

2.5.1 Composición nutricional de la cáscara de plátano

La Tabla 2.2, se muestra la composición nutricional por cada 100 g de cáscara de

plátano.

Tabla 2.2

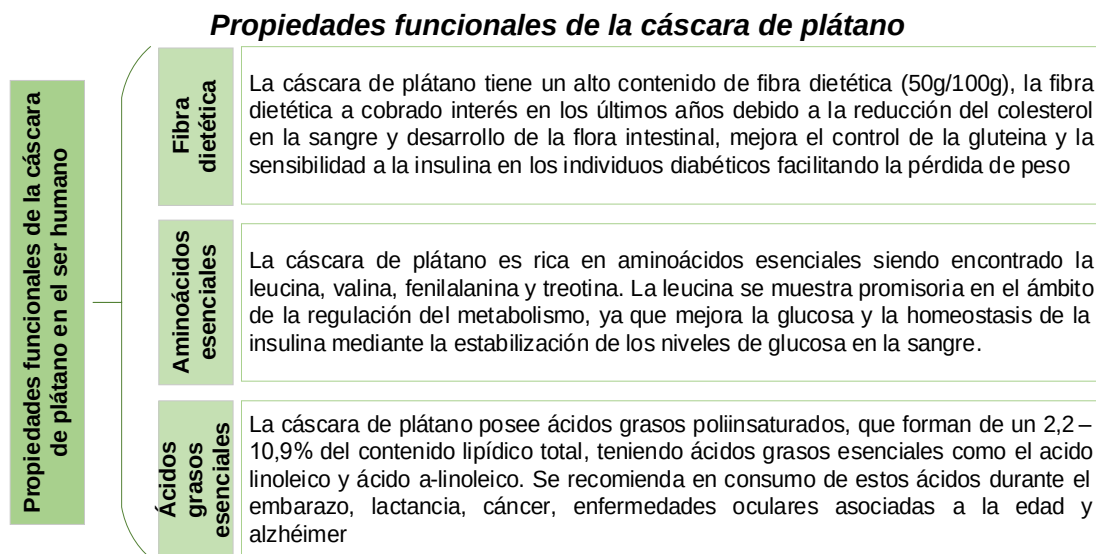
Composición nutricional de la cáscara de plátano

Componentes	Unidad	Cantidad
Energía	kcal	28,00
Carbohidratos	g	7,11
Grasas	g	0,61
Proteínas	g	1,07
Fibras	g	5,15
Potasio	mg	507,00
Calcio	mg	221,00
Magnesio	mg	10,50
Fósforo	mg	211,13
Luteína	mcg	350,00

Fuente: Leal, 2023

2.6 Propiedades funcionales de la cáscara de plátano en el ser humano

Según Blasco y Gómez, (2014) las principales propiedades funcionales, que presenta la cáscara de plátano en el ser humano, se muestran en la figura 2.1:



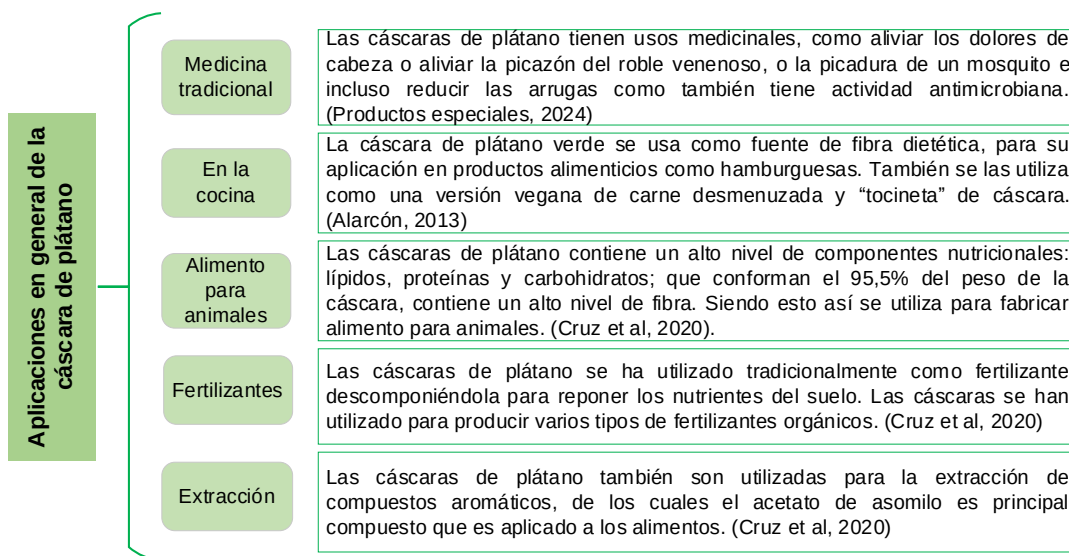
Fuente: Blasco y Gómez, 2014

Figura 2.1: Propiedades funcionales de la cáscara de plátano

2.7 Aplicaciones en general de la cáscara de plátano verde

Según Cruz et al, (2020), Productos especiales, (2024) y Alarcón, (2013) en la actualidad la cáscara de plátano tiene diferentes aplicaciones en forma general, las cuales se muestran en la Figura 2.2:

Aplicaciones de la cáscara de plátano verde



Fuente: Cruz et al, (2020), Productos especiales, 2024 y Alarcón, 2013

Figura 2.2: Aplicaciones en general de la cáscara de plátano verde

2.8 Composición nutricional de harina de cáscara de plátano verde

En la Tabla 2.3, se muestra la composición nutricional por cada 100 g de harina de cáscara de plátano verde.

Tabla 2.3

Composición nutricional de la harina de cáscara de plátano verde

Componentes	Unidad	Cantidad
Fibra dietética	g	38,70
Proteínas	g	5,90
Humedad	g	9,45
Grasas totales	g	3,60
Carbohidratos totales	g	76,30

Fuente: Acosta y Parodi, 2021

2.9 Tipos de harinas vegetales

En la Figura 2.3, se muestran algunos tipos de harinas vegetales.

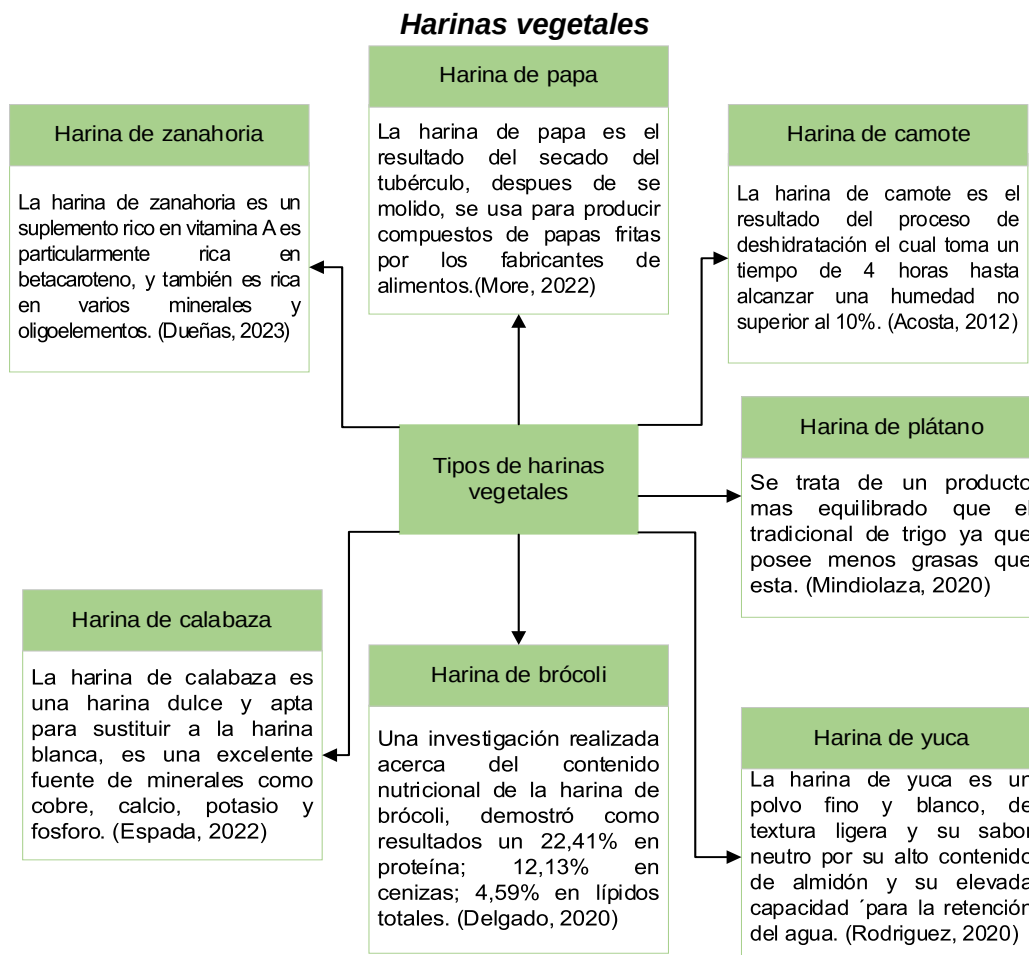
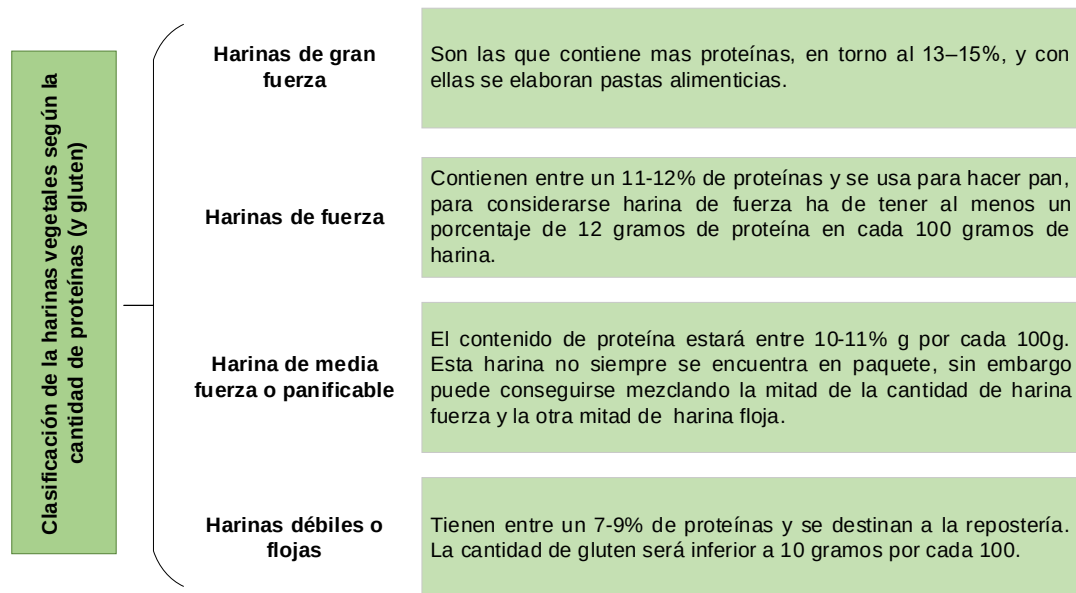


Figura 2.3: Tipos de harinas vegetales

2.10 Clasificación de las harinas vegetales

En la Figura 2.4, se muestra la clasificación de las harinas vegetales en función de la cantidad de proteínas (y gluten) que contiene.

Clasificación de las harinas vegetales según la cantidad de proteína

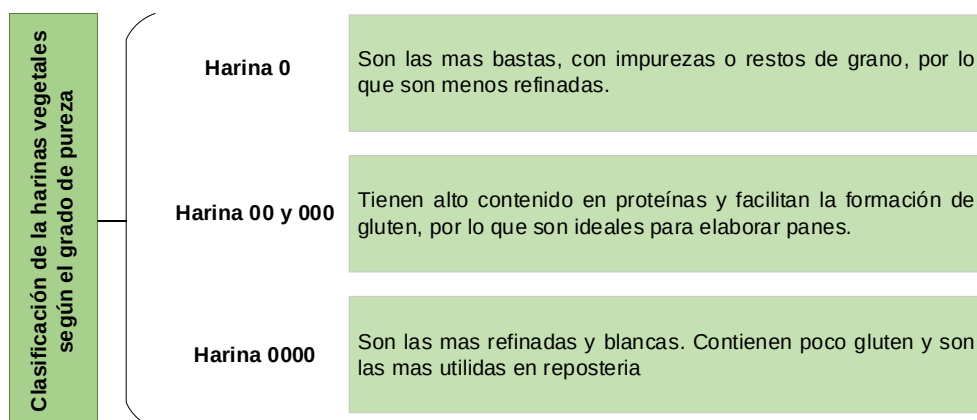


Fuente: Alonso, 2010

Figura 2.4: Clasificación de las harinas vegetales según la cantidad de proteínas (y gluten)

En la Figura 2.5, se muestra la clasificación de las harinas vegetales según el grado de pureza.

Clasificación de las harinas vegetales según su grado de pureza



Fuente: Alonso, 2010

Figura 2.5: Clasificación de las harinas vegetales según el grado de pureza

2.11 Aplicaciones de la harina de cáscara de plátano en el ser humano

La harina de cáscara de plátano tiene una variedad de aplicaciones en el ser humano, algunas de ellas se muestran en la Figura 2.6:

Aplicaciones de la harina de cáscara de plátano en el ser humano



Figura: 2.6: Aplicaciones de la harina de cáscara de plátano verde en el ser humano

2.12 Secado de alimentos

El secado es una de las operaciones más antiguas usadas para conservar alimentos que ha dado lugar a productos secos tradicionales como carnes, pescados, frutas, quesos. La conservación se consigue debido a que se reduce la actividad de agua a niveles muy bajos donde se puede bloquear el crecimiento microbiológico (Tecante, 2009).

El agua se elimina de los alimentos por medio del proceso de difusión a través de la estructura interior del alimento sólido. El movimiento del agua líquida es seguido por la evaporación de la misma en algún punto del alimento, para lo cual es necesario el calor, por lo tanto, el proceso de secado es en sí un transporte simultáneo de masa y calor (Velázquez, 2007).

El secado es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos, ya que el contenido de humedad es, sin duda, la característica más importante para determinar si el alimento corre el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento (Ortega, 2021).

2.12.1 Actividad de agua

La actividad del agua (a_w) se define formalmente como la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con el alimento dividido por la presión parcial de vapor de agua en condiciones estándar. Es un parámetro relacionado con el contenido de agua de un alimento, concretamente con el agua disponible o no ligada al soluto. Es fundamental en la vida útil de los alimentos, ya que determina el agua disponible para el crecimiento de microorganismos y la actividad química y enzimática durante la conservación del alimento, que van a afectar a su calidad. Esto es debido a que los microorganismos necesitan cierta cantidad de agua libre para vivir, y las reacciones se dan en medio acuoso. Toma valores entre 0 y 1, y cuanto más se aleja de 1 (valor para el agua pura), más difícil es la actividad biológica, y por lo tanto la conservación es más fácil y la vida útil más larga (Cardona, 2019).

2.12.2 Secado con aire caliente

Operación unitaria que se aplica a los alimentos ya sean sólidos, líquidos en los que existe una mezcla solido-líquido continua y de un solo componente volátil para su eliminación el cual normalmente es agua, es una operación simultánea de transferencia de calor y de masa, en secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. En el secado por aire caliente el alimento se pone en contacto con una corriente de aire caliente, el calor se aporta al producto principalmente por convección (López y German, 2018).

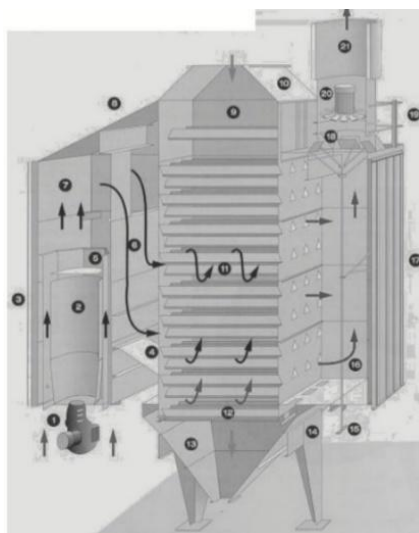
El secado por flujo de aire es una técnica que por medio del calor se elimina el agua que contiene algunos alimentos mediante la evaporación, lo que impide el crecimiento de algunas bacterias que no pueden vivir en medios secos. En el secado de frutas y vegetales mediante el empleo de aire caliente a altas temperaturas se afectan las propiedades sensoriales del producto y su valor nutricional, por lo que la temperatura es una variable a tener en cuenta en los estudios cinéticos (Barrera, 2007).

2.12.3 Secador de bandejas

El secador consiste de una cámara en la cual pueden ser colocadas bandejas con el producto. En los secadores grandes son colocadas como vagonetas para facilitar su manejo, en los secadores pequeños las charolas pueden ponerse sobre soportes permanentes en el secador. El aire es impelido por un ventilador y pasa por un calentador y después a través de las charolas del material que se está secando. El secador de bandejas es por lo general, el menos caro de construir, es fácil de mantener y bastante flexible, normalmente es usado en el secado de frutas y hortalizas a pequeñas escalas y temporales en laboratorios (Ortega et al, 2021).

Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado. Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire (Cerrón y Junchaya, 2019).

En la Figura 2.7, se muestra el secador de bandejas:



Fuente: Maupoey, (2016)

Figura 2.7: Secador de bandejas

2.12.4 Contenido de humedad de los sólidos

El contenido de humedad es una magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido y se puede representar en términos de una base de masa seca o de una base de masa húmeda. Aunque ambas expresiones representan el contenido de humedad de una muestra, sus valores numéricos son distintos, por lo que al expresar el contenido de humedad sin indicar la base de masa se puede incurrir en un error de interpretación (Martines y Lira, 2010).

2.12.4.1 Humedad en base húmeda

Según (Cedeño, 2017) el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) se refiere a la cantidad de masa de agua por unidad de masa de sólido seco más la masa del agua. Mediante la ecuación (2.1) se calcula el contenido de humedad en base húmeda.

$$H_{BH} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de sólido seco} + \text{Masa de agua}} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

2.12.4.2 Humedad en base seca

Según (Cedeño, 2017) el contenido de humedad en base seca (H_{BS}) se refiere a la cantidad de masa de agua por unidad de masa de sólido seco en la muestra. Mediante la ecuación (2.2) se calcula el contenido de humedad en base seca y la ecuación (2.3) para el cálculo de la masa de sólido seco.

$$H_{BS} = \frac{m_i - m_{ss}}{m_{ss}} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de solido}} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

$$m_{ss} = m_i (1 - H_{BH}) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

m_{ss} = Masa de sólido seco

m_i = Peso de muestra inicial

H_{BH} = Humedad en base húmeda

2.12.4.3 Humedad en equilibrio

Cuando un sólido húmedo se pone en contacto, con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes, se alcanzarán las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Se logran las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire (Moreno,2018).

2.12.4.4 Humedad ligada

Es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado; o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que este deje de comportarse como higroscópico (Moreno,2018).

2.12.4.5 Humedad no ligada

Es el agua que el sólido puede perder mediante métodos físicos, que se encuentra unida al sólido superficialmente. Si el sólido tiene humedad libre se comportará como húmedo (Moreno, 2018).

2.12.4.6 Humedad libre

Según (Moreno, 2018) es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas. Es la humedad que puede perder el sólido después de un tiempo de contacto con el aire en las condiciones dadas y constantes. Mediante la ecuación (2.4) se calcula la humedad libre.

$$F = X - X^* \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

Donde:

F = Contenido de humedad libre

X = Contenido total de humedad

X* = Contenido de humedad de equilibrio

2.12.4.7 Humedad relativa

Es la relación entre la presión actual (e_r) del vapor de agua y la presión de vapor saturado (e_s), a la temperatura del bulbo seco. La humedad relativa se incrementa cuando el aire se enfría o cuando se agrega vapor de agua al aire (Jaramillo, 2005).

2.12.4.8 Humedad absoluta

La humedad absoluta, es la masa de vapor de agua por volumen de aire. Representa la densidad del vapor de agua en el aire (gramos/cm^3) (Jaramillo, 2005).

2.13 Cinética de secado

Según Giraldo et al, (2010) la cinética de secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo.

Según Valencia, (2017) la velocidad de secado se define como la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, operando en condiciones constantes de secado, es decir con aires cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo.

Según Valencia, (2017) la expresión de la velocidad de secado W , se refiere a la unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación (2.5):

$$W = \frac{S}{A} \left(- \frac{dx}{dt} \right) \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

W = Velocidad de secado

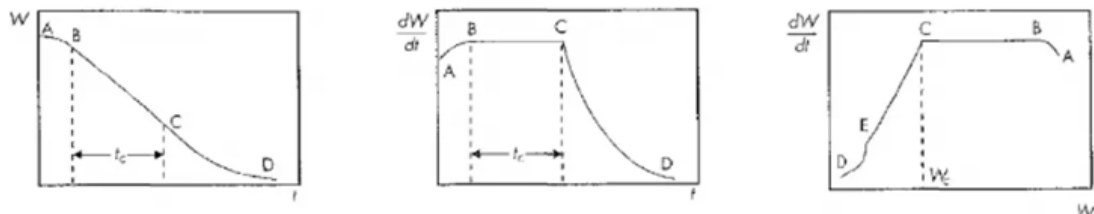
S = Peso del sólido seco

A = Área de la superficie expuesta

2.13.1 Curvas de secado

Según (Aguado et al., 2002) la representación de la humedad del producto frente al tiempo de secado es el punto de partida para establecer la evolución de la velocidad de secado a lo largo de la operación. En la Figura 2.8, se muestran las etapas de secado de un alimento con aire caliente.

Etapas de secado de un alimento con aire caliente



Fuente: Aguado et al., 2002

Figura 2.8: Etapas del secado de un alimento con aire caliente

En la Figura 2.8, se muestran las variaciones típicas de la humedad de un alimento y de su velocidad de secado frente al tiempo. La tercera imagen de la Figura 2.8, informa sobre como varía la velocidad de secado conforme se reduce la humedad del sólido. El proceso de secado está dividido en periodos para la velocidad de secado, estos se describen a continuación:

Periodo de estabilización o de inducción (Tramo A – B): no es significativo frente al tiempo total de secado, corresponde al tiempo que necesita el sistema para alcanzar el régimen estacionario y se caracteriza por la cesión de calor sensible del aire al alimento, que se manifiesta en forma de un aumento de su temperatura. Esta fase termina cuando la temperatura del alimento se iguala a la del bulbo húmedo del aire (Aguado et al., 2002).

Periodo de velocidad de secado constante (Tramo B – C): el agua migra desde el interior del alimento hasta su superficie con la misma velocidad con que se evapora desde la referida superficie hasta el aire. Este comportamiento se explica debido al equilibrio existente entre el flujo de calor de materia, que permite que la superficie del alimento permanezca en todo momento saturada de agua, el periodo de velocidad de secado constante finaliza cuando se alcanza la denominada “humedad crítica” del producto (Aguado et al., 2002).

Periodo de velocidad de secado decreciente (Tramo C – D): comienza cuando la velocidad de migración del agua desde el interior del producto hasta su superficie decae respecto a la velocidad de evaporación del agua, lo que conduce a una desecación progresiva de la superficie del alimento, el tramo considerado presenta un poco de inflexión cuando la superficie se seca por completo, momento en el que alcanza la temperatura de bulbo seco de aire. Se completa así el primer subtramo del periodo de velocidad decreciente (Aguado et al., 2002).

Periodo segundo de velocidad decreciente (Tramo D – E): una vez seca la superficie del sólido, se inicia el segundo subtramo de este periodo, que se caracteriza por el progresivo desplazamiento del frente o plano de evaporación del agua desde la superficie hacia el centro del producto conforme avanza el secado. En este caso la opresión es controlada por la difusión interna del vapor de agua. El secado se da por terminado cuando la humedad del alimento se aproxima a su contenido de humedad en equilibrio (Aguado et al., 2002).

2.14 Psicrometría

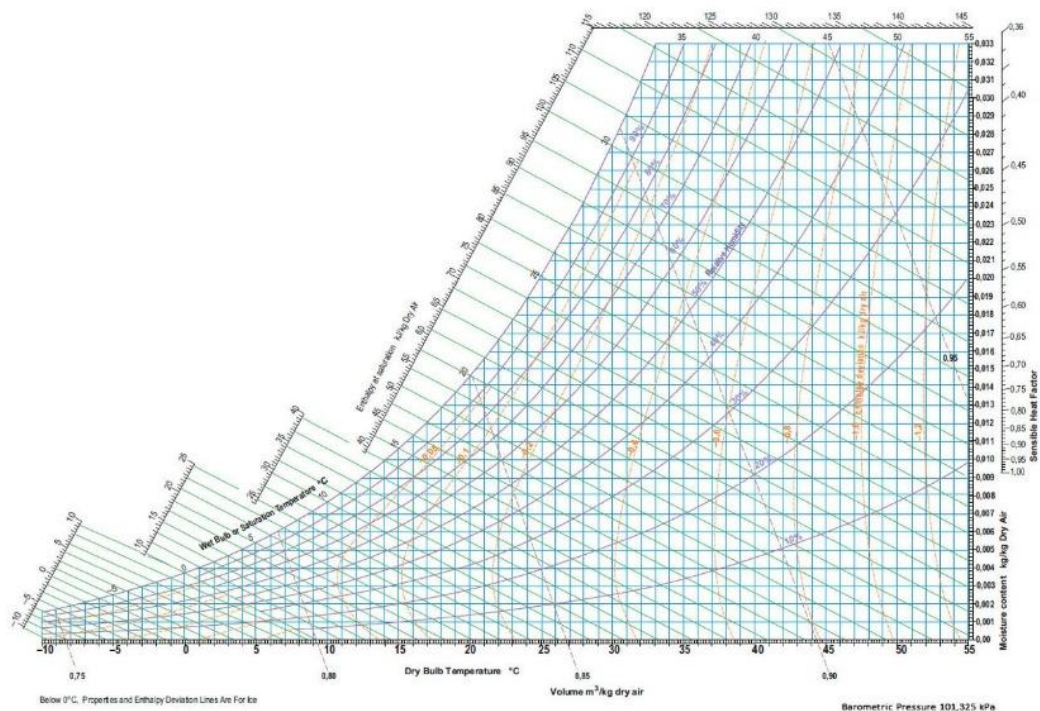
Psicrometría se define como la medición del contenido de humedad del aire. Ampliando la definición a términos más técnicos, psicrometría es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. Ampliando aún más, incluiríamos el método de controlar las propiedades térmicas del aire húmedo. Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica. Las tablas psicrométricas ofrecen una gran precisión, ya que sus valores son de hasta cuatro decimales; sin embargo, en la mayoría de los casos, no se requiere tanta precisión; y con el uso de la carta psicrométrica, se puede ahorrar mucho tiempo y cálculos (Díaz, 2009).

2.14.1 Carta psicrométrica

Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, humedad relativa, volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire. Aunque las tablas psicrométricas son más precisas, el uso de la carta psicrométrica puede ahorrarnos mucho tiempo y cálculos, en la mayoría de los casos donde no se requiere una extremada precisión, por lo tanto, la carta psicrométrica puede basarse en datos obtenidos a la presión atmosférica normal al nivel del mar, o puede estar basada en presiones menores que la atmosférica, o sea, para sitios a mayores alturas sobre el nivel del mar. Existen muchos tipos de cartas psicrométricas, cada una con sus propias ventajas. Todas tienen básicamente la misma función; y la carta a usar, deberá seleccionarse para el rango de temperaturas y el tipo de aplicación (Díaz, 2009).

En la Figura 2.9, se muestra una carta psicrométrica básica.

Carta psicrométrica



Fuente: Díaz, 2009

Figura 2.9: Carta psicrométrica a temperaturas normales y presión de 760 mmHg (a nivel del mar)

2.15 Caracterización de los aditivos utilizados en las muestras de cáscara de plátano

Para el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) se utilizó tres aditivos funcionales, estos compuestos son utilizados como antioxidantes naturales, reguladores de acidez y como conservantes.

2.15.1 Ácido cítrico

El ácido cítrico es un ácido orgánico tricarboxílico presente en la mayoría de las frutas, principalmente en cítricos como el limón y la naranja (Sánchez et al, 2008).

Es un aditivo perteneciente a los antioxidantes el cual se utiliza con la finalidad de reducir el pardeamiento enzimático garantizando que las frutas y hortalizas conserven su color, perdure su sabor y se pueda consumir en un tiempo más alargado de lo común (Vélez de la Cruz, 2022).

2.15.2 Ácido ascórbico

Velázquez, 2010 (como se citó en Vélez de la Cruz, 2022) el ácido ascórbico comúnmente conocido como vitamina C se encuentra de manera natural en las plantas y alimentos como tomates, brócoli, hortalizas verdes y cítricos. Es de apariencia como un cristal, no tiene color ni olor, su sabor es ácido.

El ácido ascórbico se utiliza como agente antioxidante por su efectividad al inhibir el pardeamiento enzimático, esto se debe por la reducción de o-quinonas producidas por la polifenoloxidasas a los precursores o-difenoles antes de que ocurra la reacción y se empiecen a formar los pigmentos oscuros (Vélez de la Cruz, 2022).

