

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA
PERUANA**



**FACULTAD DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

*Escuela de Formación Profesional de Ingeniería en
Industrias Alimentarias*

TRABAJO FINAL DE CARRERA

**“OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SECADO DE
LA CASCARA DEL CAMU-CAMU (*Myrciaria Dubia*) EN UN
LECHO FLUIDIZADO”**

**PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:
JOSÉ RAÚL VALCÁRCEL GONZÁLES**

ASESORES:

**Ing. MSc. ROGER RUIZ PAREDES
Ing. MSc. JORGE LUIS CARRANZA GONZALES**

**IQUITOS - PERÚ
2014**

AUTORIZACIÓN DEL ASESOR

Yo Ing. MSc. Roger Ruiz Paredes, profesor Principal del Departamento Académico de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana:

INFORMA:

Que el Bach. José Raúl Valcárcel Gonzáles, ha realizado bajo mi dirección el trabajo final de carrera intitulado **“OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SECADO DE LA CASCARA DEL CAMU-CAMU (*MYRCIARIA DUBIA*) EN UN LECHO FLUIDIZADO”**, considerando que el mismo reúne los requisitos necesarios para ser presentado ante el jurado calificador y acceda a obtener el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias.

AUTORIZO:

Al citado Bachiller a presentar el trabajo final de carrera para proceder a su sustentación cumpliendo así, la normativa vigente que regula los Grados y Títulos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.

.....
Ing. MSc. ROGER RUIZ PAREDES,

ASESOR

MIEMBROS DEL JURADO

Tesis aprobada en sustentación pública, en la ciudad de Iquitos en las Instalaciones del Auditorio de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, llevado acabo el día jueves 10 de abril del 2014 a horas 10:00 a.m. siendo mencionado líneas abajo los jurados.

.....

PRESIDENTE

.....

MIEMBRO TITULAR

.....

MIEMBRO TITULAR

.....

MIEMBRO SUPLENTE

DEDICATORIA

-A Dios todo poderoso por darme la vida, salud, y la fortaleza para seguir adelante en mi formación como profesional.

-A mis queridos Padres Prof. José Hernán Valcárcel Farrera y Hermelinda Gonzales Tello, gracias a su sacrificio, paciencia, dedicación y confianza que tuvieron hacia mi persona.

-A mis hermanos Linda Janisse Valcárcel Gonzales y Marco Polo Valcárcel Gonzales por el apoyo moral en los años de estudio.

AGRADECIMIENTO

-A la Facultad de Industrias Alimentarias (FIA) por las facilidades brindadas durante la realización del presente trabajo.

-Agradezco a mis Asesores y amigos MSc. Jorge Luis Carranza Gonzales y MSc. Roger Ruiz Paredes por el apoyo incondicional, orientación, amistad y aportes durante la realización y redacción del presente estudio.

-Agradecimiento a mis queridos amigos Abg. Alejandro Muñoz Cortez y CPC. Rafael Salazar Quiroz por sus apoyos enriquecedores e incondicional durante mi formación.

INDICE

	Pág.
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación y planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 Materia prima	5
2.1.1 Taxonomía	5
2.1.2 Morfología	6
2.1.3 Composición del fruto	6
2.2 Principios de fluidinámica	8
2.2.1 Concepto de fluidización	8
2.2.2 Lecho fluidizado	9
2.2.3 Característica física de las partículas	10
2.2.3.1 Porosidad del lecho (ϵ)	10
2.2.3.2 Esfericidad	10
2.2.3.3 Densidad de la partícula (ρ_p)	11
2.2.3.4 Diámetro de la partícula	11
2.2.3.5 Área superficial (a)	11
2.2.3.6 Clasificación de las partículas	11
2.3 Velocidades relacionadas en un lecho fluidizado	12
2.3.1 Velocidad superficial del gas	13
2.3.2 Velocidad mínima de fluidización	13
2.3.3 Velocidad terminal.	15
2.4 Construcción de las curvas de secado	17
2.5 Transferencia de calor en el lecho fluidizado	19
2.5.1 Transferencia de calor entre el gas y las partículas	19
2.6 Balance de materia en el lecho fluidizado	22
2.7 Balance de energía en lecho fluidizado	23
2.8 Análisis estadístico	24

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Materiales	25
3.1.1 Materia prima	25
3.1.2 Materiales de laboratorio	25
3.2 Descripción del equipo	26
3.2.1 Horno secador de lecho fluidizado	26
3.2.2 Equipos de medición	32
3.3 Métodos de análisis	33
3.3.1 De la materia prima	33
3.4 Metodología experimental	35
3.4.1 Descripción del proceso	35
3.4.2 Caracterización fluidinámica de la cascara de camu-camu	37
3.4.2.1 Densidad de las partículas (ρ_p)	38
3.4.2.2 Esfericidad de las partículas (ϕ)	38
3.4.2.3 Diámetro promedio de partícula (d_p)	40
3.4.3 Cálculo de parámetros fluidinámicos de la cascara de camu-camu.	41
3.4.3.1 Cálculos fluidinámicos para una malla de 13 mm con una temperatura de 50 °c.	41
3.4.3.1.1 Cálculo de la densidad de la partícula (ρ_p)	41
3.4.3.1.2 Calculo de la esfericidad de la partícula (ϕ_p)	42
3.4.3.1.3 Calculo del diámetro de la partícula (d_p)	42
3.4.3.1.4 Calculo del volumen del lecho (V_l)	42
3.4.3.1.5 Calculo de la densidad del lecho (ρ_l)	43
3.4.3.1.6 Calculo de la porosidad del lecho fluidizado (ε)	43
3.4.3.1.7 Determinación de la densidad del aire (ρ_{aire})	43
3.4.3.1.8 Calculo de la porosidad mínima de fluidización del lecho (ε_{mf})	44
3.4.3.1.9 Calculo de la velocidad mínima de fluidización (U_{mf})	45
3.4.3.2 Cálculos fluidinámicos para una malla de 19 mm con una temperatura de 50 °c.	45

3.4.3.2.1 Cálculo de la densidad de la partícula (ρ_p)	45
3.4.3.2.2 Calculo de la esfericidad de la partícula (ϕ_p)	46
3.4.3.2.3 Calculo del diámetro de la partícula (d_p)	46
3.4.3.2.4 Calculo del volumen del lecho (V_l)	46
3.4.3.2.5 Calculo de la densidad del lecho (ρ_l)	47
3.4.3.2.6 Calculo de la porosidad del lecho fluidizado (ε)	47
3.4.3.2.7 Determinación de la densidad del aire (ρ_{aire}).	47
3.4.3.2.8 Calculo de la porosidad mínima de fluidización del lecho (ε_{mf}).	48
3.4.3.2.9 Calculo de la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).	49
3.4.3.3 Cálculos fluidinámicos para una malla de 24 mm con una temperatura de 50 °c.	49
3.4.3.3.1 Cálculo de la densidad de la partícula (ρ_p)	49
3.4.3.3.2 Calculo de la esfericidad de la partícula (ϕ_p)	50
3.4.3.3.3 Calculo del diámetro de la partícula (d_p)	50
3.4.3.3.4 Calculo del volumen del lecho (V_l)	50
3.4.3.3.5 Calculo de la densidad del lecho (ρ_l)	51
3.4.3.3.6 Calculo de la porosidad del lecho fluidizado (ε)	51
3.4.3.3.7 Determinación de la densidad del aire (ρ_{aire})	51
3.4.3.3.8 Calculo de la porosidad mínima de fluidización del lecho (ε_{mf}).	52
3.4.3.3.9 Calculo de la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).	52

IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Análisis de las características físicas y fluido dinámicas de la cascara de camu-camu	53
4.2 Determinación experimental de la cinética de secado de la cascara de camu-camu	56

4.3 Contenido de humedad crítica durante el proceso de secado	63
4.4 Análisis físico-químico de la cascara de camu-camu después del proceso de deshidratación	64
4.5 Cálculos del balance energético para las muestras de las diferentes mallas.	65
4.6 Balance de agua en el secador para las cascara de camu-camu.	66
4.7 Balance del combustible consumido.	67
4.8 Análisis de varianza del secado	68
V. CONCLUSIONES	69
VI. RECOMENDACIONES	71
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	72
VIII. ANEXOS	
ANEXO I: Balance de energía durante el proceso	75
ANEXO II: Balance de agua en el secador	86
ANEXO III: Diagrama de flujo para el sacado de la cascara de camu-camu	94
ANEXO IV: Pesos registrados durante las experiencias de secado	97
ANEXO V: Informe de Ensayo N° 01, 02 y 03	106

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 01: Características principales de las dos variedades de camu-camu	5
Tabla N° 02: Composición por cada 100 g de pulpa de camu-camu	7
Tabla N° 03: Composición proximal de la cascara y pulpa de la fruta fresca	8
Tabla N° 04: Ecuaciones para un lecho gas-sólido	16
Tabla N° 05: Variables independientes naturales y codificadas considerados en el diseño experimental	24
Tabla N° 06: Densidad de al cascara	38
Tabla N° 07: Características físicas obtenidas de la malla de 13 mm	39
Tabla N° 08: Características físicas obtenidas de la malla de 19 mm	39
Tabla N° 09: Características físicas obtenidas de la malla de 24 mm	40
Tabla N° 10: Obtención del diámetro promedio de la malla de 13 mm	40
Tabla N° 11: Obtención del diámetro promedio de la malla de 19 mm.	41
Tabla N° 12: Obtención del diámetro promedio de la malla de 24 mm	41
Tabla N° 13: Características físicas para las muestras a una temperatura de 50 °C	53
Tabla N° 14: Contenido de humedad crítica (x_c) a las temperaturas de 50 °C y 60 °C.	63
Tabla N° 15: Análisis Físico - Químico de la cascara de camu camu deshidratado	64
Tabla N° 16: Cálculo energético para diferentes temperaturas para las muestras de cascara de camu camu	65
Tabla N° 17: Balance de agua a las temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C	66
Tabla N° 18: Balance del combustible consumido para las temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C. para las muestras de las mallas de 13 mm, 19 mm y 24 mm.	67
Tabla N° 19: Análisis de varianza a temperaturas de 50 °C y 60 °C.	68
Tabla N° 20: Comparación de las concentraciones de ácido ascórbico.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 01: Comportamiento de los lechos fluidizados.	9
Figura N° 02: Clasificación de las partículas de Geldart	12
Figura N° 03: Curvas que se presentan durante el secado.	19
Figura N° 04: Control de volumen en la que se realiza el balance	22
Figura N° 05: Vista frontal del equipo secador de lecho fluidizado	26
Figura N° 06: Vista lateral de la cámara de combustión	27
Figura N° 07: Cámara de acumulación de aire caliente	27
Figura N° 08: Cámara de secado	28
Figura N° 09: Salida de la materia seca.	29
Figura N° 10: Distribuidor de flujo de aire caliente.	29
Figura N° 11: Motor extractor de humedad	30
Figura N° 12: Boquillas para conectar el manómetro tipo “U” instalado en el equipo.	30
Figura N° 13: Variador de velocidad	31
Figura N° 14: Diagrama de flujo seguido para la obtención de la cascara de camu-camu para su secado.	37
Figura N° 15: Contenido de humedad Vs. Tiempo. Temperatura de 40 °C.	56
Figura N° 16: Contenido de humedad Vs. Tiempo. Temperatura de 50 °C	57
Figura N° 17: Contenido de humedad Vs. Tiempo. Temperatura de 60 °C.	58
Figura N° 18: Velocidad de secado Vs. Humedad. Temperatura de 50 °C	60
Figura N° 19: Velocidad de secado Vs. Humedad. Temperatura de 60 °C	61

RESUMEN

El presente trabajo fue realizado en los ambientes de la planta de Conservas de Palmito y los Laboratorios de Análisis físico - químico de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias - UNAP.

El equipo empleado para secar las muestras fue un Horno Secador de lecho fluidizado con una temperatura de funcionamiento de 40 °C a 150 °C, también se utilizó un Anemómetro para medir la velocidad de aire circulante y un termohigrómetro para medir la temperatura y humedad relativa en el interior del horno y así asegurarnos que estas no varíen y se mantengan constantes durante las pruebas, estos equipos se utilizaron durante todo el tiempo de duración de la presente investigación.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación fue realizar una serie de experimentos para la obtención de los parámetros del secado de la cascara del camu camu (*Myrciaria dubia*) en un lecho fluidizado. La materia prima a emplear es proveniente de los pueblos y caseríos cercanos a la ciudad de Iquitos y puesto a la venta en forma fresca en los mercados locales de donde nos abasteceremos.

Para una correcta deshidratación de la cascara de camu camu se seguirá el siguiente diagrama de flujo:

Materia prima, selección/clasificación, lavado, desinfectado, enjuagado, pulpeado, pre secado, selección por tamaños, deshidratado en horno Fluidizado, análisis de vitamina C.

Los resultados experimentales de contenido de ácido ascórbico (vitamina C) fueron analizados estadísticamente con el (ANOVA), el cual tenía el diseño factorial 2^3 , representado por la ecuación $Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_1^2 + B_5X_1 X_2$, que tendrá tres factores: X_1 = temperatura (°C), X_2 = velocidad de aire (m/s), X_3 = peso de la muestra (gr). El factor X_1 tiene 2 niveles (-1 = 40 °C , +1 = 60 °C), el factor X_2 tiene 2 niveles (-1 = 2.9 m/s , +1 = 3.3 m/s), El factor X_3 tiene 2 niveles (-1 = 1.1 gr, +1 = 2.0 gr), con un rango de aceptación de R^2 (> 85 %) y el valor P ($P < 0.05$) ó ($F_{cal} > F_{tabla}$).

El análisis estadístico concluyo que la concentración de vitamina C y el contenido de humedad dependen únicamente del factor temperatura y no de la velocidad de aire.

Las concentraciones de vitamina C obtenidas fueron: 40 °C = 1587 mg/100 gr, 50 °C = 13181 mg/100 gr y 60 °C = 12133 mg/100 gr. Indicando que la mejor temperatura de deshidratación es de 50 °C ya que a 60 °C sufre una pérdida considerable de vitamina C, demostrando que la vitamina C es sensible al calor y sufre desnaturalización.

El contenido de humedad también disminuye con el incremento de temperatura, a 50 °C se obtiene 10.22 % y a 60 °C se obtiene 7.53 %, ambos valores son aceptables y garantizan su calidad nutricional por un tiempo considerable.

I. INTRODUCCIÓN

El secado ha sido desde los tiempos más remotos, un medio de conservación de los alimentos. Su aplicación en la forma más sencilla se aprovechó sin duda mediante la observación de la naturaleza. En el campo se secan los granos y los tallos por medio de exposición al sol. A menudo se logra así un grado suficiente de seguridad en la conservación de los alimentos. Sin embargo, en la región amazónica existen pocas investigaciones sobre la cinética de secado de especies vegetales que contribuyan a mejorar la dieta nutricional del poblador amazónico (Carranza, 2001).

(Geankoplis, 1982), menciona que el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas, de un cierto material. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades de agua bastante grandes. En la evaporación, el agua se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición. En el secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. El secado de materiales biológicos en especial los alimentos, se usa también como una técnica de preservación.

Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso.

(Earle, 1997), menciona que el secado de productos alimenticios es un proceso complejo que incluye calor y fenómenos de transferencia de masa que ocurre en los materiales que están siendo secados.

Durante el secado de diversos productos biológicos (sorgo, arroz, papa, zanahoria, nabo, chicharo, aceituna, achiote), se ha observado después del análisis de las cinéticas de secado, que el periodo que gobierna esta operación es el decreciente, el cual está descrito principalmente por la difusión de la humedad dentro del producto

(Aguirre et al, 1982; Bimbinet et al, 1984; Carbonell et al, 1985; citados por Carranza, 2001).

El fruto del camu-camu (*Murcyaria Dubia H.B.K*), debido a su alta composición de ácido ascórbico (1800 - 2800 mg./100 gr. de pulpa) es una excelente fuente de vitamina C, superando 60 veces en contenido de vitamina C al limón y en 40 veces a la naranja, pero como es una fruta estacional se pierde una gran parte de ella al no ser consumida por la población.

La cáscara del camu-camu contiene mayor cantidad de vitamina C que la pulpa misma, pero que es desechado porque no se tiene una forma apropiada para aprovechar sus propiedades nutricionales. Una de las formas para aprovechar la cáscara es deshidratándola.

El secado de lecho fluidizado va tomando mayor auge a nivel industrial para secar productos biológicos, que consiste en pasar aire caliente a una presión constante a través de un lecho de partículas. El aire al ponerse en contacto con el producto logra suspenderlas.

La transferencia de masa se da entre el producto y el aire caliente, este aire es el medio para eliminar el agua contenida en la materia a secar.

Se realizaron experimentos a 40, 50 y 60 °C con velocidades de aire de 2.9, 3.1 y 3.3 m/s, en el equipo de secado por fluidización ubicado en la Planta Piloto de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP). El objetivo de estos experimentos fue el de establecer los parámetros óptimos de temperatura y la velocidad de aire para el secado de la cáscara de camu-camu.

Con los datos obtenidos se procedió a analizar los efectos de la temperatura y la velocidad del aire sobre la materia prima realizando análisis de humedad, cenizas, carbohidratos, contenido de ácido ascórbico empleando el método de la (AOAC) Official Association of Chemical Assays, también se emplearon las curvas de secado para comparar el contenido de humedad vs tiempo.

1.1. JUSTIFICACIÓN

La producción actual del camu-camu (*Myrciaria dubia*) como fruto nativo y las favorables condiciones ecológicas para explotación agrícola en la zona, la justifican en primer término.

La creciente producción de este fruto muchas veces no es aprovechado por lo que se desperdicia ocasionando pérdidas económicas para los agricultores y con ello la pérdida de un componente importante en la calidad nutricional de las personas.

El fruto del camu-camu (*Murcyaria Dubia H.B.K*), debido a su alta composición de ácido ascórbico (1800 - 2800 mgr./100 grs. de pulpa) es una excelente fuente de vitamina C, superando 60 veces en contenido de vitamina C al limón y en 40 veces a la naranja, pero como es una fruta estacional se pierde una gran parte de ella al no ser consumida por la población.

La cáscara del camu-camu contiene mayor cantidad de vitamina C que la pulpa misma, pero que es desechado por qué no tiene una forma apropiada para aprovechar sus propiedades nutricionales. Una de las formas para aprovechar la cáscara es deshidratándola en un horno de lecho fluidizado.

El secado de lecho fluidizado va tomando mayor auge a nivel industrial para secar productos biológicos, que consiste en pasar aire caliente a una presión constante a través de un lecho de partículas. El aire al ponerse en contacto con el producto logra suspenderlas. La fluidización de partículas como medio físico para su uso en procesos industriales hace que cobre especial importancia su estudio.

En la actualidad son varios los investigadores que han dedicado su trabajo a la caracterización del proceso y su aplicación industrial, ofreciéndonos hoy en día el conocimiento acerca de fluidización que podemos utilizar para su desarrollo industrial.

Actualmente surge la necesidad de realizar amplios proyectos de investigación para el desarrollo de aplicaciones industriales en las que la fluidización supone una gran ventaja hace necesario la adquisición de conocimiento sobre el tema.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gran cantidad de ácido ascórbico (vitamina C) presente en el camu-camu a originado actualmente una creciente industrialización del mismo lo cual nos incentiva a investigar y desarrollar nuevas tecnologías para tener un producto de calidad, conservando sus propiedades organolépticas y un uso adecuado de la energía.

Actualmente se está investigando que el calor generado por diversos equipos, no afecte la cantidad de ácido ascórbico (vitamina C) presente en el camu-camu siendo este un reto constante por la alta sensibilidad a las temperaturas de trabajo en equipos industriales.

Por esta razón el presente trabajo de investigación plantea lo siguiente

¿La obtención de los parámetros del secado de la cascara del camu-camu (*Myrciaria dubia*) en un lecho fluidizado contribuirá en la conservación de sus propiedades físico-químicas y nutricionales?

