

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE GRANOS DE CACAO
FERMENTADO, EN UN SECADOR DE BANDEJAS CON CONVECCIÓN
FORZADA DE AIRE”**

Realizado por:

Br. GEORGINA MIRANDA LARA

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como Requisito
Parcial para optar al Título de

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, Abril de 2011.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE GRANOS DE CACAO
FERMENTADO, EN UN SECADOR DE BANDEJAS CON CONVECCIÓN
FORZADA DE AIRE”**

Asesor

Ing. Químico Lucas Álvarez Martínez (PhD.)

Asesor Académico

Barcelona, Abril de 2011.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE GRANOS DE CACAO
FERMENTADO, EN UN SECADOR DE BANDEJAS CON CONVECCIÓN
FORZADA DE AIRE”**

Ing. Quím. Lucas Álvarez Martínez, PhD.

Asesor Académico

Ing. Quím. Héctor Silva, M. Sc.

Jurado Principal

Ing. Quím. Yaneis Obando,
M.Sc

Jurado Principal

Barcelona, Abril de 2011.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 de reglamento de trabajo de grado:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién deberá participarlo previamente al Consejo Universitario para su autorización”.



DEDICATORIA

Durante estos cinco años de lucha constante, de gratas vivencias, de momentos de éxitos y también de angustias y desesperanza para poder cumplir mis objetivos y así poder alcanzar uno de mis mas grandes anhelos, culminar mi carrera, los deseos de superarme y de lograr mi meta eran tan grandes que logre vencer todos los obstáculos y es por ello que debo dedicar este triunfo a quienes en todo momento me llenaron de amor y apoyo, y por sobre todo me brindaron su amistad:

A Dios Todopoderoso por iluminarme el camino a seguir y que siempre está conmigo en los buenos y sobre todo en los malos momentos.

A mi abuelos Jorge Miranda y Miguel Lara, a ustedes mis viejitos que Dios los tenga en su santa gloria, fueron hombres luchadores y trabajadores, abuelito Jorge aunque te fuiste cuando yo estaba pequeña, siempre recordaré que me enseñaste, que cuando se siente dolor hay que tener fortaleza y amor para seguir adelante y sobre todo el de la familia. A mi Miguelito, que dolor fue tu partida y tan inesperada para mí viejito, siempre te miré fuerte, recto y tan lleno de vida, me hubiese gustado que estuvieras en físico celebrando mi graduación, pero sé que estarán conmigo de espíritu dándome un fuerte abrazo y la mejor de las bendiciones. Siempre los recordaré todos los días como los mejores hombres de mi vida.

A mi padre: Eduardo Miranda, pilar fundamental en mi vida, digno de ejemplo de trabajo y constancia, quien ha brindado todo el apoyo necesario para alcanzar mis metas y sueños, y ha estado allí cada día de mi vida, compartiendo los buenos y los malos ratos desde el día en que nací....Te quiero muchísimo y gracias.



A mis hermanos Jorge, Mariangel, Margarita y especialmente a mi hermanito Eduardo Ignacio, que por ser la mayor es mi deber marcar el ejemplo, pero nunca es tarde para incentivar el deseo del sueño anhelado... Este triunfo lo comparto con ustedes.

A toda mi gran familia Nicaragüense, abuela Otilia, tías: Georgina y Carla, tíos: Jorge, Mario, Luis, Hugo y Marlon; a mis primos: Jorge Andrés, Marito, Eduardo Carlos, Amaury, Jorge Alberto, Luisa Fernanda, Clarys Lucía, Ariel y los chiquitos de la casa. Gracias a ustedes por estar al pendiente de nosotros a pesar de la distancia, de darnos esas palabras de aliento así sea por un correo, hacernos sentir queridos, los amo y espero algún día poder compartir este mérito con ustedes.

A mis grandes amigos, que han sido más que una familia para mi, con las cuales he compartido tantas momentos, y sé que puedo contar con ellos al igual que ellos conmigo, Aismar, Jaigimar, Tatiana, Wendys, Claudia, Roselyn, Julio, Mely, Titis, Cesar, Carlos, Rara y Zuly, aunque ya no estemos tan juntos como antes, siempre estarán en mi corazón y se, que sin su apoyo y compañía estos cinco años no hubiesen sido lo mismo.

A mis amigos de bachillerato, Rossanna, Nelson, Hidelmarys, Aismar, Gisselle, Pepeto, Jairo, Juan (el chino), Andreina, Ensueño y Jesús Omar, gracias por todavía permitirme ser parte de sus vidas, siguen y seguirán siendo mis mejores amigos, mis mejores recuerdos de esta etapa tan maravillosa fueron a su lado.

A todos los amigos de la familia: Oswaldo, mi bello y querido amigo Sergio, Sr. Carlos, Sra. Nurami, Sra. Raiza, Kenny, Aurita, Sra. Crucita, Sr. Gleciano y el Sr. Julio. Gracias por siempre brindarnos apoyo en todo momento. Siempre se les mantiene presente en nuestras vidas.



AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas especiales que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón. Sin importar donde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

A mi Dios todopoderoso por haberme iluminado y proporcionado con salud e inteligencia para culminar mis metas. Gracias a ti por estar siempre a mi lado. Este éxito es tuyo porque sin ti, absolutamente nada hubiese sido posible. Siempre haz de mí tu voluntad señor.

A mi padre Eduardo Miranda, mis palabras jamás alcanzarán lo orgullosa que estoy de que seas mi padre, sin ti, ni en sueño esto hubiese sido posible. Mil gracias por brindarme tu apoyo moral y económico. Gracias a tu constancia, amor y consejos logré lo que me propuse hace muchos años. Cuentas y contarás conmigo toda la vida. TE AMO.

A mi madre María Lara y su esposo José Marcano, gracias por tenderme la mano cuando siempre la necesité, por todo el apoyo y paciencia que me brindaron, siempre he sabido que en medio de la adversidad puedo contar con ustedes. Gracias mamá por haberme dado la vida, te amo, te valoro y te respeto, por fin voy a realizar mi sueño, tu sueño, nuestro sueño de convertirme en ingeniera; así que, colega nos vemos en el trabajo.

A mis hermanos Eduardo Ignacio, Jorge y Mariangel, por compartir conmigo, por darme tantos momentos de felicidad y brindarme su apoyo. Espero haber podido ser de gran ejemplo para ustedes.



A mi novio, José Daniel Villarroel, gracias mi loquito por el amor que me has brindado. Gracias por tu apoyo, paciencia y comprensión y hasta por tus regaños cuando me desesperaba en la realización de la misma. Hoy me gradúo yo, pero el esfuerzo y el mérito es de los dos. Gracias por hacerme realmente feliz. TE AMO.