2.15.3 Sorbato de potasio

El sorbato potásico es la sal potásica del ácido sórbico. En el ámbito de la tecnología alimentaria, sirve como conservante destinado principalmente a prolongar la vida útil de los productos alimenticios. Este aditivo, ampliamente utilizado, es conocido por su seguridad y eficacia, por lo tanto, que es un componente habitual en una gran variedad de alimentos. El sorbato de potasio suele presentarse en forma de polvo blanco que se disuelve fácilmente en agua, se identifica con el número E202, que indica su aprobación como aditivo alimentario (Moritz, 2010).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Desarrollo de la parte experimental

El presente trabajo experimental de “obtención de harina de cáscara de plátano verde”, fue desarrollado en el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (L.A.C.I.A). de la Facultad de Ciencia y Tecnología, ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (U.A.J.M.S).

3.2 Tipos de intervención experimental

Según Ramos, (2021) en un tipo de diseño experimental, la variable independiente se caracteriza por generar los grupos de intervención que se organizan en el estudio. Claramente, una variable independiente es la variable causal que genera un impacto sobre una variable dependiente, en tal sentido, los niveles de experimentación de la variable independiente generación un impacto en la variable que se pretende influir.

La metodología que se utilizó para la obtención de resultados experimentales del presente trabajo de investigación, se detalla a continuación:

- Análisis de los parámetros físicos del plátano en el proceso de acondicionamiento.
- Análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la cáscara de plátano.
- Análisis del diseño factorial 2^3 de las variables en el proceso de secado.
- Análisis fisicoquímico y micronutrientes de la harina de cáscara de plátano.
- Análisis microbiológico de la harina de cáscara de plátano verde.
- Operacionalización de las variables en el proceso de secado por aire caliente.

3.3 Enfoque de la investigación

Según Ñaupas et al, (2018) el enfoque cuantitativo se caracteriza por utilizar métodos y técnicas cuantitativas y por ende tiene que ver con la medición, el uso de magnitudes, la observación y medición de unidades de análisis, el muestreo y el tratamiento estadístico (p. 140). Así mismo Hernández et al, (2014) señala que el enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías. (p. 4)

3.4 Paradigma de la investigación

Según Gallardo, (2017) el paradigma es una postura macro que se tiene ante la realidad de un fenómeno determinado, donde quienes comparten esas ideas manejan un mismo lenguaje, se orientan a través de valores, metas y creencias en común (p. 21). Así mismo Ricoy, (2006) dice que el conocimiento del paradigma de investigación nos ayudará a situarnos y conocer mejor los modelos metodológicos en los que nos propongamos encuadrar un estudio empírico. El paradigma puede señalar, orientar o avanzar en niveles diferentes a los métodos, instrumentos a utilizar y a las cuestiones de investigación que queremos contrastar.

3.4.1 Paradigma positivista

Según Gallardo, (2017) este paradigma persigue la verificación rigurosa de proporciones generales a través de la observación empírica y el experimento en muestras de amplio alcance, desde una aproximación cuantitativa, con el fin de verificar y perfeccionar leyes. Su finalidad es explicar, predecir, verificar y controlar los fenómenos.

3.4.2 Tipo de investigación

Según Tamayo y Tamayo, (2003) la investigación experimental se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular (p. 47). Así mismo, Arias, (2012) explica que, en cuanto al nivel, la investigación experimental es netamente explicativa, por cuánto a su propósito es demostrar que los cambios en la variable dependiente fueron causados por la variable independiente. Es decir, que se pretende establecer con precisión una relación causa-efecto.

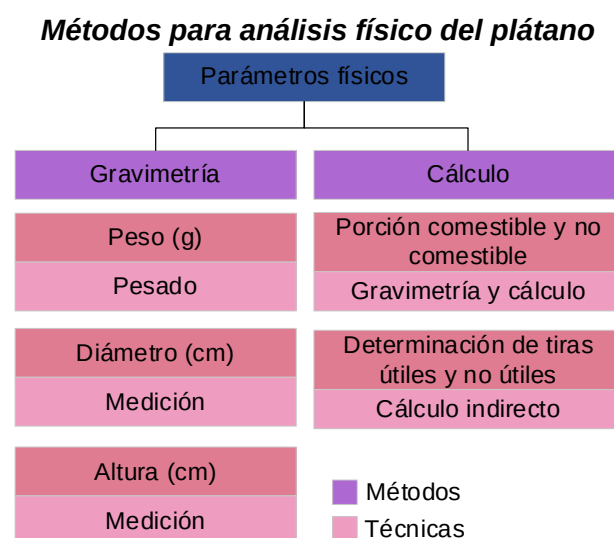
3.5 Métodos, técnicas e instrumentos

Según Cabezas et al, (2018) el método científico se refiere a la ciencia como un conjunto de pensamientos universales y necesarios, y que en función de estos surgen algunas cualidades importantes, es el procedimiento que se sigue en la investigación, con el objetivo de descubrir las formas de existencia de los procesos objetivos, para desentrañar conexiones internas y externas, para generalizar y profundizar los

conocimientos adquiridos. Así mismo, Arias, (2012) expresa que se entiende por técnicas de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información. Las técnicas son particulares y específicas de una disciplina, por lo que sirven de complemento al método científico, el cual posee una aplicabilidad general (p. 67). Por otro lado, Ñaupas et al, (2018) señala que los instrumentos de investigación son las herramientas conceptuales o materiales, mediante los cuales se recoge los datos e información, mediante preguntas, ítems que exigen respuestas del investigado. Asume diferentes formas de acuerdo con las técnicas que le sirven de base (p. 273).

3.5.1 Análisis físico del plátano

En la Figura 3.1 se muestran los métodos y técnicas que se utilizaron para determinar el análisis físico del plátano verde (*Musa paradisiaca*).



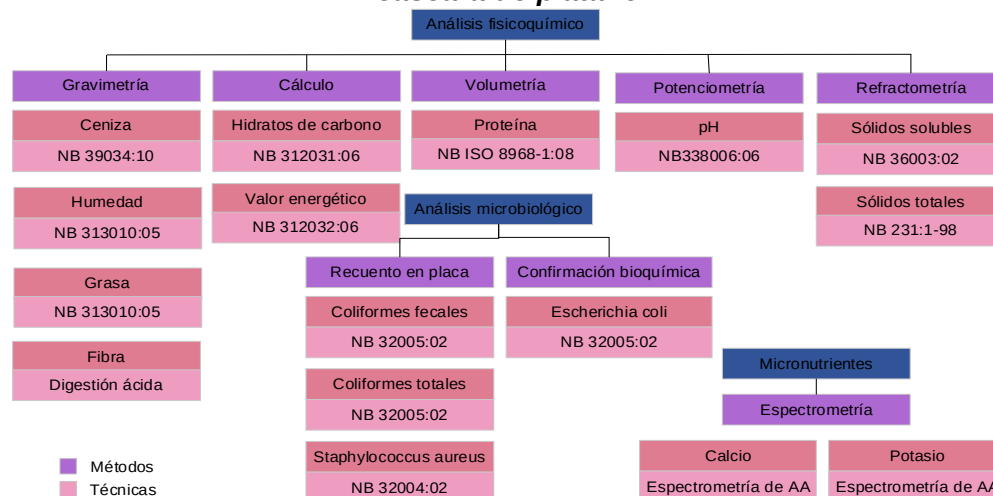
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1: Métodos y técnicas para análisis físico del plátano

3.5.2 Análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la cáscara de plátano

En la Figura 3.2, se muestran los métodos y técnicas del análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la cáscara de plátano verde (*Musa paradisiaca*), que fueron realizados en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS) de Tarija, Bolivia.

Métodos para análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la cáscara de plátano



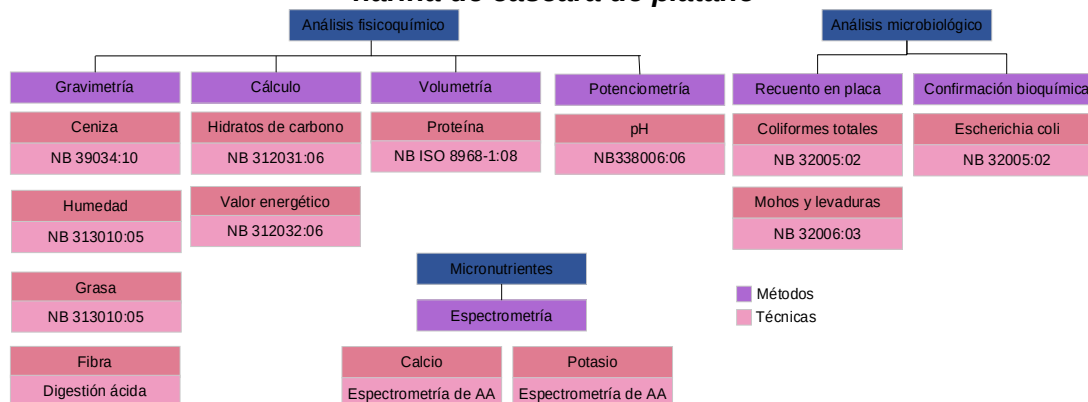
Fuente: CEANID, 2024

Figura 3.2: Métodos y técnicas para determinación de análisis fisicoquímicos, microbiológicos y micronutrientes en la cáscara de plátano.

3.5.3 Análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la harina de cáscara de plátano

En la Figura 3.3, se muestran los métodos y técnicas del análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la harina de cáscara de plátano verde (*Musa paradisiaca*), que fueron realizados en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología.

Métodos para análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la harina de cáscara de plátano



Fuente: CEANID, 2025

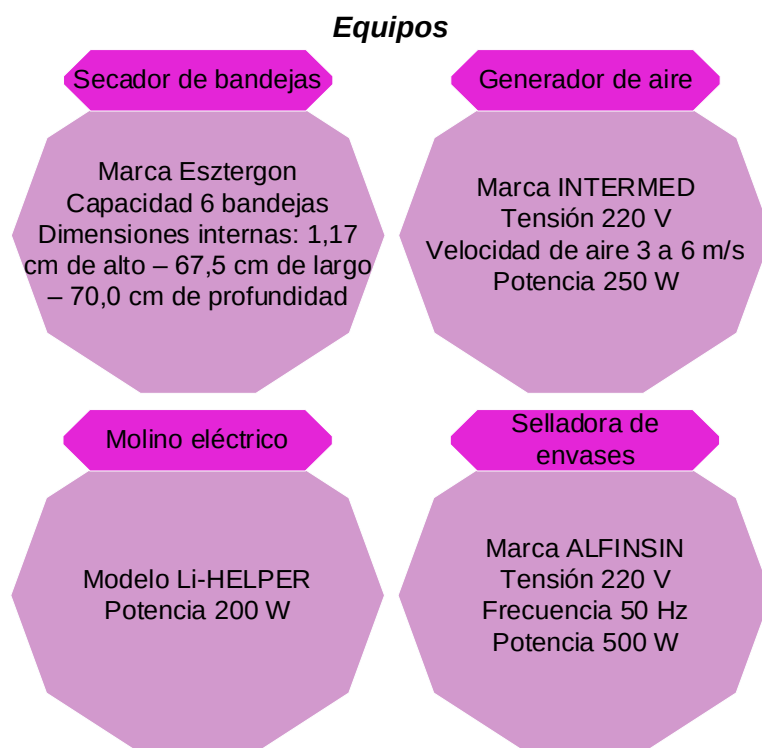
Figura 3.3: Métodos y técnicas para determinación de análisis fisicoquímico, microbiológico y micronutrientes de la harina de cáscara de plátano verde

3.6 Equipos, instrumentos, materiales de laboratorio y utensilios de cocina

Para el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación, se utilizaron equipos, instrumentos de laboratorio, material de laboratorio y utensilios de cocina, los cuales se describen a continuación:

3.6.1 Equipos de proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

En la Figura 3.4 se detallan y observan las características técnicas de los equipos que se utilizaron en el proceso de elaboración de harina de cáscara de plátano verde y los cuales se muestran en el (Anexo E).

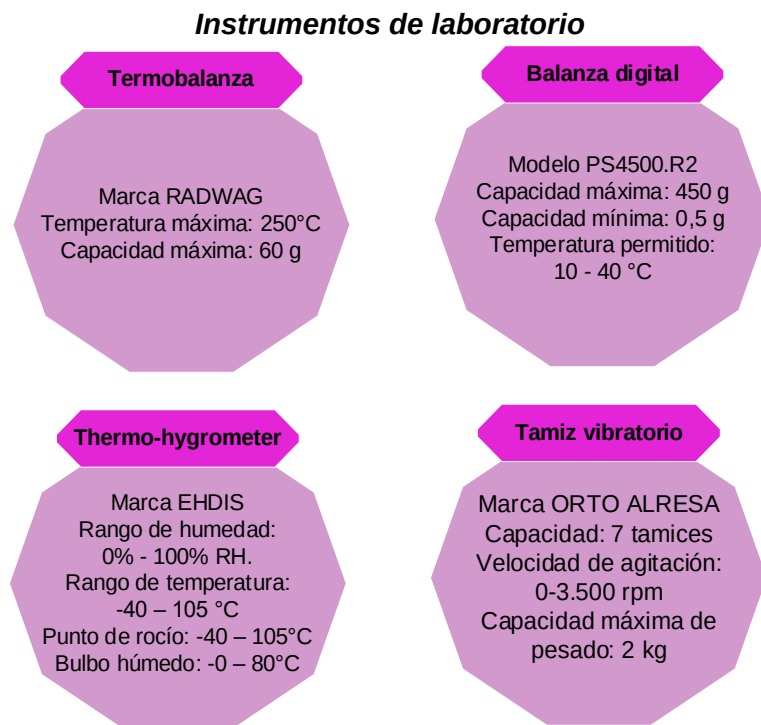


Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4: Equipos de proceso en la obtención de harina de cáscara de plátano

3.6.2 Instrumentos de laboratorio

En la Figura 3.5, se detallan y observan las características técnicas de los instrumentos que se utilizaron en el proceso de elaboración de harina de cáscara de plátano verde (*Musa paradisiaca*) y los cuales se muestran en el (Anexo E).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Instrumentos de laboratorio en el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

3.6.3 Materiales de laboratorio

Los materiales de laboratorio que se utilizaron para realizar el trabajo de investigación se muestran en el (Anexo E) y se detallan a continuación sus características:

- **Termómetro:** material de vidrio, alcohol y rango (0-200) °C.
- **Espátula:** material de acero inoxidable, tipo alargada, tamaño mediano.
- **Vidrio reloj:** material de vidrio, tamaño mediano.
- **Probeta:** material de vidrio, capacidad de 100 ml.
- **Mortero:** material de porcelana, tamaño mediano.
- **Bandejas:** material de aluminio, tamaño (65×65) cm; tamaño (35×35) cm.
- **Cronómetro:** material de plástico, tamaño mediano.

3.6.4 Utensilios de cocina

Los utensilios de cocina que se utilizaron para realizar el presente trabajo de investigación se muestran en el (Anexo E) y se detallan a continuación sus características:

- **Cuchillo:** material acero inoxidable, tamaño mediano.
- **Picador de verduras:** material acero inoxidable, tamaño mediano.
- **Fuentes:** material acero inoxidable, tamaño mediano.
- **Olla:** material acero inoxidable, tamaño mediano.
- **Tabla de picar:** material de plástico, tamaño mediano.
- **Jarra graduada:** material de plástico, capacidad de 1 Litro.

3.7 Aditivos de uso alimentario

Los aditivos de uso alimentario que se utilizaron para realizar el presente trabajo de investigación se detallan en la Tabla 3.1

Tabla 3.1

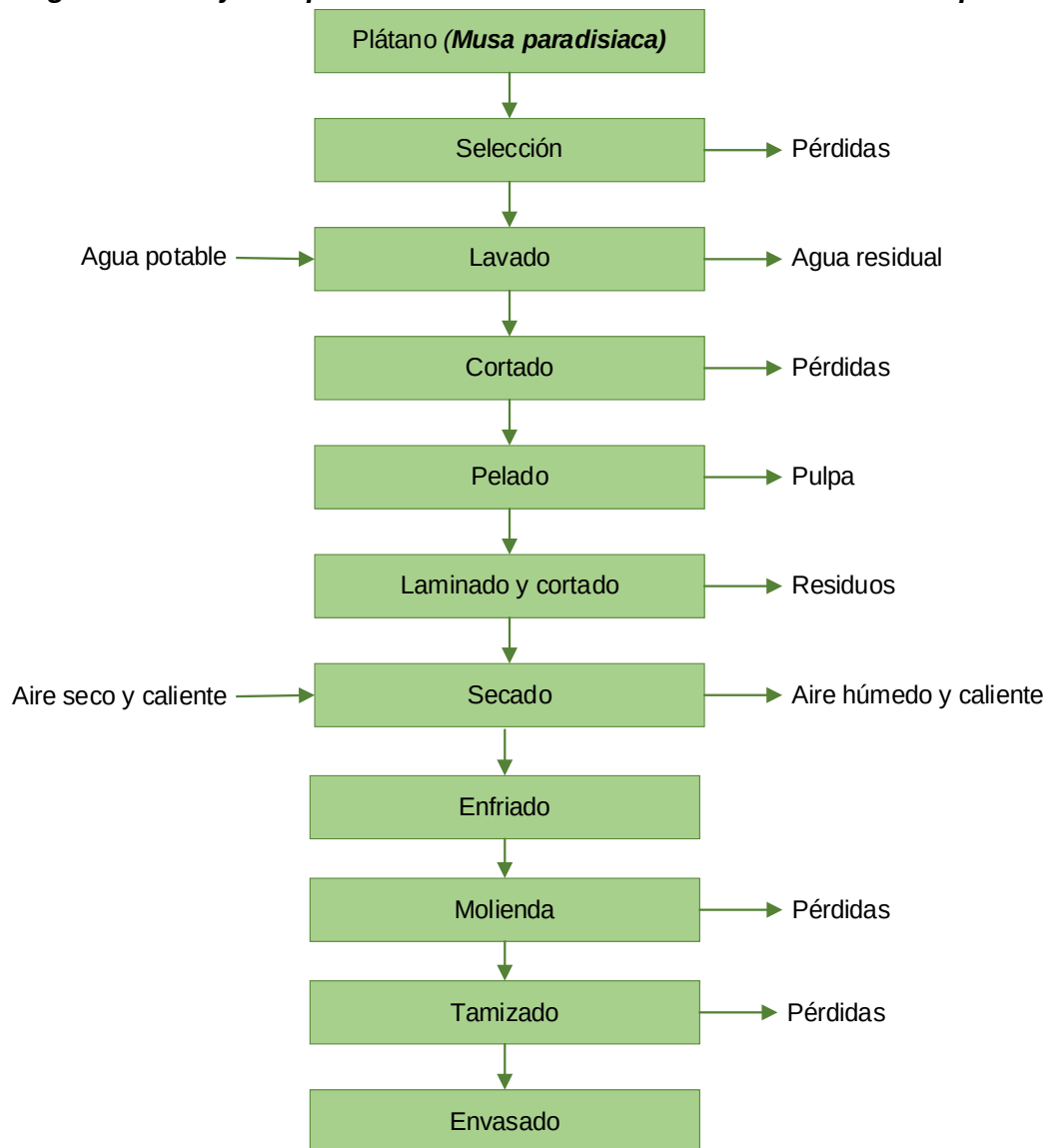
<i>Aditivos de uso alimentario</i>			
Aditivos	Marca	Procedencia	Estado
Ácido cítrico	SOLQUIFAR	Boliviana	Sólido
Ácido ascórbico	SOLQUIFAR	Boliviana	Sólido
Sorbato de potasio	SOLQUIFAR	Boliviana	Sólido

Fuente: Elaboración propia

3.8 Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

En la Figura 3.6, se muestra el diagrama de flujo a nivel experimental del proceso de secado por aire caliente para la obtención de harina de cáscara de plátano.

Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de harina de cáscara de plátano

3.8.1 Descripción del diagrama del proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

Las operaciones que se realizarán del proceso de secado por aire caliente para la obtención de harina de cáscara de plátano se detallan a continuación:

Plátano (*Musa paradisiaca*)

En la Figura 3.7, se muestra el plátano verde (*Musa paradisiaca*), fue adquirida del Mercado Campesino de la ciudad de Tarija.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.7: Plátano verde

Selección

En la Figura 3.8, se muestra el proceso de selección del plátano de acuerdo a su estado de madurez y separando aquellas que se encuentren golpeadas o negras que no son aptas para el proceso.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.8: Selección

Lavado

En la Figura 3.9, se muestra el proceso de lavado del plátano donde se realizó utilizando DG-6 y agua potable en relación 0,1:1 y con la ayuda de un cepillo se retiró impurezas y residuos adheridos al plátano con la finalidad de que quede completamente limpio.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.9: Lavado

Cortado

En la Figura 3.10, se muestra el proceso de cortado que se realizó con de un cuchillo de acero inoxidable y se cortan los cabos y puntas del plátano con la finalidad de separar la porción útil y no útil.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.10: Cortado

Pelado

En la Figura 3.11, se muestra el proceso de pelado que se realizó manualmente con un cuchillo de acero inoxidable, retirando la cáscara de la pulpa con el fin de obtener solo la cáscara.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.11: Pelado

Laminado y cortado

En la Figura 3.12, se muestra el proceso de laminado que se realizó manualmente con la ayuda de un picador de hortalizas para cortar en tiras entre (3 – 4) mm de espesor.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.12: Laminado y cortado

Secado

En la Figura 3.13 se presenta el proceso de secado de las tiras de cáscara de plátano. Inicialmente, se realizaron los ajustes necesarios en el secador de bandejas, lo cual implicó poner en funcionamiento el equipo hasta alcanzar la temperatura de operación establecida de 70 °C, en un tiempo aproximado de 20 minutos. Posteriormente, se activó el generador de aire, regulando la velocidad entre 5 m/s. Una vez configuradas las condiciones de operación, se introdujo la bandeja milimétrica con las muestras de cáscara de plátano. Durante el secado, se realizó un control de la pérdida de peso cada 10 minutos, hasta alcanzar un peso constante en un tiempo estimado de (3 – 4) horas.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.13: Secado

Enfriado y preenvasado

En la Figura 3.14, se muestra las tiras secas que después del secado se retiran de las bandejas para ser enfriadas a temperatura ambiente (20 – 25) °C y evitar que las muestras transpiren durante el envasado. Luego son preenvasadas en bolsas de polipropileno para que no absorban humedad del ambiente.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.14: Enfriado y preenvasado

Molienda

En la Figura 3.15, se muestra el proceso de molienda que consistió en introducir las muestras secas al molino eléctrico con el fin de reducir el tamaño de las partículas hasta alcanzar una granulometría de (0,30) mm



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.15: Molienda

Tamizado

En la Figura 3.16, se muestra el proceso de tamizado que se realizó a la harina de cáscara de plátano en un tamiz vibratorio con abertura (0,25) mm con el fin de obtener una harina de cáscara de plátano fina.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.16: Tamizado

Envasado

En la Figura 3.17, se muestra el proceso de envasado que se realizó a la harina de cáscara de plátano en bolsas de polipropileno de alta densidad con espesor de 0,05 mm y cierre hermético con la finalidad de evitar que adquiriera humedad del ambiente y agentes que puedan contaminar al producto.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.17: Envasado

3.9 Diseño experimental

Según Gutiérrez y De la Vara, (2008) el diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permite entender mejores situaciones complejas de relación causa efecto. De acuerdo con Gutiérrez et al, (2009) el diseño de experimentos puede ser útil, tanto en la fase de diseño del producto o proceso como en la fase de control de procesos y se puede combinar las técnicas de diseños de experimentos con las técnicas básicas de control de calidad.

Así mismo, Melo et al, (2020) adicionalmente, se busca minimizar el efecto de las variables no controlables (covariables), procurando con ello estabilizar y minimizar la variabilidad de las respuestas, identificando los factores que contribuyen a las mayores causas de variabilidad. (p. 3)

3.9.1 Diseño factorial 2^3

Según Montgomery (2004) suponiendo que tres factores A, B y C cada uno con dos niveles, son de interés se utiliza la notación “+” y “-” para representar los niveles alto y bajo de los factores. Al diseño se le llama diseño factorial 2^3 , las combinaciones de los tratamientos en el orden estándar se escriben como (1), a, b, ab, ac, bc y abc.

Este diseño factorial corresponde a la ecuación 3.1:

$$2^k \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Dónde:

2 = Número de niveles

k = Número de variables

Así mismo, Gutiérrez y De la Vara, (2008) señalan que un modelo de regresión permite expresar los resultados de una variable respuesta en las variables independientes de forma matemática. En la ecuación 3.2, se describe el modelo de regresión a ser aplicado:

$$y = \beta_0 + \beta_A X_A + \beta_B X_B + \beta_C X_C - \beta_{AB} X_A X_B - \beta_{AC} X_A X_C - \beta_{BC} X_B X_C + \beta_{ABC} X_A X_B X_C$$

(Ecuación 3.2)

Dónde:

β = Coeficientes de regresión

X_A, X_B, X_C = Valor codificado del factor de diseño

3.9.2 Diseño factorial de 2^3 en el proceso de secado de las muestras de cáscara de plátano

El diseño experimental en el proceso de secado para las muestras de cáscara de plátano en el secador estuvo conformado por tres variables: temperatura, tipo de corte y velocidad de aire donde se aplicó de acuerdo a la ecuación 3.3:

$$2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8 \text{ Tratamientos}$$

(Ecuación 3.3)

Para este efecto, las variables y sus niveles de variación son los siguientes:

- Temperatura de secado (A) = 2 niveles
- Espesor de corte (B) = 2 niveles
- Velocidad de aire (C) = 2 niveles

En la Tabla 3.2, se muestran los niveles de variación de los factores (nivel alto y nivel bajo) aplicado en el proceso de secado por aire caliente conformados por las tres variables: temperatura (A), espesor de corte (B) y velocidad de aire (C).

Tabla 3.2

Niveles de variación aplicado en el proceso de secado por aire caliente

Variables	Nivel inferior	Nivel superior	Unidad
Temperatura (A)	60	70	°C
Espesor de corte (B)	3	4	mm
Velocidad de aire (C)	4	5	m/s

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.3, se muestra un algoritmo del diseño factorial 2^3 que se aplicó en el proceso de secado por aire caliente que estará conformado por tres variables: temperatura (A), espesor de corte (B) y velocidad de aire (C).

Tabla 3.3

Matriz del diseño factorial aplicado en el proceso de secado por aire caliente

Combinación de tratamientos	Factores			Interacciones				Variable respuesta	
	A	B	C	AB	AC	BC	AB C	Hbs	Hbs
(1)	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Hbs ₁	Hbs ₁
A	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Hbs ₂	Hbs ₂
b	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Hbs ₃	Hbs ₃
C	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Hbs ₄	Hbs ₄
Ab	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Hbs ₅	Hbs ₅
Ac	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Hbs ₆	Hbs ₆
Bc	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Hbs ₇	Hbs ₇
abc	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Hbs ₈	Hbs ₈

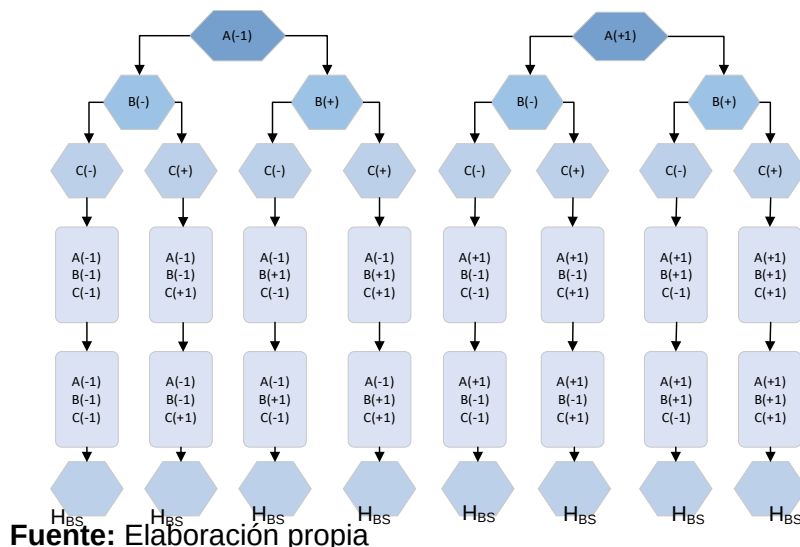
Fuente: Elaboración propia

Dónde:

H_{BS} = Porcentaje de humedad en base seca (Kg agua/Kg sólido seco) en el proceso de secado.

3.10 Algoritmo de variables para la obtención de harina de cáscara de plátano

En la Figura 3.18, se muestra el algoritmo de variables para la obtención de harina de cáscara de plátano en función al diseño factorial 2^3 .

Algoritmo de variables para la obtención de harina de cáscara de plátano

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.18: Algoritmo de variables para la obtención de harina de cáscara de plátano

3.11 Operacionalización de las variables para la obtención de harina de cáscara de plátano por secado de aire caliente

En la Figura 3.19 se muestra la operacionalización de las variables para la obtención de harina de cáscara de plátano verde (*Musa paradisiaca*), por secado de aire caliente.