1.2. OBJETIVOS

De lo presentado en la justificación y planteamiento del problema se presentan los siguientes objetivos:

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Obtener los parámetros del secado de la cascara de camu-camu (*Myrciaria dubia*) en un Lecho Fluidizado.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar las variables de operación que dominan este proceso de secado y los efectos que estos tienen sobre la cascara de camu-camu (*Myrciaria dubia*) durante el secado por lecho fluidizado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 MATERIA PRIMA

2.1.1 Taxonomía

El camu-camu pertenece a la familia botánica *Myrtaceae*, genero *Myrcyaria*. Existen dos tipos de camu-camu: el arbustivo y el arbóreo. El camu-camu arbustivo fue identificado por (Mc Vauhg, 1958) inicialmente como (*Myrcyaria paraensis Berg*, ya en el año 1963) Mc Vauhg cambio el nombre por *Myrcyaria dubia H.B.K.*

El camu-camu arbóreo generalmente se encuentra en los pantanos de aguas negras y zonas con mal drenaje, que se ubican en la segunda posición fisiográfica sobre el río (terrazas inundables y no inundables), y la parte inferior de su tallo queda sumergido solamente en las crecientes de mayor intensidad (Villachica, 1996).

Tabla N° 01 .Características principales de las dos variedades de camu-camu

Característica	<i>Myrciaria dubia</i>	<i>Myrciaria</i>
Porte de planta	Arbusto	Árbol
Época de cosecha	Diciembre – marzo	Marzo – mayo
Peso del fruto	10 – 20 g	23 – 40 g
Color del fruto	Rojo intenso a morado	Morado amarrón
Cascara del fruto	Apergaminada	Semi leñosa
Color de la semilla	Amarillenta	Rosada
Tamaño de la semilla	Grande	Pequeña y pilosa
Forma de la semilla	Chata, reniforme	Ovalada, dura
Semillas por fruto	1 – 4	1 – 2
Fruto	Menor tamaño	Mayor tamaño
Contenido Acido ascórbico	Mayor	Menor

Fuente: (Villachica, 1996)

2.1.2 Morfología

El camu-camu es un arbusto que alcanza hasta los 4 m. de altura, con abundantes ramas que salen desde la base del tallo, ramificándose en forma de vaso abierto.

El fruto es globoso de superficie limpia y brillante, de color rojo oscuro hasta el negro púrpura al madurar, puede tener de 2-4 cm de diámetro, con 1-4 semillas por fruto. Las semillas son reniformes (forma de riñón) y aplanadas de 8-11 mm de longitud y 5.5 a 11 mm de ancho, cubiertas por una vellosidad blanca rala de menos de 1 mm de longitud.

En las poblaciones naturales que se encuentran en las áreas inundables a lo largo de los causes de agua, la floración natural se produce cuando los ríos han disminuido su caudal, dejando los tallos y hojas expuestos a la luz. Esto normalmente se presenta en los meses de septiembre y octubre, la fructificación se presenta entre diciembre y febrero, dependiendo de la localidad.

En plantaciones efectuadas con buen drenaje, lejos de la influencia de las inundaciones, la floración se da dos veces al año. El primero se da entre los meses de setiembre y octubre y el segundo entre los meses de marzo y abril, con la fructificación produciéndose tres a cuatro meses más tarde (Villachica, 1996).

2.1.3 Composición del fruto

La composición químico-nutricional de 100g de pulpa de camu-camu se presenta en la siguiente Tabla N° 2. El ácido ascórbico se encuentra presente en mayor cantidad. El contenido de proteínas y carbohidratos es también importante, mientras que los demás constituyentes se encuentran en cantidades similares a los que se observan en otras frutas tropicales (Villachica, 1996).

Tabla N° 02.Composición por cada 100 g de pulpa de camu-camu

Componente	Unidad	Valor
Agua	G	94.4
Valor energético	Cal	17.0
Proteína	G	0.5
Carbohidratos	G	4.7
Fibra	G	0.6
Cenizas	G	0.2
Calcio	Mg	27.0
Fosforo	Mg	17.0
Hierro	Mg	0.5
Tiamina	Mg	0.01
Rivoflavina	Mg	0.04
Niacina	Mg	0.062
Ac. Ascórbico reducido	Mg	2780
Ac. Ascórbico total	Mg	2994

Fuente: (Villachica, 1996)

(Chávez 1993), manifiesta que en la cascara del camu-camu se encuentra hasta 5g de acido ascórbico por 100 g de la misma. El peso de la pulpa representa el 69 % y la cascara representa el 79 % del peso del fruto (Pella, 2004).

Tabla N° 03: Composición proximal de la cascara y pulpa de la fruta fresca

Parámetro	VERDE		SEMI MADURO		MADURO	
	Cascara	Pulpa	Cascara	Pulpa	Cascara	Pulpa
Humedad, %	92.38	95.17	91.52	94.89	93.64	94.51
Cenizas, %	0.16	0.04	0.11	0.07	0.1	0.06
Proteínas, %	0.77	0.11	0.77	0.77	0.55	0.55
Carbohidratos, %	6.64	4.6	7.55	4.39	5.67	4.28
Grasas, %	0.05	0.08	0.05	0.08	0.04	0.06
Flavonoides, mg/100g	14.4	2.77	10.53	2.49	8.5	6.7
Antocianinas, mg/100g	1.04	0.1	1.3	0.86	2.6	1.3
Ácido ascórbico, mg/100g	472.58	1387.8	432.13	1307	287.2	1138

Fuente: (Norma Técnica Peruana 011.030. 2007).

2.2 PRINCIPIOS DE FLUIDINÁMICA.

2.2.1 Concepto de fluidización

El proceso de fluidización se refiere a una gran variedad de sistemas como gas-sólido, líquido-sólido. Entre ellos encontramos el proceso de intercambio de calor entre partículas y el fluido en el secado de granos; gasificación de carbón en lecho fluidizado rápido; reactores de catálisis, etc., en los cuales actúa la fuerza de gravedad y la fricción del fluido, (corriente gaseosa en forma ascendente). Básicamente, la fluidización es la levitación de una masa de partículas (lecho de sólidos), contenida en un recipiente (reactor), por la fricción de una corriente de gas (o líquido) a presión, asemejándose a un líquido en ebullición, que tiende a establecer un nivel y un flujo en respuesta a un gradiente de presión.

2.2.2 Lecho fluidizado

Si se hace circular en sentido ascendente una corriente fluida (gaseosa o líquida) a través de un lecho de partículas sólidas, se produce un rozamiento del fluido con las partículas. Esta fuerza de rozamiento, que tiende a desplazar las partículas hacia arriba, aumenta al hacerlo la velocidad de circulación del fluido, de esta forma que si la velocidad es suficientemente elevada el rozamiento llega a compensar el peso de las partículas, por lo que estas quedan suspendidas en el seno de la corriente fluida. Cuando esto sucede se dice que el lecho se encuentra fluidizado. Un lecho fluidizado se caracteriza por un elevado grado de mezcla, comportándose el lecho de partículas sólidas como si fuera un fluido, (Rodríguez, *et al* 2002).

Así por ejemplo, si se inclina un lecho fluidizado, su superficie superior se mantiene horizontal (figura 2a), si se unen dos lechos fluidizados mediante una conducción, ambos alcanzan la misma altura, es decir, se cumple el principio de los vasos comunicantes (figura 2b); si se realiza una perforación en la pared de un lecho fluidizado se produce un derrame de sólidos a través del orificio (figura 1c), (Rodríguez, *et al* 2002).

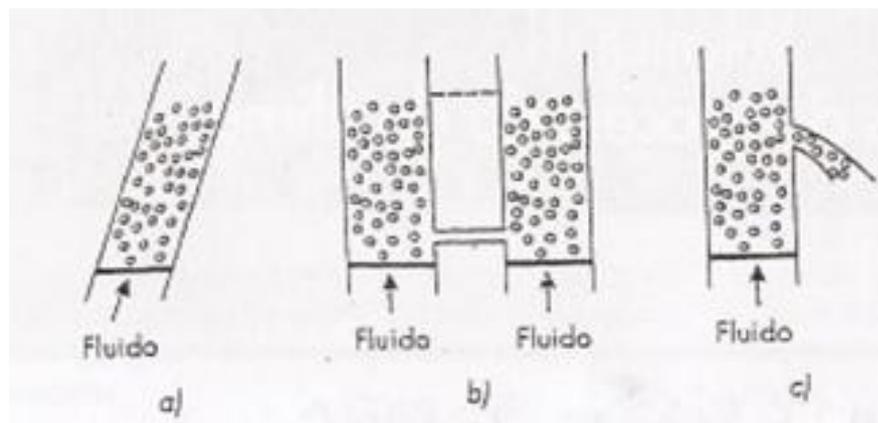


Figura N° 01: Comportamiento de los lechos fluidizados.

2.2.3 Característica de las partículas

2.2.3.1 Porosidad del lecho (ϵ)

La porosidad del lecho depende de la relación existente entre el diámetro de la partícula, el diámetro del lecho, la rugosidad de las paredes de la columna, la presión y la temperatura de operación.

Para medir el porcentaje de poros en el lecho, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{\text{volumen del lecho} - \text{volumen de las partículas}}{\text{volumen del lecho}} \quad (1)$$

2.2.3.2 Esfericidad (Φ)

Es el parámetro que se emplea para determinar la forma de las partículas, debemos considerar que todas las partículas no son esféricas teniendo por lo general de formas irregulares, es por esta razón que se establece una definición para obtener la esfericidad, el cual se basa en el área superficial de una esfera con el mismo volumen que el volumen de la partícula.

$$\Phi = \frac{\text{área superficial de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}} \quad (2)$$

El volumen de la partícula está dada por la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{\pi d_p^3}{4} \quad (3)$$

Donde :

V_p = volumen de la partícula (m^3)

$\Pi = ()$

d_p = diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen de la partícula

2.2.3.3 Densidad de la partícula (ρ_p)

La densidad de la partícula se puede determinar de la siguiente manera:

$$\rho_p = \frac{\text{masa de la partícula}}{\text{volumen de la partícula}}$$

Donde el volumen de la partícula incluye la porosidad de la partícula. Para las partículas compactas, $\rho_p = \rho_{\text{abs}}$ (densidad absoluta) y para las partículas porosas, $\rho_p < \rho_{\text{abs}}$

2.2.3.4 Diámetro de la partícula

Para obtener el diámetro, se medirán los diámetros correspondientes al grosor, ancho y largo, determinando de esta manera el diámetro promedio para cada partícula.

2.2.3.5 Área superficial (a)

Es el área en contacto entre el gas y el sólido. La siguiente ecuación muestra la obtención del área superficial cuando una partícula no es esférica:

$$a = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (4)$$

2.2.3.6 Clasificación de las partículas

Las partículas fueron clasificadas según (Geldart, 1973), en cuatro grupos por su diferencia de densidades y por su tamaño, que a continuación se describen.

Grupo A: El tamaño de la partícula es pequeño y una densidad baja ($\rho_p < 1.400 \text{ kg/m}^3$). El lecho se expande antes de que ocurra el burbujeo ($U_{\text{mb}} / U_{\text{mf}} > 1$).

Grupo B: El tamaño de las partículas y las densidades considerados como medianos. El burbujeo empieza a una naciente fluidización ($U_{mb} / U_{mf} = 1$). La mayoría de las burbujas ascienden más rápidamente que el gas intersticial. El tamaño de burbuja es independiente al tamaño de la partícula.

Grupo C: Las partículas son cohesivas, es decir difíciles de fluidizar.

Grupo D: Partículas largas y densas. Las partículas requieren de una velocidad de gas, mayores a las otras categorías para poder fluidizar el lecho.

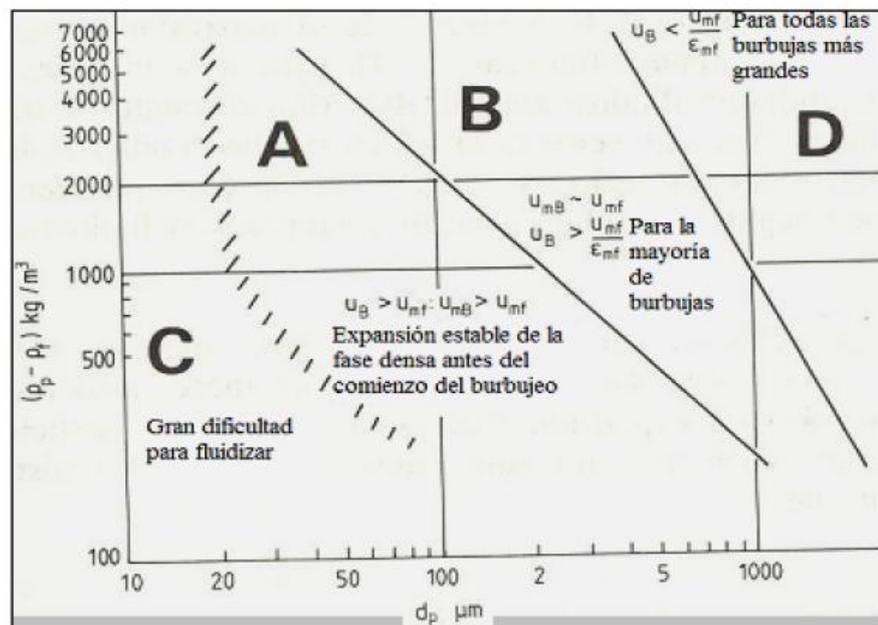


Figura N°02: Clasificación de las partículas de Geldart (Geldart, 1973)

2.3 VELOCIDADES RELACIONADAS EN UN LECHO FLUIDIZADO

En un lecho fluidizado se relacionan cuatro diferentes tipos de velocidades que se presentan en diferentes fases o tipos de lecho que son: velocidad superficial del gas (U_0), velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), velocidad terminal (U_t), y la velocidad mínima de burbujeo (U_{mb}).

2.3.1 Velocidad superficial del gas (U_0)

Se puede entender como la velocidad en función del área transversal del lecho, se determina cuando en el interior no existen partículas y solo fluye el gas (aire). Se obtiene con la siguiente formula:

$$U_0 = \frac{m}{\rho_g \varepsilon_m A_t} \quad (5)$$

Donde:

U_0 = Velocidad superficial del gas (m/s).

ε_m = Porosidad del lecho (-)

ρ_g = Densidad del gas (kg/m³)

m = masa (kg)

A_t = Área transversal de la columna (m²)

Al no conocer la fracción vacía, podemos aplicar la siguiente formula (Romero, 2006)

$$U_0 = \frac{V}{A_t}$$

(6)

U_0 = Velocidad superficial del gas (m/s)

V = Flujo volumétrico del gas (m³/s)

A_t = Área transversal (m²)

2.3.2 Velocidad mínima de fluidización

Se presenta como un aumento del caudal en el lecho. Se llega a un punto donde las partículas solidas se encuentran en estado de suspensión causado por el flujo ascendente del gas.

Dicho flujo crea la fuerza de arrastre que equilibra la fuerza de gravedad haciendo que se muevan y se puedan levantar. La U_{mf} corresponde a una situación homogénea donde no se toman en cuenta las burbujas.

Para encontrar la velocidad mínima de fluidización del gas, se utiliza una extrapolación de la ecuación de Ergun (Ergun, 1952) para lechos fijos (tabla N°1). Solo se trabajó con una sola variedad de camu-camu (Myrciaria dubia)

Combinada con la ecuación de caída de presión que se muestra a continuación. Ambas relacionan las variables que definen, y la combinación de estas cubre todos los factores que ayudan a encontrar toda la velocidad mínima de fluidización teórica.

Ecuación de la caída de presión.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{g}{g_c} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g)$$

(7)

Donde:

ΔP = caída de presión (kPa)

L = altura del lecho (m)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

g_c = constante adimensional

ε_{mf} = porosidad mínima de fluidización

ρ_s = densidad del solido (kg/ m³)

ρ_g = densidad del fluido (kg/ m³)

Combinación de las dos ecuaciones:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p \mu_{mf} \rho_g}{U} \right)^2 + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p \mu_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p \rho_g (p_s - p_g) g}{\mu^2}$$

(8)

Φ_s = esfericidad de la partícula ()

d_p = diámetro de la partícula (cm)

ε_{mf} = porosidad mínima de fluidización ()

μ = viscosidad del gas (kg/ ms)

U_{mf} = velocidad mínima de fluidización (m/s)

ρ_s = densidad del solido (kg/ m³)

ρ_g = densidad del fluido (kg/m³)

La velocidad mínima de fluidización experimental se determina mediante el análisis de las graficas vs la caída de presión, velocidad vs altura del lecho y velocidad vs porosidad del lecho. El análisis consiste en ver la tendencia de la curva, donde hay un cambio ahí es donde se ubica la velocidad mínima de fluidización. Para considerar que el U_{mf} es la correcta las curvas generadas deben de estar cercanas entre si.

2.3.3 Velocidad terminal (U_T)

Se le conoce así a la velocidad que esta lejos de las paredes de columna, la cual tiende a aumentar hasta que se hace estable. Así propuso una ecuación para cuando una partícula de diámetro d_s cae a través de un fluido:

$$U_t = \left[\frac{4d_s(\rho_s - \rho_g)g}{2\rho_g C_d} \right]^{1/2}$$

(9)

Donde :

d_s = Diámetro del solido (cm)

ρ_g = Densidad del fluido (kg/m³)

ρ_s = Densidad del solido (kg/m³)

g = Fuerza de gravedad (m/s²)

c_d = Coeficiente de arrastre del gas ()

Nota: el c_d se relaciona con el número de Reynolds ya que varía de acuerdo con el régimen de flujo.

Tabla N°04: Ecuaciones para un lecho gas-sólido.

Ecuaciones para lechos gas - sólido				
Rango experimental				
Autores	Gas	Diámetro de partícula (mm)	Ecuaciones	Comentarios
Ergun (1952)			$\frac{175}{D\varepsilon_{mf}^3} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\phi^2\varepsilon_{mf}^3} \text{Re}_{mf} = GoMv$	Ecuación para lechos fijos
Leva et al (1956)			$U_{mf} = \frac{7.39d^{1.82}(\rho_p - \rho_f)^{0.94}}{\rho_{mf}^{0.06}}$	$\text{Re}_{mf} < 5$
Goroshko et al.(1958)			$\text{Re}_{mf} = \frac{GaMv}{1400 + 5.2\sqrt{GaMs}}$	
Leva (1959)	Aire, He, CO ₂	0.05 – 0.097	$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} d^{2.82} (\rho_p - \rho_f)^{0.94} g}{\rho_{mf}^{0.06} \mu^{0.35}}$	Materiales sólidos como arena, carbón, catalizadores
Bena (1960)			$\text{Re}_{mf} = \frac{1.38 \times 10^{-3} GaMv}{(GaMv + 19)^{0.11}}$	$\text{Re}_{mf} < 39$ y $GaMv < 105$
Rowe y Henwood (1961)			$\text{Re}_{mf} = 8.1 \times 10^{-3} GaMv$	
Miller y Logwinuk (1961)	Aire, He, CO ₂ , C ₂ H ₆		$\mu_{mf} = \frac{0.00125d^2(\rho_p - \rho_f)^{0.9} \rho_f^{0.2} g}{\mu}$	Materiales sólidos como Al ₂ O ₃ , SiCSiO ₂ , gel silica
Frantza (1966)	He, N ₂ , Ar, C ₂ H ₂ y mezclas	0.046-0.305	$\text{Re}_{mf} = 1.065 \times 10^{-3} GaMv$	Para arena y catalizadores $\text{Re}_{mf} < 32$
Daviles y Richardson (1966)	Aire	0.055-0.042	$\text{Re}_{mf} = 7.8 \times 10^{-4} GaMv$	Materiales sólidos como pvc, diakon y catalizadores
Kunii y Levenspiel (1969)			$\text{Re}_{mf} = \frac{\phi^2 \varepsilon_{mf}^2}{150(1-\varepsilon_{mf})} GaMv$	Válido para $\text{Re}_{mf} < 20$
Pillal y Raja Rao (1971)	Aire	0.058-1.1	$\mu_{mf} = \frac{7.01 \times 10^{-4} d^2 (\rho_p - \rho_f) g}{\mu}$	Válido para acero, aluminio, arena y pliestireno

				$Re_{mf} < 20$
Baeyens y Geldart (1973)	Aire	0.05-4	$GaMv = 1823Re_{mf}^{10} + 21.27Re_{mf}^2$	$850 < \rho_p < 8810 \frac{kg}{m^3}$
Broadhurst y Becker (1975)	Aire, Freon 12	0.07-1	$Re_{mf} = \left[\frac{GaMv}{2.42 \times 10^5 (GaMv)^{-0.35} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0.13} + 37.7} \right]^{0.3}$	$1000 < \rho_p < 8000 \frac{kg}{m^3}$
Saxena y Vogel (1977)	Aire	0.088-1.41	$Re_{mf} = [25.28^2 + 0.0571GaMv]^{0.5} - 25.28$	$6 < Re_{mf} < 102 \rho_p = 3190 \frac{kg}{m^3}$
Babu et al. (1978)		0.05-2.87	$Re_{mf} = [25.25^2 + 0.0651GaMv]^{0.5} - 25.25$	$256 < \rho_p < 3920$
Richardson y Jeronimo (1979)			$Re_{mf} = [25.7^2 + 0.0365GaMv]^{0.5} - 25.7$	
Doichev y Kahmakov (1979)	Aire	0.09-2.2	$Re_{mf} = 1.08 \times 10^{-3} (GaMv)^{0.947}$	$\rho_p = 2650 \frac{kg}{m^3}$
Thonglimp (1981)	Aire	0.11-2.12	Primera forma: $Re_{mf} = 7.54 \times 10^{-4} (GaMv)^{0.98}$ para $Re_{mf} < 30$ $Re_{mf} = 1.95 \times 10^{-2} (GaMv)^{0.66}$ para $30 < Re_{mf} < 180$ Segunda forma $Re_{mf} = [31.6^2 + 0.0425 GaMv]^{0.5} - 31.6$	

2.4 CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO

En el secado de un material se remueve humedad libre de la superficie y también agua retenida en el interior.