A Mely, gracias por los consejos y regaños, con los que a tu modo me dices que me quieres. Eres una mujer muy fuerte y un ejemplo de buena hermana. Gracias por ser mi mejor amiga y por la confianza que invariablemente me has demostrado. Quiero que sepas que siempre podrás contar conmigo y que te quiero muchísimo.

A Wendys, gracias amiga por compartir momentos inolvidables de la carrera, vimos las materias más importantes y las más emocionantes de nuestra carrera, bastante café y trasnochos que tomamos y pasamos juntas. Gracias por aguantarme en los momentos más bipolares que he tenido. Siempre he dicho que eres la persona más lechuaaaaa que conozco jajajaja, espero esa suerte te dure siempre amiga. Te adoro tal cuál eres y te adoraré siempre mi hermana querida.

A todos mis profes no sólo de la carrera sino de toda la vida, mil gracias porque de alguna forma forman parte de lo que ahora soy. Especialmente al Dr. Lucas Álvarez, tutor académico, gracias por toda su paciencia y su valioso tiempo, conocimientos que me sirvieron de gran ayuda. Gracias por todo el apoyo, considero que usted fue mi mejor elección, porque me ha servido como ejemplo, y deseo contar siempre con su sabiduría y amistad.

Al Sr. Oswaldo Fariñas, gracias por su amistad incondicional, por haberme llevado en un momento crucial a buscar la materia prima que hoy se expone y se plasma en esta tesis, sin usted nada de esto hubiese sido posible, eternamente agradecida.



Gracias a la Fundación de Ciencias y Tecnología (FUNDACITE) sucre, por haberme orientado y prestado información para la realización de este presente trabajo.

Gracias a la comunidad de haciendas “Cooperativa Cacaotera 323”, por haberme prestado sus instalaciones y especialmente al Sr. José Rodríguez, por todos los consejos e informaciones proporcionadas y por su espíritu tan colaborador.



RESUMEN

En este proyecto se evaluó el proceso de secado de granos de cacao fermentado (*Theobroma cacao L.*), en un secador de bandejas con convección forzada de aire. Las muestras estudiadas fueron suministradas por la unidad de producción comunitaria “Cacao de paria 338”, ubicada en la localidad de Río Caribe, estado Sucre. La caracterización física de la semilla de cacao fue realizada mediante la evaluación de las variables: peso, dimensiones e índice de las semillas. Para cumplir con el objetivo planteado se determinó la cinética de secado a tres temperaturas (50, 60 y 70 °C) hasta alcanzar la humedad de equilibrio a las condiciones empleadas, y el efecto de la variación del espesor del lecho de granos con una y dos capas. Todas las cinéticas de secado se ajustaron a un modelo de tipo exponencial, observándose además el período de velocidad constante y el período de velocidad decreciente en dos etapas (períodos postcrítico I y postcrítico II) del proceso de secado para ambos espesores de 1,03 y 2,41 cm. En el período de secado de velocidad constante los valores de la pendiente (velocidad de secado) fueron aumentando a medida que aumentó la temperatura del secador, obteniéndose la mayor velocidad a 70 °C (0,3060 y 0,2640 g agua/g ss.h) y la menor a 50 °C (0,1980 y 0,1380 g agua/g ss.h) respectivamente, lo cual concuerda con los datos reportados de las propiedades termodinámicas, en donde a mayor temperatura mayor energía cinética de las moléculas del agua. Los tiempos transcurridos necesarios hasta alcanzar los períodos de secado a velocidad decreciente fueron menores a temperaturas más altas. Los resultados revelaron una gran variabilidad entre los tipos de zonas comparadas (Cumboto, Cuyagua y Barlovento), presentando la zona estudiada las semillas más largas y de mayores espesores. Las muestras de cacao fermentado presentaron aumentos de humedad, cenizas,



proteínas y valores inferiores de pH. Durante el secado disminuyeron la humedad, proteínas, cenizas, pero con incrementos de pH; mientras que el tamaño de las semillas se redujo debido a la pérdida de humedad mediante el proceso de evaporación. En conclusión, las propiedades del grano seco variaron en función de los factores evaluados, en tanto que las características químicas dependieron de la condición del grano.



CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	x
CONTENIDO	xii
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABLAS	xx
CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.2.1 Objetivo general:.....	6
1.2.2 Objetivos específicos:	6
CAPITULO 2.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.2 EL CACAO: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES	8
2.2.1 Clasificación taxonómica.....	8
2.2.2 Características principales de la planta	8
2.2.3 Características de los principales cacaos cultivados	11
2.2.4 Características del fruto	15
2.2.5 Características de la semilla	16



2.2.6 Zonas productoras de cacao en Venezuela.....	18
2.2.7 Fermentación	20
2.3 EL PROCESO DE SECADO.....	26
2.3.1 Generalidades sobre el proceso de secado.....	26
2.3.2 Tratamiento de sólidos en los secadores.....	26
2.3.3 Contacto gas-sólido	29
2.3.4 Clasificación de los secadores.....	32
2.3.5 Tipos de secadores.....	33
2.3.6 Cartas psicrométricas	40
2.3.7 Tipos de humedad en el proceso de secado	42
2.3.8 Cinética de secado	45
2.3.9 Balanza de determinación de humedad (OHAUS).....	48
2.3.10 Variables que intervienen en el proceso de secado de bandeja ..	49
2.3.11 Determinación de las ecuaciones de transferencia de masa en el proceso de secado.....	51
2.3.12 Determinación de las ecuaciones de transferencia de calor en el proceso de secado.....	53
2.4 DIFUSIÓN DEL AGUA EN SÓLIDOS EN EL PROCESO DE SECADO.....	56
2.4.1 Proceso de difusión	56
2.4.2 Tipos de difusión en sólidos.....	57
2.4.3 Relación entre la difusión y la transferencia de calor.....	60
2.4.4 Proceso de difusión en el secado de sólidos	61
2.4.5 Teoría capilar empleada en el proceso de secado	62
CAPITULO 3.....	65
DESARROLLO DEL TRABAJO	65