Operacionalización de las variables para la obtención de harina de cáscara de plátano por secado de aire caliente

Hipótesis	Variables		Definición	Dimensión	Indicador
Mediante el proceso de secado por aire caliente se logrará elaborar harina de cáscara de plátano verde (<i>Musa paradisiaca</i>), en la provincia Cercado de Tarija	Variable dependiente	Harina de cáscara de plátano	Alimento nutritivo, se obtiene como un subproducto del fruto. Contiene un contenido más elevado de grasa que otras harinas. (Zambrano, 2019)	Físicos	Peso (g)
					Longitud (cm)
					Porción comestible (%)
					Porción no comestible (%)
				Fisicoquímicos	Proteína (g/100g)
					Materia grasa (g/100g)
					pH
					Humedad (g/100g)
					Ceniza (g/100g)
					Fibra (g/100g)
				Microbiológicos	Coliformes totales (UFC/g)
					Escherichia coli (UFC/g)
					Mohos y levaduras (UFC/g)
				Humedad relativa	g/m ³
				Contenido de humedad en base seca	g agua/g solido seco
	Variable independiente	Proceso de secado por aire caliente	Operación que se aplica a los alimentos, los cuales son puestos en contacto con una corriente de aire caliente, para rebajar su contenido de humedad (Melo, 2018).	Temperatura	(60 – 70) °C
				Flujo de aire	(m ³ /s)
				Velocidad de aire	(4 – 5) m/s
				Tiempo	(3 – 4) horas
				Tipo de corte	Julianas
				Corte	(3 - 4) mm
				Contenido de humedad	(g agua/g solido seco)
				Curva de secado	Humedad vs tiempo

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19: Operacionalización de las variables para la obtención de harina de cáscara de plátano verde

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Caracterización de la cáscara de plátano verde

Para el presente trabajo de obtención de harina de cáscara de plátano, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros físicos, fisicoquímicos, microbiológicos y micronutrientes y los cuales se detallan a continuación:

4.1.1 Parámetros físicos del plátano (*Musa paradisiaca*)

En base a las 15 muestras de plátano (Figura 4.1) las cuales fueron tomadas aleatoriamente y al azar, se procedieron a determinar las propiedades físicas: altura con cabo y punta (ACCP), altura sin cabo y punta (ASCP), diámetro inferior (DI), diámetro superior (DS), porción comestible (PC), peso total, peso sin cabo y punta (PSCP), porción no comestible (PNC) y peso de las tiras de cáscara de plátano. En donde las muestras fueron adquiridas del Mercado Campesino de la ciudad de Tarija.

Plátano (*Musa paradisiaca*)



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1: Muestras de plátano (*Musa paradisiaca*)

En la Tabla 4.1, se puede observar el promedio de los resultados obtenidos de las propiedades físicas del plátano (*Musa paradisiaca*).

Tabla 4.1

Propiedades físicas del plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)								
Muestras	ACCP (cm)	ASCP (cm)	DI (cm)	DS (cm)	Peso total (g)	PSCP (g)	PC (%)	PNC (%)
1	19,00	14,40	2,00	2, 60	90, 14	79,93	52,58	47,42
2	18,50	14,50	2,00	2,40	94,53	83,76	52,66	47,34
3	18,00	15,80	1,70	2,40	96,13	87,76	52,60	47,40
4	19,50	16,00	2,00	2,40	103,60	104,46	54,27	45,73
5	18,20	15,10	2,00	2,40	89,55	80,74	49,09	50,91
6	18,30	15,10	1,50	2,30	84,37	76,08	51,97	48,03
7	20,20	16,00	2,10	2,30	112,95	103,12	53,62	46,38
8	18,00	16,20	1,70	2,30	114,86	107,75	56,47	43,53
9	18,40	15,80	2,10	2,50	129,65	119,98	57,70	42,30
10	17,00	13,90	2,10	2,60	101,39	92,05	54,22	45,78
11	18,70	15,50	1,90	2,30	116,08	105,73	55,88	44,12
12	17,50	13,90	1,70	2,20	91,76	81,86	54,60	45,40
13	16,80	14,40	1,80	2,10	104,66	90,43	52,92	47,08
14	15,50	14,60	1,70	2,10	113,62	103,82	56,41	43,59
15	18,00	16,00	2,00	2,30	126,67	116,38	54,69	45,31
Promedio	18,11	15,15	1,89	2,35	98,66	95,59	53,98	46,02

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 4.1, se muestran los resultados promedio obtenidos de las características físicas del plátano con altura con cabo y punta (ACCP) 18,11 cm, altura sin cabo y punta (ASCP) 15,15 cm, diámetro inferior (DI) 1,89 cm, diámetro superior (DS) 2,35 cm, peso total (PT) 98,66 g, peso sin cabo y punta (PSCP) 95,59 g, porción comestible (PC) 53,98% y porción no comestible (PNC) 46,02%.

4.1.1.1 Cálculo del rendimiento de las tiras de cáscaras de plátano

En la Tabla 4.2, se puede observar el rendimiento de tiras de cáscara de plátano, en la cual se utilizó un cortador de verduras (Anexo E), para determinar peso total de la cáscara, número de tiras útiles (TU), número de tiras no útiles (TNU), peso de tiras útiles (PTU), peso de tiras no útiles (PTNU), tiras útiles (TU) y tiras no útiles (TNU).

Tabla 4.2

Cálculo del rendimiento de las tiras de cáscara de plátano

Muestras	Peso total (g)	TU (cantidad)	TNU (cantidad)	PTU (g)	PTNU (g)	TU (%)	TNU (%)
1	32,53	114,00	50,00	27,50	5,03	84,54	15,47
2	33,98	81,00	50,00	22,53	10,64	66,30	33,70
3	37,20	102,00	51,00	26,72	10,42	71,83	28,17
4	42,72	110,00	52,00	31,85	10,78	74,55	25,45
5	36,39	96,00	53,00	26,56	9,78	72,99	27,01
6	32,16	95,00	37,00	24,56	7,58	76,37	23,63
7	42,51	97,00	47,00	31,11	11,32	73,18	36,82
8	42,68	113,00	50,00	30,58	11,83	71,65	28,35
9	44,68	115,00	51,00	30,68	13,69	68,67	31,33
10	36,82	101,00	46,00	26,68	10,10	72,46	27,54
11	40,35	107,00	53,00	28,82	11,46	71,47	28,53
12	31,11	91,00	49,00	21,81	9,28	70,11	29,89
13	34,59	89,00	50,00	22,99	11,32	66,46	33,54
14	39,11	95,00	49,00	26,36	12,69	67,40	32,60
15	46,72	132,00	58,00	31,35	15,16	67,10	32,90
Promedio	38,24	102,53	49,73	27,34	10,74	71,67	28,33

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.2, se puede observar el promedio de los resultados obtenidos del cálculo del rendimiento de las tiras de plátano, que presenta peso total 38,24 g; número de tiras útiles 102,53; número de tiras no útiles 49,73; peso de tiras útiles 27,34 g; peso de tiras no útiles 10,74 g; tiras útiles 71,67% y tiras no útiles 28,33%.

4.1.2 Parámetros fisicoquímicos de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados del análisis fisicoquímico de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*), procedente del Mercado Campesino del departamento de Tarija datos extraídos de la Tabla A.1 (Anexo A).

Tabla 4.3

Análisis fisicoquímico de la cáscara de plátano

Parámetros	Unidad	Resultado
Humedad	g/100 g	89,51

Ceniza	g/100 g	1,85
Grasa	g/100 g	0,85
Proteína total (N*6,25)	g/100 g	1,50
Fibra	g/100 g	6,02
Hidratos de carbono	g/100 g	6,29
Valor energético	kcal/100 g	39,00
pH (°)	-	6,56
Sólidos solubles	°Brix	1,10
Sólidos totales	g/100 g	10,49

Fuente: CEANID, 2024

Como se puede observar en la Tabla 4.3, se expresan los resultados del análisis fisicoquímico de la cáscara de plátano contiene: Humedad 89,51 g/100g; Ceniza 1,85 g/100g; Grasa 0,85 g/100g; Proteína total 1,50 g/100g; Fibra 6,02 g/100g; Hidratos de carbono 6,29 g/100g; Valor energético 39 kcal/100g; pH 6,56; Sólidos solubles 1,10 g/100 g y Sólidos totales 10,49 g/100g.

4.1.3 Parámetros microbiológicos de la cáscara de plátano

En la Tabla 4.4, se muestran los resultados del análisis microbiológico de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*), procedente del mercado campesino del departamento de Tarija de datos extraídos de la Tabla A.1 (Anexo A).

Tabla 4.4

Análisis microbiológico de la cáscara de plátano

Microorganismos	Unidad	Resultado
<i>Coliformes fecales</i>	UFC/g	<1,0x10 ¹ (*)
<i>(Coliformes totales)</i>	UFC/g	9,0x10 ²
<i>Escherichia coli</i>	UFC/g	<1,0x10 ¹ (*)
<i>Staphylococcus aureus</i>	UFC/g	<1,0x10 ¹ (*)
(*) No se observa desarrollo de colonias		

Fuente: CEANID, 2024

Como se puede observar en la Tabla 4.4, se expresan los resultados del análisis microbiológico de la cáscara de plátano que contiene: *Coliformes fecales* <1,0x10¹ (*) UFC/g; *Coliformes totales* 9,0x10² UFC/g; *Escherichia coli* <1,0x10¹ (*) UFC/g y *Staphylococcus aureus* <1,0x10¹ (*) UFC/g.

4.1.4 Parámetros de micronutrientes de la cáscara de plátano

En la Tabla 4.5, se muestran los resultados del análisis de micronutrientes de la cáscara de plátano procedente del Mercado Campesino, de datos extraídos de la Tabla A.1 (Anexo A).

Tabla 4.5

Análisis de micronutrientes de la cáscara de plátano		
Micronutrientes	Unidad	Resultado
Potasio	mg/100 g	603
Calcio	mg/100 g	22

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 4.5, se expresan los resultados del análisis de micronutrientes de la cáscara de plátano que presenta Potasio 603 mg/100g y de Calcio 22 mg/100g.

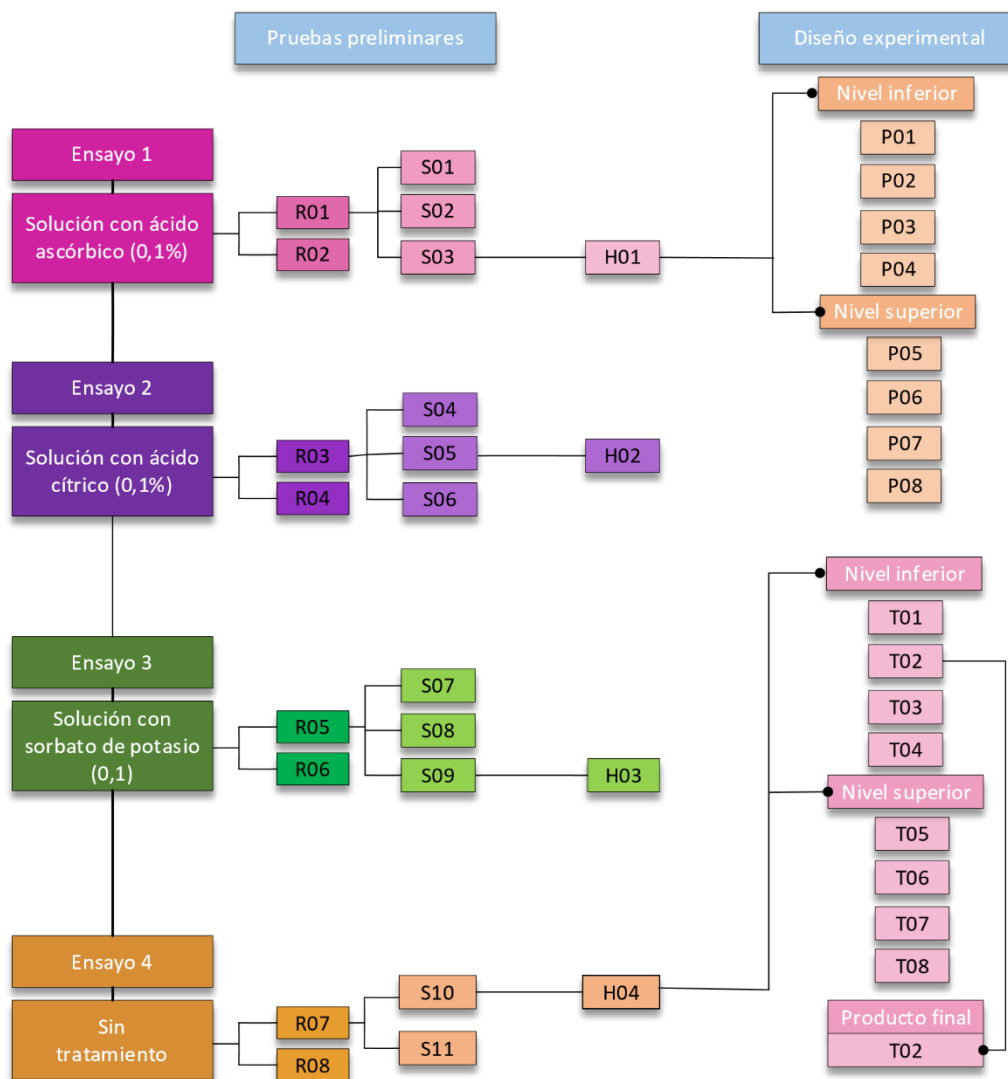
4.2 Caracterización de las variables del proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

Para la caracterización de las variables del proceso de secado con aire caliente para la obtención de harina de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*), se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

4.2.1 Pruebas experimentales para el proceso de secado para la obtención de harina de cáscara de plátano

En la Figura 4.2 se muestra el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación sobre obtención de harina de cáscara de plátano. Para ello, se realizaron cuatro pruebas preliminares: ensayo 1 (ácido ascórbico 0,10%), ensayo 2 (ácido cítrico 0,10%), ensayo 3 (sorbato de potasio 0,10%) y ensayo 4 (sin tratamiento). Cada uno, con dos diferentes tipos de corte: 3 mm (R01, R03, R05 y R07) y muestras de 4 mm (R02, R04, R06 y R08), con el objetivo de determinar el corte más adecuado para el proceso de secado. También se realizaron tres muestras en cada ensayo variando la concentración de ácido ascórbico (0,10%; 0,15% y 0,20%) (S01, S02 y S03), ácido cítrico (0,15%; 0,20% y 0,25) (S04, S05, S06) y sorbato de potasio (0,10%; 0,13% y 0,15%) (S07, S08 y S09), para el ensayo 4 sin tratamiento

se realizó la variación de temperatura de 70 °C y velocidad de aire 5 m/s (S10) y temperatura de 60 °C y velocidad de aire 4 m/s (S11).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Pruebas experimentales para la obtención de harina de cáscara de plátano

Para desarrollar la parte experimental y determinar el contenido de humedad en base seca (H_{BS}) en laboratorio en función de los datos obtenidos en las pruebas experimentales. Este análisis consideró la variación de peso en función de la ecuación (2.2) para establecer el tipo de corte más adecuado en cada prueba. Para ello, se tomó como referencia el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 89,51% (CEANID, 2024), y se utilizó la ecuación 2.2:

$$H_{BS} = \frac{m_i - m_{ss}}{m_{ss}}$$

El proceso de secado se llevó a cabo bajo condiciones controladas, a temperatura de 60°C y velocidad de aire de 4 m/s constante en el proceso de secado y para calcular la masa del sólido seco (m_{ss}) se empleó la ecuación 2.3:

$$m_{ss} = m_i (1 - H_{BH}) \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde:

m_i = Masa inicial (kg)

m_{ss} = Masa del sólido seco (kg)

H_{BH} = Contenido de humedad en base húmeda (kg agua/kg sólido húmedo)

H_{BS} = Contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

4.2.2.1 Prueba preliminar para elegir el tipo de corte con solución de ácido ascórbico para el ensayo 1

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos del ensayo 1, en el que se utilizó una solución de ácido ascórbico al 0,10% con un tiempo de inmersión de 10 minutos), con el fin de observar la diferencia en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Variando el tipo de corte (Hendley, 2016). Corte 3 mm (R01), el tiempo de secado 200 minutos y 4 mm (R02) tiempo de secado 260 minutos; tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 89,51% (CEANID, 2024) y se empleó la ecuación (2.2).

Tabla 4.6

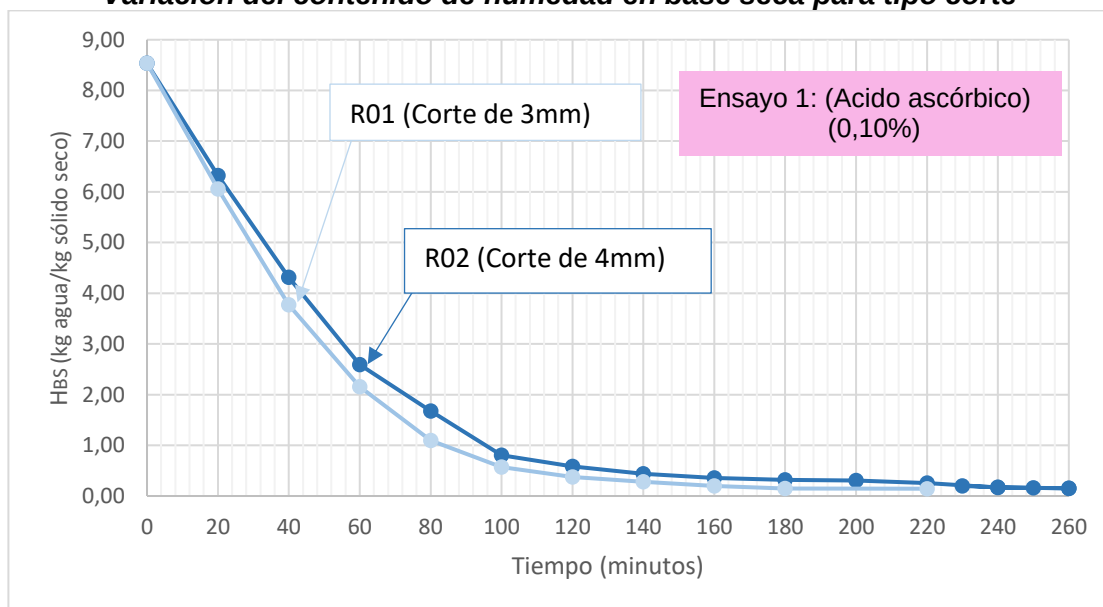
Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 1

Tiempo (min)	Corte 3mm (R01)		Corte 4mm (R02)		Tiempo (min)	Corte 3mm (R01)		Corte 4mm (R02)	
	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}		Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}
0	100,33	8,54	100,87	8,54	140	13,46	0,23	29,51	0,44
20	74,19	6,05	83,59	6,32	160	12,58	0,20	23,03	0,35
40	50,19	3,77	70,22	4,31	180	12,10	0,15	20,14	0,32
60	33,22	2,16	61,36	2,59	200	12,06	0,14	15,49	0,30
80	23,08	1,09	53,02	1,67	220	-	-	12,99	0,25
100	16,53	0,57	44,44	0,80	240	-	-	12,31	0,17
120	14,45	0,37	36,31	0,58	260	-	-	12,15	0,15

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.3, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el tipo corte del ensayo 1 con solución de ácido ascórbico (0,10%) en base a datos de la Tabla 4.6

Variación del contenido de humedad en base seca para tipo corte



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3: Variación del contenido de humedad en base seca para tipo corte del ensayo 1

En la Figura 4.3, se observan que la muestra R01 y R02 inicia con un mismo contenido de humedad en base seca 8,54 kg agua/kg sólido seco. Para la muestra R01, después

de 120 minutos de secado, el contenido de humedad en base seca se disminuye al valor de (0,37 kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la muestra R02 el contenido de humedad en base seca es de (0,58 kg agua/kg sólido seco) a 120 minutos y de (0,15 kg agua/kg sólido seco) a 260 minutos. Debido que la muestra R01 presentaba un corte 3 mm alcanzó el menor contenido de humedad en base seca en el menor tiempo de secado de 200 minutos. Por lo cual, se seleccionó como la opción más adecuada para el proceso de secado porque permitió un secado más rápido y eficiente.

4.2.2.2 Variación de la concentración de ácido ascórbico para muestras del ensayo 1

En la Tabla 4.7, se resumen los valores de concentración y tiempo de inmersión en cada caso, tomando en cuenta como referencia la muestra R01; con el fin de observar diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Las mismas se pueden observar en la Figura 4.4a, Figura 4.4b y Figura 4.4c.

Tabla 4.7

Valores de concentración y tiempo de inmersión para el ensayo 1

Muestras	Concentración (%)	Tiempo de Inmersión (min)
S01	0,10	10
S02	0,15	7
S03	0,20	5

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.4a, Figura 4.4b y Figura 4.4c se observan las diferencias de cada una de las muestras tratadas con ácido ascórbico de las muestras (tiras de cáscara de plátano) que pasaron por un proceso de secado y molienda para obtener un producto intermedio (harina de cáscara de plátano) e identificar la variación de los atributos sensoriales previstos.

Diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado del ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4.4a la muestra (S01) (0,10%, 10 min) presentó un color oscuro, apariencia fina y mayor tiempo de secado 260 min. En Figura 4.4b la muestra (S02) (0,15%, 7 min) mostró un color ligeramente oscuro, textura fina y tiempo de secado intermedio 240 min. Finalmente, en la Figura 4.4c la muestra (S03) (0,20%, 5 min) presentó un color ligeramente claro con apariencia y textura fina, y menor tiempo de secado 200 min. Se observa que al aumentar la concentración del ácido ascórbico y reducir el tiempo de inmersión, las muestras tienden a preservar un color más natural, presentando la misma textura y reduciendo tiempo de secado.

4.2.2.3 Prueba preliminar para elegir tipo de corte en solución de ácido cítrico para el ensayo 2

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados obtenidos del ensayo 2, en el que se utilizó una solución de ácido cítrico al 0,10% con un tiempo de inmersión de 10 minutos, con el fin de observar la diferencia en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Variando el tipo de corte (Hendley, 2016). Corte 3 mm (R03) tiempo de secado 200 minutos y 4 mm (R04) tiempo de secado 260 minutos; tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 89,51% (CEANID, 2024) y se empleó la ecuación (2.2).

Tabla 4.8

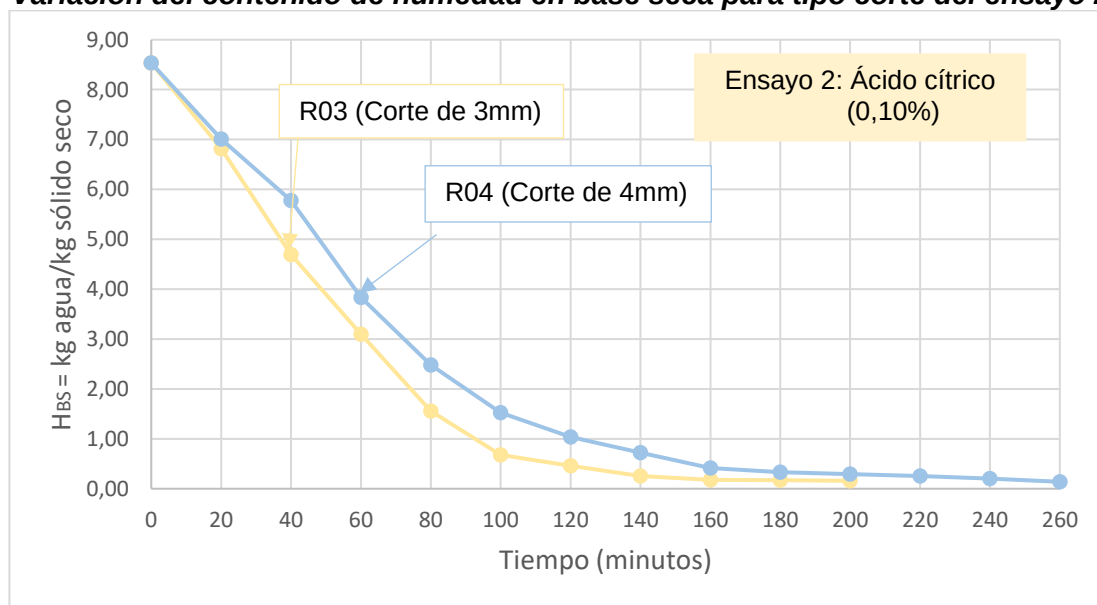
Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 2

Tiempo (min)	Corte 3mm (R03)		Corte 4mm (R04)		Tiempo (min)	Corte 3mm (R03)		Corte 4mm (R04)	
	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}		Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}
0	100,86	8,53	110,92	8,53	140	14,33	0,25	20,05	0,72
20	82,71	6,82	93,18	7,00	160	12,45	0,18	16,47	0,42
40	58,67	4,70	78,89	5,78	180	12,36	0,17	15,49	0,33
60	43,32	3,09	55,09	3,84	200	12,27	0,16	15,07	0,30
80	27,06	1,56	40,52	2,48	220	-	-	14,61	0,26
100	17,74	0,68	28,21	1,52	240	-	-	13,96	0,20
120	15,44	0,46	23,69	1,04	260	-	-	12,25	0,14

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.5, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el tipo corte del ensayo 2 con solución de ácido cítrico (0,10%) en base a datos de la Tabla 4.8.

Variación del contenido de humedad en base seca para tipo corte del ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5: Variación del contenido de humedad en base seca para tipo de corte del ensayo 2

En la Figura 4.5, se observan que la muestra R03 y R04 inicia con un mismo contenido de humedad en base seca 8,53 kg agua/kg sólido seco. Para la muestra R03, después de 120 minutos de secado, el contenido de humedad en base seca se disminuye al

valor de (0,46 kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la muestra R04 el contenido de humedad en base seca es (1,04 kg agua/kg sólido seco) a 120 minutos y de (0,15 kg agua/kg sólido seco) a 260 minutos. Debido a que la muestra R03 presentaba un corte 3 mm alcanzó un menor contenido de humedad en base seca en el menor tiempo de secado de 200 minutos. Por lo cual, se seleccionó como la opción más adecuada para el proceso de secado porque permitió un secado más rápido y eficiente.

4.2.2.4 Variación de la concentración de ácido cítrico para muestras del ensayo 2

En la Tabla 4.9, se resume los valores de concentración y tiempos de inmersión en cada caso, tomando en cuenta como referencia la muestra R03; con el fin de observar diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Las mismas se pueden observar en la Figura 4.6a, Figura 4.6b y Figura 4.6c.

Tabla 4.9

Valores de concentración y tiempo de inmersión para el ensayo 2

Muestras	Concentración (%)	Tiempo de Inmersión (min)
S04	0,15	10
S05	0,20	7
S06	0,25	5

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.6a, Figura 4.6b y Figura 4.6c se observan las diferencias de cada una de las muestras tratadas con ácido cítrico de las muestras (tiras de cáscara de plátano) que pasaron por un proceso de secado y molienda para obtener un producto intermedio (harina de cáscara de plátano) e identificar la variación de los atributos sensoriales previstos.

Diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado del ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4.6a la muestra (S04) (0,15%, 10 min) presentó un color oscuro, apariencia fina y mayor tiempo de secado 270 min. En Figura 4.6b la muestra (S05) (0,20%, 7 min) mostró un color ligeramente oscuro, textura fina y tiempo de secado menor 210 min. Finalmente, en la Figura 4.6c la muestra (S06) (0,25%, 5 min) presentó un color oscuro con apariencia y textura fina, y tiempo intermedio de secado 250 min. Se observa que al aumentar la concentración del ácido ascórbico y reducir el tiempo de inmersión, las muestras cambian su atributo color, presentando la misma textura y alterando su tiempo de secado.

4.2.2.5 Prueba preliminar para elegir tipo de corte en solución de sorbato de potasio para el ensayo 3

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos del ensayo 3, en el que se utilizó una solución de sorbato de potasio al 0,10% con un tiempo de inmersión de 10 minutos; con el fin de observar la diferencia en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Variando el tipo de corte (Hendley, 2016). Corte 3 mm (R05) tiempo de secado 200 minutos y 4 mm (R06) tiempo de secado 260 minutos; tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 89,51% (CEANID, 2024) y se empleó la ecuación (2.2).

Tabla 4.10

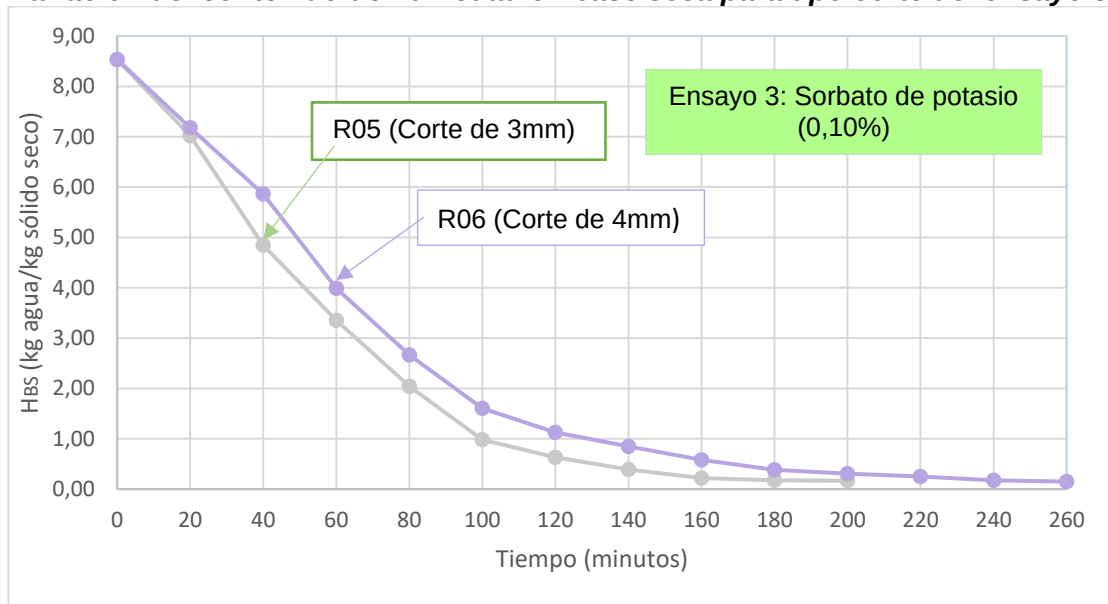
Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 3

Tiempo (min)	Corte 3mm (R05)		Corte 4mm (R06)		Tiempo (min)	Corte 3mm (R05)		Corte 4mm (R05)	
	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}		Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}
0	100,26	8,53	110,82	8,53	140	14,63	0,39	21,48	0,85
20	84,31	7,02	95,09	7,18	160	12,79	0,22	17,56	0,58
40	61,45	4,84	79,79	5,86	180	12,37	0,18	16,12	0,39
60	45,76	3,35	57,43	3,99	200	12,27	0,17	15,21	0,31
80	31,98	2,04	42,61	2,66	220	-	-	14,55	0,25
100	19,78	0,98	29,14	1,51	240	-	-	13,62	0,17
120	17,15	0,63	24,77	1,13	260	-	-	1,36	0,15

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.7, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el tipo corte del ensayo 3 con solución de sorbato de potasio (0,10%) en base a datos de la Tabla 4.10.