Si se determina el cambio en el contenido de humedad del material con respecto al tiempo, se obtiene una curva de la cual se puede conocer la velocidad de secado a cualquier contenido de humedad. La forma de la curva varia con la estructura y tipo de material (Brennan et al, 1980).

En la figura N° 3, se muestran los diferentes tipos de curvas que se obtienen en el proceso de secado (Daudin, 1983), en las cuales se pueden diferenciar tres fases (Treyball, 1980)

Fase A - B: En esta fase o periodo de estabilización, las condiciones de la superficie del sólido se equilibran con las de la superficie de secado.

Fase B - C: Esta fase de deshidratación, se conoce como periodo de velocidad constante y durante el mismo, la superficie del sólido se mantiene saturada de agua líquida debido a que el movimiento del agua desde el interior del sólido a la superficie ocurre a la misma velocidad que la de evaporación en la superficie.

La deshidratación tiene lugar por el movimiento del vapor de agua desde la superficie saturada, a través de una delgada capa de aire hasta la corriente principal del aire de secado.

Fase C- D: Al avanzar el secado, se alcanza un punto en el que la velocidad del movimiento de la humedad desde el interior del producto hasta la superficie, se reduce en grado tal, que la superficie comienza a secarse. En C, la velocidad global de secado comienza a descender, iniciándose el periodo decreciente. El contenido de humedad del producto en el punto C se denomina contenido crítico de humedad X_c . A partir de este punto, la temperatura de la superficie comienza a elevarse, aumento que persiste durante la deshidratación, hasta aproximadamente la temperatura de bulbo seco del aire.

En el periodo de velocidad decreciente, la velocidad de deshidratación está influenciada principalmente por el movimiento de la humedad dentro del sólido, reduciéndose los efectos de los factores externos, en especial de la velocidad de aire. Normalmente, el periodo decreciente constituye la mayor proporción del tiempo total de secado.

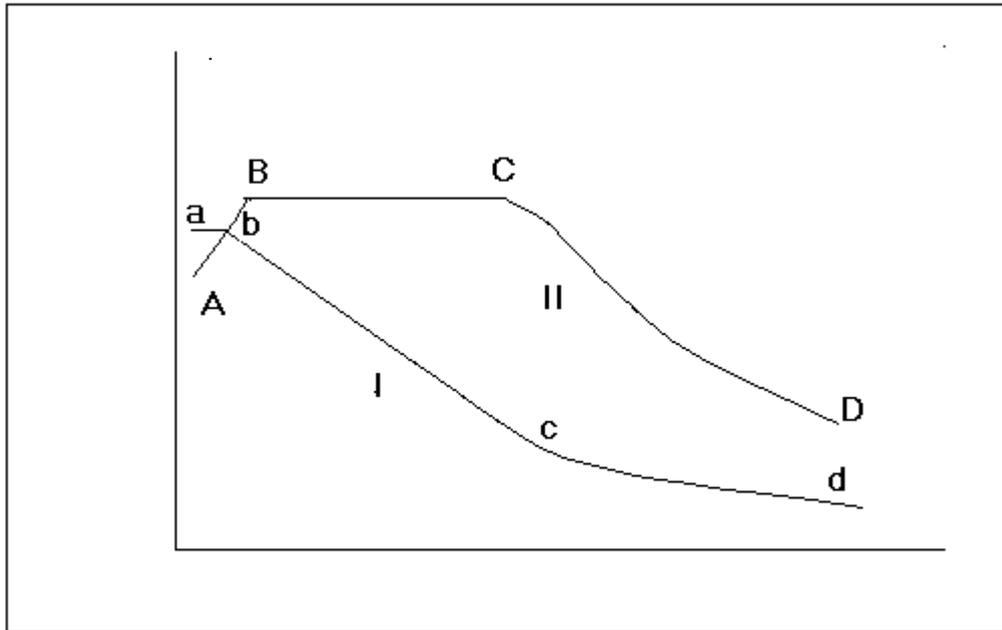


Figura N° 03: Curvas que se presentan durante el secado.

- I) Evolución del contenido de humedad.
- II) Cinética de secado.

2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR EN LECHO FLUIDIZADO

2.5.1 Transferencia de calor entre el gas y las partículas

Existe alta transferencia de calor debido a la gran superficie de contacto entre las partículas sólidas y el medio que le rodea, al igual que por el grado de mezcla entre las partículas. La transferencia de calor será principalmente por convección. Sin embargo, existen resultados experimentales desarrollados por Kunii y Levenspiel citados por Geldart[15], donde se relaciona el número de Nusselt del gas a la partícula (Nu_{gp}) con el número de Reynolds de la partícula (Re_p) y en cuya relación se obtienen números de Nusselt muy bajos.

$$Nu_{gp}=0.03Re_p^1 \quad (10)$$

Este bajo número de Nusselt puede ser atribuido al hecho de que no toda

el área de las superficies de las partículas está expuesto a la transferencia de calor con el gas. Zabrodsky citado por Geldart, propuso un modelo donde incluye “microrpturas”, donde expone que el gas no necesariamente fluye uniformemente a través de la fase continua del lecho.

Littman y Silva citados por Geldart mostraron que, particularmente en lechos estáticos existe fuerte dependencia en el número de Reynolds porque las regiones cercanas a los puntos de contacto entre las partículas no son completamente accesibles al flujo del fluido.

Otros estudios (Botterill, citado por Geldart) muestran que los coeficientes más altos son obtenidos cuando los sistemas operan a altas presiones.

Para lechos de partículas con alta actividad de mezcla, si las partículas sólidas tienen un bajo número de Biot (Resistencias térmicas internas despreciables) y la temperatura de operación es estacionaria, un simple balance de calor relaciona el cambio de temperatura del gas fluidizante con la penetración en el lecho. De esta forma se obtiene la siguiente ecuación (11):

$$C_g U \rho_g \Delta T_g = h_{gp} S_B (T_g - T_p) dl \quad (11)$$

Donde

C_g = capacidad de calor del gas [J/Kg K]

dl = diferencial del fondo del lecho [m]

S_B = la superficie del área de los sólidos por unidad de volumen del lecho

ΔT_g = el cambio de temperatura del gas que fluye a través del elemento del lecho

T_g = la temperatura del gas

T_s = la temperatura del sólido

De la ecuación (11) es posible obtener el coeficiente de transferencia de calor entre el gas y la partícula con la siguiente expresión:

$$h_{gp} = \frac{NU_{gp} K_f}{d_p} \therefore h_{gp} = \frac{0.03d_p^{0.3} \rho_g^{1.3} U^{1.3} K_g}{U^{1.3}} \left[\frac{W}{mK} \right]$$

(12)

Ahora con la ecuación (12) es posible obtener una expresión para calcular la distancia l_n en la cual el gas es enfriado por un factor n definido como:

$$\eta = \frac{T_{gm} - T_p}{T_g - T_p}$$

(13)

Y la distancia está dada por:

$$\eta = \frac{5.5 \ln n U^{1.3} d_p^{0.7} C_g}{\rho_g^{0.3} U^{0.3} K_g (1 - \varepsilon)}$$

(14)

Las fórmulas de transferencia de calor previamente mencionadas pueden ser utilizadas cuando el número de Biot es menor que 1/10. Esto significaría que no existen gradientes de temperatura dentro de las partículas sólidas. Este comportamiento sería esperado ya que las partículas sólidas usadas en experimentos de fluidización son pequeñas.

Una vez obtenido el coeficiente de transferencia de calor entre la partícula sólida y el gas, es posible calcular la tasa de transferencia de calor entre el gas y las partículas sólidas. Para esto es necesario obtener el promedio logarítmico de diferencia de temperatura (LMTD) que se define con la siguiente expresión:

$$Q = h_{gp} A_p (LMTD) \quad (15)$$

Donde θ_1 y θ_2 se refieren a la diferencia de temperaturas entre el aire a la entrada y a una distancia determinada respectivamente.

La tasa de transferencia de calor entre el gas y las partículas sólidas

puede calcularse con la siguiente expresión:

$$Q = h_{gp} A_p (LMTD) \quad (16)$$

Donde A_p es el área de la superficie de las partículas. Otra forma de calcular la tasa de transferencia de calor entre el gas y las partículas sólidas es la siguiente:

$$Q = m C_p (\Delta T) \quad (17)$$

Donde m representa el flujo másico alrededor de las partículas sólidas y C_p es el calor específico del aire a presión constante y ΔT es la diferencia de temperatura entre el gas y las partículas sólidas.

2.6 BALANCE DE MATERIA EN EL LECHO FLUIDIZADO

Considerando un lecho de área de sección transversal uniforme $A \text{ m}^2$, por el cual penetra un flujo de gas $G \text{ kg gas seco / hr m}^2$ sección transversal, con humedad de Y_1 , con un balance de material del gas, en cualquier momento, dicho gas sale del lecho con humedad Y_2 . La cantidad de agua que se elimina del lecho con el gas es igual a la velocidad de secado en ese tiempo.

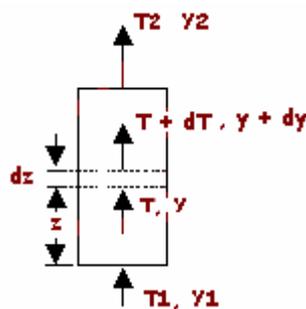


Figura N° 04. Control de volumen en la que se realiza el balance

Realizando el balance de materia:

$$\frac{1}{A} \frac{dm_w}{dt} = G_2 Y_2 - G_1 Y_1 \quad (18)$$

Donde:

$$m_w = m_{ss} X$$

$$(19)$$

Sustituyendo ecuación (18) en la ecuación (19) y tomando en cuenta que la masa del sólido seco y el flujo de aire seco es constante para todo el proceso.

$$\frac{m_{ss}}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right) = G(G_2 - Y_1) \quad (20)$$

Por lo tanto se tiene con la ecuación (20),

$$N = G(Y_2 - Y_1) \quad (21)$$

Donde N = kg w / hr. m² de sección transversal y G = kg de aire seco / hr m² de sección transversal.

2.7 BALANCE DE ENERGÍA EN LECHO FLUIDIZADO

El balance de energía para el secador de lecho fluidizado es el siguiente:

$$G (C_{p_{az}} + Y_1' C_{p_{w(v)}}) (T_1 - T_2) = \frac{m_{ss}}{A} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \lambda + m_{ss} (C_{p_{ss}} + X C_{p_{w(v)}}) \frac{dT}{dt} + Q$$

(22)

Para quedar finalmente

$$G (C_{p_{az}} + Y_1' C_{p_{w(v)}}) (T_1 - T_2) = G(Y_2 - Y_1) \lambda + m_{ss} (C_{p_{ss}} + X C_{p_{w(v)}}) \frac{dT}{dt} + Q$$

(23)

El lado izquierdo de la ecuación 23, es el cambio de entalpía del gas, y el lado derecho, el primer término se refiere al calor necesario para evaporar el agua contenida en el sólido, el segundo término al calentamiento del mismo sólido y Q es el calor que se disipa a los alrededores.

2.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A las cinéticas de la pérdida de humedad y pérdida de peso obtenidas se les aplicara un análisis de varianza (ANVA) al 5 % de significancia analizando el tiempo, la temperatura como efectos entre las variables de operación.

A los valores finales promedio de pérdida de humedad y peso también se les aplicara un análisis de varianza (ANVA) al 5 % de significancia.

En este análisis se considera Y1 al rendimiento de en perdida de humedad y Y2 al rendimiento referido al contenido de ácido ascórbico (vitamina C).

Se empleara un diseño factorial de 2^3 es decir de dos niveles con tres factores según el modelo:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_1^2 + B_5X_1 X_2 \quad (28)$$

Tabla N° 05: Variables independientes naturales y codificadas considerados en el diseño experimental

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-1)	nivel (+1)
X1: Temperatura (°C)	40	60
X2 : Velocidad aire (m/s)	2.9	3.3
X3: Peso de la muestra (g)	1.0	2.0

Fuente: Elaboración propia del autor

Donde:

Y: Rendimiento del secado estimado (%)

B_0 : Terminio independiente

B_1, B_2 : Coeficientes de regresión lineal.

X_1, X_2 : Temperatura (°C) y velocidad de aire (m/s).

$B_5X_1 X_2$: Coeficientes de interacción.

Los resultados que se obtendrán con el experimento permitirán determinar los coeficientes de regresión de los cuales sólo quedarán en el modelo los parámetros que son altamente significativos. Asimismo, el modelo deberá validarse estadísticamente con el coeficiente de determinación, R^2 (>85%) y el valor P ($P < 0,05$) ó ($F_{cal} > F_{tabla}$).

III. MATERIALES Y METODOS

El desarrollo del presente proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis Físico -Químico de alimentos y en las instalaciones de la Planta de deshidratadora, ambos ambientes están ubicados en la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana;

3.1 MATERIALES

3.1.1 Materia prima

- Camu-camu (*Murcyaria Dubia H.B.K*),
- Se utilizó materia prima proveniente de los pueblos y caseríos cercanos a la ciudad de Iquitos, teniendo en cuenta que este fresco y en buenas condiciones para su proceso.

3.1.2 Materiales de laboratorio

- Vasos de Precipitado
- Balón de 250 ml
- Papel filtro
- Probetas graduadas
- Crisoles
- Pinzas para crisoles
- Agua tratada.

Otros equipos:

*** Mufla eléctrica.**

Marca “TERRÍGENO”, modelo BARNSTEAD / TERMOLINE, tensión 220 - 240, temperatura máxima 1125°C.

*** Estufa.**

Marca “SELECTA”, modelo 209, tensión 220, temperatura máxima 220°C.

* **Balanza analítica.**

Marca “SARTORIUS”, corriente 220, capacidad máxima 160g.

* **Extractor de proteína.**

Marca “BUCHI 425”, compuesto por un digestor y un destilador de 04 fundas, temperatura máxima 120°C.

* **Equipo soxhlet.**

Marca “BUCHI”, extractor de grasa de 04 fundas, temperatura máxima de funcionamiento 120°C.

* **Anemómetro.**

Marca “ALNOR” registra de 0 - 10000 pies/min, a una temperatura máxima de 250°F, entrada máxima de presión 5 psi.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

3.2.1 Horno secador de lecho fluidizado

El secado de la materia prima se realizó en un horno secador de lecho fluidizado, Horno secador de lecho fluidizado, por convección forzada, Marca “JARCON”, año 2009, modelo SLFT-240X, motor ventilador de 5 Hp, motor extractor de 1.5 Hp, ambos motores funcionan a 3450 rpm diseñado especialmente para secar diferentes tipos de productos tales como tubérculos, especies, frutas, etc.

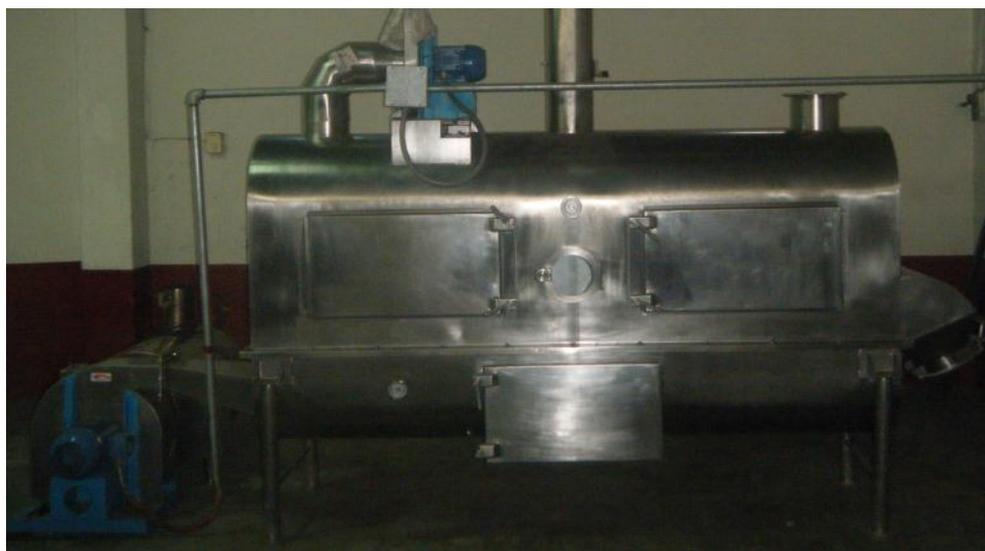


Figura N° 05: Vista frontal del equipo secador de lecho fluidizado

El principio para que se lleve a cabo la fluidización en el equipo se basa en lo siguiente: la corriente de aire caliente para el proceso se suministra al lecho a través de una plancha perforada que fluye a través de ésta en forma de columna manteniendo en suspensión contra las fuerzas de gravedad. El calor es suministrado por un intercambiador de calor, que calienta el aire generado por un ventilador con motor de alta velocidad. Este equipo también posee un extractor de humedad para eliminar la humedad y otros polvillos generados al secarse las partículas en la cámara de secado. Todo el polvillo es recepcionado en un ciclón.

A continuación describiremos las diversas partes de la que esta compuesto el equipo de lecho fluidizado.

3.2.1.1 Cámara de combustión

La figura N° 06 muestra la cámara de combustión, diseñado para funcionar con gas propano como fuente de calor, el aire caliente generado es ingresado al equipo por un motor ventilador de alta velocidad.

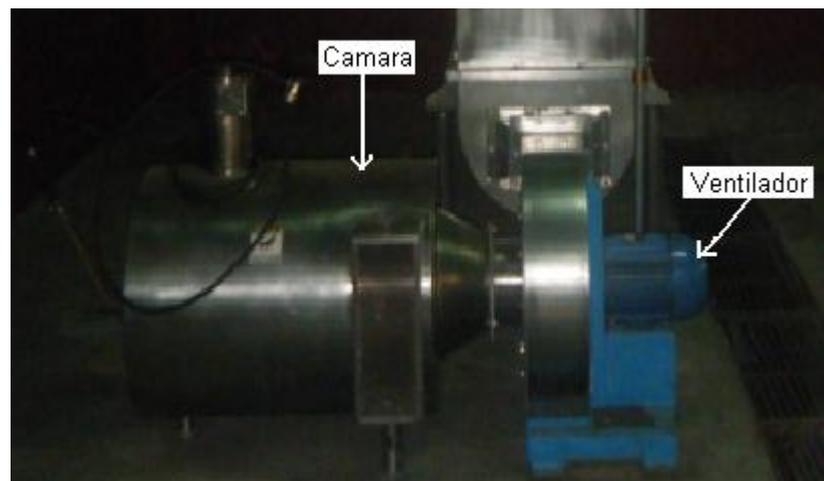


Figura N° 06: Vista lateral de la cámara de combustión

3.2.1.2 Cámara de acumulación de aire caliente

La cámara de acumulación de aire caliente que está ubicada en la parte inferior del equipo, luego ingresara a la zona de secado del alimento dispersa en forma pareja por una rejilla que se encuentra en el interior.

Cuenta con un termómetro incorporado para ver la temperatura de ingreso del aire.