3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	65
3.1.1 Propiedades fisicoquímicas del grano fermentado de cacao.	65
3.1.2 Determinación del efecto de temperatura de la cámara del secador de bandeja sobre el tiempo de secado de los granos de cacao.	74
3.1.3 Estudio del efecto de la variación del espesor del lecho de granos fermentados de cacao sobre el tiempo en un secador de bandejas con convección forzada de aire.	75
3.1.4 Caracterización de las curvas de velocidad de secado de los granos de cacao en función de sus contenidos de humedad libre.	76
3.1.5 Comparación de las propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidratada de cacao, con las propiedades del cacao fermentado.	78
3.2 MATERIALES, EQUIPOS Y SUSTANCIAS UTILIZADOS	78
3.2.1 Materiales	78
3.2.2 Equipos	79
3.2.3 Sustancias	80
3.3 MUESTRA DE CÁLCULO	81
3.3.1 Cálculo de las propiedades fisicoquímicas para el cacao fermentado	81
3.3.2 Construcción de la curva de velocidad de secado.	101
3.3.3 Determinación de los tiempos de secado en función de la temperatura y de la variación del espesor.	108
3.3.4 Caracterización de las curvas de velocidad de secado en función de sus contenidos de humedad libre crítica.	112
3.3.5 Propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidratada de cacao.	112
CAPITULO 4	113
RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	113



4.1.1	Análisis de las propiedades fisicoquímicas del cacao fermentado	113
4.1.2	Curvas de velocidad de secado del grano de cacao.....	121
4.1.3	Efecto de la variación del espesor del lecho de granos sobre la temperatura y tiempo de secado.....	128
4.1.4	Variación de la velocidad de secado de los granos de cacao en función de sus contenidos de humedad libre.....	130
4.1.5	Comparación de las propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidrata de cacao, con las propiedades del cacao fermentado.	133
4.2	CONCLUSIONES	144
4.3	RECOMENDACIONES	145
	BIBLIOGRAFÍA.....	146
	ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO A.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO B.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO C.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO D.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO E.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO F.....	¡Error! Marcador no definido.
	METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:...	149



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Frutos de varias especies del género <i>Theobroma</i> [2].....	10
Figura 2.2 Diversidad de frutos del tipo Criollo Andino [2]	12
Figura 2.3 Diversidad de tamaños y colores del Criollo Porcelana [2].....	13
Figura 2.4 Cacao Criollo Pentágono rojo [2].....	13
Figura 2.5 Cacao Forastero de forma amelonada [3].	15
Figura 2.6 Corte anatómico de la semilla, señalando componentes celulares [2].....	17
Figura 2.7 Parte interior del cacao [1].....	18
Figura 2.8 Dibujo esquemático de una almendra de cacao en proceso de fermentación [2]	22
Figura 2.9 Fermentador Caucagua [1].....	23
Figura 2.10 Fermentador Reymol [1]	24
Figura 2.11 Fermentador Rohan [1].....	25
Figura 2.12 Rejilla inferior del fermentador trinitario [2]	26
Figura 2.13 Lecho estático (secador de bandejas) [8]	27
Figura 2.14 Lecho móvil dentro de un secador rotatorio con elevadores [8].....	27
Figura 2.15 Lecho fluidizado [8].....	28



Figura 2.16 Sólidos en condición diluida cerca de la parte superior de un secadero por aspersion [8]	29
Figura 2.17 Flujo paralelo del gas sobre un lecho estático [8]	30
Figura 2.18 Gas circulante que choca contra un objeto sólido de gran tamaño, siguiendo un flujo perpendicular, en un horno con transportador de rodillos [8]	30
Figura 2.19 Circulación de gas en flujo directo a través de un lecho de sólidos preformados, sobre un transportador de plataforma perforada [8].....	31
Figura 2.20 Flujo de corrientes paralelas de gas-sólidos en un transportador neumático de fase diluida y ascenso vertical [8].....	31
Figura 2.21 Flujo transversal de gas y sólidos en un secador por gravedad tipo cascada [8].....	32
Figura 2.22 Secador continuo de túnel [8]	34
Figura 2.23 Secador rotatorio [9]	35
Figura 2.24 Secador de tambor [9]	36
Figura 2.25 Secador de lecho fluidizado [8].....	37
Figura 2.26 Secador por aspersion [9].....	38
Figura 2.27 Secador de bandeja [10].....	40
Figura 2.28 Carta psicrométrica en sistema inglés de unidades [11].....	41
Figura 2.30 Humedad en base seca en función del tiempo [9]	45
Figura 2.31 Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constante [9]	46
Figura 2.32 Balanza Ohaus MB 200.	49



Figura 2.33 Comportamiento de secado de un sólido [12].....	49
Figura 2.34 Variaciones de la humedad del sólido en el tiempo, a distintas velocidades másicas del aire [12].....	50
Figura 2.35 Variación de la humedad del sólido (X) con el tiempo (t) , a distintas humedades del aire (Y) [12].....	50
Figura 2.36 Variación del tamaño del sólido versus el tiempo [12].....	51
Figura 2.38 Diagrama de flujo de un secador continuo [9].....	53
Figura 3.1 Crisoles con muestras en la mufla.....	68
Figura 3.2 Balones con la muestra en el equipo de extracción, sobre la placa de calentamiento.....	70
Figura 3.3 Muestras digeridas en tubos portamuestras.....	71
Figura 3.4 Recolección del destilado en el digestor Kjeldahl.....	72
Figura 3.5 Dedales de extracción colocados en el equipo Soxhlet.....	73
Figura 3.7 Muestras de granos de cacao seco a 60°C. a) monocapa b) bicapa.....	75
Figura 3.8 Muestras colocadas en el desecador.....	77
Figura 3.9 Psicrómetro utilizado para medir la temperatura de bulbo seco y húmedo.....	77
Figura 4.1 Granos de cacao. a) fresco con la cubierta mucilaginosa b) en el proceso de fermentación.....	114
Figura 4.2 Peso de las semillas de cacao de cuatro zonas diferentes de Venezuela.....	116
Figura 4.3 Índice de las semillas de cuatro zonas cacaoteras de Vzla.....	118



Figura 4.3 Curvas de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70°C. (monocapa).....	123
Figura 4.4 Curvas de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70°C. (bicapa).....	125
Figura 4.5 Curvas de velocidad de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70 °C (monocapa).	126
Figura 4.6 Curvas de velocidad de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70 °C (bicapa).....	127
Figura 4.7 Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad crítica.	131
Figura 4.8 Variación de la velocidad constante de secado en función de la temperatura de secado.	132
Figura 4.9 Comparación de desviaciones típicas de dos muestras utilizando Stargratics.....	136
Figura 4.10 Análisis gráfico estadístico de las humedades del cacao fermentado y seco.	138
Figura 4.11 Resumen estadístico señalando diferentes parámetros de evaluación para la grasa cruda.....	139
Figura 4.12 Porcentajes promedios de pH y acidez presentes en los granos de cacao fermentado y seco.	141
Figura 4.13 Histograma de frecuencia del cacao fermentado y secado para el análisis de almidón ($p < 0,05$).	142