Variación del contenido de humedad en base seca para tipo corte del ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7: Variación del contenido de humedad en base seca para tipo de corte del ensayo 3

En la Figura 4.7, se observan que la muestra R05 y R06 inician con un mismo contenido de humedad en base seca 8,53 kg agua/kg sólido seco. Para la muestra

R05, después de 120 minutos de secado, el contenido de humedad en base seca disminuye al valor de (0,63 kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la muestra R06 el contenido de humedad en base seca es (1,13 kg agua/kg sólido seco) a 120 minutos y de (0,15 kg agua/kg sólido seco) a 260 minutos. Debido que la muestra R05 presentaba un corte 3 mm alcanzó un menor contenido de humedad en base seca en el menor tiempo de secado de 200 minutos. Por lo cual, se seleccionó como la opción más adecuada para el proceso de secado porque permitió un secado más rápido y eficiente.

4.2.2.6 Variación de la concentración de sorbato de potasio para muestras del ensayo 3

En la Tabla 4.11, se resume los valores de concentración y tiempos de inmersión en cada caso; tomando en cuenta como referencia la muestra R05; con el fin de observar diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Las mismas se pueden observar en la Figura 4.8a, Figura 4.8b y Figura 4.8c.

Tabla 4.11

Valores de concentración y tiempo de inmersión para el ensayo 3

Muestras	Concentración (%)	Tiempo de Inmersión (min)
S07	0,10	10
S08	0,13	12
S09	0,15	12

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.8a, Figura 4.8b y Figura 4.8c se observa las diferencias de cada una de las muestras tratadas con sorbato de potasio, de las muestras (tiras de cáscara de plátano) que pasaron por un proceso de secado y molienda para obtener un producto intermedio (harina de cáscara de plátano) e identificar la variación de los atributos sensoriales previstos.

Diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado del ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4.8a la muestra (S07) (0,10%, 10 min) presentó un color oscuro, apariencia fina y mayor tiempo de secado 270 min. En Figura 4.8b la muestra (S08) (0,13%, 12 min) mostró un color ligeramente oscuro, textura fina y tiempo de secado intermedio 250 min. Finalmente, en la Figura 4.8c la muestra (S09) (0,15%, 12 min) presentó un color oscuro con apariencia y textura fina, y menor tiempo de secado 210 min. Se observa que al aumentar la concentración del sorbato de potasio y aumentar el tiempo de inmersión, las muestras cambian su atributo color, presentando la misma textura y reduciendo tiempo de secado.

4.2.2.7 Prueba preliminar para elegir el tipo de corte sin tratamiento para el ensayo 4

En la Tabla 4.12 se presentan los resultados obtenidos del ensayo 4 sin tratamiento (natural), variando el tipo de corte (Hendley, 2016). Corte de 3 mm (R07) tiempo de secado 180 minutos y 4 mm (R08) tiempo de secado 240 minutos; tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 89,51% (CEANID, 2024) y se empleó la ecuación (2.2).

Tabla 4.12

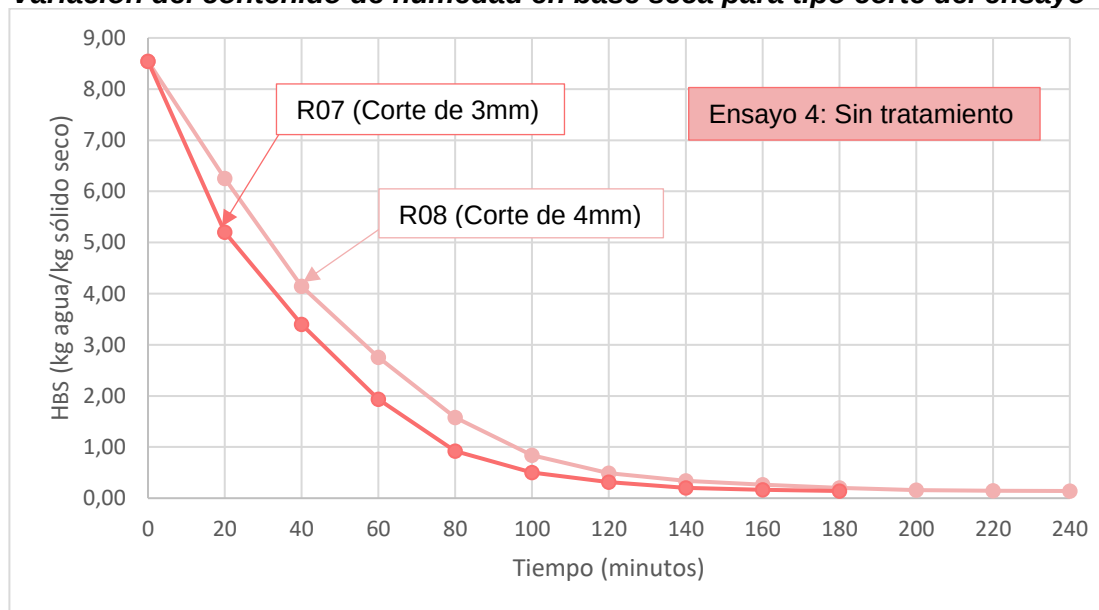
Variación del contenido de humedad en base seca para el ensayo 4

Tiempo (min)	Corte 3mm (R07)		Corte 4mm (R08)		Tiempo (min)	Corte 3mm 7(R08)		Corte 4mm (R08)	
	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}		Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}
0	100,26	8,53	110,82	8,53	140	12,70	0,20	15,54	0,34
20	76,20	5,20	84,24	6,25	160	12,34	0,17	14,69	0,27
40	46,58	3,40	59,75	4,15	180	12,08	0,14	13,95	0,20
60	31,09	1,94	43,59	2,75	200	-	-	13,45	0,16
80	20,34	0,92	29,96	1,58	220	-	-	13,31	0,15
100	15,87	0,50	21,40	0,84	240	-	-	13,26	0,14
120	13,91	0,31	17,31	0,49	260	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.9, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el tipo corte del ensayo 4 sin tratamiento (natural) en base a datos de la Tabla 4.12

Variación del contenido de humedad en base seca para tipo corte del ensayo 4



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9: Variación del contenido de humedad en base seca para tipo de corte del ensayo 4

En la Figura 4.9, se observan que la muestra R07 y R08 inician con un mismo contenido de humedad en base seca 8,53 kg agua/kg sólido seco. Para la muestra R07, después de 120 minutos de secado, el contenido de humedad en base seca

disminuye al valor de (0,31 kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la muestra R08 el contenido de humedad en base seca es (0,49 kg agua/kg sólido seco) a 120 minutos y de (0,14 kg agua/kg sólido seco) a 260 minutos. Debido que la muestra R07 presentaba un corte 3 mm alcanzó un menor contenido de humedad en base seca en menor tiempo de secado de 180 minutos. Por lo cual, se seleccionó como la opción más adecuada para el proceso de secado porque permitió un secado más rápido y eficiente.

4.2.2.8 Variación de temperatura de secado y velocidad de aire para muestras sin tratamiento del ensayo 4

En la Tabla 4.13, se resume los valores de temperatura de secado y velocidad de aire en cada caso, tomando en cuenta como referencia la muestra R07; con el fin de observar la diferencia en el atributo color, apariencia y tiempo de secado. Las mismas se pueden observar en la Figura 4.10a y Figura 4.10b.

Tabla 4.13

Valores de concentración y tiempo de inmersión para el ensayo 4

Muestras	Temperatura de secado (°C)	Velocidad de aire (m/s)
S10	70	5
S11	60	4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.10a, Figura 4.10b y Figura 4.10c se observan las diferencias de cada una de las muestras, las muestras (tiras de cáscara de plátano) que pasaron por un proceso de secado y molienda para obtener un producto intermedio (harina de cáscara de plátano) e identificar la variación de los atributos sensoriales previstos.

Diferencias en el atributo color, apariencia y tiempo de secado en el ensayo 4



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4.10a la muestra (S010) presentó un color ligeramente oscuro, apariencia fina y menor tiempo de secado 170 min. Finalmente, en la Figura 4.10b la muestra (S11) presentó un color ligeramente oscuro con apariencia y textura fina, y mayor tiempo de secado 190 min. Se observa que al aumentar la temperatura y aumentar la velocidad de aire, las muestras preservan el mismo atributo color, presentando la misma textura y reduciendo su tiempo de secado.

4.3 Pruebas preliminares para determinar pretratamiento a ser aplicado en las muestras de cáscara de plátano

Tras llevar a cabo el proceso de secado para la obtención del producto intermedio (harina de cáscara de plátano), en el cual se realizaron cuatro ensayos preliminares con diferentes pretratamientos y evaluar muestras sin pretratamiento bajo distintas condiciones de secado. Luego de analizar el comportamiento de cada una de ellas, se seleccionaron las muestras S03, S05, S09 y S10, las cuales fueron recodificadas como H01, H02, H03 y H04, respectivamente. Esta recodificación permitió comparar las muestras con y sin pretratamiento, con el fin de determinar el pretratamiento más adecuado para la producción de harina de cáscara de plátano.

En la Tabla 4.14 se presentan los resultados obtenidos para la muestra H01 (ácido ascórbico), muestra H02 (ácido cítrico), muestra H03 (sorbato de potasio) y muestra H04 (sin tratamiento). En este análisis, se consideró el contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del 89,51% (CEANID, 2024) y utilizando la ecuación (2.2).

Tabla 4.14

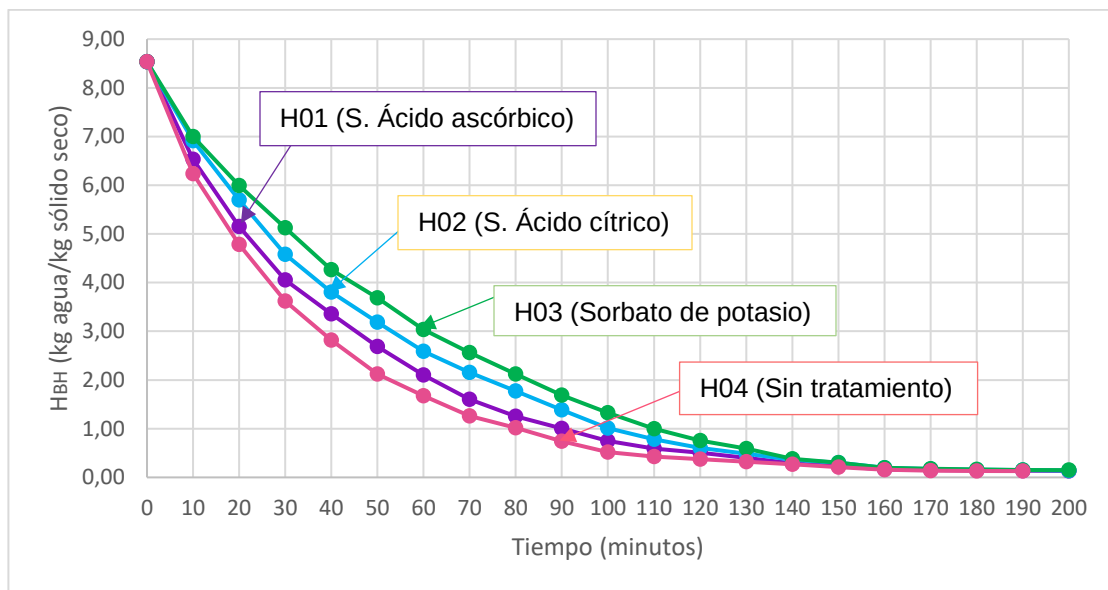
Pruebas preliminares para determinar pretratamiento a ser aplicado en las muestras de cáscara de plátano

Tiempo (min)	Ácido ascórbico (H01)		Ácido cítrico (H02)		Sorbato de potasio (H03)		Sin tratamiento (H04)	
	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}	Peso (g)	H _{BS}
0	100,10	8,53	100,65	8,53	100,46	8,53	100,23	8,53
10	79,10	6,53	83,55	6,91	84,28	6,99	76,10	6,24
20	64,62	5,15	70,69	5,70	73,72	5,99	60,84	4,79
30	53,06	4,05	58,93	4,58	64,53	5,12	48,59	3,62
40	45,77	3,36	50,70	3,80	55,49	4,27	40,12	2,82
50	38,71	2,69	44,23	3,19	49,42	3,69	32,84	2,12
60	32,56	2,10	37,87	2,59	42,53	3,04	28,14	1,68
70	27,37	1,61	33,28	2,15	37,54	2,56	23,77	1,26
80	23,65	1,25	29,31	1,78	32,88	2,12	21,24	1,02
90	21,09	1,01	25,21	1,39	28,33	1,69	18,35	0,74
100	18,38	0,75	21,20	1,01	24,54	1,33	16,00	0,52
110	16,69	0,59	18,85	0,79	21,07	0,99	15,02	0,43
120	15,78	0,50	16,93	0,60	18,49	0,75	14,43	0,37
130	14,70	0,40	15,71	0,49	16,74	0,59	13,90	0,32
140	13,56	0,29	14,40	0,36	14,59	0,38	13,33	0,27
150	12,90	0,23	13,72	0,30	13,69	0,29	12,71	0,21
160	12,21	0,16	12,61	0,19	12,58	0,20	12,19	0,16
170	12,08	0,15	12,37	0,17	12,40	0,18	12,00	0,14
180	12,00	0,14	12,25	0,16	12,25	0,16	11,90	0,13
190	11,94	0,14	12,13	0,15	12,16	0,15	11,87	0,13
200	11,90	0,13	12,05	0,14	12,11	0,15	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.11 se muestra la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras de cáscara de plátano sometidas a pretratamiento por inmersión en diferentes soluciones: ácido ascórbico (H01), ácido cítrico (H02) y sorbato de potasio (H03), así como la muestra sin pretratamiento (H04). Para ello, se registraron datos cada 10 minutos bajo condiciones de secado a 60°C, con una velocidad de aire de 4 m/s y un espesor de corte de 3 mm, de acuerdo con los datos presentados en las Tabla 4.10, Tabla 4.11, Tabla 4.12 y Tabla 4.13.

Variación del contenido de humedad en función del tiempo de secado



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.11: Variación del contenido de humedad en función del tiempo de secado

Según la Figura 4.11, el contenido de humedad final en base seca y tiempo de secado se ven influenciados por el tipo de pretratamiento aplicado, bajo las condiciones de secado a temperatura (60°C), espesor de corte (3 mm) y velocidad de flujo de aire (4 m/s). Los resultados muestran que, tras 200 minutos de secado, la muestra H01 presentó una pérdida de agua (0,133 kg agua/kg sólido seco), la muestra H02 (0,141 kg agua/kg sólido seco), y la muestra H03 (0,149 kg agua/kg sólido seco). En el caso de la muestra H04 (sin pretratamiento), se alcanzó una pérdida de agua (0,129 kg agua/kg sólido seco) en un tiempo menor, de 190 minutos.

En base a la muestra que presenta menos contenido de humedad al menor tiempo de secado, por lo cual, se procedió a elegir la muestra H04 sin tratamiento para la obtención de harina de cáscara de plátano ya que presenta menor tiempo de secado (190 min) en comparación con las demás muestras. Así mismo, se procedió a tomar en cuenta la muestra pretratada con ácido ascórbico (H01) con la finalidad de determinar si existen diferencias durante el proceso de secado.

4.4 Diseño experimental en el proceso de secado de muestras de cáscara de plátano en solución de ácido ascórbico

En el Cuadro 4.1 se presentan las variables consideradas para la aplicación experimental del diseño factorial 2^3 en el proceso de secado, con base en la muestra ideal (H01), con el propósito de obtener harina de cáscara de plátano. Así mismo se tomó como variable respuesta el contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco) que se detalla en el (Anexo G) metodología de la termobalanza

Cuadro 4.1

Variables experimentales consideradas para la muestra H01

Variables	Niveles utilizados
Temperatura (°C)	60 – 70
Espesor de corte (mm)	3 – 4
Velocidad de aire (m/s)	4 – 5

Fuente: Elaboración propia

4.4.1 Diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de muestras de cáscara de plátano con solución de ácido ascórbico

En la Tabla 4.15, se muestra la matriz de variables controladas durante el proceso de secado por aire caliente de tiras de cáscara de plátano en solución de ácido ascórbico (0,20%) y los resultados de las variables respuesta del contenido de humedad en base seca.

Tabla 4.15

Contenido de humedad en base seca de las muestras con solución de ácido ascórbico

Tratamientos	Factores			Réplica I	Réplica II	Total Y_1
	Temperatura	Espesor de corte	Velocidad de aire			
	A	B	C			
(1)	60	3	4	0,149	0,135	0,142
A	70	3	4	0,152	0,120	0,136
B	60	4	4	0,166	0,168	0,167
Ab	70	4	4	0,151	0,157	0,154
C	60	3	5	0,166	0,149	0,158
Ac	70	3	5	0,126	0,138	0,132
Bc	60	4	5	0,167	0,153	0,160
abc	70	4	5	0,145	0,143	0,144

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1 Análisis de varianza del diseño factorial del proceso de secado de cáscara de plátano

En la Tabla 4.16, se muestra los resultados del análisis de varianza de acuerdo a los datos de la Tabla 4.15 introducidos al software “statgraphics centurión 19 – X64” en función al contenido de humedad en base seca de datos extraídos de la Tabla (B 1.5) (Anexo B.1).

Tabla 4.16

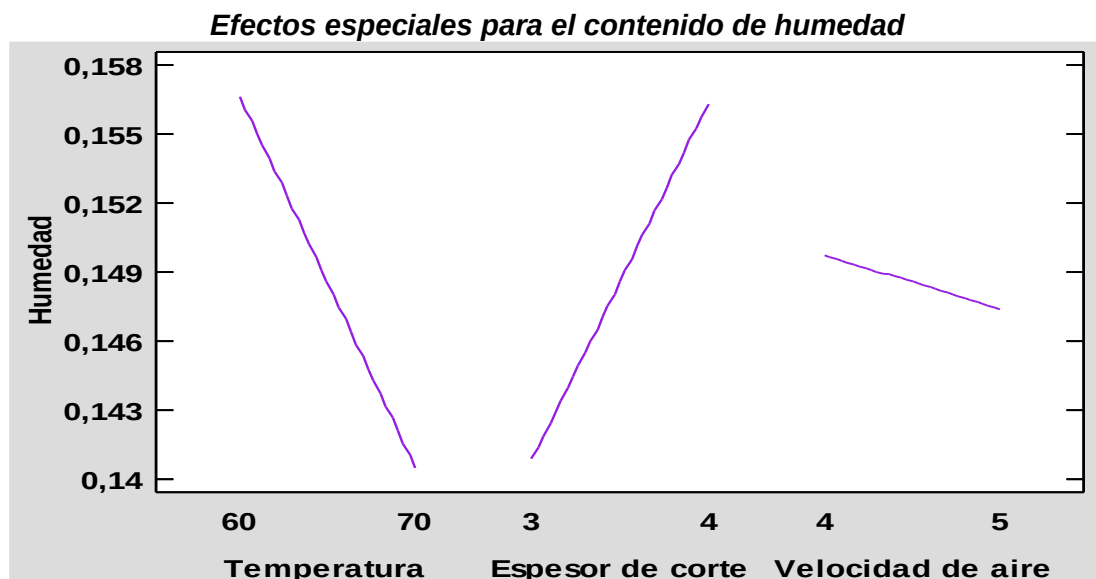
Análisis de varianza en función de la variable respuesta de humedad

Fuente de varianza (FV)	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	Fcal	Ftab
Factor A	0,00104006	1	0,00104006	9,43	5,318
Factor B	0,00094556	1	0,00094556	8,57	5,318
Factor C	0,00002256	1	0,00002256	0,20	5,318
Interacción AB	0,00001056	1	0,00001056	0,10	5,318
Interacción AC	0,00017556	1	0,00017556	1,59	5,318
Interacción BC	0,00015006	1	0,00015006	1,36	5,318
Interacción ABC	0,00010506	1	0,00010506	0,95	5,318
Error total	0,00088250	8	0,00011031	-	-
Total	0,00333194	15	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.16 se observa que el factor C, así como las interacciones AB, AC, BC y ABC, no presentan diferencias significativas, ya que el valor de $F_{cal} < F_{tab}$. Por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada. No obstante, para los factores A y B, se evidencian diferencias significativas en el proceso de secado, dado que $F_{cal} > F_{tab}$; en consecuencia, se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

En la Figura 4.12, se muestran los efectos principales para los factores: A (temperatura), B (velocidad de aire) y C (espesor de corte) con relación a la variable respuesta contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco).



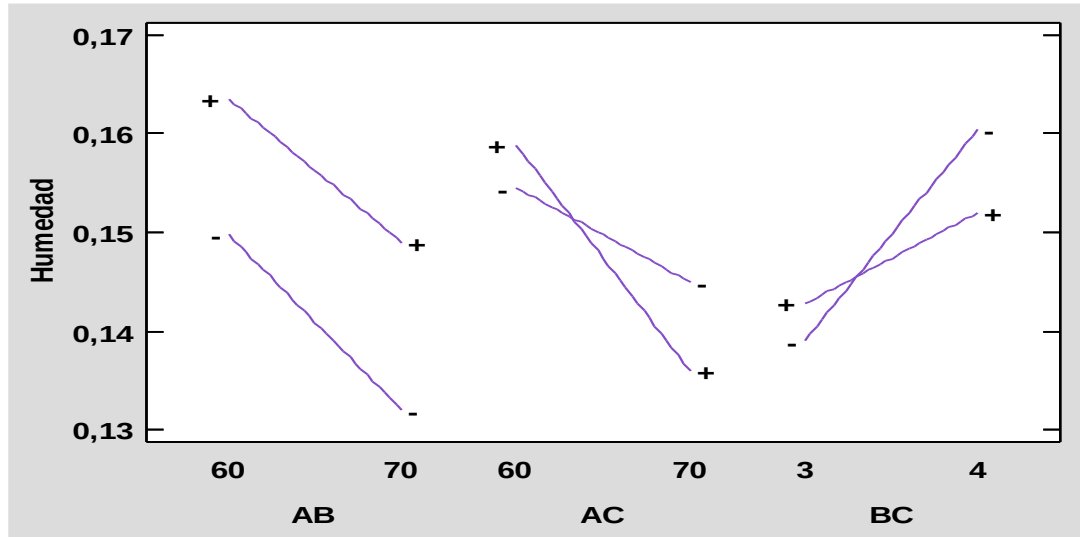
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12: Efectos especiales para el contenido de humedad

En la Figura 4.12 se observa que los factores A (temperatura), en el rango de (60 – 70) °C, y B (espesor de corte), entre (3 – 4) mm, influyen significativamente sobre la variable respuesta del contenido de humedad en base seca cuando se encuentran en sus niveles alto y bajo. Sin embargo, el factor C (velocidad del aire), en el rango de (4 – 5) m/s, no presenta una incidencia significativa en dichos niveles, ya que la variación del contenido de humedad en base seca es mínima.

En la Figura 4.13, se muestra la interacción del contenido de humedad en base seca de factores: temperatura – espesor de corte (AB), temperatura – velocidad de aire (AC) y espesor de corte – velocidad de aire (BC) de las tiras de cáscara de plátano con solución de ácido ascórbico al 0,20%.

Interacción de los factores con relación al contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

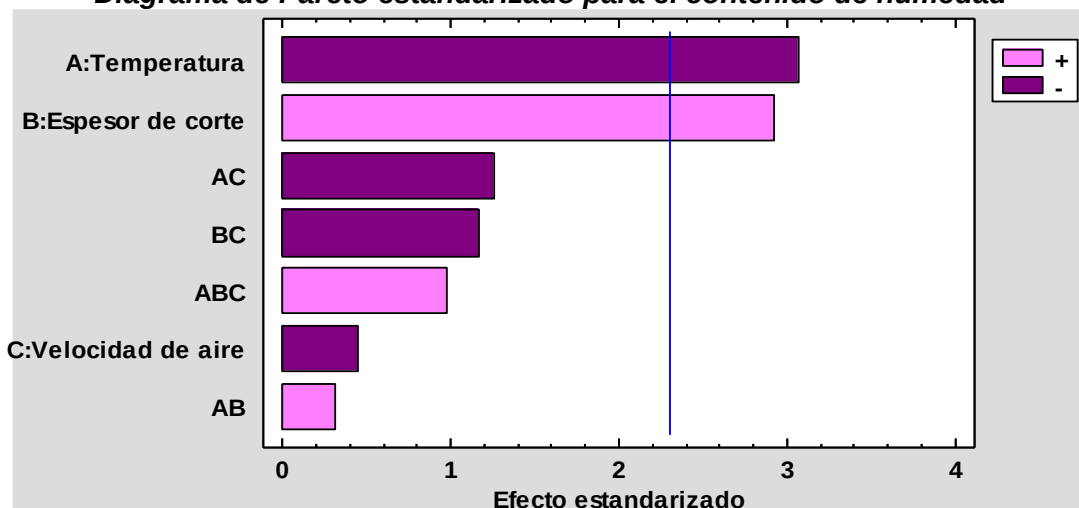
Figura 4.13: Interacción de los factores con relación al contenido de humedad

Según la Figura 4.13, se observa que para la interacción AB para temperatura de 60 °C el contenido de humedad se ve afectado cuando el factor B (espesor de corte) se encuentra en su nivel alto y bajo (3 – 4) mm, de igual manera para temperatura de 70 °C el contenido de humedad se ve afectado cuando el factor B (espesor de corte) se encuentra en su nivel alto y bajo. Así mismo, la interacción AC es significativa debido a que las variables interaccionan entre sí, para temperatura de 60 °C, el contenido de humedad no se ve afectado debido a que el contenido de humedad es mínimo cuando el factor C (velocidad de secado), se encuentre en su nivel alto y bajo (4 – 5) m/s, sin embargo, para temperatura de 70 °C el contenido de humedad se ve afectado por el factor C (espesor de corte) cuando se encuentre en su nivel alto y bajo. Por otro lado, la interacción BC es significativa debido a que los factores de las variables interaccionan entre sí, para un corte de 3 mm, el contenido de humedad no se ve afectado debido a que el contenido de humedad es mínimo cuando el factor C (velocidad de secado), se encuentre en su nivel alto y bajo (4 – 5) m/s. Sin embargo, para el corte de 4 mm el contenido de humedad se ve afectado por el factor C (espesor de corte) cuando se encuentre en su nivel alto y bajo.

En la Figura 4.14 se presenta el diagrama de Pareto estandarizado correspondiente a los factores considerados en el diseño factorial. En donde, el nivel de significancia

estadística está representado por una línea vertical de referencia con un valor de 2,303. Por lo tanto, aquellos factores que sobrepasan la línea son considerados estadísticamente significativos para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14: Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad

Según la Figura 4.14, se observa que los factores: temperatura (A), temperatura – velocidad de aire (AC), espesor de corte – velocidad de aire (BC) y velocidad de aire (C), influyen de manera negativa es decir que disminuyen el contenido de humedad en base seca. Mientras que los factores: espesor de corte (B), temperatura – espesor de corte – velocidad de aire (ABC) y temperatura – espesor de corte (AB) influyen de manera positiva es decir que aumentan el contenido de humedad en base seca. Sin embargo, los factores temperatura (A) y espesor de corte (B) son significativos debido que sobre pasa la línea vertical de referencia con un valor de 2,303 a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

4.4.1.2 Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca

Según la ecuación (3.2) del modelo de regresión para un diseño 2^k , en la ecuación (4.1) se observa el modelo de regresión que se ajusta a los datos experimentales para el contenido de humedad en base seca de tiras de cáscara de plátano sin tratamiento y de los datos extraídos de la Tabla B.1.3. (Anexo B).

$$X = (-2,395 + 0,0355*A + 0,649*B + 0,593*C + 0,0089*A*B + 0,0085*A*C + 0,1455*B*C + 0,00205*A*B*C) \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde:

X = Regresión del contenido de humedad

A = Temperatura (°C)

B = Espesor de corte (mm)

C = Velocidad de aire (m/s)

4.4.1.3 Optimización de respuesta de los factores de secado de cáscara de plátano con ácido ascórbico

En la Tabla 4.17, se muestran los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de cáscara de plátano; en base de los datos extraídos de la Tabla (B.1.7) (Anexo B).

Tabla 4.17

Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca

Factores	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura (A)	60,0	70,0	70,0
Espesor de corte (B)	3,0	4,0	3,0
Velocidad de aire (C)	4,0	5,0	5,0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.17 se presentan los valores óptimos de los factores evaluados: temperatura de 70 °C, espesor de corte de 3 mm y velocidad de aire de 5 m/s. Bajo estas condiciones de secado, se obtiene el valor óptimo del contenido de humedad en base seca, correspondiente (0,128 kg agua/kg sólido seco). Este resultado se asocia con la muestra final P06 con pretratamiento en solución de ácido ascórbico al 0,20%.