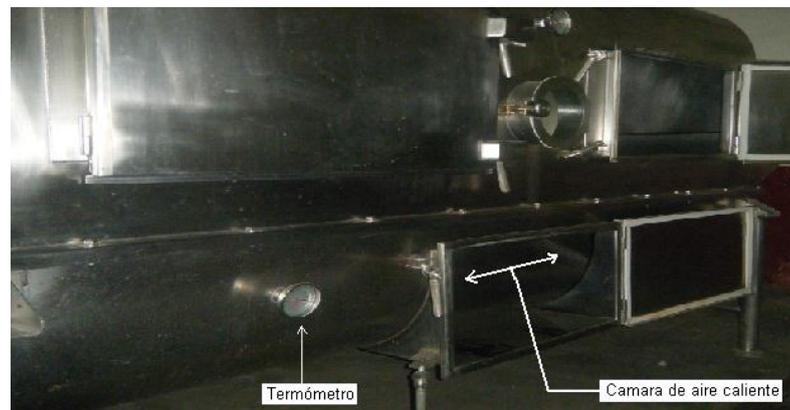


Figura N° 07: Cámara de acumulación de aire caliente

3.2.1.3 Cámara de secado

Está en la parte superior de la cámara de aire caliente. Cuenta con una chimenea para la recolección de polvos finos, dos puertas para el ingreso de la materia prima a secar (como se muestra en la figura N° 08), un termómetro y un visor para observar el proceso de secado, la base de esta cámara es una placa perforada por donde ingresa el aire caliente para secar la materia prima puesta sobre su superficie.

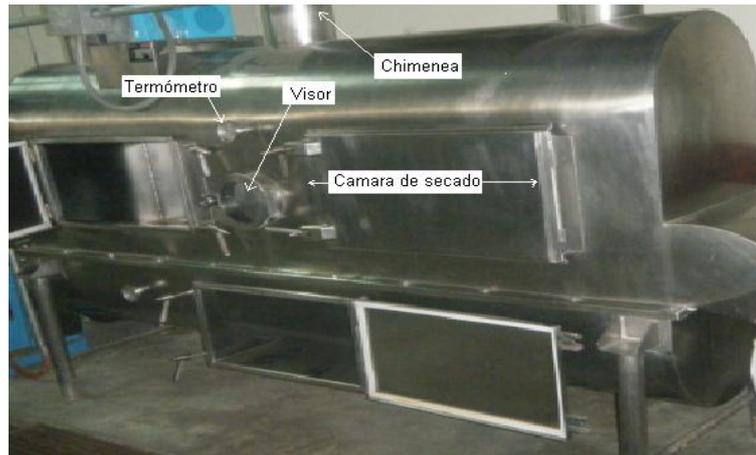


Figura N° 08: Cámara de secado

3.2.1.4 Salida de la materia seca

Finalizado el proceso de secado el producto seco es retirado del equipo por la parte lateral derecha del mismo (ver figura N° 09), empujando el producto desde el interior usando unas palas de acero inoxidable.



Figura N° 09: Salida de la materia seca.

3.2.1.5 Distribuidor de flujo

La plancha distribuidora de aire tiene un espesor de 1.5 mm, tiene un área de 50 cm X 240 cm con perforaciones de 1mm de diámetro, la distribución de las perforaciones es en forma de triángulo equilátero cuya lado mide 6 mm, como se puede apreciar en la figura N° 10.

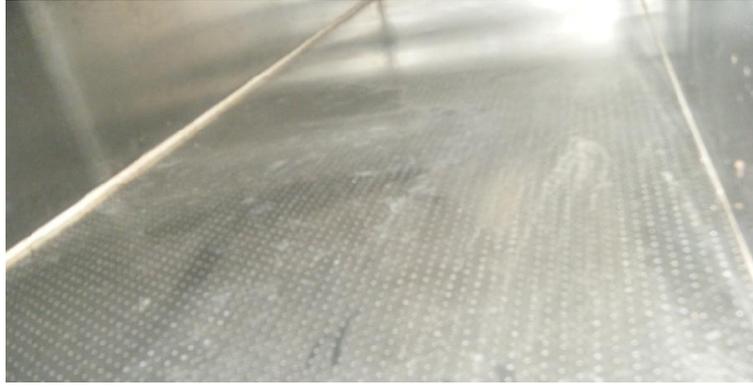


Figura N° 10: Distribuidor de flujo de aire caliente.

3.2.1.6 Extractor de humedad

La figura N ° 11. Se muestra el motor ubicado en la parte superior del equipo, acoplado a la cámara de secado. El motor es de 1.5 Hp con conexión trifásica 220 V, de alta velocidad.

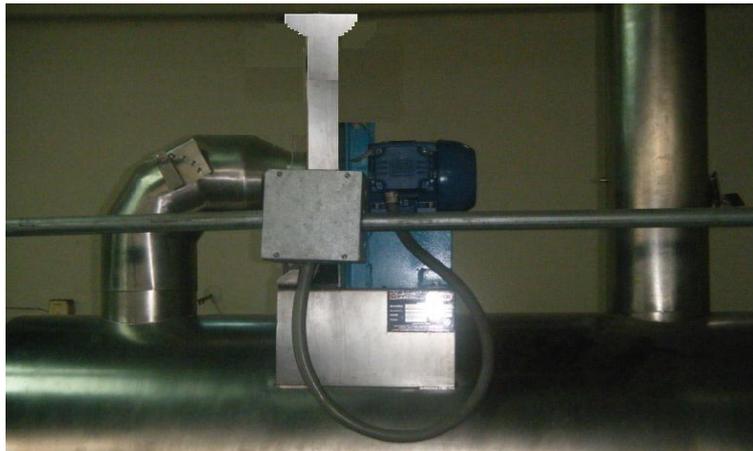


Figura N° 11: Motor extractor de humedad

3.2.1.7 Medidor de presión diferencial

Está ubicado en la parte central del equipo secador. Necesario para medir la caída de presión del lecho en funcionamiento ubicadas a 10 cm y 20 cm por encima de la plancha de perforada (ver figura N° 12), ésta es una mejora del equipo realizada por Carranza (2013).



Figura N° 12: Boquillas para conectar el manómetro tipo “U” instalado en el equipo.

3.2.1.8 Variador de velocidad

Es un equipo Modelo VFD – E DELTA, de 7 Hp, que se adapta al motor ventilador de alta velocidad (ver figura N ° 13), su función consiste en disminuir o aumentar la velocidad de giro de las aletas impulsoras del aire, es decir aumenta o disminuye los rpm logrando así aumentar o disminuir la velocidad del aire que ingresa a la cámara de secado. Este equipo es muy importante porque cada materia presenta sus propias características físicas necesitando por ello mayor o menor velocidad de aire para su proceso de secado. La incorporación de este variador de velocidad también es una mejora del equipo realizada por Carranza (Carranza, 2013).



Figura N° 13: Variador de velocidad

3.2.2 Equipos de medición

* **Anemómetro.**

Marca “ALNOR” registra de 0 - 10000 pies/min, a una temperatura máxima de 250°F, entrada máxima de presión 5 psi.

* **Termohigrómetro.**

Marca “NEUTRONIC” temperatura máxima de funcionamiento 90°C, funcionamiento a baterías.

3.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.3.1 De la materia prima

Se realizaron análisis físico-químicos del camu-camu que fueron secadas a distintas velocidades de aire con sus respectivas temperaturas. Determinándose las siguientes características:

a) Humedad

La determinación fue hecha por el método de la A.O.A.C. Se basa en el contenido de agua de la muestra, que consiste en colocar la muestra en la Estufa a 110 °C hasta peso constante (aproximadamente 4 h).

Los resultados se expresan en porcentaje, y se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{(P1 - P2)}{m} \times 100 \quad (24)$$

P1 = placa + muestra fresca

P2 = placa + muestra seca

m = peso de la muestra

b) Cenizas

La determinación fue hecha por el método de la A.O.A.C. Se basa en la incineración de la muestra en un horno Mufla a una temperatura de 600 °C hasta obtener un peso constante (aproximadamente 6 h).

Los resultados se expresan en porcentaje, y se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$\%C = \frac{W2 - W1}{P_m} \times 100 \quad (25)$$

W2 = peso crisol + ceniza

W1 = peso crisol vacío

P_m = peso de la muestra

c) Proteínas

Se utilizó el método Micro – Kjeldal, que consiste en calentar la muestra con ácido sulfúrico concentrado a elevada temperatura en presencia de un catalizador. Valorando con retroceso con base patrón se obtiene la cantidad de amonio y de esta el contenido de la muestra.

Los resultados se expresan en porcentaje de Nitrógeno, a este resultado lo multiplicamos por un factor de 5.7; así obtenemos un resultado que se expresa en porcentaje de proteínas.

$$\%N = \frac{(V_{H_2SO_4} \times N) - (V_{NaOH} \times N) \times 0.14 \times 100}{M}$$

$$\%P = \%N \times 0.57 \quad (26)$$

d) Carbohidratos

Se determina por la diferencia del 100 % con los valores de humedad, cenizas, proteína, grasa. El resultado es expresado en porcentaje.

e) Calorías

Se determina sumando los valores de los componentes de grasa, proteínas y carbohidratos, primero multiplicamos a cada componente por sus respectivos factores. Los resultados son expresados en Kcal.

$$\% PC = G (9) + P (4) + CHO (4) \quad (27)$$

3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.4.1 Descripción del proceso

Actualmente el único uso que se le da al fruto del camu-camu es extrayendo su pulpa para elaborar néctares y bebidas.

Las etapas se muestran en la figura N° 1, los que se detallan a continuación: cosecha, transporte, recepción en planta, selección y lavado, pulpeado y refinado, estabilizado de la pulpa, envasado y almacenado.

Describiremos a continuación las etapas para el secado del camu-camu, pero solo hasta la parte del pulpeado, puesto que es allí donde se obtiene la cascara que es materia de investigación.

❖ Cosecha de la fruta

La fruta es cosechada en estado semi-maduro por que siendo ésta una fruta climatérica seguirá su proceso de maduración hasta después de cosechado. Los frutos serán cosechados cuando presenten un color verde con pintas rojizas.

❖ Transporte

Los frutos serán colocados en cajas plásticas perforadas que pueden cargar hasta 17 kg sin sufrir daño alguno durante el transporte, considerando que el transporte se realiza en lancha desde los sitios de producción y demorara en llegar a la planta de proceso un tiempo no mayor de dos días.

❖ Recepción /lavado

Los frutos son recepcionados y pesados, luego son puestos en unas bandejas conteniendo agua para ser lavadas y eliminar las partículas de tierra y hojas que hayan venido con ellas en el transporte.

❖ **Desinfección**

Las frutas sin residuos extraños son remojadas en una solución que contiene bisulfito de sodio al 0.5 % para desinfectarlas de los microorganismos adquiridos durante la cosecha y el transporte.

❖ **Lavado**

Se realiza con agua tratada y el objetivo es eliminar los residuos del desinfectante de la etapa anterior.

❖ **Selección / clasificación**

La fruta es pasada por una faja transportadora donde se eliminan las malogradas y las que no reúnen las características deseadas.

❖ **Pulpeado**

La fruta seleccionada es pasada a través de la maquina pulpeadora para extraerle la pulpa, de acuerdo al número de malla de la pulpeadora se obtendrá un producto más fino o más espeso, según sea el requerimiento.

Las cascaras recolectadas después de esta etapa son las que utilizaremos en la presente investigación.

❖ **Pre secado**

Se realiza en el horno secador de bandejas, esta operación es necesaria porque las cascaras salen de al pulpeadora con bastante agua libre lo que impide su fluidización. En esta etapa se reduce el contenido de humedad hasta un 45 %, haciendo posible la fluidización.

❖ **Cascara seca.**

Es el producto final obtenido después de todo el proceso de secado la cual tiene un contenido de humedad del 7 -10 %. Con esta característica se lo puede convertir en harina o formar parte de otro producto como fuente aportadora de vitamina C.

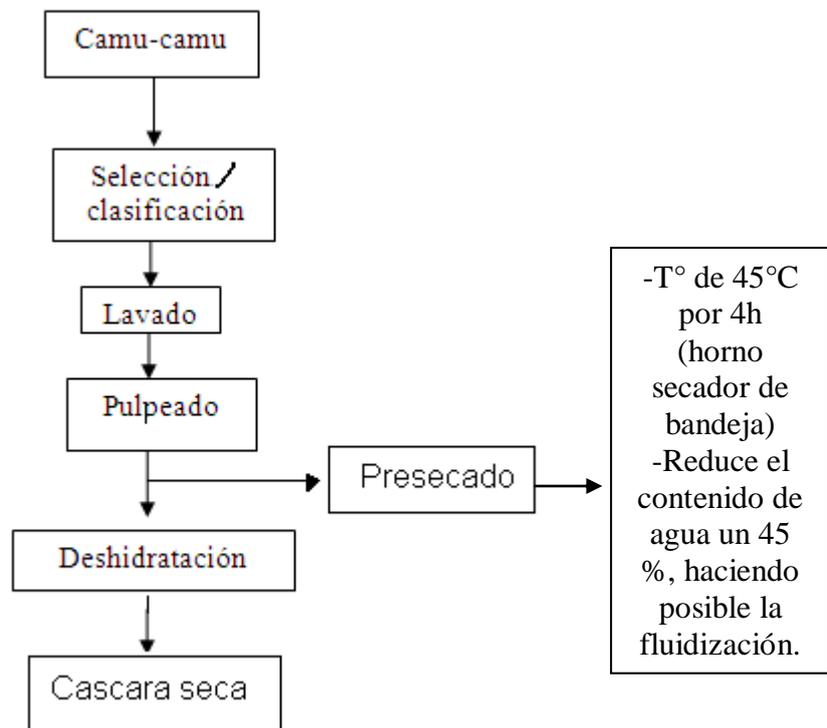


Figura N° 14: Diagrama de flujo seguido para la obtención de la cascara de camu-camu para su secado.

Fuente: Elaboración propia del Autor.

3.4.2 Caracterización fluidinámica de la cascara de camu-camu

En el presente trabajo se realizaron pruebas de fluidización empleando la cascara de camu-camu. Estas cascara presentan tres tamaños diferentes como resultado de ser tamizadas con mallas de 13 mm, 19 mm y 24 mm. Las cascara obtenidas de cada malla se deshidrataron a 40 °C, 50 °C y 60 °C, realizándose un total de 18 experimentos.

Para estudiar el comportamiento fluidinámico de la cascara de camu-camu es necesario conocer sus propiedades físicas tales como su densidad (ρ), esfericidad (Φ) y diámetro promedio de partícula (d_p).

3.4.2.1 Densidad de las partículas (P_p)

Se seguirá la metodología empleada por Flores (2006), que consiste en poner la muestra previamente pesada dentro una probeta graduada de vidrio conteniendo 50 ml de agua, así de esta manera se obtuvo el promedio de la relación de la masa de las partículas con respecto al volumen que desplazan.

En nuestro caso se peso 10 gr de cada malla cernidora.

Tabla N° 06: Densidad de la cascara

Muestra	M (gr)	V (ml)	ρ (gr/ml)	ρ (kg/m ³)
1	10	10	1.0	1000

Fuente: Elaboración propia del Autor

3.4.2.2 ESFERICIDAD DE LAS PARTÍCULAS (Φ)

El método empleado es el de (Martines, 2008) para materias casi esféricas y que se representa con la siguiente fórmula:

$$\phi = \left(\frac{bc}{a^2} \right)^{1/3}$$

(28)

Para obtener la esfericidad de la cascara se tomaron 10 muestras al azar de cada tamiz y se les midió los tres diámetros (a, b y c) perpendiculares entre sí, donde “a” es el largo, “b” es el ancho y “c” es el espesor. Para tener una medición exacta se empleo un micrómetro de precisión de 0.01 micras de pulgada.

Las tablas siguientes muestran los valores de los diámetros correspondientes para cada una de las 10 muestras en su tamiz correspondiente.

Tabla N° 07: Características físicas obtenidas de la malla de 13 mm

Muestra	a (mm)	b (mm)	c (mm)
1	1.500	1.300	1.100
2	2.000	1.000	1.100
3	1.800	1.300	1.000
4	2.100	1.100	1.200
5	1.400	0.900	1.100
6	2.400	1.300	1.000
7	2.000	1.200	1.100
8	1.000	1.100	1.000
9	2.500	1.100	1.200
10	1.700	1.000	1.100
PROMEDIO	1.840	1.130	1.090
ESFERICIDAD PROMEDIO Φ		0.714	

Fuente: Elaboración propia del Autor

Tabla N° 08: Características físicas obtenidas de la malla de 19 mm

Muestra	a (mm)	b (mm)	c (mm)
1	2.500	1.900	1.000
2	3.000	1.500	0.900
3	3.100	1.400	1.100
4	2.900	1.800	1.000
5	3.500	1.900	0.950
6	2.900	1.800	1.200
7	3.000	1.900	1.100
8	2.800	1.800	0.900
9	2.700	1.900	1.000
10	3.000	1.700	0.900
PROMEDIO	2.940	1.760	1.005
ESFERICIDAD PROMEDIO Φ		0.589600299	

Fuente: Elaboración propia del Autor

Tabla N° 09: Características físicas obtenidas de la malla de 24 mm.

Muestra	a (cm)	b (cm)	c (cm)
1	5.600	1.900	1.100
2	6.100	2.400	1.300
3	6.300	2.300	1.200
4	5.600	2.300	1.200
5	5.800	2.000	1.000
6	6.800	1.900	1.100
7	5.900	2.400	1.200
8	6.300	2.000	1.090
9	5.500	2.500	0.970
10	4.800	2.100	1.000
PROMEDIO	5.870	2.180	1.116
ESFERICIDAD PROMEDIO Φ		0.413680656	

Fuente: Elaboración propia del Autor

3.4.2.3 DIÁMETRO PROMEDIO DE PARTÍCULA (D_p)

Para obtener los diámetros, se trabajó con los promedios de los valores de a, b y c de los tres tamices, determinando de esta manera el diámetro promedio para cada tamiz en particular.

Las tablas siguientes muestran los diámetros promedios encontrados.

Tabla N° 10: Obtención del diámetro promedio de la malla de 13 mm

	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Promedios	1.840	1.130	1.090
D_p	1.353		

Fuente: Elaboración propia del Autor

Tabla N° 11: Obtención del diámetro promedio de la malla de 19 mm.

	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Promedios	2.940	1.760	1.005
Dp	1.901		

Fuente: Elaboración propia del Autor

Tabla N° 12: Obtención del diámetro promedio de la malla de 24 mm

	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Promedios	5.870	2.180	1.116
Dp	3.055		

Fuente: Elaboración propia del Autor

3.4.3 Cálculo de parámetros fluidinámicos de la cascara de camu-camu.

Aquí se realizaron cálculos fluidinámicos importantes como la porosidad del lecho, porosidad mínima de fluidización y la velocidad mínima de fluidización pero para lograrlo fue necesario el cálculo previo de propiedades relacionadas con estas.

Los cálculos se realizaron para las tres mallas es decir, para 13 mm, 19 mm y 24 mm.

3.4.3.1 Cálculos fluidinámicos para una malla de 13 mm con una temperatura de 50 °C.

3.4.3.1.1 Cálculo de la densidad de la partícula (ρ_p)

Para el cálculo de la densidad de la partícula se tomo como muestra lo obtenido de la malla de 13 mm.

Muestra	M (gr)	V (ml)	ρ (gr/ml)	ρ (kg/m ³)
1	10	10	1.0	1000

$$\rho_p = \frac{\text{masa partícula (gr)}}{\text{volumen desplazado (ml)}}$$

$$\rho_p = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

3.4.3.1.2 Calculo de la esfericidad de la partícula (Φ_p)

Calculo de la Esfericidad de las partículas (Φ_p) empleando las partículas de la malla de 13 mm.