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.- Grupos de cacaos cultivados [2].....	11
Tabla 2.2 Fermentadores de cacao y sus características [2].	23
Tabla 3.1 Normas COVENIN para la determinación de las propiedades físicoquímicas.	65
Tabla 4.1 Características físicas de las semillas de los granos de cacao fermentado de la localidad estudiada (Río Caribe) y otras zonas cacaoteras de Venezuela.	115
Tabla 4.2 Promedios de las características químicas del grano de cacao fermentado (porcentajes en base seca).....	119
Tabla 4.3 Duración de los períodos de secado en función de la temperatura y espesor	129
Tabla 4.4 Humedades libres críticas y velocidades de secado en función de las temperaturas.....	131
Tabla 4.6 Resultados de los parámetros físicoquímicos del cacao fermentado y seco. (Base seca)	134

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El cacao es una fruta de origen tropical con la que se produce el chocolate. Su origen es americano y se cree que surgió de las cuencas del Amazonas y del Orinoco, por los extensos cacaotales encontrados principalmente en las regiones boscosas del Río Negro y del Alto Orinoco. Sin embargo, se encuentran especies diferentes de cacao en las Guayanas, Brasil, Colombia, México y Centroamérica. Es un producto sabroso y muy nutritivo; se usa en la fabricación de bombones y chocolates en barras y tabletas, para consumirlos como golosinas o preparar otros alimentos y las bebidas achocolatadas frías o calientes. Por otra parte la manteca de cacao se usa en productos farmacéuticos como cicatrizante y en la cosmetología.

En Venezuela el cacao se cultiva en todos los climas cálidos, en terrenos franco-arcillosos, con buen drenaje y ricos en materia orgánica. Se debe plantar en época de lluvias, de mayo a octubre. Requiere calor, más no viento ni sol, por lo que se alterna con siembra del árbol de bucare o de plátano para darle sombra. Se cosecha durante todo el año pero la mayor producción es de noviembre a abril. El cacao venezolano posee gran fama por su calidad y el procesamiento de éste, se compone de dos etapas principales; fermentación y secado. Siendo el primero el proceso por medio del cual se da la calidad propia del cacao para hacer chocolate; se limpian las semillas, se mata el embrión y se da buena presentación a las almendras. Para ello se precisa de lugares acondicionados y bien ventilados. Cuando las

almendras no fermentan este proceso se realiza mal o en forma deficiente, se produce el llamado cacao corriente.

Durante el proceso, la acción combinada y balanceada de temperatura, alcoholes, ácidos, pH y humedad matan el embrión, disminuye el sabor amargo por la pérdida de theobromina y se producen las reacciones bioquímicas que forman el chocolate. La duración del sistema de fermentación no debe ser mayor de tres días para los cacaos criollos o de cotiledón blanco y de ocho para los cacaos forasteros o de cotiledón morado o púrpura. Existen varios métodos para realizar la fermentación, siendo los más empleados la fermentación en montones, en sacos, en cajas, el método Rohan y el empleo de tendales.

Existen distintas técnicas de secado pudiendo ser natural, aprovechando la temperatura de los rayos solares y obteniéndose almendras con mayor aroma, o un secado artificial mediante el empleo de estufas o secadoras mecánicas haciendo pasar una corriente de aire seco y caliente por la masa del cacao. El desarrollo del sabor continúa durante el proceso de secado y tostado, hasta llegar al producto final.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cacao (*Theobroma cacao L.*) constituye un producto agrícola de gran importancia económica y social. Actualmente el cacao se cultiva en más de veinticinco países, donde las mayores plantaciones del mundo se encuentran en África del Oeste, América Central, Sudamérica y Asia. Actualmente en Venezuela se consideran tres regiones productoras de cacao, como las principales; entre ellas se tiene la región Nororiental, la cual está considerada

como unas de los mayores productores de cacao a nivel nacional; la región Centro-Norte-Costera y la región Suroccidental.

Para garantizar la calidad del cacao es importante un buen manejo del cultivo que incluya una adecuada práctica post cosecha (fermentación y secado). El procesamiento post cosecha ha sido considerado una etapa crítica para todos los tipos de cacaos y es esencial para el desarrollo de un buen sabor y aroma a chocolate. Es también la etapa donde ocurre con frecuencia el deterioro de la calidad del grano. La correcta fermentación y secado del cacao es de suma importancia para la transformación industrial de este rubro en productos de alta calidad chocolatera. La fermentación del cacao tiene por objetivos: eliminar el mucílago que cubre al grano verde, desencadenar las reacciones bioquímicas y enzimáticas que favorecen la reducción del sabor amargo y la astringencia, desarrollar las sustancias precursoras del aroma y sabor, promover el cambio de color púrpura original de los cotiledones del grano a un color café, matar al embrión para evitar su germinación, y por último, separar los lóbulos del cotiledón que están fuertemente unidos para facilitar el secado en el interior del grano y permeabilizar las paredes celulares.[1]

Son varias las vías utilizadas para proceder a la fermentación del cacao; las formas más usuales incluyen el apilado de los granos en el piso de secado en cajas de madera, cestas, plataformas de desecación y el sistema de bandejas (fermentador Rohan).[1]

En efecto, el cacao es uno de los pocos alimentos que desarrolla sus cualidades de sabor, aroma y aspecto mediante la formación de compuestos precursores en un proceso de fermentación natural (anaeróbica y aeróbica),

que se dan en el tostado de las almendras de cacao, mediante complejas reacciones (tipo Maillard).[2]

La práctica de secado del grano de cacao tiene como fin primordial detener la actividad enzimática, siendo ésta de suma importancia porque en este proceso ocurren reacciones químicas que disminuyen el amargor y la astringencia en el grano de cacao, del 45-60% de humedad (base húmeda) al finalizar la fermentación, al 7-8% (bh) necesario para su manipulación y almacenamiento. Si la humedad final es menor la almendra se torna quebradiza, y si es mayor puede sufrir infecciones futuras y permitir la proliferación de bacterias y hongos. Entre los métodos de secado existe el artesanal, en el cual la masa de granos es extendida por un período de 6 a 8 días en los llamados patios de secado, que normalmente son de hechos de madera y cemento; siendo el de madera el más utilizado, puesto que con este material se evita que el producto absorba posibles malos olores existentes en el ambiente.[1]

La velocidad y temperatura de secado son esenciales para mantener activas las reacciones de oxidación de alcoholes y la de otros compuestos producidos durante la fermentación del cacao, que son importantes para su sabor y aroma.[3]

En la región costera del estado Sucre, en la localidad de Río Caribe, municipio Arismendi, el cacao es un cultivo tradicional de la zona y el beneficio del producto se ha ido realizando según costumbres culturales transmitidas por generaciones, las cuales varían entre productores, y que pueden ocasionar pérdidas cuando no son aplicadas adecuadamente en el proceso. He aquí donde adquiere importancia el método de secado artificial, tan apropiado y necesario en zonas de altas precipitaciones. Y estas

precipitaciones coinciden con los picos de cosecha del cacao. El reto para un método artificial de secado de cacao es la utilización eficiente de los recursos energéticos disponibles, reducir la humedad de las almendras, garantizar una vida de almacenamiento prolongada y mantener su calidad.