En tal sentido, para la obtención de “**harina de cáscara de plátano verde**”, se seleccionó como muestra final (P06), al ser la más representativa y presentar el valor óptimo de contenido de humedad en base seca, equivalente **0,128 (agua/kg sólido seco)**. Esta elección se fundamenta en que el objetivo principal del proceso es minimizar el contenido de humedad en la harina, logrando dicho resultado bajo las siguientes condiciones óptimas: **temperatura 70 °C, espesor de corte tiras de cáscara de plátano 3 mm y velocidad de aire 5 m/s.**

4.5 Diseño experimental en el proceso de secado de muestras de cáscara de plátano sin tratamiento

En el Cuadro 4.2, se presentan las variables consideradas para la aplicación experimental del diseño factorial 2^3 en el proceso de secado, con base en la muestra ideal (H04), con el propósito de obtener harina de cáscara de plátano. Así mismo, se tomó como variable respuesta el contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco) que se detalla en el (Anexo G) metodología de la termobalanza.

Cuadro 4.2

Variables experimentales consideradas para la muestra H04

Variables	Niveles utilizados
Temperatura (°C)	60 – 70
Espesor de corte (mm)	3 – 4
Velocidad de aire (m/s)	4 – 5

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Diseño factorial 2^3 en el proceso de secado de muestras de cáscara de plátano sin tratamiento

En la Tabla 4.18, se observa las variables controladas durante el proceso de secado por aire caliente de muestras en tiras de cáscara de plátano sin tratamiento y los resultados de las variables respuesta del contenido de humedad en base seca.

Tabla 4.18

Contenido de humedad en base seca de las muestras sin tratamiento

Combinación de tratamientos	Factores			Réplica I	Réplica II	Total Y_1
	Temperatura	Espesor de corte	Velocidad de aire			
	A	B	C			
(1)	60	3	4	0,141	0,133	0,137
a	70	3	4	0,115	0,119	0,117
b	60	4	4	0,158	0,162	0,160
ab	70	4	4	0,143	0,155	0,149
c	60	3	5	0,158	0,147	0,152
ac	70	3	5	0,125	0,126	0,125
bc	60	4	5	0,139	0,152	0,145
abc	70	4	5	0,137	0,140	0,139

Fuente: Elaboración propia

4.5.1.1 Análisis de varianza del diseño factorial del proceso de secado de cáscara de plátano

En la Tabla 4.19, se muestran los resultados del análisis de varianza de acuerdo a los datos de la Tabla 4.18 introducidos al software “statgraphics centurión 19 – X64” en función al contenido de humedad en base seca de datos extraídos de la Tabla (B 1.5) (Anexo B.2).

Tabla 4.19

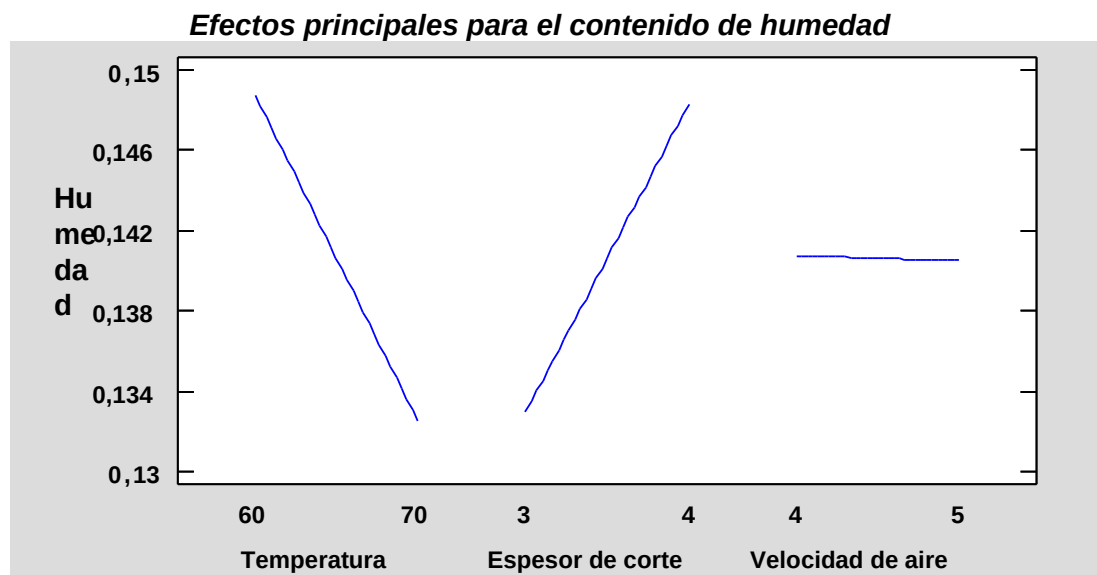
Análisis de varianza en función de la variable respuesta de humedad

Fuente de varianza	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	Fcal	Ftab
Factor A	0,00105625	1	0,00105625	31,30	5,318
Factor B	0,00093025	1	0,00093025	27,56	5,318
Factor C	0,00000025	1	0,00000025	0,01	5,318
Interacción AB	0,00021025	1	0,00021025	6,23	5,318
Interacción AC	0,00000225	1	0,00000225	0,07	5,318
Interacción BC	0,00060025	1	0,00060025	17,79	5,318
Interacción ABC	0,00003025	1	0,00003025	0,90	5,318
Error total	0,00027000	8	0,00003375	-	-
Total	0,00309975	15	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.19 se observa que el factor C, así como las interacciones AC y ABC, no presentan diferencias significativas, ya que el valor de $F_{cal} < F_{tab}$. Por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada. No obstante, para los factores A y B, así como para las interacciones AB y BC, se evidencian diferencias significativas en el proceso de secado, dado que $F_{cal} > F_{tab}$; en consecuencia, se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

En la Figura 4.15, se muestran los efectos principales para los factores: A (temperatura), B (velocidad de aire) y C (espesor de corte) con relación a la variable respuesta contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco).



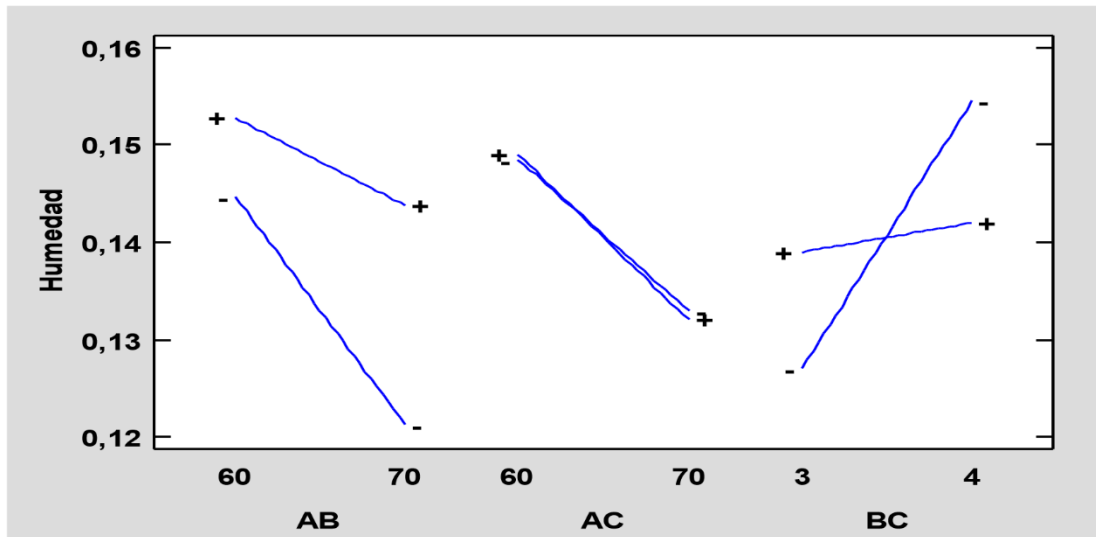
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15: Efectos principales para el contenido de humedad

En la Figura 4.15 se observa que los factores A (temperatura), en el rango de (60 – 70) °C, y B (espesor de corte), entre (3 – 4) mm, influyen significativamente sobre la variable respuesta del contenido de humedad en base seca cuando se encuentran en sus niveles alto y bajo. Sin embargo, el factor C (velocidad del aire), en el rango de (4 – 5) m/s, no presenta una incidencia significativa en dichos niveles, ya que la variación del contenido de humedad en base seca es mínima.

En la Figura 4.16, se muestra la interacción del contenido de humedad en base seca de factores: temperatura – espesor de corte (AB), temperatura – velocidad de aire (AC) y espesor de corte – velocidad de aire (BC) de las tiras de cáscara de plátano sin tratamiento.

Interacción de los factores con relación al contenido de humedad



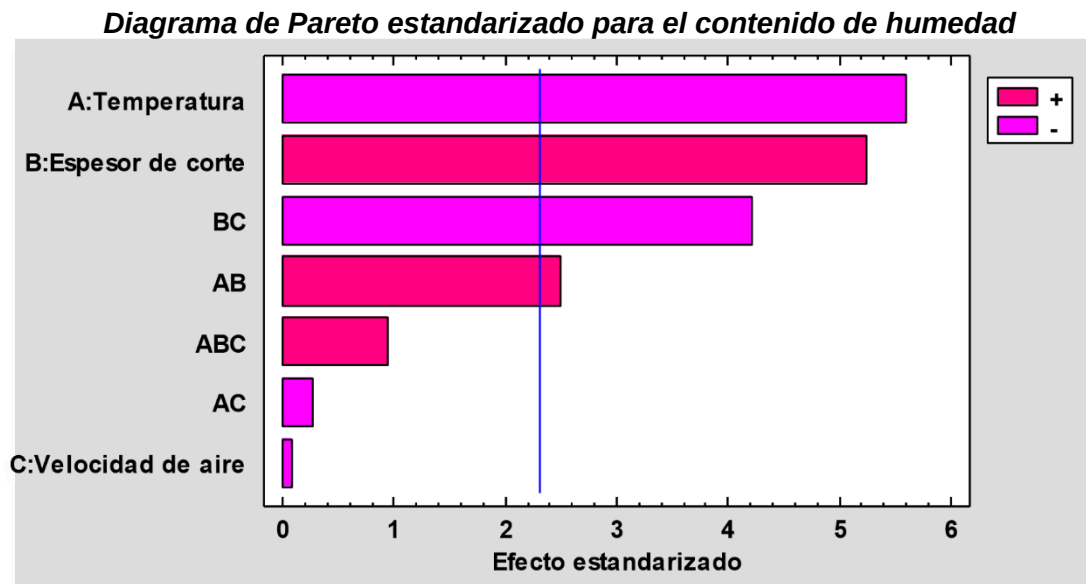
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16: Interacción de los factores con relación al contenido de humedad

Según la Figura 4.16, se observa que para la interacción AB para temperatura de 60°C el contenido de humedad se ve afectado cuando el factor B (espesor de corte) se encuentra en su nivel alto y bajo (3 – 4) mm, sin embargo, para temperatura de 70 °C se observa un cambio del contenido de humedad cuando el factor B (espesor de corte) se encuentra en su nivel alto y bajo. Así mismo, la interacción AC es significativa debido a que las variables interaccionan entre sí, para temperatura de 60 °C, el contenido de humedad no se ve afectado debido a que el contenido de humedad es mínimo cuando el factor C (velocidad de secado, se encuentre en su nivel alto y bajo (4 – 5) m/s, sin embargo, para temperatura de 70 °C el contenido de humedad se ve afectado por el factor C (espesor de corte) cuando se encuentre en su nivel alto y bajo. Por otro lado, la interacción AC es significativa debido a que los factores de las variables interaccionan entre sí, para un espesor de (3- 4) mm, la velocidad de secado se ve afectado significativamente en su nivel alto y bajo (4 – 5) m/s.

En la Figura 4.17 se presenta el diagrama de Pareto estandarizado correspondiente a los factores considerados en el diseño factorial. En donde, el nivel de significancia estadística está representado por una línea vertical de referencia con un valor de

2,303. Por lo tanto, aquellos factores que sobrepasan la línea son considerados estadísticamente significativos para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.17: Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de humedad

Según la Figura 4.17, se observa que los factores: temperatura (A), espesor de corte – velocidad de aire (BC), temperatura – velocidad de aire (AC) y velocidad de aire (C), impactan de manera negativa es decir que disminuyen el contenido de humedad en base seca. Mientras que los factores: espesor de corte (B), temperatura – espesor de corte (AB) y temperatura – espesor de corte – velocidad de aire (ABC), impactan de manera positiva es decir que aumentan el contenido de humedad en base seca. Sin embargo, el factor temperatura (A), es el más significativo en comparación a los factores: espesor de corte (B), espesor de corte – velocidad de secado (BC) y temperatura – espesor de corte (AB) que de igual manera sobrepasan la línea vertical de referencia de 2,303 a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

4.5.1.2 Coeficientes de regresión para el contenido de humedad en base seca

Según la ecuación (3.2) del modelo de regresión para un diseño 2^k , en la ecuación (4.2) se observa el modelo de regresión que se ajusta a los datos experimentales para el contenido de humedad en base seca de tiras de cáscara de plátano sin tratamiento, de datos extraídos de la Tabla B.2.3. (Anexo B).

$$X = (-1,032 + 0,0113*A + 0,353*B + 0,3455*C + 0,0035*A*B + 0,004*A*C + 0,096*B*C + 0,0011*A*B*C) \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Donde:

X = Regresión del contenido de humedad

A = Temperatura (°C)

B = Espesor de corte (mm)

C = Velocidad de aire (m/s)

4.5.1.3 Optimización de respuesta de los factores de secado de la cáscara de plátano sin pretratamiento

En la Tabla 4.20, se muestran los valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca de las muestras de cáscara de plátano; en base de los datos extraídos de la Tabla (B.2.7) (Anexo B).

Tabla 4.20

Valores óptimos para minimizar el contenido de humedad en base seca

Factores	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura (A)	60,0	70,0	70,0
Espesor de corte (B)	3,0	4,0	3,0
Velocidad de aire (C)	4,0	5,0	4,0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.20, se presentan los valores óptimos de los factores evaluados: temperatura de 70 °C, espesor de corte de 3 mm y velocidad de aire de 4 m/s. Bajo estas condiciones de secado, se obtiene el valor óptimo del contenido de humedad en base seca, correspondiente (0,117 kg agua/kg sólido seco). Este resultado se asocia con la muestra final T02, la cual no fue sometida a pretratamiento.

En tal sentido, para la obtención de “harina de cáscara de plátano verde”, se seleccionó como muestra final (T02), al ser la más representativa y presentar el valor óptimo de contenido de humedad en base seca, equivalente a 0,117 kg (agua/kg

sólido seco). Esta elección se fundamenta en que el objetivo principal del proceso es minimizar el contenido de humedad en la harina, logrando dicho resultado bajo las siguientes condiciones óptimas: temperatura 70 °C, espesor de corte tiras de cáscara de plátano 3 mm y velocidad de aire 4 m/s.

4.6 Influencia de las variables sobre el contenido de humedad en el proceso de secado de muestras de cáscara de plátano

La variación del contenido de humedad se determinó a partir de la pérdida de peso registrada durante el proceso de secado de las muestras, partiendo de un peso inicial de (100 - 101) gramos de cáscara de plátano. Para este análisis, se consideró un contenido de humedad en base húmeda (H_{BH}) del **89,51 %**, según CEANID (2024), y se empleó la **ecuación (2.3)** para el cálculo de la masa de sólido seco. En este contexto, se evaluó el contenido de humedad en base seca en función de las siguientes: **temperatura (A)**, **espesor de corte (B)** y **velocidad de aire (C)**, como se detalla en la **Tabla 4.21**.

Tabla 4.21

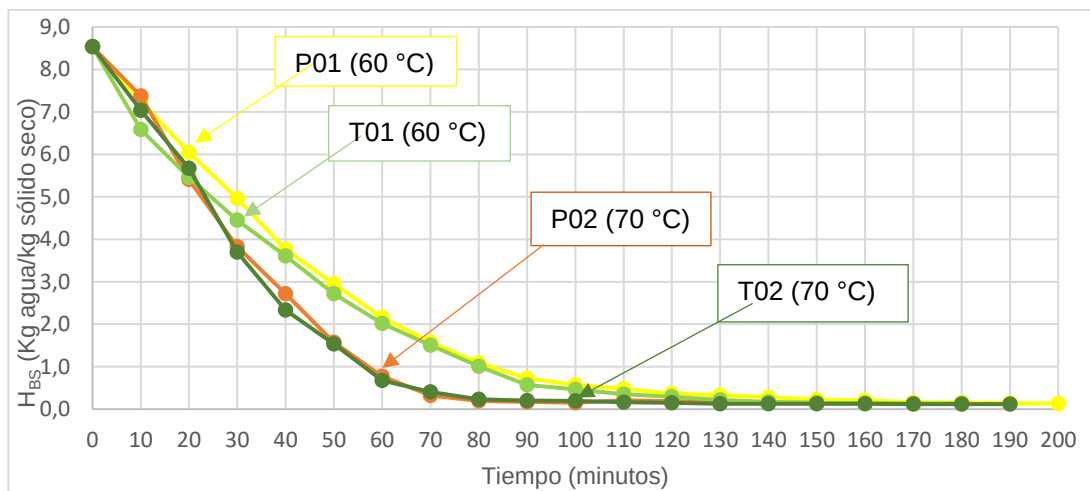
Variables de control del contenido de humedad en base seca		
Características del proceso de secado		
Temperatura	Espesor de corte	Velocidad de aire
$A_1 = 60^\circ\text{C}$	$B_1 = 3 \text{ mm}$	$C_1 = 4 \text{ m/s}$
$A_2 = 70^\circ\text{C}$	$B_2 = 4 \text{ mm}$	$C_2 = 5 \text{ m/s}$

Fuente: Elaboración propia

4.6.1 Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C: B_1 (3 mm) y C_1 (4 m/s)

En la Figura 4.18 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P01 y P02) y sin tratamiento (T01 y T02). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la temperatura entre 60 °C y 70 °C; manteniendo constantes el corte (3 mm) y la velocidad del aire (4 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de la Tabla C.1 y Tabla C.2 (Anexo C).

Variación del contenido de humedad en función del tiempo de secado



Fuente: Elaboración propia

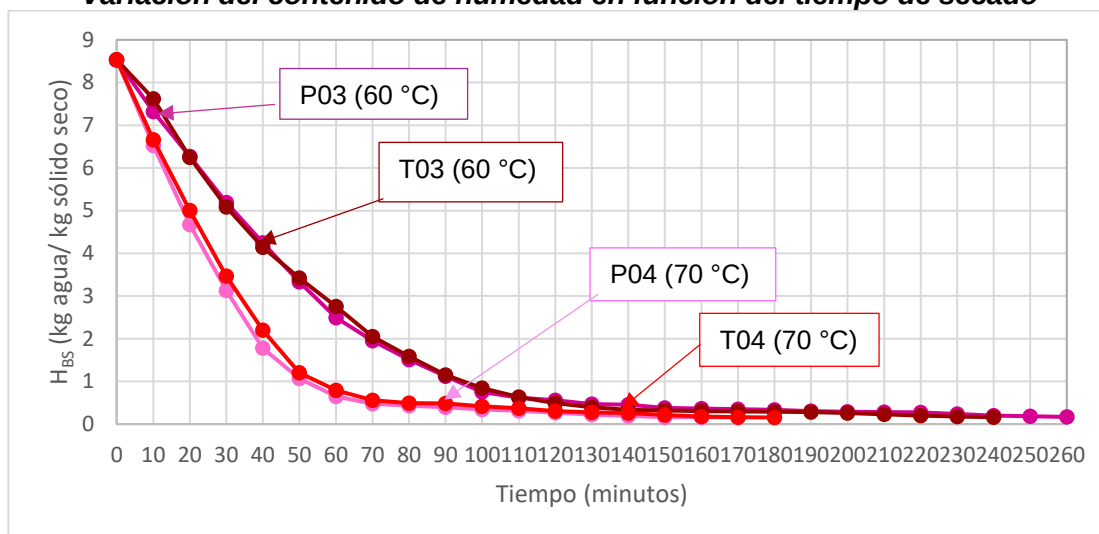
Figura 4.18: Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C a B_1 (3 mm) y C_1 (4 m/s)

En la Figura 4.18 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P01 y T01 a una temperatura de 60 °C, con un de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 200 minutos, la muestra P01 presenta contenido de humedad de 0,135 (kg agua/kg sólido seco); mientras que la muestra T01 alcanza un valor de 0,133 (kg agua/kg sólido seco) a los 180 minutos. Por otro lado, para las muestras P02 y T02, a temperatura de 70 °C con las mismas condiciones de corte y velocidad de aire, la muestra P02 presenta un contenido de humedad de 0,152 (kg agua/kg sólido seco) a los 150 minutos; mientras que muestra T02 muestra valor de (0,119 kg agua/kg sólido seco) a los 190 minutos de secado.

4.6.2 Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C: B_2 (4 mm) y C_1 (4 m/s)

En la Figura 4.19 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido cítrico (P03 y P04) y sin tratamiento (T03 y T04). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la temperatura entre 60 °C y 70 °C; manteniendo constantes el corte (4 mm) y la velocidad del aire (4 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de la Tabla C.3 y Tabla C.4 (Anexo C).

Variación del contenido de humedad en función del tiempo de secado



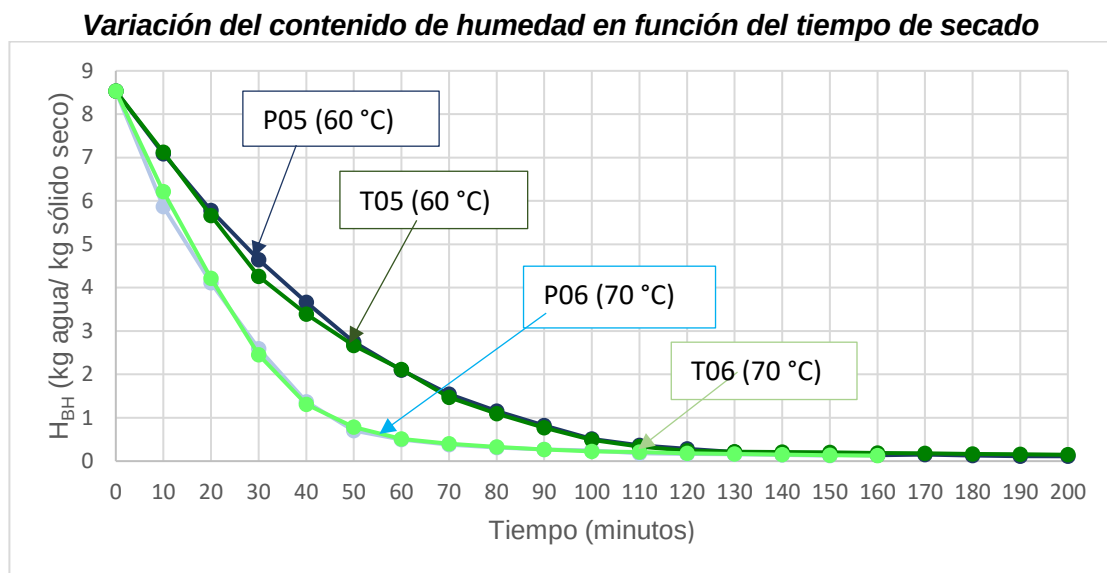
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19: Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C a B_2 (4 mm) y C_1 (4 m/s)

En la Figura 4.19 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P03 y T03 a una temperatura de 60 °C, con corte de 4 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 260 minutos, la muestra P03 presenta contenido de humedad de 0,168 (kg agua/kg sólido seco); mientras que la muestra T03 alcanza un valor de 0,162 (kg agua/kg sólido seco) a los 240 minutos. Por otro lado, para las muestras P04 y T04, a temperatura de 70 °C con las mismas condiciones de corte y velocidad de aire, la muestra P04 presenta un contenido de humedad de 0,157 (kg agua/kg sólido seco) a los 170 minutos, mientras la muestra T04 muestra un valor de 0,155 (kg agua/kg sólido seco) a los 180 minutos de secado.

4.6.3 Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C: B_1 (3 mm) y C_2 (5 m/s)

En la Figura 4.20, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P05 y P06) y sin tratamiento (T05 y T06). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la temperatura entre 60 °C y 70 °C; manteniendo constantes el corte (3 mm) y la velocidad del aire (5 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.5 y C.6 (Anexo C).



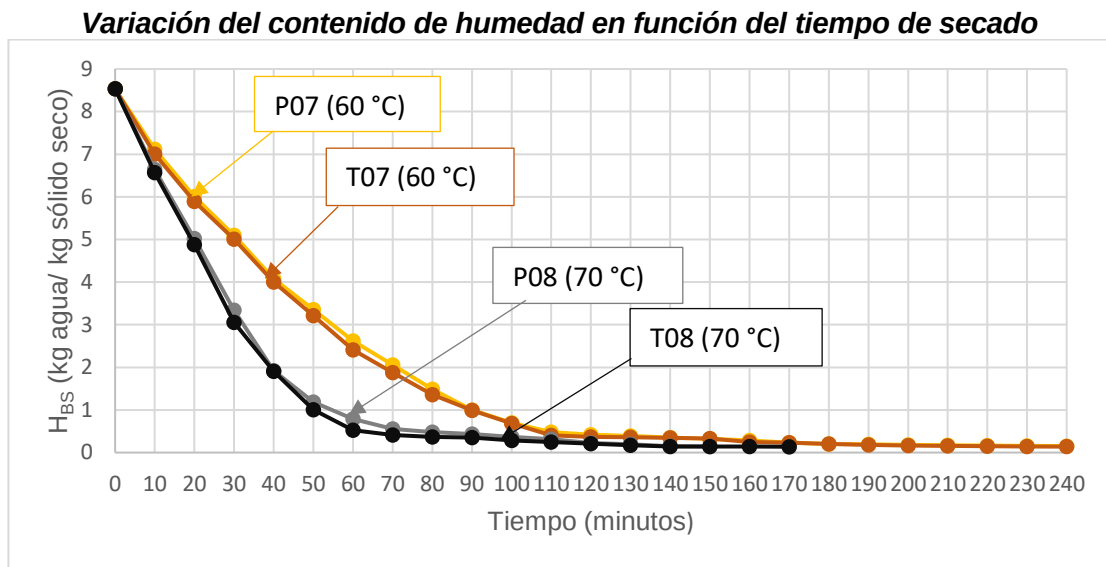
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.20: Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C a B_1 (3 mm) y C_2 (5 m/s)

En la Figura 4.20 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P05 y T05 a una temperatura de 60 °C, con un espesor de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 5 m/s. A tiempo de 200 minutos, la muestra P05 presenta contenido de humedad de 0,149 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T05 alcanza un valor de 0,147 (kg agua/kg sólido seco) a los 200 minutos. Por otro lado, para las muestras P06 y T06, a temperatura de 70 °C con las mismas condiciones de corte y velocidad de aire, la muestra P06 presenta un contenido de humedad de 0,126 (kg agua/kg sólido seco) a los 160 minutos, mientras la muestra T06 muestra un valor de 0,128 (kg agua/kg sólido seco) a los 160 minutos de secado.

4.6.4 Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C: B_2 (4 mm) y C_2 (5 m/s)

En la Figura 4.21, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P07 y P08) y sin tratamiento (T07 y T08). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la temperatura entre 60 °C y 70 °C; manteniendo constantes el corte (4 mm) y la velocidad del aire (5 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.7 y C.8 (Anexo C).



Fuente: Elaboración propia

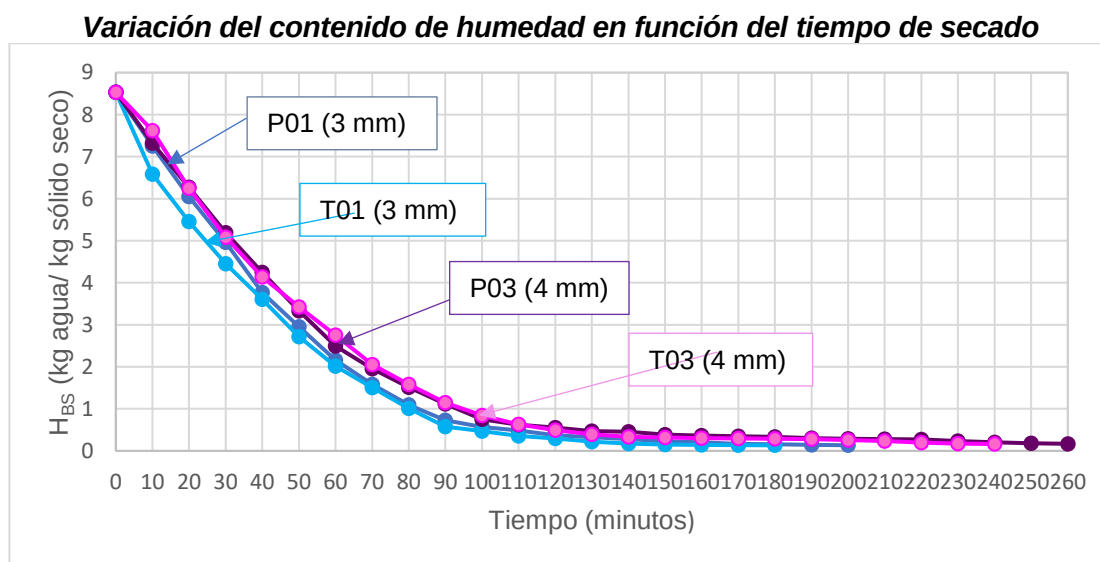
Figura 4.21: Variación del contenido de humedad con la temperatura A_{12} (60 – 70) °C a B_2 (4 mm) y C_2 (5 m/s)

En la Figura 4.21 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P07 y T07 a una temperatura de 60 °C, con un espesor de corte de 4 mm y una velocidad de aire de 5 m/s. A tiempo de 240 minutos, la muestra P07 presenta contenido de humedad de 0,153 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T07 alcanza un valor de 0,139 (kg agua/kg sólido seco) a los 240 minutos. Por otro lado, para las muestras P08 y T08, a temperatura de 70 °C con las mismas condiciones de corte y velocidad de aire, la muestra P08 presenta un contenido de humedad de 0,143 (kg agua/kg sólido seco) a los 150 minutos, mientras la muestra T08 muestra un valor de 0,137 (kg agua/kg sólido seco) a los 170 minutos de secado.