	A	B	C
PROMEDIOS	1.840	1.130	1.090
Esfericidad promedio Φ	0.714		

$$\phi = \left(\frac{bc}{a^2} \right)^{1/3} \quad \phi = \left(\frac{(1.130)(1.090)}{(1.840)^2} \right)^{1/3}$$

$$\phi = 0.714$$

3.4.3.1.3 Calculo del diámetro de la partícula (D_p)

	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Promedios	1.840	1.130	1.090
D_p	1.901		

$$d_p = \frac{1.840 + 1.130 + 1.090}{3}$$

$$d_p = 1.353 \text{ m m} \quad d_p = 1.353 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3.4.3.1.4 Calculo del volumen del lecho (V_l)

Aquí se considera el valor del diámetro del lecho y la altura del lecho al ser fluidizadas, en este caso la altura es de 25 cm.

$$V_l = \frac{\pi D^2}{4} \times L$$

$$V_l = \frac{(3.1415) \cdot (0.10 \text{ m})^2}{4} \times 0.25 \text{ m}$$

$$V_l = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

3.4.3.1.5 Calculo de la densidad del lecho (ρ_l)

Se toma el valor de la masa de cascara contenida en el cilindro a la altura de operación que es de 10 cm y el volumen que ocupa.

$$\rho_l = \frac{0.098 \text{ kg}}{1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\rho_l = 49.93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.3.1.6 Calculo de la porosidad del lecho fluidizado (ε)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{lecho}}}{\rho_{\text{particula}}}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{49.93}{1000}$$

$$\varepsilon = 0.950$$

3.4.3.1.7 Determinación de la densidad del aire (ρ_{aire})

Para ello el aire se comporta como un gas ideal para una temperatura de 50 °C = 323 K donde: P es la presión atmosférica, M es el peso molecular del aire, R la constante de los gases y T la temperatura del aire.

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1 \times 29}{0.082 \times 323}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{29}{26.486}$$

$$\rho_{aire} = 1.094 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.3.1.8 Cálculo de la porosidad mínima de fluidización del lecho (ε_{mf})

Para el cálculo consideramos la altura de 10 cm.

$$V_l = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot L$$

$$V_l = \frac{3.1416}{4} \times (10 \text{ cm})^2 \times 10 \text{ cm}$$

$$V_l = 7.853 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_l = \frac{\text{masa}_{particula}}{V_l}$$

$$\rho_l = \frac{0.098 \text{ kg}}{7.853 \times 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$\rho_l = 124.793 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_{lecho}}{\rho_{particula}}$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{124.793 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.875$$

3.4.3.1.9 Cálculo de la velocidad mínima de fluidización (U_{mf})

Cálculo para una temperatura de 50 °C.

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_{particula} - \rho_{aire}}{\rho_{aire}} \right) \cdot g \cdot \epsilon_{mf} \cdot d_p \right]}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{\left[\left(\frac{1000 - 1.094}{1.094} \right) \cdot (9.81) \cdot (0.875) \cdot (1.901 \times 10^{-3}) \right]}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{[(913.076)] \cdot (0.016)}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{(14.899)}$$

$$U_{mf} = 0.75 \cdot (3.859)$$

$$U_{mf} = 2.894 \frac{m}{s}$$

3.4.3.2 Cálculos fluidinámicos para una malla de 19 mm con una temperatura de 50 °C.

3.4.3.2.1 Cálculo de la densidad de la partícula (ρ_p)

Para el cálculo de la densidad de la partícula se tomo como muestra lo obtenido de la malla de 19 mm.

Muestra	M (gr)	V (ml)	ρ (gr/ml)	ρ (kg/m ³)
1	10	10	1.0	1000

$$\rho_p = \frac{\text{masa partícula (gr)}}{\text{volumen desplazado (ml)}}$$

$$\rho_p = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

3.4.3.2.2 Calculo de la esfericidad de la partícula (Φ_P)

Calculo de la Esfericidad de las partículas (Φ_p) empleando las partículas de la malla de 19 mm.

	A	B	C
PROMEDIOS	2.940	1.760	1.005
Esfericidad promedio Φ	0.589		

$$\phi = \left(\frac{bc}{a^2} \right)^{1/3} \quad \phi = \left(\frac{(1.760)(1.005)}{(2.940)^2} \right)^{1/3}$$

$$\phi = 0.589$$

3.4.3.2.3 Calculo del diámetro de la partícula (D_p)

	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Promedios	2.940	1.760	1.005
Dp	1.901		

$$d_p = \frac{2.940 + 1.760 + 1.005}{3}$$

$$d_p = 1.901 \text{ mm} \quad d_p = 1.901 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3.4.3.2.4 Calculo del volumen del lecho (V_l)

Aquí se considera el valor del diámetro del lecho y la altura del lecho al ser fluidizadas, en este caso la altura es de 25 cm.

$$V_l = \frac{\pi D^2}{4} \times L$$

$$V_l = \frac{(3.1415) \cdot (0.10 \text{ m})^2}{4} \times 0.25 \text{ m}$$

$$V_l = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

3.4.3.2.5 Calculo de la densidad del lecho (ρ_l)

Se toma el valor de la masa de cascara contenida en el cilindro a la altura de operación que es de 10 cm y el volumen que ocupa.

$$\rho_l = \frac{0.150 \text{ kg}}{1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\rho_l = 76.414 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.3.2.6 Calculo de la porosidad del lecho fluidizado (ε)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{lecho}}}{\rho_{\text{particula}}}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{76.414}{1000}$$

$$\varepsilon = 0.924$$

3.4.3.2.7 Determinación de la densidad del aire (ρ_{aire}).

Para ello el aire se comporta como un gas ideal para una temperatura de 50 °C = 323 K donde: P es la presión atmosférica, M es el peso molecular del aire, R la constante de los gases y T la temperatura del aire.

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1 \times 29}{0.082 \times 323}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{29}{26.486}$$

$$\rho_{aire} = 1.094 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.3.2.8 Cálculo de la porosidad mínima de fluidización del lecho (ε_{mf}).

Para el cálculo consideramos la altura de 10 cm.

$$V_l = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot L$$

$$V_l = \frac{3.1416}{4} \times (10 \text{ cm})^2 \times 10 \text{ cm}$$

$$V_l = 7.853 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_l = \frac{\text{masa}_{particula}}{V_l}$$

$$\rho_l = \frac{0.150 \text{ kg}}{7.853 \times 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$\rho_l = 191.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_{lecho}}{\rho_{particula}}$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{191.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.809$$

3.4.3.2.9 Cálculo de la velocidad mínima de fluidización

(U_{mf}).

Cálculo para una temperatura de 50 °C.

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_{particula} - \rho_{aire}}{\rho_{aire}} \right) \cdot g \cdot \epsilon_{mf} \cdot d_p \right]}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{\left[\left(\frac{1000 - 1.094}{1.094} \right) \cdot (9.81) \cdot (0.809) \cdot (1.901 \times 10^{-3}) \right]}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{[(913.076)] \cdot (0.0151)}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{(13.787)}$$

$$U_{mf} = 0.75 \cdot (3.713)$$

$$U_{mf} = 2.784 \frac{m}{s}$$

3.4.3.3 Cálculos fluidinámicos para una malla de 24 mm con una temperatura de 50 °C.

3.4.3.3.1 Cálculo de la densidad de la partícula (ρ_p)

Para el cálculo de la densidad de la partícula se tomo como muestra lo obtenido de la malla de 24 mm.

Muestra	M (gr)	V (ml)	ρ (gr/ml)	ρ (kg/m ³)
1	10	10	1.0	1000

$$\rho_p = \frac{\text{masa partícula (gr)}}{\text{volumen desplazado (ml)}}$$

$$\rho_p = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

3.4.3.3.2 Calculo de la esfericidad de la partícula (Φ_P)

Calculo de la Esfericidad de las partículas (Φ_p) empleando las partículas de la malla de 24 mm.

	A	B	C
PROMEDIOS	5.870	2.180	1.116
Esfericidad promedio Φ	0.431		

$$\phi = \left(\frac{bc}{a^2} \right)^{1/3} \quad \phi = \left(\frac{(2.180)(1.116)}{(5.870)^2} \right)^{1/3}$$

$$\phi = 0.431$$

3.4.3.3.3 Calculo del diámetro de la partícula (D_p)

	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Promedios	5.870	2.180	1.116
D_p	3.055		

$$d_p = \frac{5.870 + 2.180 + 1.116}{3}$$

$$d_p = 3.055 \text{ mm} \quad d_p = 3.055 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3.4.3.3.4 Calculo del volumen del lecho (V_l)

Aquí se considera el valor del diámetro del lecho y la altura del lecho al ser fluidizadas, en este caso la altura es de 25 cm.

$$V_l = \frac{\pi D^2}{4} \times L$$

$$V_l = \frac{(3.1415) \cdot (0.10 \text{ m})^2}{4} \times 0.25 \text{ m}$$

$$V_l = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

3.4.3.3.5 Calculo de la densidad del lecho (ρ_l)

Se toma el valor de la masa de cascara contenida en el cilindro a la altura de operación que es de 10 cm y el volumen que ocupa.

$$\rho_l = \frac{0.250 \text{ kg}}{1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\rho_l = 127.356 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.3.3.6 Calculo de la porosidad del lecho fluidizado (ε)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{lecho}}}{\rho_{\text{particula}}}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{127.356}{1000}$$

$$\varepsilon = 0.872$$

3.4.3.3.7 Determinación de la densidad del aire (ρ_{aire})

Para ello el aire se comporta como un gas ideal para una temperatura de 50 °C = 323 K donde: P es la presión atmosférica, M es el peso molecular del aire, R la constante de los gases y T la temperatura del aire.

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1 \times 29}{0.082 \times 323}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{29}{26.486}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.094 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.3.3.8 Cálculo de la porosidad mínima de fluidización del lecho (ε_{mf}).

Para el cálculo consideramos la altura de 10 cm.

$$V_l = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot L$$

$$V_l = \frac{3.1416}{4} \times (10 \text{ cm})^2 \times 10 \text{ cm}$$

$$V_l = 7.853 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_l = \frac{\text{masa}_{\text{particula}}}{V_l}$$

$$\rho_l = \frac{0.250 \text{ kg}}{7.853 \times 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$\rho_l = 318.349 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_{\text{lecho}}}{\rho_{\text{particula}}}$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{318.349 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.682$$

3.4.3.3.9 Cálculo de la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).

Cálculo para una temperatura de 50 °C.

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_{\text{particula}} - \rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire}}} \right) \right] \cdot g \cdot \varepsilon_{mf} \cdot d_p}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{\left[\left(\frac{1000 - 1.094}{1.094} \right) \right] \cdot (9.81) \cdot (0.682) \cdot (3.055 \times 10^{-3})}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{[(913.076)] \cdot (0.0204)}$$

$$U_{mf} = 0.75 \sqrt{(18.662)}$$

$$U_{mf} = 0.75 \cdot (4.320)$$

$$U_{mf} = 3.24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

IV ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizarán en forma detallada los datos encontrados en los experimentos fluidodinámicos y la cinética de secado.

4.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y FLUIDO DINÁMICAS DE LA CASCARA DE CAMU-CAMU.

Tabla N° 13: Características físicas para las muestras a una temperatura de 50 °C.

	Cascara de camu-camu		
	13 mm	19 mm	24 mm
ρ_p (kg/m ³)	1000	1000	1000
Φ_p	0.714	0.589	0.431
d_p (mm)	1.353	1.901	3.055
$V_l \times 10^{-3}$ (m ³)	1.963	1.963	1.963
ρ_l (kg/m ³)	49.93	76.414	127.356
E	0.950	0.924	0.872
ρ_{aire} (kg/m ³)	1.094	1.094	1.094
$V_{lf} \times 10^{-4}$ (m ³)	7.853	7.853	7.853
ρ_{lf} (kg/m ³)	124.793	191.000	318.349
ϵ_{mf}	0.875	0.809	0.682
U_{mf}	2,894	2.784	3.24

Fuente: Elaboración propia del Autor

En la tabla N° 13 se pueden analizar las siguientes características:

La densidad de la partícula (ρ_p) es la misma para las tres mallas que son de 13 mm, 19 mm y 24 mm por que como es sabido la densidad no depende de la cantidad de materia y es una característica propia de cada sustancia y esta es constante.

Como es de esperarse el diámetro de la partícula (d_p) aumenta conforme se incrementa el número de malla, por que al ser mayor el tamaño mayor será su diámetro ya que estas dependen de los valores promedio de sus tres medidas representativas (a, b y c).

La esfericidad de las partículas (Φ_p) decrece con el aumento del tamaño de las mismas, esto se debe a que mientras la partículas sean más pequeñas los valores de (a, b y c) tendrán valores más cercanos a su centro geométrico pareciéndose más a una esfera ocurriendo todo lo contrario con las mallas más grandes que tienen formas más planas y alargadas.

La porosidad (ϵ), en estado estático está relacionada con la masa de las partículas, se aprecia que disminuye al aumentar el diámetro de la partícula esto se debe a que los experimentos se realizaron con un área y altura definidos por consiguiente a menor diámetro de las partículas se necesitan más de éstas para ocupar todo el volumen establecido aumentando con ello su masa; ocurre lo opuesto con partículas de mayor diámetro que llenan el volumen con menos partículas y por lo tanto menos masa repercutiendo en un menor valor.

La densidad del lecho (ρ_l) en estado de reposo se incrementa porque está directamente relacionada con la masa, es decir las partículas grandes tendrán mayor peso al ocupar el mismo volumen que las otras partículas.

El volumen del lecho fluidizado (V_{lf}) se mantiene constante por que las tres muestras al ser fluidizadas alcanzaron la misma altura de elevación a pesar que tienen masas distintas y diferentes velocidades de aire fueron empleadas.

Ocurre lo contrario con la porosidad de mínima fluidización (ϵ_{mf}) ya que las partículas de 13 mm fluidizan con más facilidad por que tienen menos masa unitaria que las partículas de 13 mm y 19 mm por lo tanto la fluidización de la partícula está directamente relacionado con la velocidad de aire. Esta afirmación es comprobada por que la velocidad de aire que es de 2.9 m/s para una partícula de la malla de 13 mm y se incrementa hasta 3.3 m/s para las partículas de la malla de 24 mm.

La velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) obtenida experimentalmente no son tan distantes de los valores obtenidos con el anemómetro, esto es para la malla de 13 mm experimentalmente es de 2.84 m/s y el anemómetro marco 2.9 m/s, para la malla de 19 mm experimentalmente es de 2.78 m/s y el anemómetro marco 3.1 m/s y finalmente para la malla de 24 mm experimentalmente fue de de 3.24 m/s y el anemómetro marco 3.3 m/s.

4.2 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CINÉTICA DE SECADO DE LA CASCARA DE CAMU-CAMU

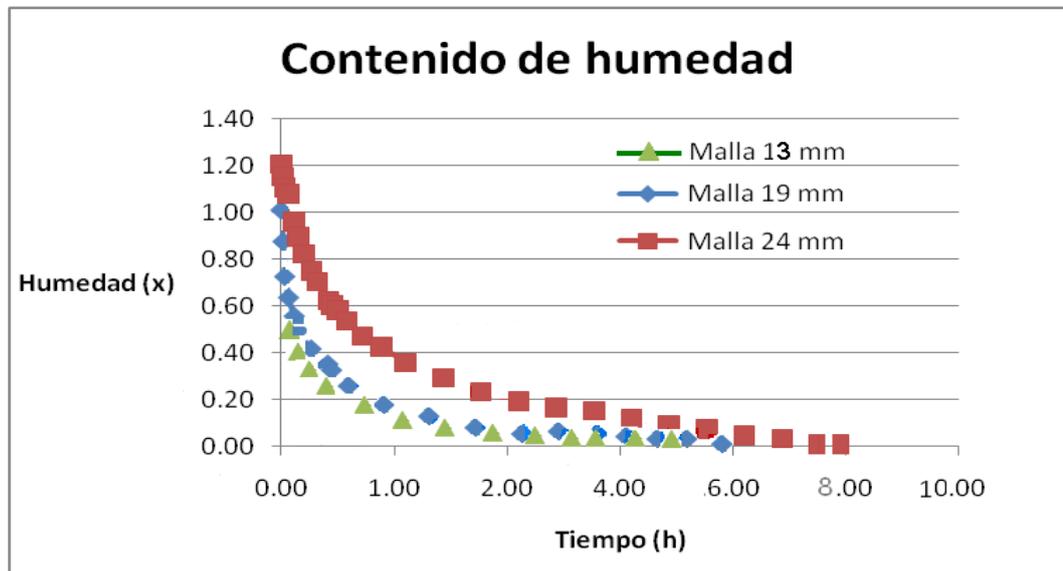


Figura N° 15: Contenido de humedad Vs. Tiempo. Temperatura de 40 °C.

Fuente: Elaboración propia del Autor

Las Curvas de la figura N° 15, fueron obtenidas tabulando los valores experimentales de humedad versus tiempo durante el proceso de secado, donde la malla de 13 mm tiene una velocidad de aire de 2.89 m/s, la malla de 19 mm tiene una velocidad de aire de 2.78 m/s y la malla de 24 mm tiene una velocidad de aire de 3.24 m/s.

En la figura N° 15 se observa lo siguiente:

- ❖ Las curvas presentan el comportamiento típico descrito en la teoría en la que es evidente la pérdida de humedad del producto conforme se ve expuesta a la corriente de aire caliente.
- ❖ La curva de malla 13 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, y presenta los periodos de secado a velocidad constante y decreciente, como son partículas pequeñas la distancia que recorre el agua desde su interior hasta la superficie es corta por lo que demora menos tiempo aumentando con ello la transferencia de masa. El tiempo que le demora en secarse la materia prima es de 5 h.

- ❖ La curva de malla 19 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, presentando un corto periodo de secado a velocidad constante, como las partículas son un poco mas grandes se incrementa el tiempo de secado a 6 h.
- ❖ La curva de la malla de 24 mm es la que demora más tiempo en secarse, esto es porque son partículas más grandes y la distancia de traslado de la humedad del centro de la cascara a la superficie para ser arrastrado por el aire caliente es mayor que las demás mallas, tiene un tiempo de secado de 8.20 h
- ❖ Comparando los tiempos de secado de las mallas de 13 mm y 19 mm estos presentan tiempos similares porque son partículas pequeñas y con una gran superficie de contacto con el aire caliente.

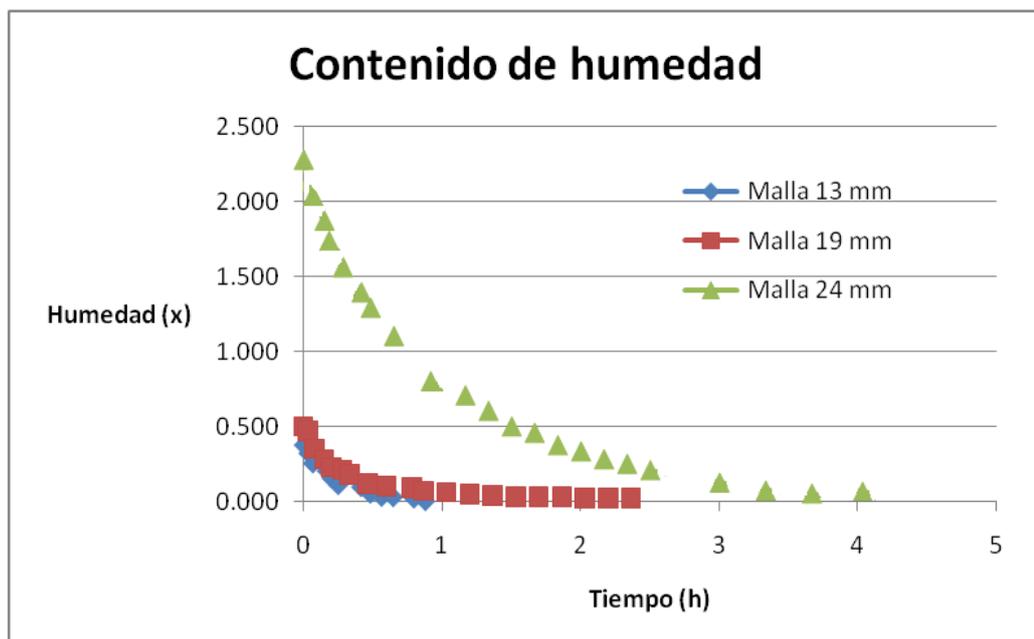


Figura N° 16: Contenido de humedad Vs. Tiempo. Temperatura de 50 °C.

Fuente: Elaboracion propia del Autor

En la figura N° 16 se observa lo siguiente:

- ❖ Las curvas presentan el comportamiento típico descrito en la teoría en la que es evidente la pérdida de humedad del producto conforme se ve expuesta a la corriente de aire caliente.