En el presente trabajo se evaluaron los efectos de algunas variables de secado artificial sobre las características físicas y químicas de granos fermentados del cacao de la localidad de Río Caribe, en la unidad de producción comunitaria "Cacao de Paria 338" mediante un secador de bandejas con convección forzada de aire, disponible en el Laboratorio de Alimentos perteneciente al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui. Dicho secador consiste básicamente en un secado por contacto con aire atmosférico calentado. El agua se extrae en forma de vapor junto con el aire. Este mecanismo es muy sencillo y se utilizó con la finalidad de generar información acerca de la influencia del efecto de temperatura, velocidad y tiempo de secado; considerando como ventaja principal el ahorro de tiempo, espacio, bajo costo y con alto nivel ecológico. Ello permitirá diseñar procesos de deshidratación de cacao en secadores a mayores escalas y capacidades, más apropiados para su incorporación en la industria cacaotera venezolana, necesaria para atender la alta demanda nacional e internacional de este rubro como materia prima, y alcanzar los estándares de calidad exigidos por los procesadores industriales de este rubro alimenticio.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general:

Evaluar el proceso de secado de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) fermentado, en un secador de bandejas con convección forzada de aire.

1.2.2 Objetivos específicos:

1. Determinar las propiedades fisicoquímicas (carbohidratos totales, almidón, fibra cruda, pH, acidez, humedad, contenido de grasa, cenizas totales, proteínas) del grano fermentado de cacao.
2. Evaluar el efecto de la variación del espesor del lecho de granos fermentados de cacao sobre el tiempo de secado, en un secador de bandejas con convección forzada de aire.
3. Determinar el efecto de la temperatura de la cámara del secador de bandeja sobre el tiempo de secado de los granos de cacao.
4. Caracterizar las curvas de velocidad de secado de los granos de cacao en función de sus contenidos de humedad libre.
5. Comparar las propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidratada de cacao, con las propiedades del cacao fermentado.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

En 2003, Manrique [4] hizo una evaluación al proceso de secado de la base avena instantánea, utilizando un secador de doble tambor (*drum dryer*) en una industria de alimentos. Determinó los parámetros de control adecuados para la normalización del proceso de secado y aumento de la producción de la base, analizando el efecto que sobre sus propiedades fisicoquímicas (densidad, viscosidad y temperatura de gelatinización) ejercen cada uno de los ingredientes de la suspensión de alimentación al secador.

Posteriormente en 2004, Bertorelli y colaboradores [5] en 2004 llevaron a cabo un estudio acerca del efecto del secado al sol sobre la calidad del grano fermentado de cacao. Evaluaron el efecto de algunas variables del secado natural al sol sobre los índices físicos de calidad y características químicas del grano fermentado de cacao (*Theobroma cacao L.*), proveniente de la localidad de Cumboto, estado Aragua, utilizando un fermentador tipo trinitario.

En 2005, Malavé y Fernández [6] elaboraron harina de batata (*Ipomoea batatas*) para consumo humano, y estudiaron la influencia de las operaciones unitarias de secado, molienda y tamizado sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina resultante. Adicionalmente analizaron las propiedades funcionales, contenidos de humedad, cenizas y proteínas del producto, y las compararon con las de harina de trigo, lo cual permitió determinar el potencial de la harina de batata.

García y Plancha [7] realizaron en 2006, el diseño preliminar de un secador rotatorio y sus equipos auxiliares, para deshidratar pulpa de café. Efectuaron corridas experimentales de secado en un secador tipo túnel en bandeja con el fin de obtener datos que asociaran el contenido de humedad de la pulpa de café con el tiempo de secado, para construir las curvas de velocidad de secado de estos sólidos particulados, determinar su comportamiento durante la deshidratación y su humedad crítica promedio, con base en la producción de la hacienda Las Acacias, ubicada en el Municipio Caripe del estado Monagas.

Las investigaciones mencionadas anteriormente y otros aportes, sirvieron de referencia para ejecutar el presente proyecto, en cuanto a la evaluación del proceso de secado de alimentos, las propiedades fisicoquímicas del grano fermentado de cacao y la obtención de las curvas de velocidad de secado en función de sus contenidos de humedad.

2.2 EL CACAO: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

2.2.1 Clasificación taxonómica

- Familia: Esterculiáceas.
- Género: Theobroma.
- Especie: Malvales.
- Nombre Científico: *Theobroma cacao L.*

2.2.2 Características principales de la planta

El árbol del cacao, o cacaotero, es una planta perenne que rinde varias cosechas al año. El fruto de este planta recibe el nombre científico de *Theobroma cacao L.* que significa "alimento de los dioses", y proviene del

griego. Al *Theobromae* se le encuentra en los pisos inferiores de las selvas húmedas de América tropical, generalmente a una altura inferior a los 1.400 metros sobre el nivel del mar. Esta planta necesita, para su desarrollo, temperaturas medias anuales elevadas, una alta humedad relativa del aire y una cubierta arbórea que la proteja de la insolación directa y de la evaporación. Las semillas del *Theobroma* son ricas en almidón, proteínas, materias grasas y otros elementos que le confieren un valor nutritivo real. Su contenido de *Theobromina* 1,5 a 3,0%, unido a la presencia de cafeína, les da un sabor aromático particular [2].

Las semillas de la mayoría de las especies del género *Theobroma* pueden servir, al igual que *T. cacao* L., para la preparación de chocolate; y algunas de ellas proporcionan chocolates de muy buena calidad. La pulpa azucarada y acidulada que las rodea puede igualmente consumida, y es utilizada para la preparación de bebidas naturales refrescantes y en dulcerías [2].