En base a la variación de temperatura entre A_1 (60 °C) y A_2 (70 °C), se observa que las muestras sin tratamiento se ven favorecidas con una mayor reducción tanto en el tiempo de secado como en el contenido de humedad en base seca. En particular, la muestra T02, a temperatura de 70 °C, espesor de corte de 3 mm, velocidad de aire de 4 m/s y tiempo de 190 minutos, alcanzó un contenido de humedad de 0,119 kg agua/kg sólido seco). Por otro lado, la variación de temperatura en las muestras con tratamiento no presentó un efecto significativo, ya que no influyó considerablemente en el tiempo de secado ni en el contenido de humedad en base seca.

4.6.5 Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm: A₁ (60 °C) y C₁ (4 m/s)

En la Figura 4.22, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P01 y P03) y sin tratamiento (T01 y T03). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando el espesor de corte entre (3 – 4) mm; manteniendo constantes la temperatura (60 °C) y la velocidad del aire (4 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.9 y C.10 (Anexo C).



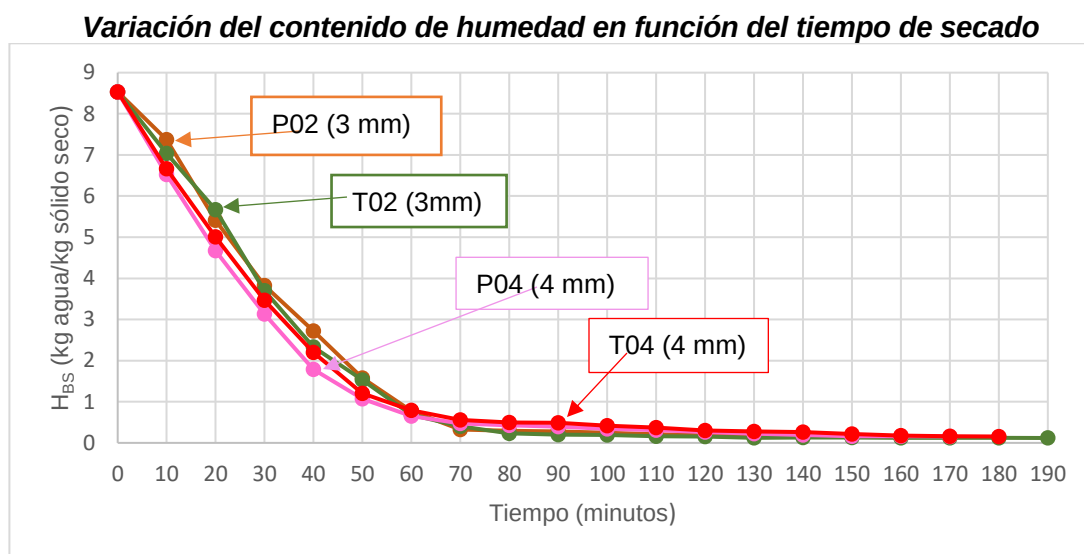
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.22: Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm a A₁ (60 °C) y C₁ (4 m/s)

En la Figura 4.22 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P01 y T01 a una temperatura de 60 °C, con un espesor de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 200 minutos, la muestra P01 presenta contenido de humedad de 0,135 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T01 alcanza un valor de 0,133 (kg agua/kg sólido seco) a los 180 minutos. Por otro lado, para las muestras P03 y T03, a temperatura de 60 °C, con corte de 4 mm y velocidad de aire 4 m/s: con tiempo de 260 minutos P03 presenta un contenido de humedad de 0,168 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T03 muestra un valor de 0,162 (kg agua/kg sólido seco) a los 240 minutos de secado.

4.6.6 Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm: A₂ (70 °C) y C₁ (4 m/s)

En la Figura 4.23, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P02 y P04) y sin tratamiento (T02 y T04). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando el espesor de corte entre (3 – 4) mm; manteniendo constantes la temperatura (70 °C) y la velocidad del aire (4 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.11 y C.12 (Anexo C).



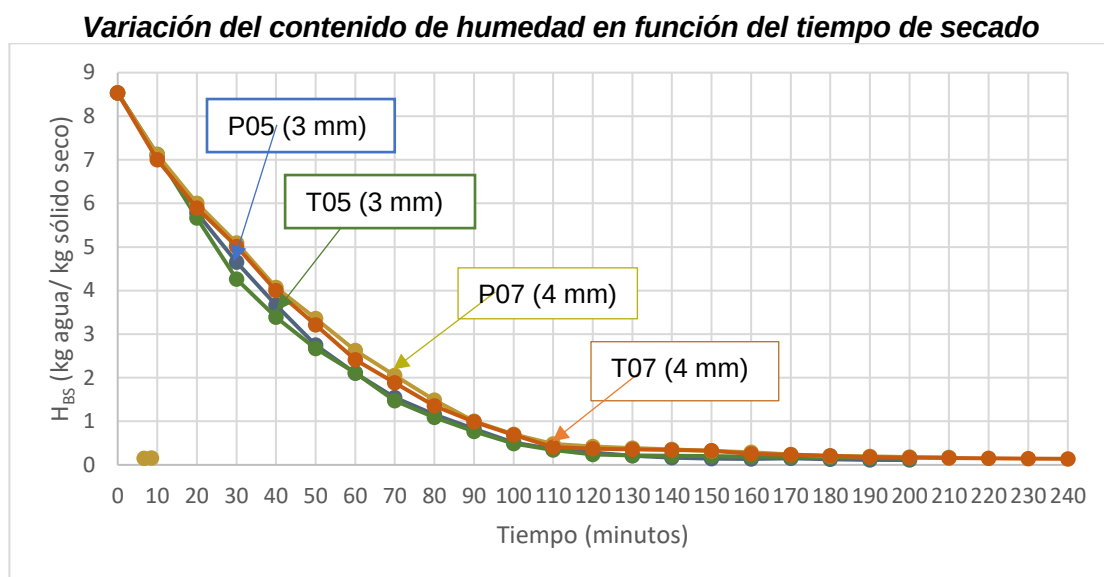
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.23: Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm a A₂ (70 °C) y C₁ (4 m/s)

En la Figura 4.23 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P02 y T02 a temperatura de 70 °C, con un corte de 3 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 150 minutos, la muestra P02 presenta un contenido de humedad de 0,152 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T02 alcanza un valor de 0,119 (kg agua/kg sólido seco) a los 190 minutos. Por otro lado, para las muestras P04 y T04, a temperatura de 70 °C, con un corte de 4 mm y velocidad de aire 4 m/s: con tiempo de 170 minutos P04 presenta un contenido de humedad de 0,157 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T04 muestra un valor de 0,115 (kg agua/kg sólido seco) a los 180 minutos de secado.

4.6.7 Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm: A₁ (60 °C) y C₂ (5 m/s)

En la Figura 4.24, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P05 y P07) y sin tratamiento (T05 y T07). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando el espesor de corte entre (3 – 4) mm; manteniéndose constantes la temperatura (60 °C) y la velocidad del aire (5 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.13 y C.14 (Anexo C).



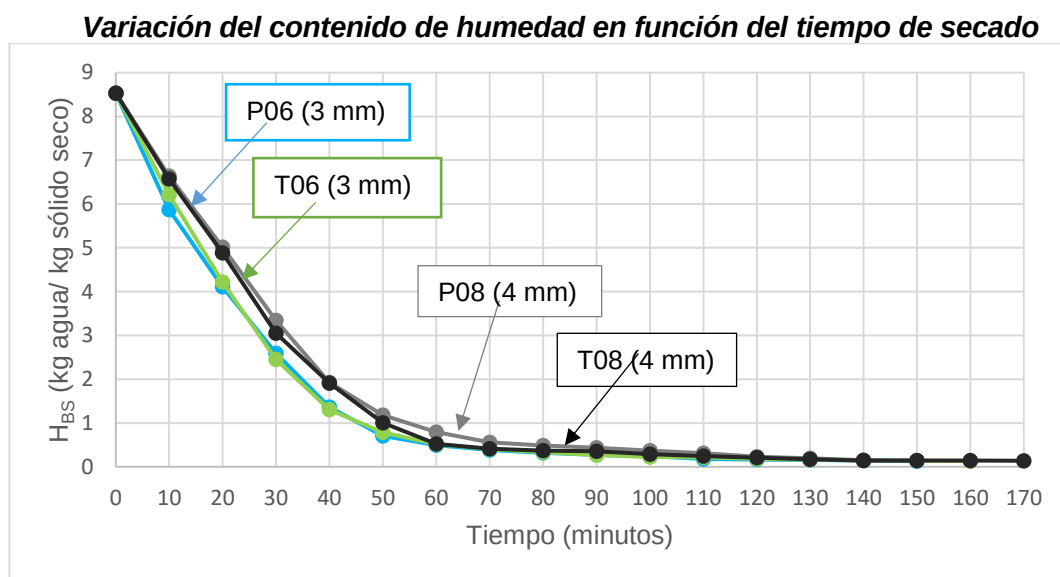
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.24: Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm a A₁ (60 °C) y C₂ (5 m/s)

En la Figura 4.24 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P05 y T05 a una temperatura de 70 °C, con un espesor de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 5 m/s. A tiempo de 200 minutos, la muestra P05 presenta contenido de humedad de 0,149 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T05 alcanza un valor de 0,147 (kg agua/kg sólido seco) a los 200 minutos. Por otro lado, para las muestras P07 y T07, a temperatura de 70 °C, con corte de 4 mm y velocidad de aire 5 m/s: con tiempo de 240 minutos P07 presenta un contenido de humedad de 0,153 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T07 muestra un valor de 0,139 (kg agua/kg sólido seco) a los 240 minutos de secado.

4.6.8 Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm: A₂ (70 °C) y C₂ (5 m/s)

En la Figura 4.25, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P06 y P08) y sin tratamiento (T06 y T08). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando el espesor de corte entre (3 – 4) mm; manteniéndose constantes la temperatura (70 °C) y la velocidad del aire (5 m/s). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.15 y E.16 (Anexo C).



Fuente: Elaboración propia

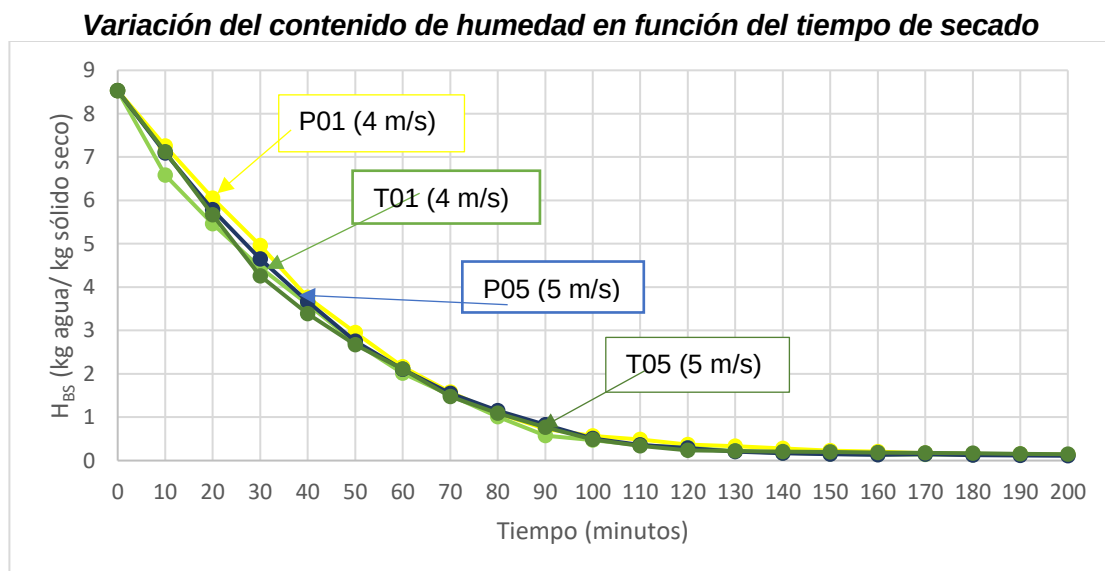
Figura 4.25: Variación del contenido de humedad con espesor de corte B₁₂ (3 – 4) mm a A₂ (70 °C) y C₂ (5 m/s)

En la Figura 4.25 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P06 y T06 a una temperatura de 70 °C, con un espesor de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 5 m/s. A tiempo de 150 minutos, la muestra P06 presenta contenido de humedad de 0,126 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T06 alcanza un valor de 0,125 (kg agua/kg sólido seco) a los 160 minutos. Por otro lado, para las muestras P08 y T08, a temperatura de 70 °C, con corte de 4 mm y velocidad de aire 5 m/s: con tiempo de 150 minutos P08 presenta un contenido de humedad de 0,143 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T08 muestra un valor de 0,137 (kg agua/kg sólido seco) a los 170 minutos de secado.

En base a la variación de espesor de corte B_1 (3 mm) y B_2 (4 mm), se observa que las muestras sin tratamiento se ven favorecidas con una mayor reducción tanto en el tiempo de secado como en el contenido de humedad en base seca. En particular, la muestra T02, a una temperatura de 70 °C, espesor de corte de 3 mm, velocidad de aire de 4 m/s y un tiempo de 190 minutos, alcanzó un contenido de humedad de 0,119 kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, la variación de temperatura en las muestras con tratamiento no presentó un efecto significativo, ya que no influyó considerablemente en el tiempo de secado ni en el contenido de humedad en base seca.

4.6.9 Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s: A_1 (60 °C) y B_1 (3 mm)

En la Figura 4.26, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P01 y P05) y sin tratamiento (T01 y T05). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la velocidad de aire entre (4 – 5) m/s; manteniéndose constantes la temperatura (60 °C) y espesor de corte (3 mm). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.17 y C.18 (Anexo C)



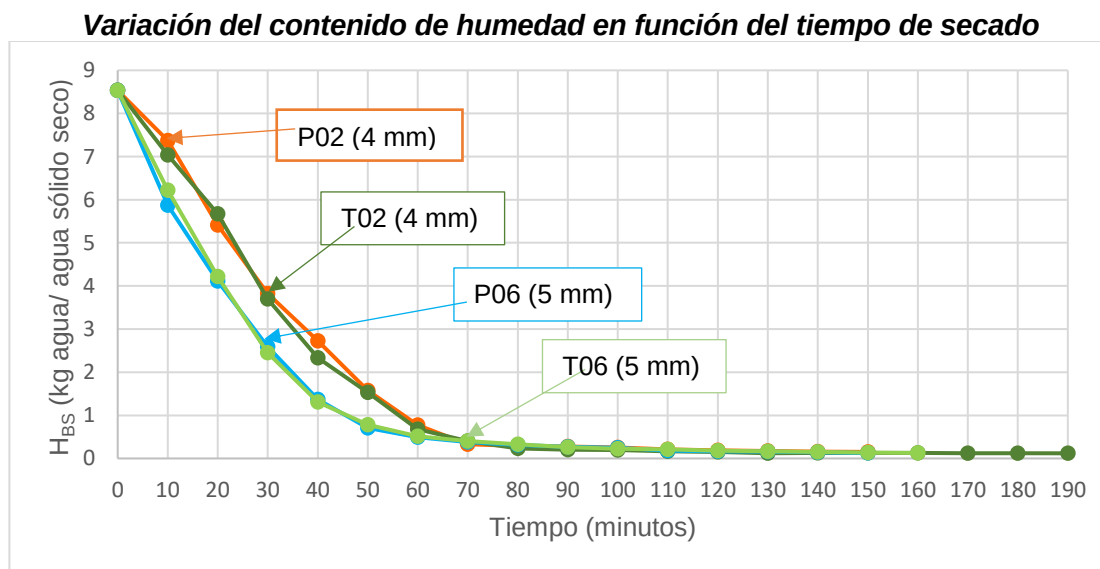
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.26: Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s a A_1 (60 °C) y B_1 (3 mm)

En la Figura 4.26 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P01 y T01 a temperatura de 60 °C, con un espesor de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 200 minutos, la muestra P01 presenta contenido de humedad de 0,135 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T01 alcanza un valor de 0,133 (kg agua/kg sólido seco) a los 180 minutos. Por otro lado, para las muestras P05 y T05, a temperatura de 60 °C, con corte de 3 mm y velocidad de aire 5 m/s: con tiempo de 200 minutos P05 presenta un contenido de humedad de 0,149 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T05 muestra un valor de 0,147 (kg agua/kg sólido seco) a los 200 minutos de secado.

4.6.10 Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s: A_2 (70 °C) y B_1 (3 mm)

En la Figura 4.27, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P02 y P06) y sin tratamiento (T02 y T06). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la velocidad de aire entre (4 – 5) m/s. manteniendo constantes la temperatura (70 °C) y espesor de corte (3 mm). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.19 y C.20 (Anexo C).



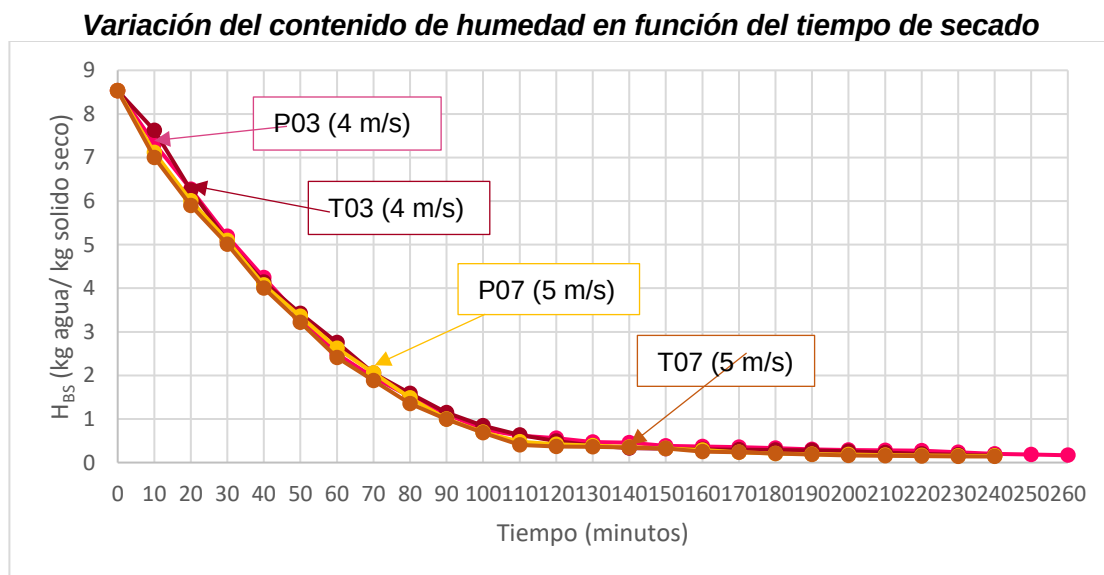
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.27: Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s a A_2 (70 °C) y B_1 (3 mm)

En la Figura 4.27 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P02 y T02 a una temperatura de 70 °C, con un espesor de corte de 3 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 150 minutos, la muestra P02 presenta contenido de humedad de 0,152 (kg agua/kg sólido seco), mientras que la muestra T02 alcanza un valor de 0,119 (kg agua/kg sólido seco) a los 190 minutos. Por otro lado, para las muestras P06 y T06, a temperatura de 70 °C, con corte de 3 mm y velocidad de aire 5 m/s: con tiempo de 150 minutos P06 presenta un contenido de humedad de 0,126 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T06 muestra un valor de 0,128 (kg agua/kg sólido seco) a los 160 minutos de secado.

4.6.11 Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s: A_1 (60 °C) y B_2 (4 mm)

En la Figura 4.28, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P03 y P07) y sin tratamiento (T03 y T07). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la velocidad de aire entre (4 – 5) m/s-, manteniendo constantes la temperatura (60 °C) y espesor de corte (4 mm). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.21 y C.22 (Anexo C).



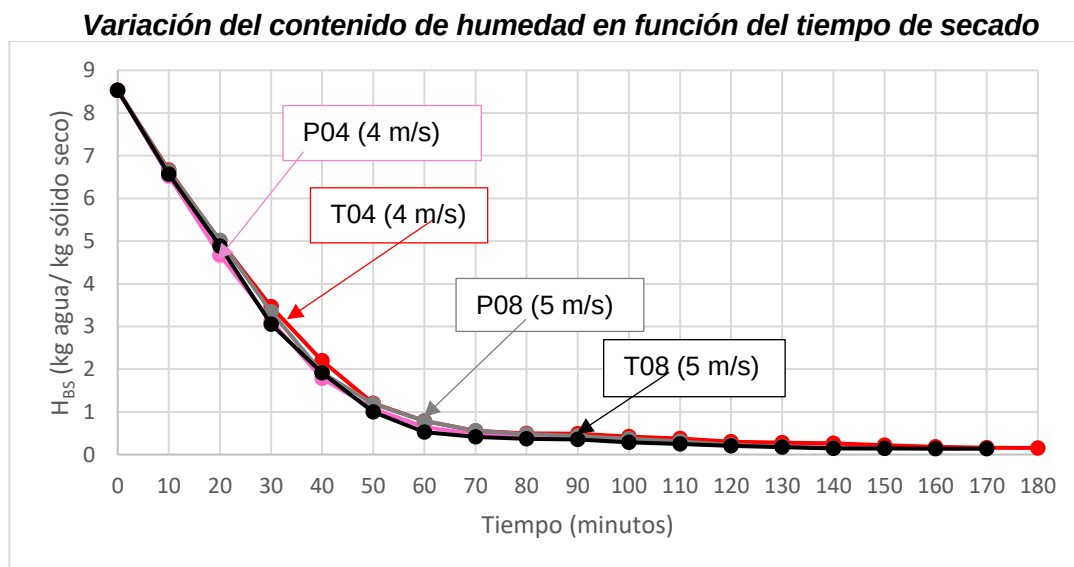
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.28: Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s a A_1 (60 °C) y B_2 (4 mm)

En la Figura 4.28 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P03 y T03 a temperatura de 60 °C, con un espesor de corte de 4 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 260 minutos, la muestra P03 presenta un contenido de humedad de 0,168 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T03 alcanza un valor de 0,162 (kg agua/kg sólido seco) a los 240 minutos. Por otro lado, para las muestras P07 y T07, a temperatura de 60 °C, con corte de 4 mm y velocidad de aire 5 m/s: con tiempo de 240 minutos P07 presenta un contenido de humedad de 0,153 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T07 muestra un valor de 0,139 (kg agua/kg sólido seco) a los 240 minutos de secado.

4.6.12 Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s: A_2 (70 °C) y B_2 (4 mm)

En la Figura 4.29, se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para las muestras tratadas con solución de ácido ascórbico (P04 y P08) y sin tratamiento (T04 y T08). Para ello, se realizaron mediciones a intervalos de 10 minutos, variando la velocidad de aire entre (4 – 5) m/s; manteniendo constantes la temperatura (70 °C) y espesor de corte (4 mm). Los datos correspondientes fueron obtenidos de las Tablas C.23 y C.24 (Anexo C).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.29: Variación del contenido de humedad con velocidad de aire C_{12} (4 – 5) m/s a A_2 (70 °C) y B_2 (4 mm)

En la Figura 4.29 se observa la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo para las muestras P04 y T04 a temperatura de 70 °C, con un espesor de corte de 4 mm y una velocidad de aire de 4 m/s. A tiempo de 170 minutos, la muestra P04 presenta un contenido de humedad de 0,157 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T04 alcanza un valor de 0,155 (kg agua/kg sólido seco) a los 180 minutos. Por otro lado, para las muestras P08 y T08, a temperatura de 70 °C, con corte de 4 mm y velocidad de aire 5 m/s: con tiempo de 150 minutos P08 presenta contenido de humedad de 0,143 (kg agua/kg sólido seco), mientras la muestra T08 muestra un valor de 0,137 (kg agua/kg sólido seco) a los 170 minutos de secado.

En base a la variación de velocidad de aire C_1 (4 m/s) y C_2 (5 m/s), se observa que las muestras sin tratamiento se ven favorecidas con una mayor reducción tanto en el tiempo de secado como en el contenido de humedad en base seca. En particular, la muestra T02, a una temperatura de 70 °C, espesor de corte de 3 mm, velocidad de aire de 4 m/s y un tiempo de 190 minutos, alcanzó un contenido de humedad de 0,119 kg agua/kg sólido seco. Por otro lado, la variación de temperatura en las muestras con tratamiento no presentó un efecto significativo, ya que no influyó considerablemente en el tiempo de secado ni en el contenido de humedad en base seca.

4.7 Cinética de secado en la obtención de harina de cáscara de plátano verde

La cinética de secado se realizó en las muestras de cáscara de plátano verde con ácido ascórbico (P06) y sin tratamiento (T02) para observar las diferencias que tiene cada muestra sobre la variación del contenido de humedad y la velocidad de evaporación de las muestras en función del tiempo.

4.7.1 Cinética de secado en la obtención de harina de cáscara de plátano con ácido ascórbico

En la Tabla 4.22, se muestra los resultados obtenidos para la cinética de secado de las muestras de cáscara de plátano en solución de ácido ascórbico (P06); en condiciones de temperatura 70 °C, espesor de corte de 3 mm y velocidad de aire 5 m/s. los resultados experimentales fueron obtenidos mediante regresión lineal por

Excel. Tomando en cuenta los siguientes datos y la ecuación (2.3) para el cálculo de la masa del sólido seco:

Datos:

- Cantidad de materia prima: 100,09 g
- Contenido de humedad: 89,51 % (CEANID, 2024)
- Masa de sólido seco: 10,499 g
- Área de la bandeja: 0,035 m²
- Tiempo de secado: 2,30 horas

Tabla 4.22

Variación de humedad y velocidad de secado en cáscara de plátano con ácido ascórbico

Tiempo (min)	Peso (g)	H _{BS} (kg/kg)	H _{BS} media (kg/kg)	Δθ (h)	ΔH _{BS} (kg/kg)	ΔH _{BS} / Δθ (kg/kg*h)	N (kg/m ² h)
0	100,09	8,533	-	-	-	-	-
10	72,17	5,872	7,201	0,167	2,661	15,934	4,780
20	53,67	4,110	4,991	0,167	1,762	10,551	3,165
30	37,73	2,593	3,352	0,167	1,517	9,084	2,725
40	24,85	1,365	1,979	0,167	1,228	7,353	2,206
50	17,90	0,704	1,035	0,167	0,661	3,958	1,187
60	15,69	0,494	0,594	0,167	0,210	1,257	0,377
70	14,49	0,380	0,437	0,167	0,114	0,683	0,205
80	13,82	0,315	0,348	0,167	0,065	0,389	0,117
90	13,36	0,272	0,294	0,167	0,043	0,257	0,077
100	13,06	0,244	0,258	0,167	0,028	0,168	0,050
110	12,40	0,217	0,230	0,167	0,027	0,162	0,049
120	12,24	0,190	0,204	0,167	0,027	0,162	0,049
130	12,16	0,165	0,178	0,167	0,024	0,142	0,043
140	12,05	0,146	0,155	0,167	0,021	0,123	0,038
150	11,95	0,138	0,142	0,167	0,007	0,042	0,013

Fuente: Elaboración propia

Donde:

H_{BS} = Contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

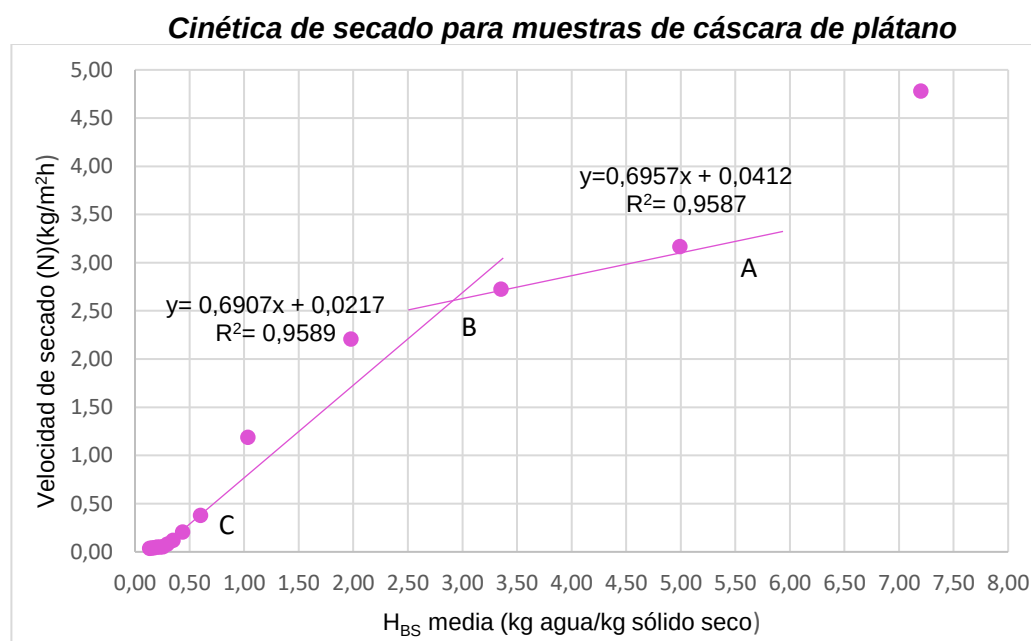
H_{BS} media = Contenido de humedad media (kg agua/kg sólido seco)

ΔH_{BS} = Gradiente de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

$\Delta H_{BS}/\Delta \theta$ = Gradiente de humedad en base seca sobre gradiente de tiempo (kg agua/kg sólido seco *h)

N = Velocidad de secado (kg sólido seco/m² *h)

En la Figura 4.30, se muestra la cinética en el proceso de secado para las tiras de cáscara de plátano con solución de ácido ascórbico (0,20%), en función del contenido de humedad media en base de datos de la Tabla 4.22.