- ❖ La curva de malla 13 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, presenta los periodos de secado a velocidad constante y decreciente, al igual que la en la figura N° 15 estas presentan el menor tiempo de secado que es de 1.8 h.
- ❖ La curva de malla 19 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, inicialmente con 0.53 kg agua/kg solido seco hasta una humedad final de 0.05 kg agua/kg solido seco, como las partículas son un poco mas grandes se incrementa el tiempo de secado a 2.5 h.
- ❖ La curva de malla 24 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, inicialmente con 2.47 kg agua/kg solido seco hasta una humedad final de 0.06 kg agua/kg solido seco, como las partículas son un poco mas grandes se incrementa el tiempo de secado a 4.15 h.

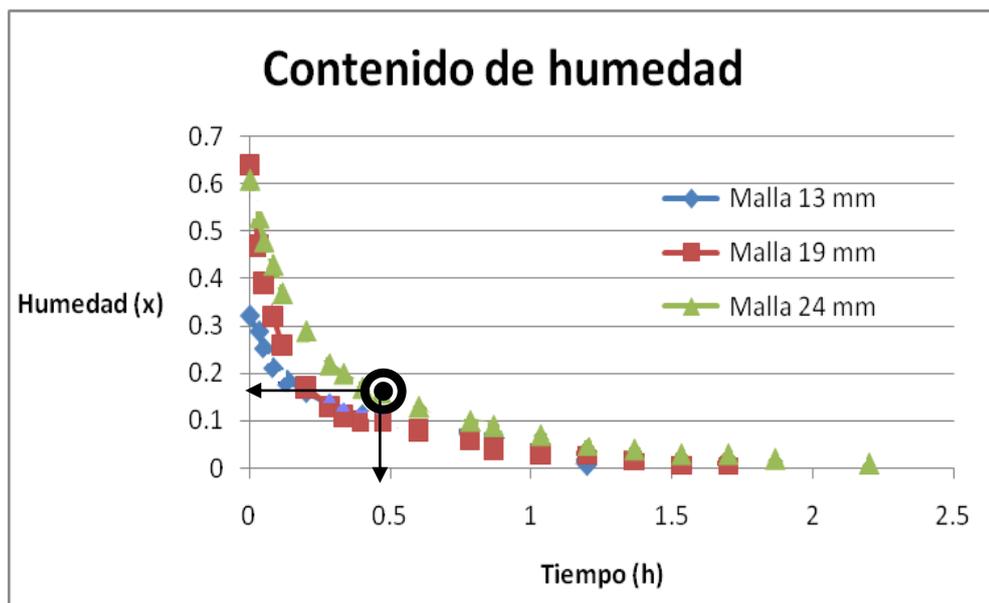


Figura N°17: Contenido de humedad Vs. Tiempo. Temperatura de 60 °C.

Fuente: Elaboración propia del Autor

En la figura N° 17 se observa lo siguiente:

- ❖ El punto negro es la humedad crítica (X_c), disminuye con el tamaño de la muestra, se debe a que la cascara al ser mas pequeña la humedad contenida al interior llega mas rápido a la superficie.
- ❖ Las curvas presentan el comportamiento típico descrito en la teoría en la que es evidente la pérdida de humedad del producto conforme se ve expuesta a la corriente de aire caliente.
- ❖ La curva de malla 13 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, presenta los periodos de secado a velocidad constante y decreciente, al igual que la en la figura N° 16 estas presentan el menor tiempo de secado que es de 1.10 h.
- ❖ La curva de malla 19 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, inicialmente con 0.65 kg agua/kg solido seco hasta una humedad final de 0.06 kg agua/kg solido seco, como las partículas son un poco mas grandes se incrementa el tiempo de secado a 1.7 h.
- ❖ La curva de malla 24 mm, indica que la cascara de camu-camu comienza a perder humedad al inicio de la operación de secado, inicialmente con 0.6 kg agua/kg solido seco hasta una humedad final de 0.06 kg agua/kg solido seco, como las partículas son un poco mas grandes se incrementa el tiempo de secado a 2.20 h.

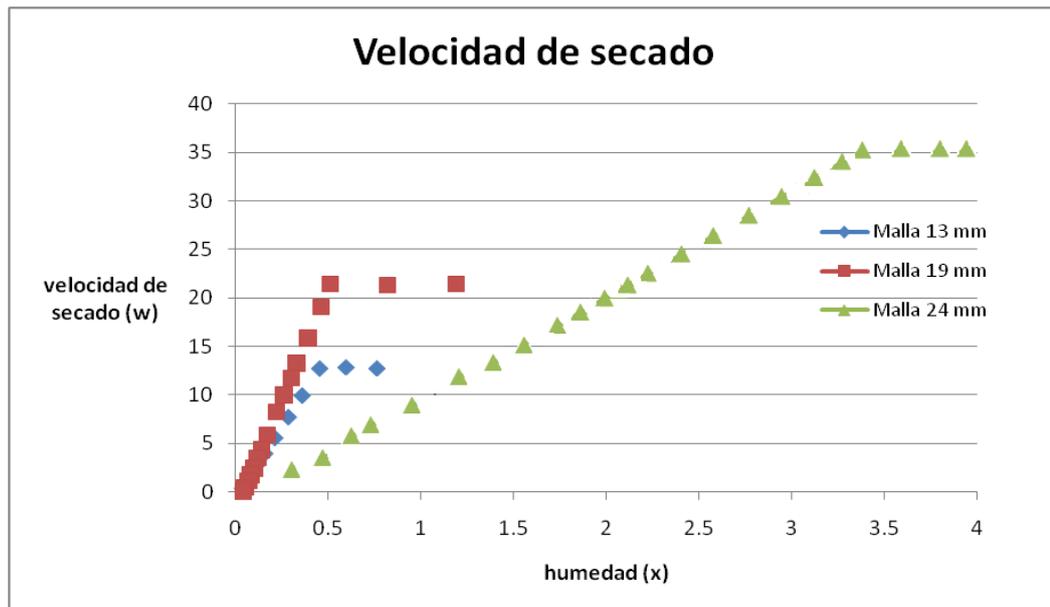


Figura N ° 18: Velocidad de secado Vs. Humedad. Temperatura de 50 °C.

Fuente: Elaboración propia del Autor

En la figura N° 18, como se puede observar, se presentan las curvas clásicas que siguen los alimentos (Geankoplis, 1995), esto es, existe un periodo de secado a velocidad constante y un periodo de secado a velocidad decreciente.

El periodo de secado a velocidad decreciente es el que predomina durante el proceso por lo que es el más estudiado en el secado de alimentos.

Analizando las curvas obtenidas experimentalmente graficadas en la figura N°9 tenemos:

- ❖ La curva generada por la malla de 13 mm, presenta un valor de secado a velocidad constante de 12.71 kg/h.m². El periodo de secado a velocidad decreciente se inicia con un valor de humedad 0.45 kg agua/kg solido seco, al final de este periodo la cascara de camu-camu presenta un peso de solido seco de 0.06 kg. Las muestras de esta malla son las que presentan la más rápida velocidad de secado.
- ❖ La curva generada por la malla de 19 mm, presenta un valor de secado a velocidad constante de 21.43 kg/h.m². El periodo de secado a velocidad decreciente se inicia con un valor de humedad 0.51 kg agua/kg solido

seco, al final de este periodo la cascara de camu-camu presenta un peso de solido seco de 0.06 kg.

- ❖ La curva generada por la malla de 24 mm, presenta un valor de secado a velocidad constante de 35.25 kg/h.m². El periodo de secado a velocidad decreciente se inicia con un valor de humedad 3.38 kg agua/kg solido seco, al final de este periodo la cascara de camu-camu presenta un peso de solido seco de 0.06 kg.

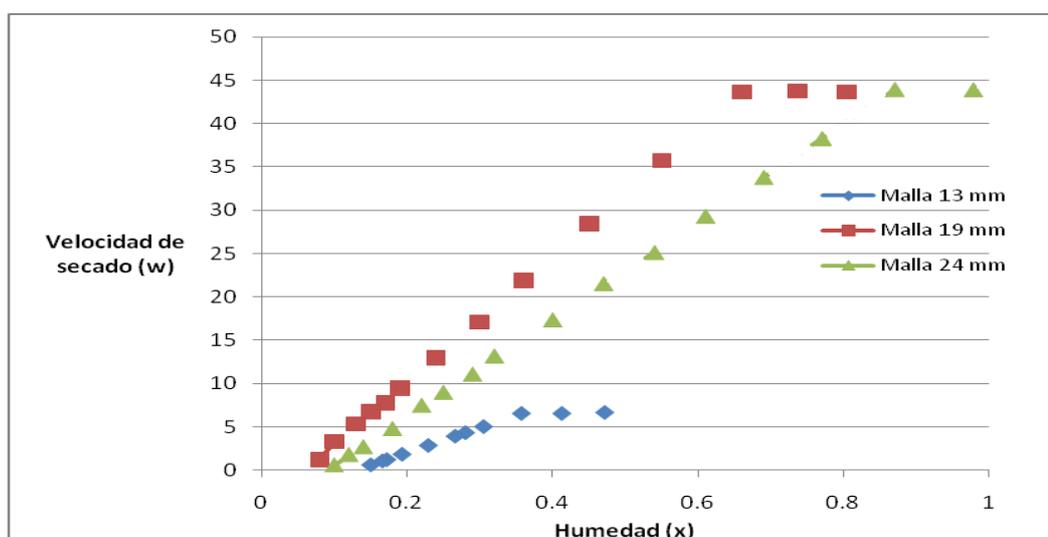


Figura N° 19: Velocidad de secado Vs. Humedad. Temperatura de 60 °C.

Fuente: Elaboración propia del Autor

En la figura N° 19, como se puede observar, se presentan las curvas clásicas que siguen los alimentos (Geankoplis, 1995), esto es, existe un periodo de secado a velocidad constante y un periodo de secado a velocidad decreciente. El periodo de secado a velocidad decreciente es el que predomina durante el proceso por lo que es el más estudiado en el secado de alimentos.

Analizando las curvas obtenidas experimentalmente graficadas en la figura N° 19, tenemos:

- ❖ La curva generada por la malla de 13 mm, presenta un valor de secado a velocidad constante de 6.56 kg/h.m². El periodo de secado a velocidad decreciente se inicia con un valor de humedad 0.35 kg agua/kg solido seco

seco, al final de este periodo la cascara de camu-camu presenta un peso de solido seco de 0.06 kg. Las muestras de esta malla son las que presentan la más rápida velocidad de secado.

- ❖ La curva generada por la malla de 19 mm, presenta un valor de secado a velocidad constante de 43.6 kg/h.m². El periodo de secado a velocidad decreciente se inicia con un valor de humedad 0.66 kg agua/kg solido seco, al final de este periodo la cascara de camu-camu presenta un peso de solido seco de 0.06 kg.

- ❖ La curva generada por la malla de 24 mm, presenta un valor de secado a velocidad constante de 43.97 kg/h.m². El periodo de secado a velocidad decreciente se inicia con un valor de humedad 0.87 kg agua/kg solido seco, al final de este periodo la cascara de camu-camu presenta un peso de solido seco de 0.06 kg.

4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD CRÍTICA DURANTE EL PROCESO DE SECADO

Tabla N° 14: Contenido de humedad crítica (x_c) a las temperaturas de 50 °C y 60 °C.

	50 °C		60 °C	
	X_c	W	X_c	W
Chica	0.45	12.71	0.35	6.56
Mediana	0.51	21.43	0.66	43.64
Grande	3.38	35.25	0.87	43.97

Fuente: Elaboracion propia del Autor

En la tabla N° 14. Se aprecia que el contenido de la humedad crítica disminuye con el tamaño de la muestra, esto se debe a que la cascara al ser más pequeña la humedad contenida en el interior de llega mas rapido a la superficie. Este comportamiento se ve incrementado con el aumento de la temperatura.

El menor valor de la humedad crítica se obtuvo con la temperatura de 60 °C con la muestra de cascara chica, incrementandose este valor con el tamaño de la muestra.

4.4 ANALISIS FISICO-QUÍMICO DE LA CASCARA DE CAMU-CAMU DESPUES DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN.

Tabla N° 15: Análisis Físico - Químico de la cascara de camu-camu deshidratado, realizado en el laboratorio de la planta piloto UNAP.

CAMU-CAMU			
TEMPERATURA	40 °C	50 °C	60 °C
VELOCIDAD DE AIRE	2.89 m/s	2.78 m/s	3.24 m/s
HUMEDAD	12.72 %	10.22 %	7.53 %
CENIZA	2.89 %	2.08 %	1.85 %
PROTEINA	4.99 %	6.90 %	5.81 %
GRASA	6.95 %	6.00 %	6.81 %
CARBOHIDRATOS	72.45 %	74.79 %	77.95 %
CALORÍAS	372.31 Kcal	371.80 Kcal	396.53 Kcal
VITAMINA C	1587 mg/100 gr	13181 mg/100 gr	12133 mg/100 gr

Fuente: Elaboración Propia del Autor

En la tabla N°15 se muestran los resultados obtenidos después del proceso de deshidratación de la cascara de camu-camu.

Analizando el contenido de humedad, para las tres temperaturas de secado la humedad final está dentro de los límites permitidos, un poco elevado para la temperatura de 40 °C (12.72 %) pero si la cascara deshidratada es empacada en bolsas de polietileno de alta densidad se preservara bien fuera del ataque de hongos y levaduras que lo puedan degradar.

En el análisis de proteínas el valor más alto fue de 6.90% que se obtuvo al ser sometida la muestra a una temperatura de 50 °C.

Los carbohidratos como fuente de energía tienden a aumentar conforme se incrementa la temperatura, de tal modo que a la temperatura de 60 °C obtuvo el valor más alto de 77.95%.

El resultado más importante y al cual está dirigido la presente investigación es a la concentración de ácido ascórbico (vitamina C) que por ser sensible al calor es seriamente afectada por la temperatura, a 40 °C no se ve afectado ni se incrementa la concentración de vitamina C obteniendo un valor como de fruta fresca (40 °C es casi la temperatura ambiente en la región), a 50 °C se incrementa la concentración de vitamina C obteniendo un valor de 13193 mg/100g y a la temperatura de 60 °C este valor se ve disminuido hasta 12133 mg/100 g, es decir se pierde 1060 mg/100g confirmando que el ácido ascórbico (vitamina C) es termolábil.

4.5 CÁLCULOS DEL BALANCE ENERGÉTICO PARA LAS MUESTRAS DE LAS DIFERENTES MALLAS.

Tabla N° 16: Cálculo energético para diferentes temperaturas para las muestras de cascara de camu-camu.

			Malla 13 mm	Malla 19 mm	Malla 24 mm
T °C	H_{G1} aire Kcal/kg	H_{G2} aire Kcal/kg	Q_E aire Kcal/h	Q_E aire Kcal/h	Q_E aire Kcal/h
40	18.809	21.295	228.555	293.455	260.077
50	18.809	23.783	443.548	473.098	503.632
60	18.809	26.271	645.338	689.817	734.327

Fuente: Elaboración propia del Autor

De la tabla N° 16 se pueden analizar lo siguiente:

El menor valor del calor entregado ($Q_{E \text{ aire}}$) es de 228.55 kcal/h para una partícula de malla de 13 mm a una temperatura de 40 °C y la más alta es para la temperatura de 60 °C para una malla de 24 mm con un valor de 734.32 kcal/h. Esto se debe a que para lograr que las partículas lleguen al contenido de humedad necesario para conservarlo a través del tiempo, las partículas de la malla de 13 mm liberan humedad más rápidamente que las de 24 mm.

El valor de ($Q_{E \text{ aire}}$) se va incrementado conforme se aumente la temperatura de operación.

4.6 BALANCE DE AGUA EN EL SECADOR PARA LAS CASCARAS DE CAMU-CAMU.

Tabla N° 17: Balance de agua a las temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C.

T (°C)	Malla de 13 mm		Malla de 19 mm		Malla de 24 mm	
	G kg aire seco/h	Q_E Kcal/h	G kg aire seco/h	Q_E Kcal/h	G kg aire seco/h	Q_E Kcal/h
40	35.3	124.61	40.52	143.06	27.62	97.50
50	57.54	203.12	41.68	270.75	23.23	164.11
60	48.13	510.05	42.91	454.69	32.95	349.18

Fuente: Elaboración propia del Autor

De la tabla N° 17 se puede interpretar lo siguiente:

El (Q_E) para las tres mallas a la temperatura de 40 °C es baja, pero este valor se va incrementando conforme se aumenta la temperatura de secado. A bajas temperaturas hay poca transferencia de calor por lo que la materia a deshidratar debe permanecer por mucho más tiempo en el horno secador para lograr la humedad final deseada y ocurrirá totalmente lo contrario al elevar la temperatura habrá mayor flujo de calor y la materia prima se deshidratara en menos tiempo.

Estos valores nos indican que conforme se incremente la temperatura de operación la transferencia de calor al agua también subirá siendo ambos directamente proporcionales.

4.7 BALANCE DEL COMBUSTIBLE CONSUMIDO.

Tabla N°18: Balance del combustible consumido para las temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C. para las muestras de las mallas de 13 mm, 19 mm y 24 mm.

T (°C)	13 mm		19 mm		24 mm	
	t (h)	m _{propano} (kg)	T (h)	m _{propano} (kg)	T (h)	m _{propano} (kg)
40	5	6.15	6	8.47	8.2	7.89
50	1.8	3.61	2.5	6.68	4.1	6.72
60	1.1	5.54	1.7	7.63	2.2	7.58

Fuente: Elaboración propia del Autor

La tabla N° 18 nos muestra que el combustible consumido (kg de propano) para las tres muestras de mallas, de 13 mm, 19 mm y 24 mm a 40 °C es aproximadamente de 1 kg /h de funcionamiento, este valor de consumo se va incrementando conforme se eleva la temperatura del horno.

Según los resultados físico químicos de la cascara de camu-camu la mejor temperatura de para su deshidratación es la de 50 °C. Según la tabla N° 12 no existe mucha diferencia en el consumo de combustible entre 50 °C y 60 °C pero si en la concentración de ácido ascórbico que se ve disminuida a la temperatura mayor.

4.8 ANALISIS DE VARIANZA DEL SECADO

Tabla N° 19: Análisis de varianza a temperaturas de 50 °C y 60 °C.

F. de V-	S. de C.	g.l	C.M	t	F
Entre tratamientos	5495712.8	1	5495712.8	709.70	4.41
Dentro del tratamiento	1964	18	10.911		
TOTAL	5497676.8	19			

Fuente: Elaboración propia del Autor

Como se puede observar, la concentración de vitamina C en ambos tratamientos es significativa, esto es corroborado con la prueba $t = 709.70$ resultado del análisis, nos indica que H_1 : si existe diferencia significativa por efecto de la temperatura.

Aplicando la ecuación del modelo estadístico para el cálculo de la concentración de ácido ascórbico (vitamina C).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_1 X_2$$

Se obtuvo lo siguiente:

Tabla N° 20: Comparación de las concentraciones de ácido ascórbico.

Temperatura (°C)	Contenido de vit. C (calculado)	Contenido de vit. C (laboratorio)
50	13193	13181
60	12187	12133

Fuente: Elaboración propia del Autor

Como se aprecia en la tabla N° 20 los resultados son similares lo que indica el correcto planteamiento y desarrollo de la ecuación.

Se muestran estas temperaturas por que es donde se manifiestan incrementos en la concentración de vitamina C, a 40 °C no hay un aumento considerable del ácido ascórbico porque es casi como secar a temperatura ambiente.

V CONCLUSIONES

Las principales conclusiones a las que se llegó al finalizar este trabajo experimental son las siguientes:

- ❖ Para la cascara de camu-camu de malla 13 mm, 19 mm y 24 mm cada una con sus respectivas velocidades de aire 2.89 m/s, 2.78 m/s y 3.24 m/s, la temperatura apropiada para su deshidratación es de 50°C. Por qué a 50° C el ácido ascórbico aumenta.
- ❖ Las curvas experimentales de humedad Vs tiempo y velocidad de secado Vs humedad presentan comportamientos similares a las obtenidas mediante modelos teóricos.
- ❖ La composición físico química de la cascara de camu-camu a 50 °C obtenido bajo estas condiciones son las siguientes:
Humedad 10.22 %, proteína 6.90 %, grasa 6.0 %, cenizas 2.08 %, carbohidratos 74.79 %, calorías 371.80 Kcal, vitamina C 13193 mg/100 g.
- ❖ El secado a la temperatura de 60 °C arrojó una concentración de 12133 mg/100 g de pulpa, lo cual no es recomendable porque hay una pérdida de vitamina C de 1060 mg/100 g de pulpa comparando con el resultado obtenido a 50° C (ver tabla N° 15).
- ❖ En cuanto a las pruebas de secado se pudo determinar la influencia que tiene la temperatura y el efecto de la velocidad de aire sobre la humedad removida y la velocidad de secado del producto. Cuando se habla de la humedad removida en un determinado tiempo, se determina, como era de esperarse, que a altas temperaturas se remueva más humedad.
- ❖ Respecto a la velocidad de secado se pudo notar que cuando se trabaja a temperaturas altas la velocidad de secado aumenta. Sin embargo en los experimentos realizados se determinó el alto impacto que también tiene la

humedad inicial de la partícula, ya que si esta tiene demasiada agua superficial no podrá ser fluidizada por lo que será necesario un presecado.