Entre las especies más conocidas y utilizadas se pueden nombrar [2]:

T. bicolor: cultivado en muchos países de América tropical, desde el sur de México hasta Brasil; la pulpa de las semillas se usa en la precipitación de bebidas refrescantes; y cuando las almendras son mezcladas y procesadas con cacao dan origen a un chocolate aceptable, pero muy amargo.

T. angustifolium: cultivado en América Central, conocido como cacao silvestre, no tiene valor comercial.

T. grandifolium: cultivado en los estados de Pará y Marañón, en Brasil, y en Venezuela. Con su pulpa se prepara una bebida refrescante conocida como "cupuasú".

T. gileri: existe en estado salvaje en el oeste de Colombia, oeste de Venezuela y norte de Ecuador.

T. glaucum: conocido como “cacao de monte”, presente en la Amazonia de Venezuela, Colombia, Brasil, Perú y Ecuador.

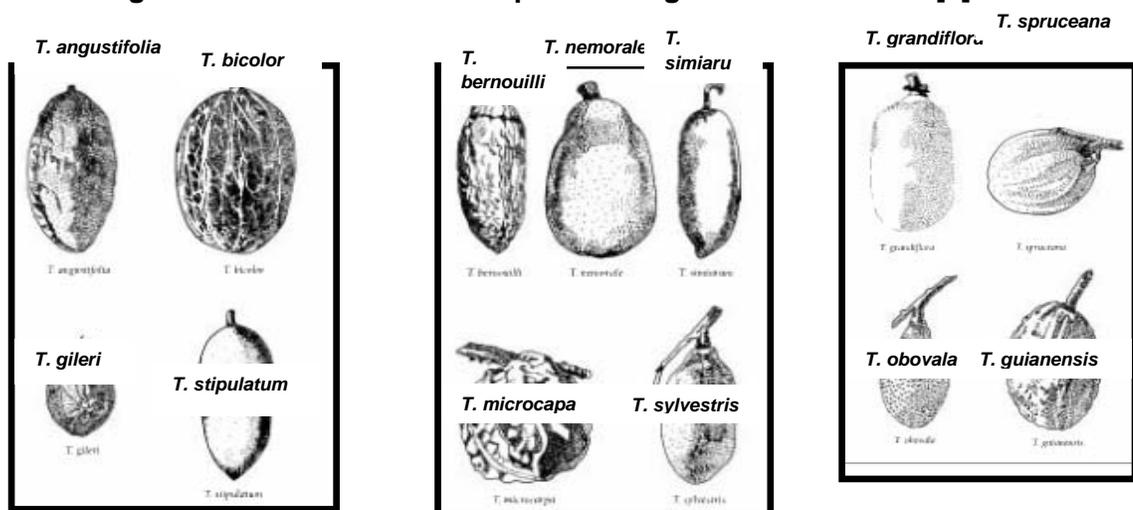
T. cirmolinae: se le ha encontrado en la vertiente pacífica de la Cordillera de los Andes, entre 800 y 1.300 m de altitud.

T. simiarum: reportado hasta ahora sólo en Costa Rica.

T. subincanum: presente en Brasil, Colombia y Venezuela.

A pesar de las veintidós especies conocidas de *Theobroma*, la única cultivada para la producción comercial de granos destinados a la preparación de chocolate o a la extracción de manteca de cacao, es la conocida como *Theobroma cacao* L. Frutos de varias especies pertenecientes a este género se muestran en la Figura 2.1.

Figura 2.1 Frutos de varias especies del género *Theobroma* [2]



2.2.3 Características de los principales cacaos cultivados

En la tabla 2.1, se puede apreciar los diferentes grupos de cacaos cultivados mundialmente y sus respectivos nombres científicos [2]

Tabla 2.1.- Grupos de cacaos cultivados [2]

Grupo	Subespecie
Criollo	<i>T. cacao cacao</i>
Forastero	<i>T. cacao sphaerocarpum</i> x <i>T. cacao sphaerocarpum</i>
Trinitario o Deltano	<i>Híbridos de T. cacao cacao</i>

2.2.3.1 Cacaos Criollos:

En este grupo se incluyen los cacaos Criollos Andinos, Porcelana y Pentágona [2].

- **Criollos Andinos** (Figura 2.2). Sus principales características son:
 - a) Mazorcas de color rojo o verde antes de la madurez, o de combinaciones de color rojo y de rosado a amarillo. Tienen forma alargada, con una punta muy acentuada en el extremo inferior; superficie marcada por diez surcos muy profundos iguales o repartidos en cinco grupos alternos de dos, uno de ellos menos acentuado que el otro.
 - b) La mazorca es siempre ancha en la base y nunca comprimida, como en el Angoleta o el Cundeamor.
 - c) Pericarpio muy rugoso, delgado y muy fácil de cortar.
 - d) Mesocarpio delgado, pero lignificado.

- e) Granos gruesos, rollizos, redondeados, con cotiledones de color blanco o muy ligeramente pigmentados cuando está fresco.

Al cacao criollo, por sus características de alta calidad, se le conoce también como Cacao Fino; y Venezuela es uno de los países que cuenta con la mayor biodiversidad de esta especie en el mundo.



Figura 2.2 Diversidad de frutos del tipo Criollo Andino [2]

- **Criollos Porcelana** (Figura 2.3): presentan características muy similares a los Criollos Andinos. Los árboles son de porte bajo, ramas finas y cortas, hojas de color verde de diferentes tonalidades o rosado suave. Las flores son pequeñas, con una ligera coloración rosada en los estaminodios y, en algunos casos, en los sépalos y pétalos. Las mazorcas, medianas o grandes, van unidas al tallo por medio de un pedúnculo corto y delgado. Presentan una forma corta y cilíndrica muy característica, que se estrecha repentinamente para formar una punta corta perfectamente marcada por cinco surcos; mientras que el cuerpo del fruto es liso, los surcos están muy poco marcados o no aparecen, y la cáscara es muy delgada.



Figura 2.3 Diversidad de tamaños y colores del Criollo Porcelana [2]

- **Criollos Pentágona** (Figura 2.4): producen una mazorca con forma particular, con cinco aristas muy prominentes, pericarpio rugoso y sin surcos. Este tipo de cacao es conocido en los Andes venezolanos como "cuatrofilos". Posee flores y hojas pequeñas y escasas, y frutos de colores verde a rojo intenso. Las semillas, en número de 20, son grandes, redondeadas y producen un grano de alta calidad.