Fuente: Elaboración propia

Figura: 4.30: Cinética de secado para muestras de cáscara de plátano en solución de ácido ascórbico

En la Figura 4.30, se observa el comportamiento de humedad media en relación con la velocidad de secado, donde se pudo observar que existe dos tramos distintos:

El tramo (A – B) representa el periodo ante-crítico donde el contenido de humedad de las tiras de cáscara de plátano migra desde el interior hasta la superficie con una velocidad de secado constante hasta alcanzar la humedad crítica, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión R^2 (0,9587) se describe en la ecuación 4.3.

$$y = 0,6957x + 0,0412 \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

El tramo (B - C) representa el periodo post-crítico donde la velocidad de secado decrece hasta que el contenido de humedad de las tiras de cáscara de plátano alcanza el equilibrio, logrando un secado total en la superficie, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión R^2 (0,9589) se describe en la ecuación 4.4

$$y = 0,6907x + 0,0217 \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

4.7.2 Cinética de secado en la obtención de harina de cáscara de plátano sin tratamiento

En la Tabla 4.23, se muestra los resultados obtenidos para la cinética de secado de las muestras de tira de cáscara de plátano sin tratamiento (T02) en condiciones de temperatura 70 °C, corte 3 mm y velocidad de aire 4 m/s. Los resultados experimentales fueron obtenidos mediante regresión lineal por Excel. Tomando en cuenta los siguientes datos y la ecuación 2.3 para el cálculo de la masa de sólido seco:

Datos:

- Cantidad de materia prima: 100,36 g
- Contenido de humedad. 89,51 % (CEANID, 2024)
- Masa de sólido seco: 10, 528 g
- Área de la bandeja: 0,035 m²
- Tiempo de secado: 3,10 horas

Tabla 4.23

**Variación del contenido de humedad y velocidad de secado en cáscara de
plátano sin tratamiento**

Tiempo (min)	Peso (g)	H _{BS} (kg/kg)	H _{BS} media (kg/kg)	Δθ (h)	ΔH _{BS} (kg/kg)	ΔH _{BS} / Δθ (kg/kg*h)	N (kg/m ² h)
0	100,36	8,533	-	-	-	-	-
10	84,70	7,045	7,789	0,167	1,488	8,910	2,681
20	70,23	5,671	6,358	0,167	1,374	8,228	2,475
30	49,50	3,702	4,687	0,167	1,969	11,790	3,547
40	35,67	2,388	3,045	0,167	1,314	7,868	2,367
50	26,67	1,533	1,961	0,167	0,855	5,120	1,540
60	17,68	0,679	1,106	0,167	0,854	5,114	1,539
70	14,70	0,396	0,538	0,167	0,283	1,695	0,510
80	13,22	0,256	0,326	0,167	0,140	0,838	0,252
90	12,88	0,223	0,240	0,167	0,033	0,198	0,059
100	12,55	0,192	0,208	0,167	0,031	0,186	0,056
110	12,23	0,162	0,177	0,167	0,030	0,180	0,054
120	12,10	0,149	0,156	0,167	0,013	0,078	0,023
130	12,01	0,141	0,145	0,167	0,008	0,048	0,014
140	11,95	0,135	0,138	0,167	0,006	0,036	0,108
150	11,90	0,130	0,133	0,167	0,005	0,030	0,009
160	11,86	0,127	0,129	0,167	0,003	0,018	0,005
170	11,83	0,124	0,126	0,167	0,003	0,018	0,005
180	11,80	0,121	0,123	0,167	0,003	0,018	0,005
190	11,78	0,119	0,120	0,167	0,002	0,012	0,003

Fuente: Elaboración propia

Donde:

H_{BS} = Contenido de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

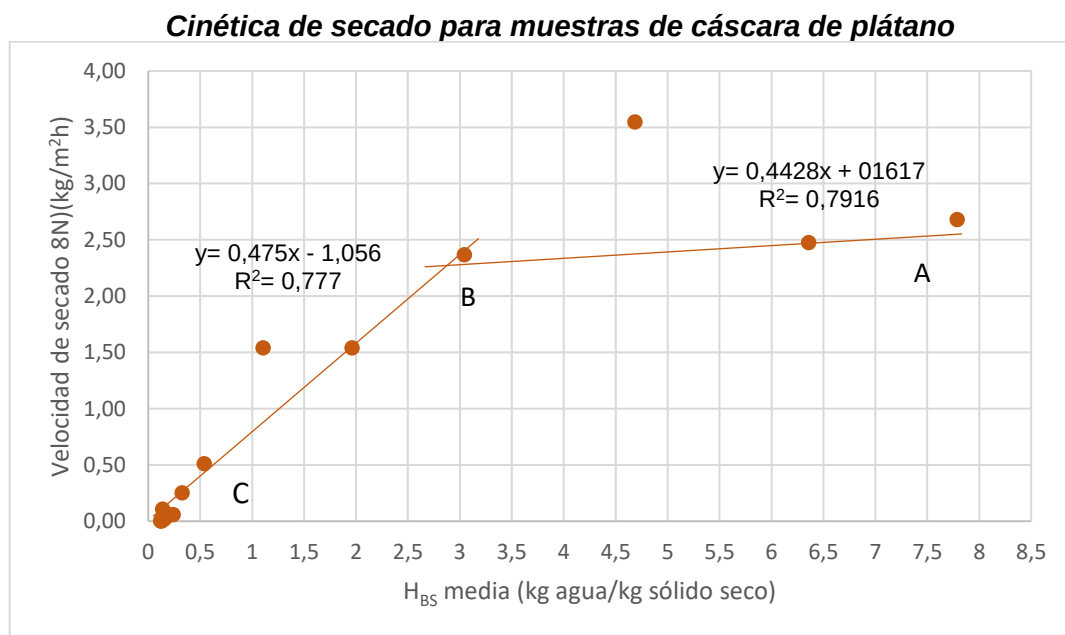
H_{BS} media = Contenido de humedad media (kg agua/kg sólido seco)

ΔH_{BS} = Gradiente de humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco)

$\Delta H_{BS}/\Delta \theta$ = Gradiente de humedad en base seca sobre gradiente de tiempo (kg agua/kg sólido seco *h)

N = Velocidad de secado (kg sólido seco/m² *h)

En la Figura 4.31, se muestra la cinética en el proceso de secado para las muestras de tiras de cáscara de plátano con solución de ácido ascórbico en función del contenido de humedad media en base de datos de la Tabla 4.23.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.31: Cinética en el proceso de secado para las muestras de cáscara de plátano sin tratamiento

En la Figura 4.31, se observa el comportamiento de humedad media en relación con la velocidad de secado, donde se pudo observar que existe dos tramos distintos:

El tramo (A – B) representa el periodo ante-crítico donde el contenido de humedad de las muestras de tiras de cáscara de plátano migra desde el interior hasta la superficie con una velocidad de secado constante hasta alcanzar la humedad crítica, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión R^2 (0,7916) se describe en la ecuación 4.5.

$$y = 0,4428x + 0,1617 \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

El tramo (B - C) representa el periodo post-crítico donde la velocidad de secado decrece hasta que el contenido de humedad de las muestras de tiras de cáscara de plátano alcanza el equilibrio, logrando un secado total en la superficie, por lo tanto, la ecuación matemática con un coeficiente de regresión R^2 (0,777) se describe en la ecuación 4.6

$$y = 0,475x + 1,056 \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

4.8 Caracterización de la harina de cáscara de plátano verde

Para caracterizar la harina de cáscara de plátano, se tomaron en cuenta los siguientes análisis: fisicoquímicos, microbiológicos y micronutrientes los cuales se detallan a continuación:

4.8.1 Análisis fisicoquímico de la harina de cáscara de plátano verde

En la Tabla 4.24, se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de harina de cáscara de plátano de datos extraídos de la Tabla A.2 (Anexo A).

Tabla 4.24

Análisis fisicoquímico de la harina de cáscara de plátano verde		
Parámetros	Unidad	Resultado
Ceniza	g/100g	13,05
Fibra	g/100g	7,80
Grasa	g/100g	6,73
Hidratos de carbono	g/100g	69,86
Proteína total (N*6,25)	g/100g	7,59
Humedad	g/100g	2,77
Valor energético	kcal/100g	370,00

Fuente: CEANID, 2025

En la Tabla 4.24, se expresan los valores fisicoquímicos de la harina de cáscara de plátano contiene: Ceniza 13,05 g/100g; Fibra 7,80 g/100g; Grasa 6,73 g/100g; Hidratos de carbono 69,86 g/100g; Proteína total (N*6,25) 7,59 g/100g; Humedad 2,77 g/100g y Valor energético 370 kcal/100g.

4.8.2 Análisis de micronutrientes de la harina de cáscara de plátano verde

En la Tabla 4.25, se muestran los resultados obtenidos del análisis de micronutrientes de harina de cáscara de plátano de datos extraídos de la Tabla A.2 (Anexo A).

Tabla 4.25

Análisis de micronutrientes de la harina de cáscara de plátano

Micronutrientes	Unidad	Resultado
Calcio	mg/100g	125
Potasio	mg/100g	4718

Fuente: CEANID, 2025

Como se puede observar en la Tabla 4.25, se muestran los resultados obtenidos del análisis de micronutrientes de harina de cáscara de plátano que contiene: Calcio 125 mg/100 g y Potasio 4718 mg/100 g.

4.8.3 Análisis microbiológico de la harina de cáscara de plátano

En la Tabla 4.26, se muestran los resultados obtenidos del análisis microbiológico de harina de cáscara de plátano de datos extraídos de la Tabla A.2 (Anexo A).

Tabla 4.26

Análisis microbiológico de la harina de cáscara de plátano

Microorganismos	Unidad	Resultado
<i>Coliformes totales</i>	UFC/g	$4,0 \times 10^1$
<i>Escherichia coli</i>	UFC/g	$<1,0 \times 10^1$ (*)
Mohos y levaduras	UFC/g	$<1,0 \times 10^1$ (*)
(*) no se observa desarrollo de colonias		

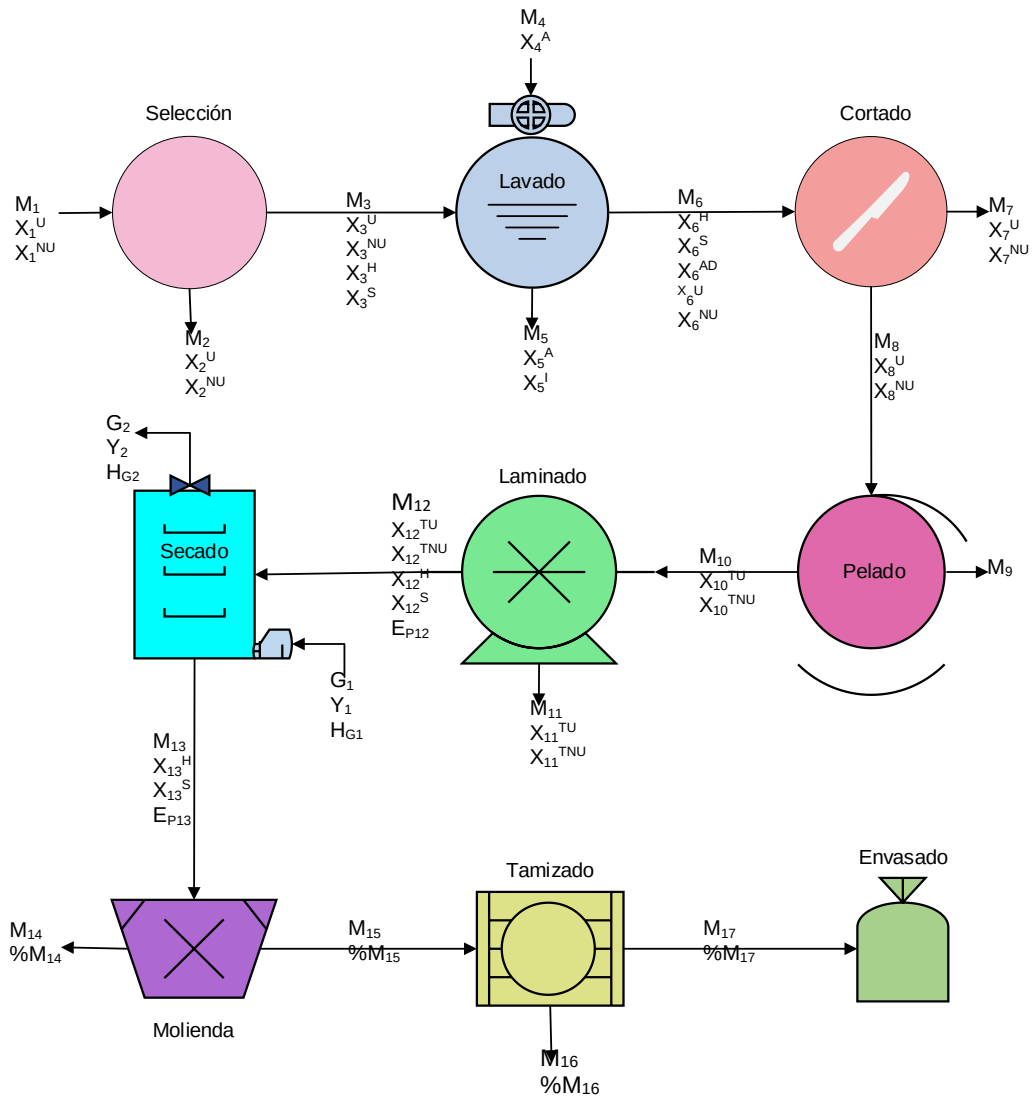
Fuente: CEANID, 2025

En la Tabla 4.26, se observan los resultados obtenidos del análisis microbiológico de harina de cáscara de plátano: *Coliformes totales* $4,0 \times 10^1$ UFC/g; *Escherichia coli* $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g y Mohos y levaduras $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g.

4.9 Balance de materia en el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

En la Figura 4.32, se muestra el balance de materia tomando en cuenta el diagrama de flujo para el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano, el balance se realizó para una base de cálculo de 2000,18 g de plátano verde (*Musa paradisiaca*).

Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.32: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

Donde:

M_1 = Plátano verde (*Musa paradisiaca*) (g)

X_1^U = Fracción de porción útil de plátano

X_1^{NU} = Fracción de porción no útil de plátano

M_2 = Pérdidas en la etapa de selección (g)

X_2^U = Fracción de porción útil de plátano

X_2^{NU} = Fracción de porción no útil de plátano

M_3 = Plátano seleccionado (g)

X_3^U = Fracción de porción útil de plátano

X_3^{NU} = Fracción de porción no útil de plátano

X_3^H = Fracción de humedad en el plátano

X_3^S = Fracción de sólido seco en el plátano

M_4 = Agua potable (g)

X_4^A = Fracción de agua en el agua

M_5 = Agua residual del lavado (g)

X_5^A = Fracción de agua en el agua residual

X_5^I = Fracción de impurezas en el agua residual

M_6 = Plátano lavado (g)

X_6^H = Fracción de humedad del plátano lavado

X_6^S = Fracción de sólidos solubles del plátano lavado

X_6^{AD} = Fracción de agua adherida en el plátano lavado

X_6^U = Fracción de porción útil de plátano

X_6^{NU} = Fracción de porción no útil de plátano

M_7 = Cabos y puntas del plátano (g)

X_7^U = Fracción de porción útil de plátano

X_7^{NU} = Fracción de porción no útil de plátano

M_8 = Plátano sin cabo y punta (g)

X_8^U = Fracción de porción útil de plátano

X_8^{NU} = Fracción de porción no útil de plátano

M_9 = Pulpa de plátano (g)

M_{10} = Cáscara de plátano (g)

X_{10}^{TU} = Fracción de tiras útiles de cáscara de plátano

X_{10}^{TNU} = Fracción de tiras no útiles de cáscara de plátano

M_{11} = Pérdidas en la etapa de laminado (g)

X_{11}^{TU} = Fracción de tiras útiles de cáscara de plátano

X_{11}^{TNU} = Fracción de tiras no útiles de cáscara de plátano

M_{12} = Cáscara de plátano laminada (g)

X_{12}^{TU} = Fracción de tiras útiles de cáscara de plátano

X_{12}^{TNU} = Fracción de tiras no útiles de cáscara de plátano

X_{12}^H = Fracción de humedad en las tiras de cáscara de plátano

X_{12}^S = Fracción de sólido soluble en las tiras de cáscara de plátano

M_{13} = Tiras de cáscara de plátano seca (g)

X_{13}^H = Fracción de humedad en las tiras de cáscara de plátano

X_{13}^S = Fracción de sólido soluble en las tiras de cáscara de plátano

M_{14} = Pérdidas en la etapa de molienda (g)

$\%M_{14}$ = Porcentaje de pérdida en la etapa de molienda (%)

M_{15} = Harina de cáscara de plátano (g)

$\%M_{15}$ = Porcentaje de harina de cáscara de plátano (%)

M_{16} = Pérdida de harina de cáscara de plátano en la etapa de tamizado (g)

$\%M_{16}$ = Porcentaje de pérdida de harina de cáscara de plátano en la etapa de tamizado (%)

M_{17} = Harina de cáscara de plátano tamizada (g)

$\%M_{17}$ = Porcentaje de harina de cáscara de plátano tamizada (%)

G_1 = Cantidad de masa de aire seco de entrada (kg aire seco/h)

G_2 = Cantidad de masa de agua evaporada

E_{P12} = Entalpia de las tiras de cáscara de plátano a la entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

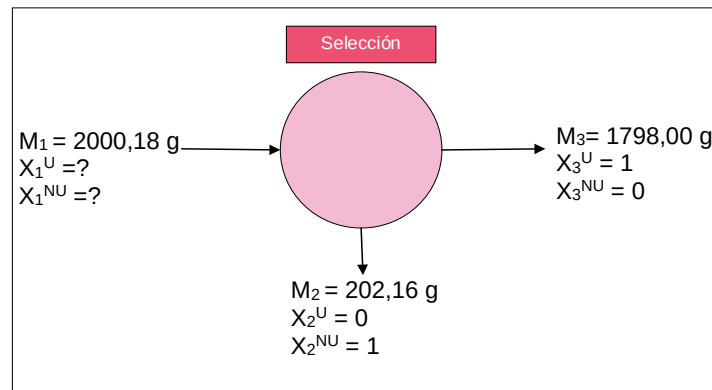
E_{P13} = Entalpia de las tiras de cáscara de plátano a la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

H_{G1} = Entalpia del aire seco de entrada del secador (kJ/kg sólido seco)

H_{G2} = Entalpia de aire seco de salida del secador (kJ/kg sólido seco)

4.9.1 Balance de materia en la etapa de selección

En la Figura 4.33, se muestra el balance de materia en la etapa de selección con una cantidad de 2000,18 g de plátano verde (*Musa paradisiaca*), tomando en cuenta 1798,02 g de plátano seleccionado y pesado para realizar el balance de materia correspondiente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.33: Etapa de selección

Por lo tanto, el balance general de materia en la etapa de selección es:

$$M_1 = M_2 + M_3 \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Balance de materia parcial para la fracción útil de plátano

$$M_1 X_1^U = M_2 X_2^U + M_3 X_3^U \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Despejando X_1^U de la ecuación 4.8, se obtiene:

$$M_1 X_1^U = \cancel{M_2 X_2^U}^0 + M_3 X_3^U$$

$$X_1^U = \frac{M_3 X_3^U}{M_1}$$

$$X_1^U = \frac{1798,02 \text{ g} * 1}{2000,18 \text{ g}}$$

$$X_1^U = 0,8989 \text{ fracción útil de plátano}$$

Balance de materia parcial para la fracción no útil de plátano

$$M_1 X_1^{NU} = M_2 X_2^{NU} + M_3 X_3^{NU} \quad (\text{Ecuación 4.9})$$

Despejando X_1^{NU} de la ecuación 4.9, se obtiene:

$$M_1 X_1^{NU} = M_2 X_2^{NU} + M_3 X_3^{NU} \quad 0$$

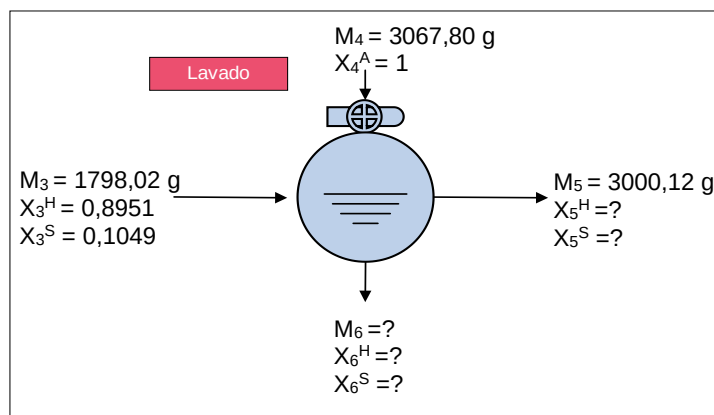
$$X_1^{NU} = \frac{M_2 X_2^{NU}}{M_1}$$

$$X_1^{NU} = \frac{202,16 \text{ g} \cdot 1}{2000,18 \text{ g}}$$

$$X_1^{NU} = 0,1011 \text{ fracción no útil de plátano}$$

4.9.2 Balance general de materia en la etapa de lavado

En la Figura 4.34, se muestra el balance de materia en la etapa de lavado el cual se realizó con 3000 ml de agua potable con una densidad de 1,0226 g/ml, calculado como masa 3067,80 g agua potable para el lavado de 1798,02 g de plátano verde con humedad inicial en base húmeda 89,51% (CEANID, 2024).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.34: Etapa de lavado

Por lo tanto, el balance general de materia en la etapa de lavado es:

$$M_3 + M_4 = M_5 + M_6 \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

Despejando M_6 de la ecuación 4.10 y reemplazando valores se obtiene:

$$M_6 = M_3 + M_4 - M_5 \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

$$M_6 = 1798,02 \text{ g} + 3067,80 \text{ g} - 3000,12$$

$$M_6 = 1865,70 \text{ g de plátano lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción sólido soluble de plátano

$$M_3X_3^S + M_4X_4^S = M_5X_5^S + M_6X_6^S \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Despejando X_6^S de la ecuación 4.12, se obtiene:

$$M_3X_3^S + M_4X_4^S = M_5X_5^S + M_6X_6^S \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

$$M_3X_3^S = M_6X_6^S$$

$$X_6^S = \frac{M_3X_3^S}{M_6}$$

$$X_6^S = \frac{1798,02 \text{ g} * 0,1049}{1854,66 \text{ g}}$$

$$X_6^S = 0,1017 \text{ fracción sólida de plátano lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción húmeda del plátano

$$M_3X_3^H + M_4X_4^H = M_5X_5^H + M_6X_6^H \quad (\text{Ecuación 4.14})$$

Despejando X_6^H de la ecuación 4.14, se obtiene:

$$M_3X_3^H + M_4X_4^H = M_5X_5^H + M_6X_6^H$$

$$X_6^H = \frac{M_3X_3^H}{M_6}$$

$$X_6^H = \frac{1798,02 * 0,8951}{1854,66}$$

$$X_6^H = 0,8628 \text{ fracción húmeda de plátano lavado}$$

Cálculo de la fracción X_6^{AD} de agua adherida en la etapa de lavado

$$X_6^{AD} = 1 - X_6^H - X_6^S \quad (\text{Ecuación 4.15})$$

Reemplazando valores se obtiene:

$$X_6^{AD} = 1 - 0,8628 - 0,1017$$

$$X_6^{AD} = 0,0355 \text{ fracción de agua adherida del plátano lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción de agua en la etapa de lavado

$$M_3X_3^A + M_4X_4^A = M_5X_5^A + M_6X_6^A \quad (\text{Ecuación 4.16})$$

Despejando X_5^A de la ecuación 4.16, se obtiene:

$$M_3X_3^A + M_4X_4^A = M_5X_5^A + M_6X_6^A$$

$$M_4X_4^A = M_5X_5^A + M_6X_6^A$$

$$X_5^A = \frac{M_4X_4^A - M_6X_6^A}{M_5}$$

$$X_5^A = \frac{3067,80 \text{ g} \cdot 1 - 1854,66 \text{ g} \cdot 0,0355}{3000,12 \text{ g}}$$

$$X_5^A = 0,9999 \text{ fracción de agua residual}$$

Cálculo para la fracción X_5^I de impurezas en el agua residual

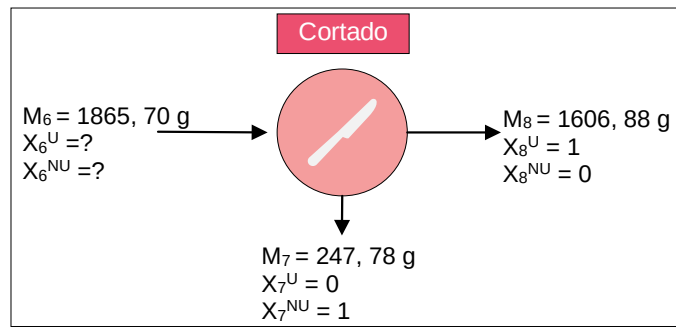
$$X_5^I = 1 - X_5^A \quad (\text{Ecuación 4.17})$$

$$X_5^I = 1 - 0,9999$$

$$X_5^I = 0,0001 \text{ fracción de impurezas en el agua residual}$$

4.9.3 Balance de materia en la etapa de cortado

En la Figura 4.35, se muestra la etapa de cortado el cual se realizó con 1865, 70 g de plátano verde, tomando en cuenta 1606,88 g de plátano sin cabo ni punta y 247,79 g de cabo y punta para realizar el balance de materia correspondiente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.35: Etapa de cortado

Por lo tanto, el balance general de materia en la etapa de cortado es:

$$M_6 = M_7 + M_8 \quad (\text{Ecuación 4.18})$$

Balance parcial de materia en la fracción de porción útil en la etapa de cortado

$$M_6 X_6^U = M_7 X_7^U + M_8 X_8^U \quad (\text{Ecuación 4.19})$$

Despejando X_6^{PU} de la ecuación 4.19, se obtiene:

$$M_6 X_6^U = M_7 X_7^U + M_8 X_8^U$$

$$X_6^U = \frac{M_8 X_8^U}{M_6}$$

$$X_6^U = \frac{1606,88 \text{ g} \cdot 1}{1865,70 \text{ g}}$$

$$X_6^U = 0,8613 \text{ fracción útil de plátano lavado}$$

Balance parcial de materia de la fracción no útil en la etapa de cortado

$$M_6 X_6^{NU} = M_7 X_7^{NU} + M_8 X_8^{NU} \quad (\text{Ecuación 4.20})$$

Despejando X_6^{NU} de la ecuación 4.20, se obtiene:

$$M_6 X_6^{NU} = M_7 X_7^{NU} + M_8 X_8^{NU}$$

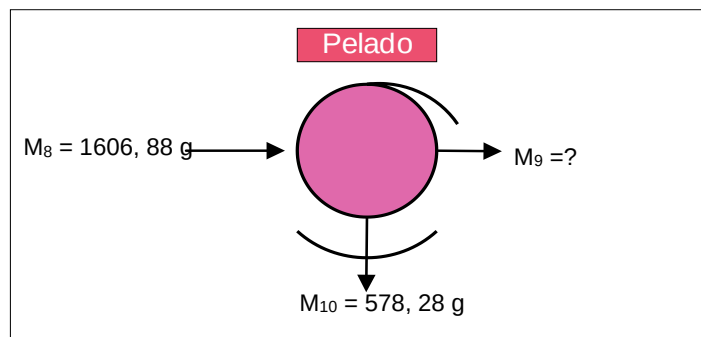
$$X_6^{NU} = \frac{M_7 X_7^{NU}}{M_6}$$

$$X_6^{NU} = \frac{247,78 \text{ g} \cdot 1}{1865,70 \text{ g}}$$

$$X_6^{NU} = 0,1328 \text{ fracción no útil de plátano lavado}$$

4.9.4 Balance de materia en la etapa de pelado

En la Figura 4.36, se muestra la etapa de pelado a partir de 1606,88 g de plátano sin cabo ni punta, tomando en cuenta 578,28 g de cáscara de plátano para realizar el balance correspondiente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.36: Etapa de pelado

Por lo tanto, el balance general de materia en la etapa de pelado es:

$$M_6 = M_9 + M_{10} \quad (\text{Ecuación 4.21})$$

Despejando M_9 de la ecuación 4.21, se obtiene:

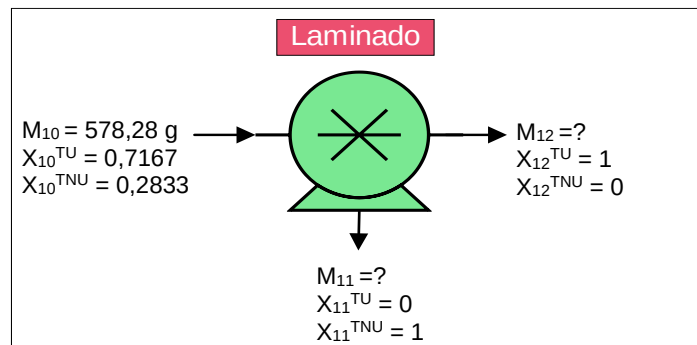
$$M_9 = M_8 - M_{10}$$

$$M_9 = 1606,88 \text{ g} - 578,28 \text{ g}$$

$$M_9 = 1028,60 \text{ g de pulpa de plátano}$$

4.9.5 Balance general de materia en la etapa de laminado y cortado

En la Figura 4.37, se muestra la etapa de laminado el cual se realizó con 578,28 g de cáscara de plátano comestible, tomando en cuenta datos de la Tabla 4.2, donde: tiras útiles 71,67% (TU) y tiras no útiles 28,33% (TNU).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.37: Etapa de laminado y cortado

Por lo tanto, el balance general de materia en la etapa de laminado es:

$$M_{10} = M_{11} + M_{12} \quad (\text{Ecuación 4.22})$$

Balance parcial de materia de la fracción de tiras útiles

$$M_{10}X_{10}^{TU} = M_{11}X_{11}^{TU} + M_{12}X_{12}^{TU} \quad (\text{Ecuación 4.23})$$

Despejando M_{12} de la ecuación 4.23 y reemplazando datos se obtiene:

$$M_{10}X_{10}^{TU} = \cancel{M_{11}X_{11}^{TU}} + M_{12}X_{12}^{TU}$$

$$M_{12} = \frac{M_{10}X_{10}^{TU}}{X_{12}^{TU}}$$

$$M_{12} = \frac{578,28 \text{ g} \cdot 0,7167}{1}$$

$M_{12} = 414,45 \text{ g}$ tiras útiles de cáscara de plátano

Despejando M_{11} de la ecuación 4.22 y reemplazando datos se obtiene:

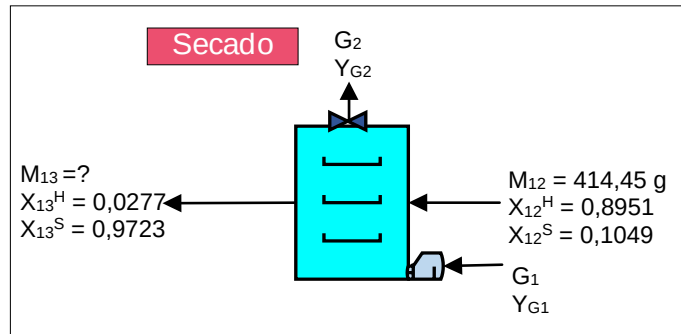
$$M_{11} = M_{10} - M_{12} \quad (\text{Ecuación 4.24})$$

$$M_{11} = 578,28 \text{ g} - 414,45 \text{ g}$$

$M_{11} = 163,83 \text{ g}$ pérdida de tiras en la etapa de laminado

4.9.6 Balance de materia en la etapa de secado

En la Figura 4.38, se muestra la etapa de secado en un secador de bandejas, se realizó con 414,45 g tiras de cáscara de plátano verde con contenido de humedad en base húmeda 89,51% y al final del proceso el contenido de humedad final de las tiras de cáscara de plátano es 2,77% (CEANID, 2024).