- ❖ El valor de la humedad crítica, disminuye por el efecto de la temperatura y del tamaño de la muestra, lo cual se debe de considerar para una correcta deshidratación.
- ❖ El análisis estadístico indica que la concentración del ácido ascórbico (vitamina C) y el contenido de humedad final dependen únicamente de la temperatura de operación y no de la velocidad de aire.

VI RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda mejorar esta investigación pero con temperaturas comprendidas entre 45 °C y 55 °C por que según los análisis la mejor temperatura fue de 50 °C pero se podría optimizar.
- ❖ Realizar estudios fluidinámicos empleando diversas variedades de frutos y complementarlos con análisis de actividad de agua, higroscopicidad y velocidad de rehidratación, para su industrialización posterior.
- ❖ Como el equipo secador de lecho fluidizado ha sido modificado para optimizar su funcionamiento se debe de tener en cuenta algunas consideraciones para su uso como son: verificar siempre que la llave general este desconectada para iniciar la labor de carga de materia prima. Para encender el variador de velocidad verificar que este en cero (punto de encendido en mínimas revoluciones del motor ventilador) y graduar poco a poco la velocidad de aire correcta para el secado, esta velocidad varía con las características propias de cada materia a secar los cuales son tamaño, densidad, peso y cantidad a ingresar al equipo de secado.
- ❖ Se recomienda analizar la muestra de la cascara fresca de camu-camu en el laboratorio físico-químico de la planta piloto (UNAP), por que solo se observa muestras proximales (Parámetros) ver tabla N° 03 composición proximal de la cascara y pulpa de la fruta fresca.
- ❖ Considerar estudios técnicos económicos para la viabilidad del proceso, puesto que los empresarios buscan rentabilidad.

VII REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

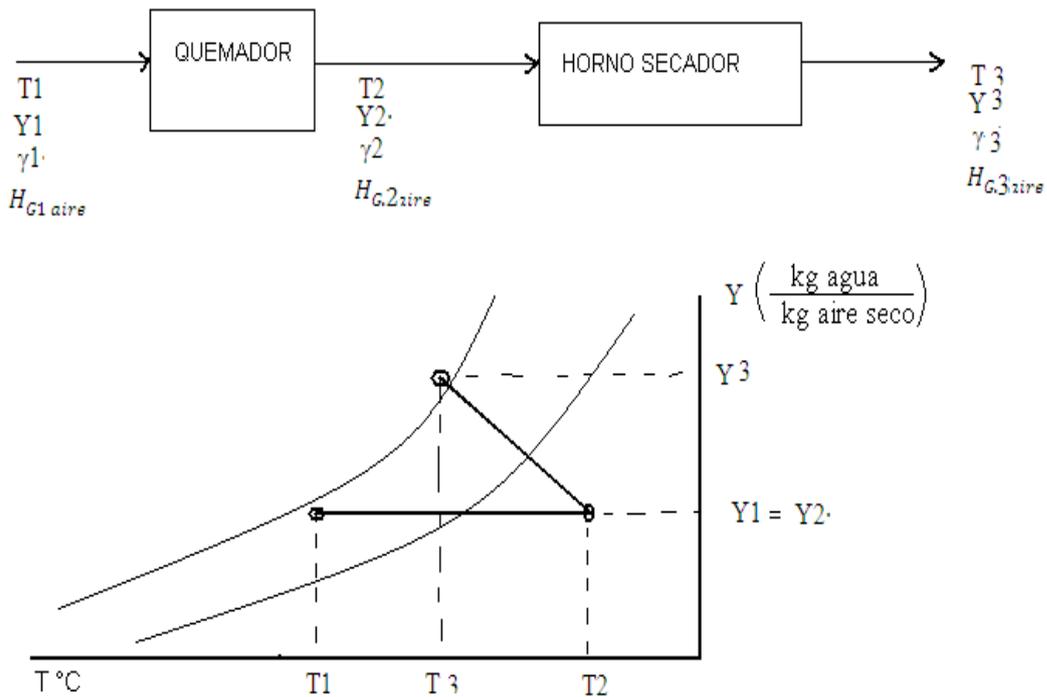
1. **Aguirre, r ; Suárez, c y Viollas, p.e. 1984** “Drying kinetics of rough rice grain” j. of food technol. Pag. 679 - 686.
2. **Carbonel, J.V ; Piñaga, F ; Peña, J.L y Garcia, M.J. 1985** “Deshidratación de Frutas y Hortalizas con Aire Ambiente V. Ensayos con Nabos (*Brassica rapa*, L). Rev. Agroquim. tecnol. Aliment. Pag. 257 - 267.
3. **Carranza, J. 2001.** “Cinética de secado del plátano (*Musa paradisiaca* L) y la yuca (*manihot esculenta* crantz)”. Tesis. FIIA. Iquitos-Perú.
4. **Carranza, J. 2013.** “Estudio fluido dinámico del ají charapita (*Capsicum frutescens*)”. Tesis. FIQT. UNI. Lima-Perú.
5. **Chavez, W. 1993,** Camu-camu, p. 139 – 146 en: C.W-Clay y C.R. Clement. Selected species and strategies to enhance income generation from amazonian forest. FO: Misc/93/6 Working paper. FAO.ROME.
6. **Earle, R.L. 1979** “Ingeniería de Alimentos” II Edición. Edit. Acribia. Zaragoza - España. 332 pág.
7. **Ergun S.** “Fluid flow throu paked columns” Chem. Eng. Prog. 48, 89, 1952.
8. **Geankoplis, C. 1982** “Procesos de Transporte y Operaciones unitarias” II Edición. Edit. Continental. México. 759 pág.
9. **Geldart, D. 1973.** Powder Technol., pp. 7,285.
10. **Guarneros, G 2005.**”Mejoras en la operación de un sistema de secado en lecho fluidizado al vacío con vapor sobrecalentado. Experimentación con pimienta en grano”. Tesis. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México.
11. **Norma Técnica Peruana. 2007.** NTP 011.030. “Productos Naturales. Camu-camu (*Myrciaria dubia* H.B.K. Mc Vaugh). Definiciones, clasificación y requisitos”. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales – INDECOPI. Lima, Perú.

12. **Pella, M. 2004.** “Estudio de separación del colorante del camu-camu”, Tesis-FIQT-UNI.
13. **Villachica, L 1996.** Hugo Consultor del Proyectcultivo del camu-camu (*Myrciaria dubia* H.B.K. Mc Vaugh) en la Amazonia Peruana. Tratado de Cooperación Amazónica.

ANEXO

ANEXO I

BALANCE DE ENERGÍA DURANTE EL PROCESO



Para el proceso de secado llevado a cabo a 40 °C, con muestras obtenidas de la malla de 13 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 40 \text{ °C} \quad Hr2 = 15 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 31 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.022 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1aire} = (0.24 + 0.46 Y1)T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1aire} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1aire} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2aire} = (0.24 + 0.46 Y2)T2 + 597.2 Y2$$

$$H_{G2aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]40 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2aire} = 9.949 + 11.3468$$

$$H_{G2aire} = 21.295 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 313 \text{ k}}$$

$$\rho_{aire} = 1.129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{aire} = V_{aire} \times A \times \rho_{aire}$$

$$G_{aire} = \left[\left(2.9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times (0.0078 \text{ m}^2) \times \left(1.129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{aire} = 91.937 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 91.937 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (21.295 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 228.555 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 50 °C, con muestras obtenidas de la malla de 13 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 50 \text{ °C} \quad Hr2 = 25 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 33 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.026 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1aire} = (0.24 + 0.46 Y1) T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)] 30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1aire} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1aire} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2aire} = (0.24 + 0.46 Y_2)T_2 + 597.2 Y_2$$

$$H_{G2aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]50 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2aire} = 12.437 + 11.3468$$

$$H_{G2aire} = 23.7838 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 323 \text{ k}}$$

$$\rho_{aire} = 1.0949 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{aire} = V_{aire} \times A \times \rho_{aire}$$

$$G_{aire} = \left[\left(2.9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times (0.0078 \text{ m}^2) \times \left(1.0949 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{aire} = 89.159 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 89.159 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (23.7838 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 443.548 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 60 °C, con muestras obtenidas de la malla de 13 mm.

$$T_1 = 30 \text{ °C} \quad H_{r1} = 72 \%$$

$$Y_1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T_2 = 60 \text{ °C} \quad H_{r2} = 15 \%$$

$$Y_2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 35.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad H3 = 80 \% \quad Y3 = 0.029 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y1)T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1\text{aire}} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1\text{aire}} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y2)T2 + 597.2 Y2$$

$$H_{G2\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]60 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2\text{aire}} = 14.9244 + 11.3468$$

$$H_{G2\text{aire}} = 26.2712 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 333 \text{ k}}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{\text{aire}} = V_{\text{aire}} \times A \times \rho_{\text{aire}}$$

$$G_{\text{aire}} = \left[\left(2.9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times (0.0078 \text{ m}^2) \times \left(1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{\text{aire}} = 86.481 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{\text{aire}} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 86.481 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (26.2712 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 645.338 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 40 °C, con muestras obtenidas de la malla de 19 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 40 \text{ °C} \quad Hr2 = 15 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 31 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.022 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1aire} = (0.24 + 0.46 Y1)T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1aire} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1aire} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2aire} = (0.24 + 0.46 Y2)T2 + 597.2 Y2$$

$$H_{G2aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]40 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2aire} = 9.949 + 11.3468$$

$$H_{G2aire} = 21.295 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 313 \text{ k}}$$

$$\rho_{aire} = 1.129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{aire} = V_{aire} \times A \times \rho_{aire}$$

$$G_{aire} = \left[\left(3.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times (0.0078 \text{ m}^2) \times \left(1.129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{aire} = 98.277 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 98.277 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (21.295 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 293.455 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 50 °C, con muestras obtenidas de la malla de 19 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 50 \text{ °C} \quad Hr2 = 25 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 33 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.026 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y1)T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1\text{aire}} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1\text{aire}} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y2)T2 + 597.2 Y2$$

$$H_{G2\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]50 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2\text{aire}} = 12.437 + 11.3468$$

$$H_{G2\text{aire}} = 23.7838 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 323 \text{ k}}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.0949 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{\text{aire}} = V_{\text{aire}} \times A \times \rho_{\text{aire}}$$

$$G_{aire} = \left[\left(3.1 \frac{m}{s} \right) \times \left(3600 \frac{s}{h} \right) \right] \times \left(0.0078 m^2 \right) \times \left(1.0949 \frac{kg}{m^3} \right)$$

$$G_{aire} = 95.306 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 95.306 \frac{kg}{h} \times (23.7838 - 18.809) \frac{kcal}{kg \text{ aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 473.098 \frac{kcal}{kg \text{ aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 60 °C, con muestras obtenidas de la malla de 19 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 60 \text{ °C} \quad Hr2 = 15 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 35.5 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.029 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1aire} = (0.24 + 0.46 Y1)T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1aire} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1aire} = 18.809 \frac{kcal}{kg \text{ aire seco}}$$

$$H_{G2aire} = (0.24 + 0.46 Y2)T2 + 597.2 Y2$$

$$H_{G2aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]60 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2aire} = 14.9244 + 11.3468$$

$$H_{G2aire} = 26.2712 \frac{kcal}{kg \text{ aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 333 \text{ k}}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{\text{aire}} = V_{\text{aire}} \times A \times \rho_{\text{aire}}$$

$$G_{\text{aire}} = \left[\left(3.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times (0.0078 \text{ m}^2) \times \left(1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{\text{aire}} = 92.444 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{\text{aire}} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 92.444 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (26.2712 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 689.817 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 40 °C, con muestras obtenidas de la malla de 24 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 40 \text{ °C} \quad Hr2 = 15 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 31 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.022 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y1)T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G1\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1\text{aire}} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1\text{aire}} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y2)T2 + 597.2 Y2$$

$$H_{G2\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]40 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2\text{aire}} = 9.949 + 11.3468$$

$$H_{G2\text{aire}} = 21.295 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{k}} \times 313 \text{ k}}$$

$$\rho_{aire} = 1.129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{aire} = V_{aire} \times A \times \rho_{aire}$$

$$G_{aire} = \left[\left(3.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times \left(0.0078 \text{ m}^2 \right) \times \left(1.129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{aire} = 104.617 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 104.617 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (21.295 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 260.077 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 50 °C, con muestras obtenidas de la malla de 24 mm.

$$T1 = 30 \text{ °C} \quad Hr1 = 72 \% \quad Y1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T2 = 50 \text{ °C} \quad Hr2 = 25 \% \quad Y2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T3 = 33 \text{ °C} \quad Hr3 = 80 \% \quad Y3 = 0.026 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G\text{aire}} = (0.24 + 0.46 Y1) T1 + 597.2 Y1$$

$$H_{G\text{aire}} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)] 30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G\text{aire}} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G\text{aire}} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2aire} = (0.24 + 0.46 Y_2)T_2 + 597.2 Y_2$$

$$H_{G2aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]50 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2aire} = 12.437 + 11.3468$$

$$H_{G2aire} = 23.7838 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 323 \text{ k}}$$

$$\rho_{aire} = 1.0949 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{aire} = V_{aire} \times A \times \rho_{aire}$$

$$G_{aire} = \left[\left(3.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times \left(0.0078 \text{ m}^2 \right) \times \left(1.0949 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{aire} = 101.457 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 101.457 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (23.7838 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 503.632 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Para el proceso de secado llevado a cabo a 60 °C, con muestras obtenidas de la malla de 24 mm.

$$T_1 = 30 \text{ °C} \quad H_{r1} = 72 \%$$

$$Y_1 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T_2 = 60 \text{ °C} \quad H_{r2} = 15 \%$$

$$Y_2 = 0.019 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$T_3 = 35.5 \text{ °C} \quad H_{r3} = 80 \%$$

$$Y_3 = 0.029 \text{ kg agua/ kg aire seco}$$

$$H_{G1aire} = (0.24 + 0.46 Y_1)T_1 + 597.2 Y_1$$

$$H_{G1aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]30 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G1aire} = 7.4622 + 11.3468$$

$$H_{G1aire} = 18.809 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$H_{G2aire} = (0.24 + 0.46 \cdot Y_2)T_2 + 597.2 \cdot Y_2$$

$$H_{G2aire} = [(0.24) + 0.46 \cdot (0.019)]60 + (597.2) \cdot (0.019)$$

$$H_{G2aire} = 14.9244 + 11.3468$$

$$H_{G2aire} = 26.2712 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

Calculo del calor entregado al aire

$$\rho_{aire} = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 \text{ atm}) \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol k}} \times 333 \text{ k}}$$

$$\rho_{aire} = 1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G_{aire} = V_{aire} \times A \times \rho_{aire}$$

$$G_{aire} = \left[\left(3.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \right] \times (0.0078 \text{ m}^2) \times \left(1.062 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$G_{aire} = 98.409 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{EG} = G_{aire} (H_2 - H_1)$$

$$Q_{EG} = 98.409 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (26.2712 - 18.809) \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

$$Q_{EG} = 734.327 \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco}}$$

ANEXO II

BALANCE DE AGUA EN EL SECADOR

Balance para la cascara obtenido de la malla de 13 mm a una temperatura de funcionamiento de 40 °C

$$(x_0 - x_f) \cdot s = (Y_{2-3} - Y_2) \cdot G \cdot t_{operc}$$

$$(11 - 0.41) \cdot (0.05) = (0.022 - 0.019) \cdot G \cdot (5)$$

$$G = \frac{(11 - 0.41) \cdot (0.05)}{(0.022 - 0.019) \cdot (5)}$$

$$G = 35.3 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hr}}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + 0.3 Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2aire} - H_{G1aire})$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (35.3) \cdot (21.295 - 18.809)$$

$$Q_{entregado} = 124.61 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{propano} = \frac{(Q_{entregado}) \cdot (t_{operación})}{\tau_{propano}}$$

$$m_{propano} = \frac{(124.61 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}) \cdot (5 \text{ hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{propano} = 6.15 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 13 mm a una temperatura de funcionamiento de 50 °C

$$(x_0 - x_f) \cdot s = (Y_{2-3} - Y_2) \cdot G \cdot t_{operc}$$

$$(11 - 0.41) \cdot (0.06) = (0.026 - 0.019) \cdot G \cdot (1.8)$$

$$G = \frac{(11 - 0.41) \cdot (0.06)}{(0.026 - 0.019) \cdot (1.8)}$$

$$G = 57.54 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hr}}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + 0.3 Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2aire} - H_{G1aire})$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (57.54) \cdot (23.783 - 18.809)$$

$$Q_{entregado} = 203.12 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{propano} = \frac{(Q_{entregado}) \cdot (t_{operación})}{\tau_{propano}}$$

$$m_{propano} = \frac{(203.12 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}) \cdot (1.8 \text{ hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{propano} = 3.61 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 13 mm a una temperatura de funcionamiento de 60 °C

$$(x_0 - x_f) \cdot s = (Y_{2-3} - Y_2) \cdot G \cdot t_{operc}$$

$$(11 - 0.41) \cdot (0.05) = (0.029 - 0.019) \cdot G \cdot (1.7)$$

$$G = \frac{(11 - 0.41) \cdot (0.05)}{(0.029 - 0.019) \cdot (1.7)}$$

$$G = 48.13 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hr}}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + 0.3 Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2aire} - H_{G1aire})$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (48.13) \cdot (26.271 - 18.809)$$

$$Q_{entregado} = 510 \frac{kcal}{hr}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{propano} = \frac{(Q_{entregado}) \cdot (t_{operación})}{\tau_{propano}}$$

$$m_{propano} = \frac{\left(510 \frac{kcal}{hr}\right) \cdot (0.1.10 hr)}{101.264 \frac{kcal}{hr}}$$

$$m_{propano} = 5.54 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 19 mm a una temperatura de funcionamiento de 40 °C

$$(x_0 - x_f) \cdot s = (Y_{2-3} - Y_2) \cdot G \cdot t_{operc}$$

$$(15 - 0.41) \cdot (0.05) = (0.022 - 0.019) \cdot G \cdot (6)$$

$$G = \frac{(15 - 0.41) \cdot (0.05)}{(0.022 - 0.019) \cdot (6)}$$

$$G = 40.52 \frac{kg \text{ aire } sec}{hr}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + 0.3 Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2aire} - H_{G1aire})$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (40.52) \cdot (21.295 - 18.809)$$

$$Q_{entregado} = 143.06 \frac{kcal}{hr}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(Q_{\text{entregado}} \right) \cdot \left(t_{\text{operación}} \right)}{\tau_{\text{propano}}}$$

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(143.06 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} \right) \cdot (6\text{hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{\text{propano}} = 8.47 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 19 mm a una temperatura de funcionamiento de 50 °C

$$\left(x_0 - x_f \right) \cdot s = \left(Y_{2-3} - Y_2 \right) \cdot G \cdot t_{\text{operc}}$$

$$(15 - 0.41) \cdot (0.05) = (0.026 - 0.019) \cdot G \cdot (2.5)$$

$$G = \frac{(15 - 0.41) \cdot (0.06)}{(0.026 - 0.019) \cdot (2.5)}$$

$$G = 41.68 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hr}}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{\text{entregado}} = G \left(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}} \right) + Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{entregado}} = G \left(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}} \right) + 0.3 Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{entregado}} = 1.42 (G) \cdot \left(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}} \right)$$

$$Q_{\text{entregado}} = 1.42 (41.68) \cdot (23.783 - 18.809)$$

$$Q_{\text{entregado}} = 270.75 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(Q_{\text{entregado}} \right) \cdot \left(t_{\text{operación}} \right)}{\tau_{\text{propano}}}$$