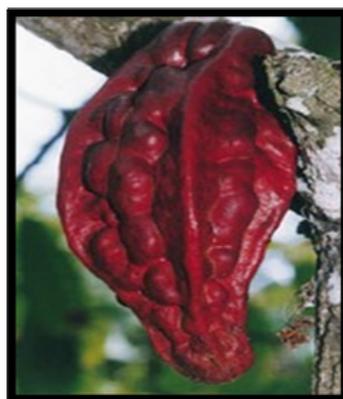


Figura 2.4 Cacao Criollo Pentágona rojo [2]

2.2.3.2 Cacaos Trinitarios o Deltanos: conforman la mayoría de las plantaciones venezolanas ubicadas en los estados Aragua, Miranda y Sucre, constituyendo casi el 90% de la producción del país. Son plantas híbridas originalmente formadas a partir del cruce del Criollo por el Forastero del Bajo Amazonas, y posteriormente, a través de un cruce con los Criollos, se ha podido lograr como resultado un cacao de alta calidad, con aroma y sabor muy pronunciados. Estos cacaos, al ser procesados por la industria, dan lugar a chocolates muy aromáticos, con un acentuado sabor a cacao. Entre éstos, destacan los producidos en Chuao, Choroni y Ocumare en el estado Aragua; los Carenero tipo superior en Miranda; y los Río Caribe, Carúpano, El Pilar y Yaguaraparo en el estado Sucre. **[1]**

2.2.3.3 Cacaos Forasteros Amazónicos: constituyen la casi totalidad de los cacaos corrientes plantados en Brasil, África Occidental, Malasia e Indonesia; Su producción llega a casi 80% del total mundial. Presentan gran vigor y productividad, además de resistencia o tolerancia a enfermedades o virus. Se distinguen cuatro tipos de cacaos Forasteros **[1,2]**.

- **Angoleta:** de surcos profundos, superficie rugosa, diámetro mayor que la longitud de la mazorca, ápice bastante pronunciado, de forma puntiaguda, cáscara gruesa y de consistencia regular, granos grandes y semirollizos, y almendras de color violeta pálido.
- **Cundeamor:** sus lomos son más bien superficiales, aunque en algunas variedades son más profundos; el diámetro mayor es aproximadamente 50% de la longitud del fruto. Presenta cuello de botella.

- **Amelonado** (Figura 2.5): de surcos poco pronunciados, casi lisos, diámetro mayor de 60 a 75% de la longitud del fruto; forma globosa, muy parecido a un melón. Es el más cultivado dentro del grupo de los Forasteros. No presenta cuello de botella. Las semillas son de color violeta oscuro y planas.
- **Calabacillo**: árbol de tamaño pequeño, con follaje compacto, las ramas tienden a abrirse y a pendular, y de fruto pequeño con cinco surcos marcados; el ápice varía según las variedades, siendo romo en algunas y puntiagudo en otras. Las semillas son de colores violeta oscuro, planos y triangulares.

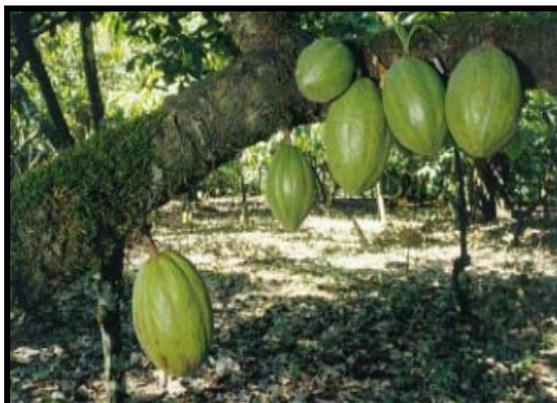


Figura 2.5 Cacao Forastero de forma amelonada [3].

2.2.4 Características del fruto

Llamado comúnmente *mazorca*, tiene una gran variedad de formas, desde alargadas hasta casi redondas; presenta surcos en su superficie, la cual puede cambiar desde muy rugosa hasta completamente lisa. El color puede variar entre el blanco, varios tonos de verdes y rojos cuando son

jóvenes. Al madurar, la coloración varía entre el amarillo, rojo naranja y rojo oscuro. El fruto cuando es joven presenta cinco compartimientos rellenos de granos; pero al madurar, las paredes de las cámaras desaparecen, quedando una cavidad única repleta de granos cubiertos de una pulpa mucilaginosa. El número de semillas por fruto varía según las especies, desde 25/30 en los Criollos, hasta 60 o 70 en algunos Forasteros Amazónicos.

El período comprendido entra la fecundación y la madurez del fruto va desde los 5 hasta los 7 meses. El peso de una mazorca madura varía entre 150 g y 1.000 g, aunque el peso promedio es de 400 g, por lo general.

El índice de mazorca se refiere al número de frutos necesarios para obtener 1 kg de cacao seco. Los Criollos poseen un índice de mazorca de 9 frutos por kilo de cacao seco, mientras que algunos Amazónicos presentan un índice de 30-35 frutos/kg de cacao seco [1].

2.2.5 Características de la semilla

Cada semilla se encuentra cubierta por una pulpa mucilaginosa de color blanco y de sabor agradable, su longitud puede variar de 15 a 30 mm, el ancho de 8 a 20 mm y el grosor de 5 a 15 mm. Se le denomina comúnmente "almendra". Constituye la

materia prima fundamental para la elaboración del chocolate. El color de los cotiledones frescos va desde el blanco en los Criollos hasta el morado intenso en los Forasteros Amazónicos [1].

2.2.5.1 Anatomía y composición de la semilla

Al estudiar histológicamente los cotiledones frescos de la semilla, se puede observar (Figura 2.6):