Fuente: Elaboración propia
Figura 4.38: Etapa de secado

Por lo tanto, el balance de materia global en la etapa de secado es:

$$M_{12} + G_1 = M_{13} + G_2 \quad (\text{Ecuación 4.25})$$

Balance parcial de materia de la fracción sólido soluble en la etapa de secado

$$M_{12}X_{12}^S = M_{13}X_{13}^S \quad (\text{Ecuación 4.26})$$

Despejando M_{13} de la ecuación 4.26, y reemplazando datos se obtiene:

$$M_{13} = \frac{M_{12}X_{12}^S}{X_{13}^S}$$

$$M_{13} = \frac{414,45 \text{ g} \cdot 0,1049}{0,9723}$$

$$M_{13} = 44,71 \text{ g de cáscara de plátano seco}$$

Para determinar la masa de sólido seco de la cáscara de plátano a la entrada del secador se utiliza la ecuación 4.27 citado por (Valiente, 2012)

$$m_{ss} = M_{12} (1 - X_{12}^H) \quad (\text{Ecuación 4.27})$$

$$m_{ss} = 414,45 \text{ g} (1 - 0,8951)$$

$m_{ss} = 43,48$ g sólido seco de la cáscara de plátano a la entrada del secador

El contenido de humedad inicial en base seca de la cáscara de plátano seco en la etapa de secado se determinó según la ecuación 4.28 citada por (Valiente, 2012)

$$X_{BS} = \frac{H_{BH}}{1 - H_{BH}} \quad (\text{Ecuación 4.28})$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.28 se obtiene:

$$X_{M12} = \frac{0,8951}{(1 - 0,8951)}$$

$$X_{M12} = 8,5329 \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

El contenido de humedad en base seca al final del proceso de secado se tomó en cuenta la ecuación 4.28:

$$X_{M13} = \frac{0,0277}{(1 - 0,0277)}$$

$$X_{M12} = 0,0285 \text{ (g agua/g sólido seco)}$$

Para determinar la cantidad de masa seca de aire seco en la etapa de secado, se tomó en cuenta la ecuación 4.29, citada por (Valiente, 2012)

$$M_{12} * X_{M12} + G_1 * Y_{G1} = M_{13} * X_{M13} + G_2 * Y_{G2} \quad (\text{Ecuación 4.29})$$

Donde:

G_1 = Cantidad de masa del aire a la entrada (kg aire seco/h)

G_2 = Cantidad de masa del agua evaporada a la salida (g)

M = Cantidad de masa de sólido seco (g sólido seco/h)

X = Humedad del producto en base seca (g agua/g sólido seco)

Y = Humedad del aire (g agua/kg aire seco)

Reemplazando variables en la ecuación 4.29 se obtiene:

$$M * X_{M12} + G_1 * Y_{G1} = M * X_{M13} + G_1 * Y_{G2} \quad (\text{Ecuación 4.30})$$

Agrupando términos semejantes de la ecuación 4.30 se obtiene:

$$M * X_{M12} - M * X_{M13} = G_1 * Y_{G2} - G_1 * Y_{G1} \quad (\text{Ecuación 4.31})$$

Factorizando la ecuación 4.31 se obtiene:

$$M * (X_{M12} - X_{M13}) = G_1 * (Y_{G2} - Y_{G1}) \quad (\text{Ecuación 4.32})$$

Despejando G de la ecuación 4.32 se obtiene:

$$G_1 = \frac{M (X_{M12} - X_{M13})}{(Y_{G2} - Y_{G1})} \quad (\text{Ecuación 4.33})$$

Según (SENAMHI, 2024) la altura de la ciudad de Tarija es de 1859 msnm, por tanto, los datos fueron introducidos al Psychrometrics program de psicrometría y los resultados se muestran en la Tabla 4.27 en base a la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo medidos a la entrada y salida del secador.

Tabla 4.27

Propiedades psicrométricas del aire

Propiedades	Aire frío	Aire saturado
T _{BS} (°C)	27,70	56,19
T _{BH} (°C)	17,68	50,76
H _R (%)	40,30	75,13
Y (g agua/kg aire seco)	11,70	114,01
PVP (kpa)	1,49	12,53
H _{G1} (Kj/kg aire seco)	57,70	
H _{G2} (Kj/kg aire seco)	354,52	

Fuente: Psychrometrics program

Donde:

T_{BS} = Temperatura de bulbo seco (°C)

T_{BH} = Temperatura de bulbo húmedo (°C)

Y = Humedad absoluta (g agua/kg de aire seco)

PVP = Presión parcial de vapor de agua (kpa)

H_{G1} = Entalpía del aire a la entrada del secador (Kj/kg aire seco)

H_{G2} = Entalpía del aire a la salida del secador (Kj/kg aire seco)

En base a la ecuación 4.32, se determinó la cantidad de masa de aire seco a partir de 414,45 g de cáscara de plátano donde obtiene 44,71 g de sólido seco.

$$G_1 = \frac{44,71 \text{ g sólido seco} * (8,5329 - 0,0285) \text{ g agua/g sólido seco}}{(114,01 - 11,70) \text{ g agua/kg aire seco}}$$

$$G_1 = 3,72 \text{ kg aire seco}$$

Para calcular la cantidad de masa de agua evaporada, se tomó en cuenta la ecuación 4.35 citada por (Valiente, 2012).

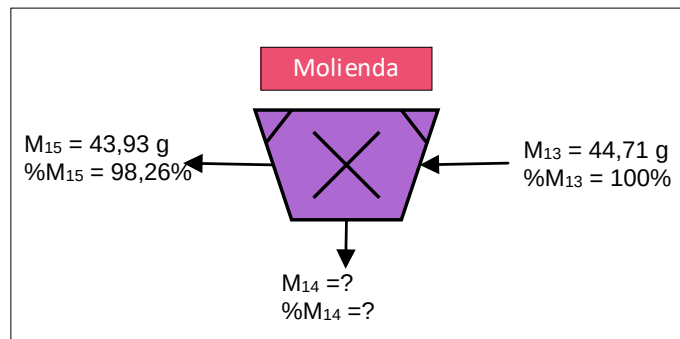
$$G_2 = (X_{P12} - X_{P13}) * m_{SS}$$

$$G_2 = (8,53 - 0,029) \text{ g de agua/g sólido seco} * 43,48 \text{ g sólido seco}$$

$$G_2 = 369,77 \text{ g de agua evaporada}$$

4.9.7 Balance general de materia en la etapa de molienda

En la Figura 4.39, se muestra el balance de materia en la etapa de molienda el cual se realizó con 44,71 g de tiras de cáscara de plátano seco y al terminar el proceso se obtuvo 43,93 g de harina de cáscara de plátano.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.39: Etapa de molienda

Por lo tanto, el balance de materia general en la etapa de molienda es:

$$M_{13} = M_{14} + M_{15} \quad (\text{Ecuación 4.34})$$

Despejando M_{14} de la ecuación 4.34 y reemplazando datos se obtiene:

$$M_{14} = M_{13} - M_{15}$$

$$M_{14} = 44,71 \text{ g} - 43,93 \text{ g}$$

$$M_{14} = 0,78 \text{ g pérdida en la etapa de molienda}$$

La cantidad de porcentaje de pérdida en la etapa de molienda se obtiene utilizando la ecuación 4.35.

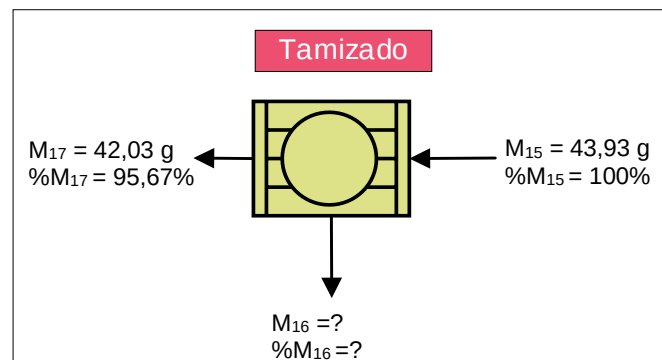
$$X_{M14} = \frac{M_{14} * 100\%}{M_{13}} \quad (\text{Ecuación 4.35})$$

$$X_{M14} = \frac{0,78 \text{ g} * 100\%}{44,71 \text{ g}}$$

$$X_{M14} = 1,74 \% \text{ pérdida de harina en la etapa de molienda}$$

4.9.8 Balance general de materia en la etapa de tamizado

En la figura 4.40, se muestra el balance de materia en la etapa de tamizado el cual se realizó con 43,93 g de harina de cáscara de plátano. Utilizando un tamiz vibratorio marca Orto Alfresa de (0,25 mm), una vez terminado el proceso se obtuvo 42,03 g de harina de cáscara de plátano.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.40: Etapa de tamizado

Por lo tanto, el balance general de materia en la etapa de tamizado es:

$$M_{15} = M_{16} + M_{17} \quad (\text{Ecuación 4.36})$$

Despejando M_{16} de la ecuación 4.36 se obtiene:

$$M_{16} = M_{15} - M_{17}$$

$$M_{16} = 43,93 \text{ g} - 42,03 \text{ g}$$

$$M_{16} = 1,90 \text{ g pérdida en la etapa de tamizado}$$

La cantidad de porcentaje de pérdida en la etapa de tamizado se obtiene utilizando la ecuación 4.37.

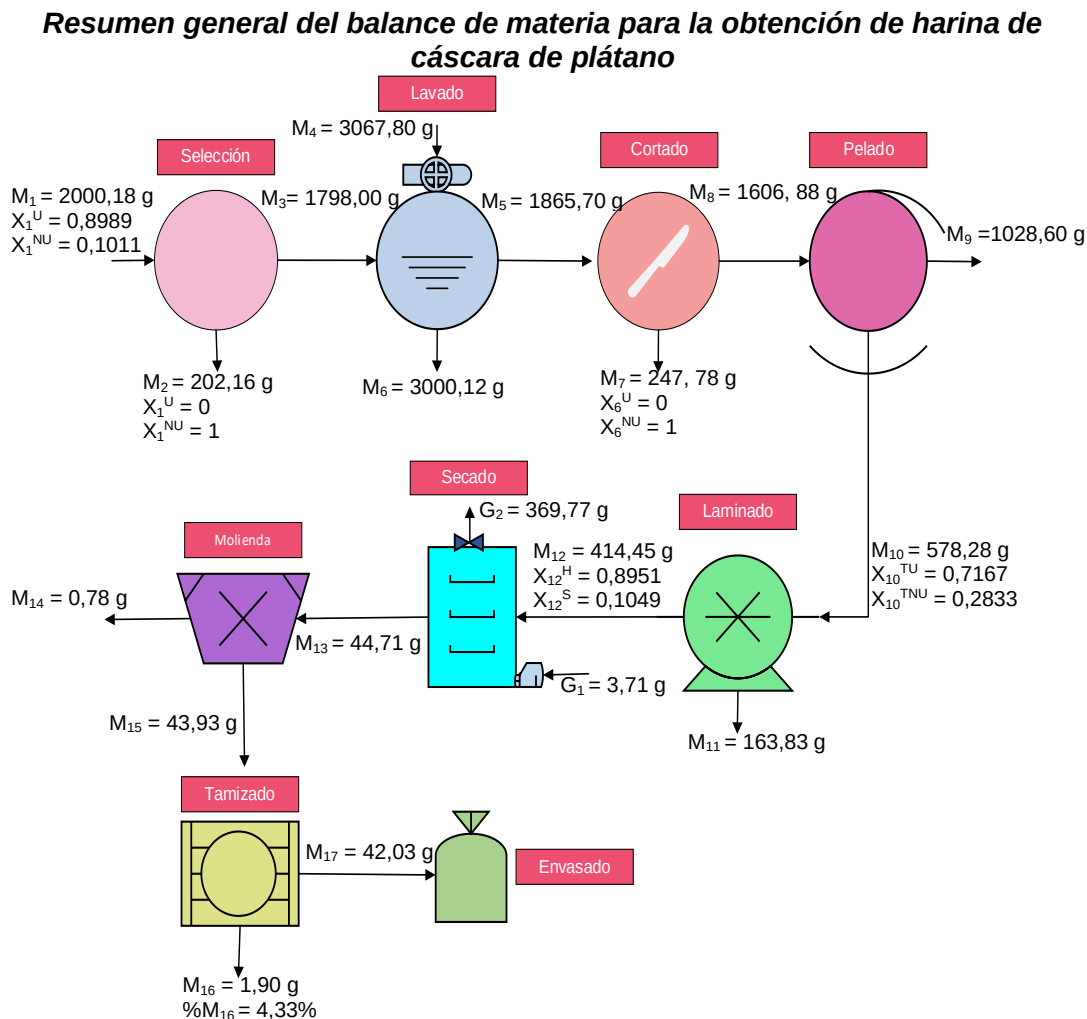
$$X_{M16} = \frac{M_{16} * 100\%}{M_{15}} \quad (\text{Ecuación 4.37})$$

$$X_{M16} = \frac{1,90 \text{ g} * 100\%}{43,93 \text{ g}}$$

$$X_{M16} = 4,33 \% \text{ pérdida de harina en la etapa de tamizado}$$

4.10 Resumen general del balance de materia en el proceso de materia en el proceso de obtención de harina de cáscara de plátano

En la Figura 4.41, se muestra el resumen general del balance de materia para la obtención de harina de cáscara de plátano.



Fuente: Elaboración propia

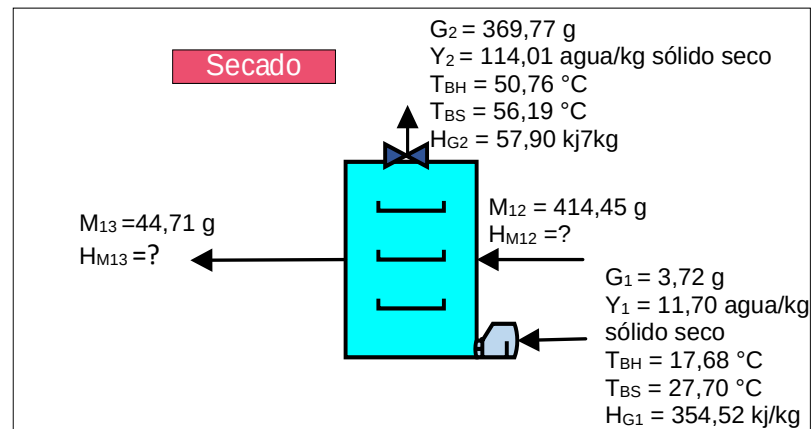
Figura 4.41: Resumen general del balance de materia para la obtención de harina de cáscara de plátano

4.11 Balance de energía para la obtención de harina de cáscara de plátano

El balance de energía para la obtención de harina de cáscara de plátano, se realizó en el proceso de secado, molienda y tamizado.

4.11.1 Balance de energía en el proceso de secado

En la Figura 4.42, se muestra el balance de energía en la etapa de secado de la muestra de cáscara de plátano, tomando en cuenta los factores temperatura (70°C), velocidad de aire (4m/s) y corte de (3 mm).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.42: Balance de materia y energía en la etapa de secado de tiras de cáscara de plátano

Según (Singh y Heldman, 1975), para calcular la entalpía de cualquier producto se tiene la ecuación 4.38

$$E_p = C_p (T_P - T_0) + X_p C_{px} (T_P - T_0) \quad (\text{Ecuación 4.38})$$

Donde:

E_p = Entalpía del producto (kJ/kg aire seco)

C_p = Calor específico del producto (cáscara de plátano) (kJ/kg°C)

T_P = Temperatura del producto (°C)

T_0 = Temperatura de referencia (°C)

X_p = Humedad del producto (kg agua/kg sólido seco)

C_{px} = Calor específico del agua (kJ/kg agua°C)

Para calcular el calor específico de cualquier tipo de alimentos, se tiene la ecuación 4.39 citada por (Singh & Heldman, 1975).

$$C_{pp} = C_{Pw} * X_w * C_{Pp} + X_p + C_{Pf} * X_f + C_{Pc} * X_c + C_{Pa} * X_a \quad (\text{Ecuación 4.39})$$

Donde:

$C_{Pw} = 4,187 \text{ (kJ/kg}^\circ\text{C)}$ = Calor específico del agua (Singh & Heldman, 1975).

$C_{Pp} = 1,549 \text{ (kJ/kg}^\circ\text{C)}$ = Calor específico de proteínas (Singh & Heldman, 1975).

$C_{Pf} = 1,675 \text{ (kJ/kg}^\circ\text{C)}$ = Calor específico de grasas (Singh & Heldman, 1975).

$C_{Pc} = 1,424 \text{ (kJ/kg}^\circ\text{C)}$ = Calor específico de carbohidratos (Singh & Heldman, 1975).

$C_{Pa} = 0,837 \text{ (kJ/kg}^\circ\text{C)}$ = Calor específico de cenizas (Singh & Heldman, 1975).

X_w = Fracción másica del agua

X_p = Fracción másica de la proteína

X_f = Fracción másica de las grasas

X_c = Fracción másica de los carbohidratos

X_a = Fracción másica de las cenizas

Reemplazando valores en la ecuación 4.39 se obtiene la ecuación 4.40:

$$C_{pp} = 4,187 * X_w + 1,549 * X_p + 1,675 * X_f + 1,424 * X_c + 0,837 * X_a \quad (\text{Ecuación 4.40})$$

Para calcular el calor específico de cáscara de plátano, se tomó en cuenta los datos de la Tabla 4.28:

Tabla 4.28

Datos de la composición fisicoquímica de cáscara de plátano

Parámetros	Símbolo	Resultado
Carbohidratos	X_c	0,0629
Proteína	X_p	0,0150
Grasa	X_f	0,0085
Cenizas	X_a	0,0185
Humedad	X_w	0,8951

Fuente: CEANID, 2024

Por lo tanto, reemplazando datos de la Tabla 4.28 en la ecuación 4.40 se obtiene:

$$C_{PP12} = (4,187 * 0,8951) + (1,549 * 0,0150) + (1,675 * 0,0085) + (1,424 * 0,0629) + (0,837 * 0,0185)$$

$$C_{PP12} = 3,8903 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.38 y reemplazando datos se obtiene la entalpia de la cáscara de plátano, a la entrada del secador de bandejas:

$$E_{P12} = C_{PP12} (T_{P12} - T_0) + X_{P12} * C_{PX12} (T_{P12} - T_0)$$

$$E_{P12} = (3,8903 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) (20,76 - 0)^\circ\text{C} + (8,53 \text{ kg/kg}) * (4,187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) (20,76 - 0)^\circ\text{C}$$

$$E_{P12} = 822,20 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Para calcular el calor específico de la harina cáscara de plátano, se tomó en cuenta los datos de la Tabla 4.29:

Tabla 4.29

Datos de la composición fisicoquímica de la harina de cáscara de plátano

Parámetros	Símbolo	Resultado
Carbohidratos	X_c	0,6986
Proteína	X_p	0,0759
Grasa	X_f	0,0673
Cenizas	X_a	0,1305
Humedad	X_w	0,0277

Fuente: CEANID,2025

Por tanto, reemplazando datos de la Tabla 4.29 en la ecuación 4.40 se obtiene:

$$C_{PP13} = (4,187 * 0,0277) + (1,549 * 0,0759) + (1,675 * 0,0673) + (1,424 * 0,6986) + (0,837 * 0,1305)$$

$$C_{PP13} = 1,4508 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.38 y reemplazando datos se obtiene la entalpia de la cáscara de plátano, a la salida del secado de bandejas.

$$E_{P13} = C_{PP13} (T_{P13} - T_0) + X_{P13} * C_{PX}(T_{P13} - T_0)$$

$$E_{P13} = 1,4508 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (40,10 - 0)^\circ\text{C} + 0,12 * 4,187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (40,10 - 0)^\circ\text{C}$$

$$E_{P13} = 78,32 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Tenemos los siguientes datos:

$$E_{P12} = 822,20 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$E_{P13} = 78,32 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$H_{G1} = 57,90 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$H_{G2} = 354,52 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$G = 3,72 \text{ kg aire seco}$$

$$M = 44,71 = 0,0447 \text{ kg sólido seco}$$

Reemplazando datos en la ecuación 4.41 se obtiene:

$$Q_P = G(H_{G2} - H_{G1}) + M(E_{P13} - E_{P12}) \quad (\text{Ecuación 4.41})$$

$$Q_P = 3,72 \text{ kg}(354,52 \text{ kJ/kg} - 57,90 \text{ kJ/kg}) + 0,0447 \text{ kg}(78,32 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} - 822,20 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})$$

$$Q_P = 1070,70 \text{ kJ}$$

Convirtiendo kJ a kcal obtenemos:

$$Q_P = 1070,70 \text{ kJ} * \frac{1 \text{ kcal}}{4,184 \text{ kJ}}$$

$$Q_P = 255,90 \text{ kcal}$$

El calor necesario para el proceso de secado de las muestras de cáscara de plátano es de 255,90 kcal para obtener una cantidad de 44,71 g de cáscara de plátano seco.

4.11.2 Balance de energía en el proceso de molienda

Para el balance de energía en la etapa de molienda se utilizó el molino eléctrico con una potencia (P) de 200 W durante 0,104 horas.

Para determinar la energía necesaria se utilizó la ecuación 4.42 (Bosques, 2015)

$$E = P * t \quad (\text{Ecuación 4.42})$$

Reemplazando los valores en la ecuación 4.42 se obtiene:

$$E = 200 \text{ W} * \frac{\left(1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}\right)}{1,163 \text{ W}} * 0,104 \text{ h}$$

E = 17,88 kcal energía necesaria para la etapa de molienda

4.11.3 Balance de energía en el proceso de tamizado

Para el balance de energía en el proceso de tamizado se utilizó un tamiz vibratorio con una potencia de 80 W durante 0,18 horas.

Reemplazando los valores en la ecuación 4.42 se obtiene:

$$E = 80 \text{ W} * \frac{\left(1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}\right)}{1,163 \text{ W}} * 0,18 \text{ h}$$

E = 12,38 kcal energía eléctrica necesaria para la etapa de tamizado de harina de cáscara de plátano.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Para el presente trabajo experimental de obtención de harina de cáscara de plátano y según datos obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- En base a las propiedades físicas del plátano presenta un promedio: altura con cabo y punta 18,11 cm; altura sin cabo y punta 15,15 cm; diámetro inferior 1,89 cm; diámetro superior 2,35 cm; peso total 98,66 g; peso sin cabo y punta 95,59; porción comestible 53,98%; porción no comestible 46,02%; tiras útiles 71,67% y tiras no útiles 28,33%.
- En base a los resultados fisicoquímicos de la cáscara de plátano (***Musa paradisiaca***) se tiene: Humedad 89,51 g/100g; Ceniza 1,85 g/100g; Grasa 0,85 g/100g; Proteína total 1,50 g/100g; Fibra 6,02 g/100g; Hidratos de carbono 6,29 g/100g; Valor energético 39 kcal/100g; pH 6,56; Sólidos solubles 1,10 g/100 g y Sólidos totales 10,49 g/100g. Así mismo, en micronutrientes contiene: 603 mg/100g de Potasio y 22 mg/100g de Calcio.
- En base a los análisis microbiológicos de la cáscara de plátano, esta contiene: *Coliformes fecales* $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g; *Coliformes totales* $9,0 \times 10^2$ UFC/g; *Escherichia coli* $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g y *Staphylococcus aureus* $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g. Donde (*) no se observa desarrollo de colonias.
- Realizadas las curvas de variación del contenido de humedad en función del tiempo y los tratamientos aplicados, se concluye que la muestra H04 (sin tratamiento) fue la más eficiente, alcanzando un contenido de humedad de 0,14 kg agua/kg sólido seco a los 180 minutos de secado.
- Los resultados del diseño factorial 2^3 permitieron identificar que la muestra T02 (sin tratamiento) presentó el valor mínimo de humedad (0,130 kg agua/kg sólido seco) a los 150 minutos. En comparación, la muestra P06 (tratada con ácido ascórbico) alcanzó un contenido de humedad de 0,138 kg agua/kg sólido seco al mismo tiempo. Por lo tanto, se determinó que la muestra T02 es la

más adecuada para la obtención de harina de cáscara de plátano, debido a su mayor eficiencia en el proceso de secado.

- En base a los análisis fisicoquímicos de la harina de cáscara de plátano esta contiene: Ceniza 13,05 g/100g; Fibra 7,80 g/100g; Grasa 6,73 g/100g; Hidratos de carbono 69,86 g/100g; Proteína total (N*6,25) 7,59 g/100g; Humedad 2,77 g/100g y Valor energético 370 kcal/100g. Los micronutrientes contienen: 125 mg/100 g de Calcio y 4718 mg/100 g de Potasio.
- En base a los análisis microbiológicos de la harina de cáscara de plátano esta contiene: *Coliformes totales* $4,0 \times 10^1$ UFC/g; *Escherichia coli* $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g y Mohos y Levaduras $<1,0 \times 10^1$ (*) UFC/g. Donde (*) no se observa desarrollo de colonias.
- En base al balance de materia y energía, se determinó que la cantidad de calor necesario para secar muestras de cáscara de plátano verde sin tratamiento de 89,51 g/100g de humedad inicial y 2,77 g/100g de humedad final, es de 255,80 kcal.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda considerar el aprovechamiento integral del plátano verde en futuros estudios. Aunque en este trabajo solo se utilizó la cáscara, la pulpa puede destinarse a la elaboración de harina, extracción de almidón o producción de chips, Esto permitiría maximizar el uso del fruto, reducir el desperdicio y fortalecer el enfoque de sostenibilidad en la cadena productiva.
- Se recomienda gestionar fondos a través de programas de innovación, desarrollo sostenible o emprendimientos para financiar la implementación de una planta piloto modular para validar el proceso a mayor escala de la harina de cáscara de plátano verde, evaluar rendimiento continuo y estandarizar la calidad de la harina.
- Se sugiere establecer acuerdos con productores del Departamento y comercializadores para asegurar una fuente constante de cáscara de plátano

como materia prima, promoviendo la economía circular dentro del sector agroalimentario.

- Para maximizar el aprovechamiento de la harina de cáscara de plátano, se sugiere investigar aplicaciones concretas como: panificación y suplementos alimenticios, ya que esto abrirá nuevas oportunidades de mercado y fortalecerá el modelo de negocio.