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(270.75 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} \right) \cdot (2.5 \text{ hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{\text{propano}} = 6.68 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 19 mm a una temperatura de funcionamiento de 60 °C

$$\left(x_0 - x_f\right) \cdot s = \left(Y_{2-3} - Y_2\right) \cdot G \cdot t_{\text{operc}}$$

$$(15 - 0.41) \cdot (0.05) = (0.029 - 0.019) \cdot G \cdot (1.7)$$

$$G = \frac{(15 - 0.41) \cdot (0.05)}{(0.029 - 0.019) \cdot (1.7)}$$

$$G = 42.91 \frac{\text{kg aire sec o}}{\text{hr}}$$

Cálculo del calor entregado

$$Q_{\text{entregado}} = G(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}}) + Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{entregado}} = G(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}}) + 0.3 Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{entregado}} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}})$$

$$Q_{\text{entregado}} = 1.42 (42.91) \cdot (26.271 - 18.809)$$

$$Q_{\text{entregado}} = 454.69 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Cálculo de la masa del combustible consumido

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(Q_{\text{entregado}}\right) \cdot \left(t_{\text{operación}}\right)}{\tau_{\text{propano}}}$$

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(454.69 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}\right) \cdot (1.7 \text{ hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{\text{propano}} = 7.63 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 24 mm a una temperatura de funcionamiento de 40 °C

$$\left(x_0 - x_f\right) \cdot s = \left(Y_{2-3} - Y_2\right) \cdot G \cdot t_{\text{operc}}$$

$$(14 - 0.5) \cdot (0.05) = (0.022 - 0.019) \cdot G \cdot (8.20)$$

$$G = \frac{(14 - 0.5) \cdot (0.05)}{(0.022 - 0.019) \cdot (8.20)}$$

$$G = 27.62 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hr}}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{\text{entregado}} = G(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}}) + Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{entregado}} = G(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}}) + 0.3 Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{entregado}} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}})$$

$$Q_{\text{entregado}} = 1.42 (27.62) \cdot (21.295 - 18.809)$$

$$Q_{\text{entregado}} = 97.50 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{\text{propano}} = \frac{(Q_{\text{entregado}}) \cdot (t_{\text{operación}})}{\tau_{\text{propano}}}$$

$$m_{\text{propano}} = \frac{(97.50 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}) \cdot (8.20 \text{ hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{\text{propano}} = 7.89 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 24 mm a una temperatura de funcionamiento de 50 °C

$$(x_0 - x_f) \cdot s = (Y_{2-3} - Y_2) \cdot G \cdot t_{\text{operc}}$$

$$(14 - 0.5) \cdot (0.05) = (0.026 - 0.019) \cdot G \cdot (4.15)$$

$$G = \frac{(14 - 0.5) \cdot (0.05)}{(0.026 - 0.019) \cdot (4.15)}$$

$$G = 23.23 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hr}}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{\text{entregado}} = G(H_{G2\text{aire}} - H_{G1\text{aire}}) + Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + 0.3 Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2aire} - H_{G1aire})$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (23.23) \cdot (23.783 - 18.809)$$

$$Q_{entregado} = 164.11 \frac{kcal}{hr}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{propano} = \frac{(Q_{entregado}) \cdot (t_{operación})}{\tau_{propano}}$$

$$m_{propano} = \frac{\left(164.11 \frac{kcal}{hr}\right) \cdot (4.15 hr)}{101.264 \frac{kcal}{hr}}$$

$$m_{propano} = 6.72 \text{ kg}$$

Balance para la cascara obtenido de la malla de 24 mm a una temperatura de funcionamiento de 60 °C

$$(x_0 - x_f) \cdot s = (Y_{2-3} - Y_2) \cdot G \cdot t_{operc}$$

$$(15 - 0.5) \cdot (0.05) = (0.029 - 0.019) \cdot G \cdot (2.2)$$

$$G = \frac{(15 - 0.5) \cdot (0.05)}{(0.029 - 0.019) \cdot (2.2)}$$

$$G = 32.95 \frac{kg_{aire \text{ seco}}}{hr}$$

Calculo del calor entregado

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = G(H_{G2aire} - H_{G1aire}) + 0.3 Q_{perdido}$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (G) \cdot (H_{G2aire} - H_{G1aire})$$

$$Q_{entregado} = 1.42 (32,95) \cdot (26.271 - 18.809)$$

$$Q_{entregado} = 349.18 \frac{kcal}{hr}$$

Calculo de la masa del combustible consumido

$$m_{\text{propano}} = \frac{(Q_{\text{entregado}}) \cdot (t_{\text{operación}})}{\tau_{\text{propano}}}$$

$$m_{\text{propano}} = \frac{\left(349.18 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}\right) \cdot (2.2 \text{ hr})}{101.264 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}$$

$$m_{\text{propano}} = 7.58 \text{ kg}.$$

ANEXO III

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL SECADO DE LAS CASCARAS DE CAMU-CAMU

A continuación se muestran las etapas (Fotos) seguidas en el diagrama de flujo para secar la cascara de camu-camu y concentrar el ácido ascórbico (vitamina C).

FOTO N° 01 MATERIA PRIMA: CAMU-CAMU



FOTO N° 02 SELECCIÓN/CLASIFICACIÓN



FOTO N° 03 LAVADO



FOTO N° 04 PULPEADO



FOTO N° 05 PRE SECADO (secador de bandejas)



FOTO N° 06 DESHIDRATACIÓN (lecho fluidizado)



FOTO N° 07 CASCARA SECA



FOTO N° 08 TRANSFORMACION (en harinas, etc)



ANEXO IV

PESOS REGISTRADOS DURANTE LAS EXPERIENCIAS DE SECADO EN EL LECHO FLUIDIZADO POR TAMAÑOS DE MUESTRAS

Los datos obtenidos en las tablas siguientes son empleados en la elaboración de las cinéticas de secado de la cascara de camu-camu.

MUESTRA CHICA

T°: 40 °C

Malla: 13 mm

Velocidad de aire: 2.9 m/s.

Peso muestra seca: 0.0156 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.332
0.020	0.329
0.200	0.295
0.500	0.255
1.000	0.216
2.000	0.197
3.000	0.174
4.000	0.168
5.000	0.164
6.000	0.156

T°: 50 °C

Malla: 13 mm

Velocidad de aire: 2.9 m/s.

Peso muestra seca: 0.0426 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.059
0.033	0.056
0.067	0.053
0.167	0.051
0.200	0.049
0.250	0.047
0.417	0.047
0.483	0.045
0.567	0.044
0.650	0.044
0.800	0.043
0.883	0.043

T°: 60 °C

Malla: 13 mm

Velocidad de aire: 2.9 m/s.

Peso muestra seca: 0.041 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.054
0.033	0.053
0.050	0.051
0.083	0.050
0.117	0.049
0.133	0.049
0.200	0.048
0.283	0.047
0.333	0.046
0.400	0.046
0.467	0.045
0.600	0.044
0.783	0.044
0.867	0.044
1.033	0.043
1.200	0.041

MUESTRA MEDIANA

T°: 40 °C

Malla: 19 mm

Velocidad de aire: 3.1 m/s.

Peso muestra seca: 0.029 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.059
0.020	0.057
0.030	0.055
0.070	0.054
0.120	0.052
0.150	0.051
0.200	0.049
0.270	0.048
0.320	0.047
0.420	0.046
0.450	0.045
0.500	0.044
0.580	0.043
0.670	0.043
0.750	0.041
0.830	0.041
0.920	0.040
1.000	0.040
2.000	0.032
3.000	0.031
4.000	0.030
5.000	0.029
5.500	0.029

T°: 50 °C

Malla: 19 mm

Velocidad de aire: 3.1 m/s.

Peso muestra seca: 0.105 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.160
0.030	0.150
0.050	0.150
0.080	0.140
0.120	0.140
0.150	0.130
0.200	0.130
0.280	0.130
0.330	0.120
0.400	0.120
0.470	0.120
0.600	0.120
0.780	0.110
0.870	0.110
1.030	0.110
1.200	0.110
1.370	0.110
1.530	0.110
1.700	0.110
1.870	0.110
2.030	0.110
2.200	0.110
2.370	0.110
2.530	0.110
2.700	0.110
2.870	0.110
3.030	0.110
3.200	0.110

T°: 60 °C

Malla: 19 mm

Velocidad de aire: 3.1 m/s.

Peso muestra seca: 0.105 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.170
0.030	0.150
0.050	0.150
0.080	0.140
0.120	0.130
0.150	0.130
0.200	0.120
0.280	0.120
0.330	0.120
0.400	0.120
0.470	0.120
0.600	0.110
0.780	0.110
0.870	0.110
1.030	0.110
1.200	0.110
1.370	0.110
1.530	0.110
1.700	0.110
1.870	0.110
2.030	0.110
2.200	0.110
2.370	0.110
2.530	0.110
2.700	0.110

MUESTRA GRANDE

T°: 40 °C

Malla: 24 mm

Velocidad de aire: 3.3 m/s.

Peso muestra seca: 0.151 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m².

Tiempo (hr)	Peso (kg)	Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.333	0.483	0.240
0.017	0.325	0.500	0.239
0.033	0.318	0.517	0.236
0.050	0.314	0.533	0.235
0.067	0.308	0.550	0.234
0.083	0.304	0.567	0.233
0.100	0.302	0.583	0.232
0.117	0.296	0.617	0.227
0.133	0.291	0.650	0.226
0.150	0.286	0.683	0.224
0.167	0.282	0.717	0.222
0.183	0.279	0.750	0.221
0.200	0.275	0.783	0.218
0.217	0.272	0.817	0.217
0.233	0.271	0.850	0.216
0.250	0.267	0.883	0.215
0.267	0.264	0.917	0.213
0.283	0.262	0.950	0.212
0.300	0.259	0.983	0.211
0.317	0.257	1.017	0.210
0.333	0.254	1.100	0.205
0.350	0.252	1.183	0.202
0.367	0.250	1.267	0.200
0.383	0.248	1.350	0.198
0.400	0.247	1.433	0.195
0.417	0.245	1.517	0.191
0.433	0.244	1.600	0.188
0.450	0.242	1.683	0.187
0.467	0.241	1.767	0.186

Tiempo (hr)	Peso (kg)
1.850	0.184
1.933	0.183
2.017	0.181
2.100	0.180
2.183	0.179
2.267	0.179
2.350	0.178
2.433	0.176
2.517	0.175
2.600	0.175
2.683	0.174
2.767	0.174
2.850	0.173
2.933	0.172
3.017	0.172
3.100	0.169
3.183	0.169
3.267	0.168
3.350	0.166
3.433	0.165
3.517	0.164
3.600	0.163
3.683	0.163
3.767	0.162
3.850	0.161
3.933	0.159
4.017	0.159
4.100	0.158
4.183	0.158

T°: 50 °C

Malla: 24 mm

Velocidad de aire: 3.3 m/s.

Peso muestra seca: 0.151 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m²

Tiempo (hr)	Peso (kg)	Tiempo (hr)	Peso (kg)
0.000	0.315	1.333	0.154
0.017	0.308	1.417	0.148
0.033	0.301	1.500	0.144
0.050	0.298	1.583	0.143
0.067	0.292	1.667	0.140
0.083	0.289	1.750	0.137
0.117	0.276	1.833	0.132
0.150	0.268	1.917	0.130
0.183	0.263	2.000	0.128
0.217	0.257	2.083	0.126
0.250	0.252	2.167	0.123
0.283	0.246	2.250	0.121
0.317	0.239	2.333	0.120
0.350	0.237	2.417	0.119
0.383	0.232	2.500	0.116
0.417	0.230	2.583	0.115
0.450	0.225	2.667	0.114
0.483	0.220	2.750	0.113
0.517	0.216	2.833	0.110
0.550	0.213	2.917	0.109
0.583	0.209	3.000	0.108
0.617	0.203	3.083	0.106
0.650	0.202	3.167	0.105
0.683	0.199	3.250	0.104
0.717	0.195	3.333	0.103
0.750	0.189	3.417	0.103
0.833	0.181	3.500	0.103
0.917	0.173	3.583	0.102
1.000	0.169	3.667	0.101
1.083	0.166	3.750	0.100
1.167	0.164	3.833	0.100
1.250	0.160	3.917	0.099

Tiempo (hr)	Peso (kg)
4.000	0.098
4.083	0.097
4.167	0.096
4.250	0.096
4.333	0.096
4.417	0.096
4.500	0.096

T°: 60 °C

Malla: 24 mm

Velocidad de aire: 3.3 m/s.

Peso muestra seca: 0.094 kg.

Diámetro del cilindro: 10 cm.

Área: 0.007854 m²

Tiempo (Hr)	Peso (kg)
0.00	0.15
0.03	0.14
0.05	0.14
0.08	0.13
0.12	0.13
0.15	0.13
0.20	0.12
0.28	0.12
0.33	0.11
0.40	0.11
0.47	0.11
0.60	0.11
0.78	0.10
0.87	0.10
1.03	0.10
1.20	0.10
1.37	0.10
1.53	0.10
1.70	0.10
1.87	0.10
2.03	0.10
2.20	0.10
2.37	0.10
2.53	0.10
2.70	0.09
2.87	0.09
3.03	0.09
3.20	0.09
3.37	0.09

ANEXO V



Facultad de
Industrias Alimentarias
Planta Piloto
Centro de Prestación de Servicio en Control de
Calidad de Alimentos
"CEPRESE COCAL"

Laboratorio de Control de Calidad de Alimentos

INFORME DE ENSAYO N° 001-2013

I. DATOS DEL SOLICITANTE

Nombre	JOSE RAUL VALCARCEL GONZALES
Dirección	Pasaje Victoria N° 125
Telefax	

II. DATOS DEL SERVICIO

N° de solicitud de servicio	01-2013
Fecha de solicitud de servicio	01/10/13
Servicio solicitado	Análisis Físico Químico

III. DATOS DEL PRODUCTO

Nombre del producto	<i>CASCARA DE CAMU CAMU DESHIDRATADOS A 40°C</i>
Numero de muestra	UNO (01)
Tamaño de muestra	100 gr
Código de muestra	01 Temp. 40°C
Código	
Tamaño del lote	
Sabor del producto	--
Forma de presentación	Bolsa de polietileno
Fecha de producción	--
Fecha de vencimiento	--

IV. RESULTADOS DEL ENSAYO

ENSAYO FISICO QUIMICO	RESULTADOS %	REQUISITOS %
Humedad	12.72	
Ceniza	2.89	
Grasa	6.95	
Proteina (Factor 6.25)	4.99	
Carbohidratos	72.45	
Calorías	372.31	
Vitamina "C"	15870 mg/100g	





NORMA QUE REGULA EL CONTROL DE CALIDAD

N.T.P 206. 011
N.T.P 206. 012
A.O.A.C 960. 39
ITINTEC-N.T.N 201.021
A.O.A.C 942.15

METODOS USADOS

- Gravimetría
- KJELDAHL
- Diferencia
- Calculo
- Volumetría

NOTA:

- Se prohíbe la reproducción total o parcial del presente documento, sin la autorización de CEPRESE – COCAL FIIA-UNAP (Laboratorios).

Iquitos, 08 de Octubre del 2013

ING. ALFONSO SHAPIAMA VASQUEZ
Coordinador de los Módulos de Enseñanza, Investigación,
Producción y de Servicios FIA-UNAP



ING. LUIS SILVA RAMOS
Jefe del Laboratorio de Control de Calidad
Alimentos-FIA-UNAP



UNAP

Facultad de
Industrias Alimentarias
Planta Piloto
Centro de Prestación de Servicio en Control de
Calidad de Alimentos
"CEPRESE COCAL"

Laboratorio de Control de Calidad de Alimentos

INFORME DE ENSAYO N° 002-2013

I. DATOS DEL SOLICITANTE

Nombre	JOSE RAUL VALCARCEL GONZALES
Dirección	Pasaje Victoria N° 125
Telefax	

II. DATOS DEL SERVICIO

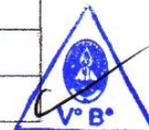
N° de solicitud de servicio	02-2013
Fecha de solicitud de servicio	01/10/13
Servicio solicitado	Análisis Físico Químico

III. DATOS DEL PRODUCTO

Nombre del producto	<i>CASCARA DE CAMU CAMU DESHIDRATADOS A 50°C</i>
Numero de muestra	UNO (01)
Tamaño de muestra	100 gr.
Código de muestra	02 Temp. 50°C
Código	
Tamaño del lote	
Sabor del producto	-.-
Forma de presentación	Bolsa de polietileno
Fecha de producción	-.-
Fecha de vencimiento	-.-

IV. RESULTADOS DEL ENSAYO

ENSAYO FISICO QUIMICO	RESULTADOS %	REQUISITOS %
Humedad	10.22	
Ceniza	2.08	
Grasa	6.00	
Proteína (Factor 6.25)	6.90	
Carbohidratos	74.79	
Calorías	371.80	
Vitamina "C"	13,181.00 mg/100g	





NORMA QUE REGULA EL CONTROL DE CALIDAD

N.T.P 206. 011
N.T.P 206. 012
A.O.A.C 960. 39
ITINTEC-N.T.N 201.021
A.O.A.C 942.15

METODOS USADOS

- Gravimetría
- KJELDAHL
- Diferencia
- Calculo
- Volumetría

NOTA:

- Se prohíbe la reproducción total o parcial del presente documento, sin la autorización de CEPRESE – COCAL FIIA-UNAP (Laboratorios).

Iquitos, 08 de Octubre del 2013



ING. ALFONSO SHAPIAMA VASQUEZ
Coordinador de los Módulos de Enseñanza, Investigación,
Producción y de Servicios FIIA-UNAP

ING. LUIS SILVA RAMOS
Jefe del Laboratorio de Control de Calidad,
Alimentos-FIIA-UNAP



UNAP

Facultad de
Industrias Alimentarias
Planta Piloto
Centro de Prestación de Servicio en Control de
Calidad de Alimentos
"CEPRESE COCAL"

Laboratorio de Control de Calidad de Alimentos

INFORME DE ENSAYO N° 003-2013

I. DATOS DEL SOLICITANTE

Nombre	JOSE RAUL VALCARCEL GONZALES
Dirección	Pasaje Victoria N° 125
Telefax	

II. DATOS DEL SERVICIO

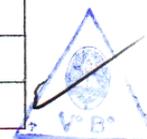
N° de solicitud de servicio	03-2013
Fecha de solicitud de servicio	01/10/13
Servicio solicitado	Análisis Físico Químico

III. DATOS DEL PRODUCTO

Nombre del producto	<i>CASCARA DE CAMU CAMU DESHIDRATADOS A 60°C</i>
Numero de muestra	UNO (01)
Tamaño de muestra	100 gr
Código de muestra	03 Temp. 60°C
Código	
Tamaño del lote	-.-
Sabor del producto	-.-
Forma de presentación	Bolsa de polietileno
Fecha de producción	-.-
Fecha de vencimiento	-.-

IV. RESULTADOS DEL ENSAYO

ENSAYO FISICO QUIMICO	RESULTADOS %	REQUISITOS %
Humedad	7.53	
Ceniza	1.85	
Grasa	6.81	
Proteina (Factor 6.25)	5.81	
Carbohidratos	77.95	
Calorías	396.53	
Vitamina "C"	12,133.00 mg/100g	





UNAP

Facultad de
Industrias Alimentarias
Planta Piloto
Centro de Prestación de Servicio en Control de
Calidad de Alimentos
"CEPRESE COCAL"

NORMA QUE REGULA EL CONTROL DE CALIDAD

N.T.P 206. 011
N.T.P 206. 012
A.O.A.C 960. 39
ITINTEC-N.T.N 201.021
A.O.A.C 942.15

METODOS USADOS

- Gravimetría
- KJELDAHL
- Diferencia
- Calculo
- Volumetría

NOTA:

- Se prohíbe la reproducción total o parcial del presente documento, sin la autorización de CEPRESE – COCAL FIAA-UNAP (Laboratorios).

Iquitos, 08 de Octubre del 2013



ING. ALFONSO SHAPIAMA VASQUEZ
Coordinador de los Módulos de Enseñanza, Investigación,
Producción y de Servicios FIA-UNAP



ING. LUIS SILVA RAMOS
Jefe del Laboratorio de Control de Calidad
Alimentos-FIA-UNAP