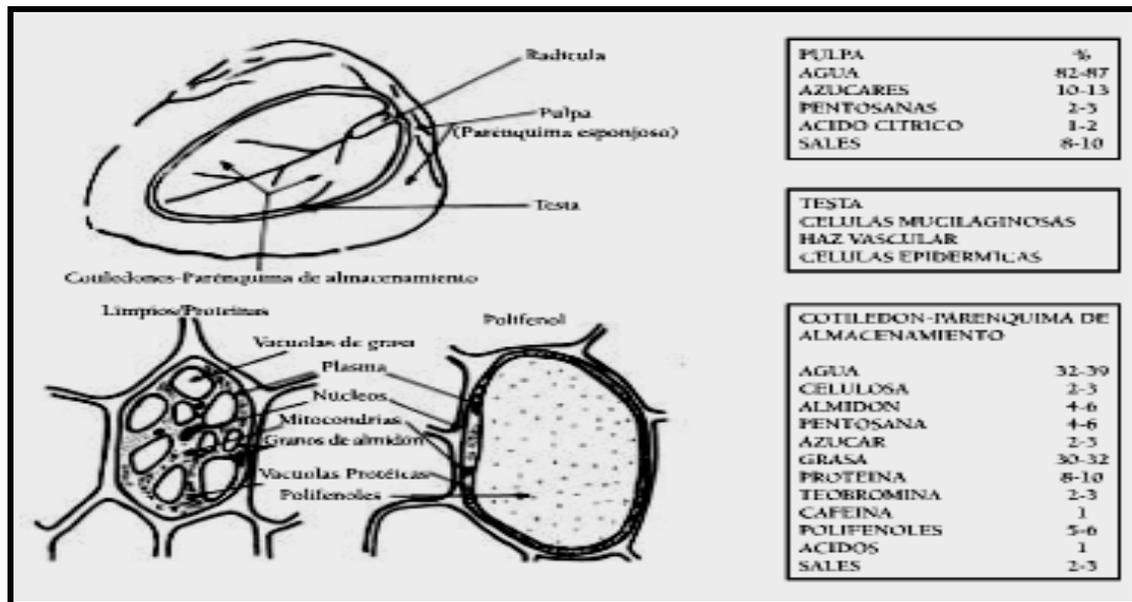


Figura 2.6 Corte anatómico de la semilla, señalando componentes celulares [2].

- Células epidérmicas dispuestas en una etapa monocelular.
- Células parenquimatosas de reserva que constituyen alrededor del 90% de los tejidos de los cotiledones, incoloras, contentivas de la llamada manteca de cacao, proteínas y granos de almidón.
- Células con pigmentos que ocupan 8 a 10% del cotiledón y que son responsables de su coloración. Contienen polifenoles (taninos, catequinas, antocianinas, leucoantocianinas) y purinas (teobromina y cafeína).

El contenido de grasa puede variar entre 45 y 60% en almendras fermentadas y secadas. Por su parte, los polifenoles constituyen los compuestos que dan la coloración a las semillas de Forasteros y Trinitarios; no están presentes en los tipos Criollos [2].

En la figura 2.7 se muestra el corte longitudinal de la mazorca de cacao y las semillas cubiertas por pulpa mucilaginosa de color blanco.



Figura 2.7 Parte interior del cacao [1]

2.2.6 Zonas productoras de cacao en Venezuela

La producción cacaotera está concentrada en tres regiones, que involucran a su vez 12 entidades federales: región Nororiental (Sucre, Monagas y Delta Amacuro), región Centro-norte-costera (Miranda, Aragua, Carabobo y Yaracuy) y la región Suroccidental (Apure, Barinas, Táchira, Mérida y Zulia). Cada una de las regiones señaladas posee características

específicas, así como particularidades referidas al material genético, manejo de las plantaciones, tenencia de la tierra y problemas fitosanitarios [1].

- **Región Nororiental:** comprende los estados Sucre, Monagas y Delta Amacuro, siendo el estado Sucre, el principal productor de esta región con 49% de producción, específicamente en la península de Paria (El Pilar, Yaguaraparo, Río Caribe, Irapa, Güiría y Carúpano. En Sucre se localizan unidades ecológicas de bosque húmedo tropical, mientras que en Monagas y Delta Amacuro las unidades ecológicas predominantes son el bosque seco tropical, con asociaciones edáficas húmedas y el bosque húmedo tropical, con suelos aluviales fértiles.
- **Región Centro-norte-costera:** esta región está integrada por los estados Miranda, Aragua, Carabobo y Yaracuy. El estado Miranda es el principal productor no sólo de esta región, si no del país, con 40% de la producción nacional. En cuanto a las unidades ecológicas se tiene que en el estado Aragua, fundamentalmente es el bosque seco tropical, con precipitación muy irregular; mientras que en los estados Carabobo y Yaracuy se encuentran el bosque húmedo tropical y el bosque seco premontano, con precipitación media anual entre 550 y 1.000 mm, y con temperatura media anual entre 18 y 24°C.
- **Región Sur Occidental:** constituida por los estados Táchira, Apure, Barinas, Mérida y Zulia; si bien es la zona que menor cantidad produce (11% del total nacional). La importancia de esta zona radica en su gran potencial agroecológico y en la alta calidad de los cacaos

que allí se cultivan, como el Porcelana y otros Criollos. Existen dos unidades ecológicas: el bosque seco tropical, (en localidades de estado Zulia, Santa Bárbara, El Vigía y orillas del río Catatumbo), y el bosque húmedo tropical, (en los estados Mérida y Táchira). Los suelos son aluviales mixtos, recientes, profundos y de gran fertilidad.

2.2.7 Fermentación

Es un proceso de capital importancia en relación con la calidad de los granos. Consiste en la colocación de los granos recién cosechados en recipientes adecuados o pilas que deben ser cubiertos para crear un ambiente semicerrado. Así ocurre la eliminación de la baba o mucílago azucarado que recubre las almendras y, dentro de ellas tienen lugar la muerte del embrión, la transformación de los cotiledones y la formación de las sustancias precursoras del sabor y aroma de chocolate. Cuando las almendras no se fermentan o el proceso se realiza deficientemente, se produce el llamado cacao corriente. Si el tipo de cacao procesado es muy cercano a los Forasteros, se producirá un alto porcentaje de almendras pizarrosas, las cuales en su interior son compactas y de color violeta oscuro. (Figura 2.8).

2.2.7.1 Etapas de la fermentación

La fermentación puede caracterizarse como un proceso en dos etapas [2]:

- a) Una etapa de hidrólisis o fase alcohólica que sucede en condiciones anaeróbicas, donde intervienen microorganismos como levaduras, que transforman el azúcar de la pulpa en alcohol y anhídrido carbónico, a

la vez que comienza a elevarse la temperatura. Conforme se produce el colapso de las células de la pulpa, hay penetración de bacterias acéticas inoculadas por los insectos denominados “mosquitos del guarapo”. El ácido acético provoca la muerte del embrión y de las almendras al penetrar en el tejido cotiledonar y aumenta la permeabilidad de las paredes celulares, permitiendo la interdifusión de los componentes del jugo celular. Así, las enzimas se ponen en contacto con los polifenoles y proteínas y se inician las reacciones hidrolíticas que dan lugar a cambios en los pigmentos cianidoglucósidos, provocando el inicio de la formación de los precursores del sabor a chocolate. Toda esta fase hidrolítica ocurre a temperaturas cercanas a 45°C y con pH de 4,0 a 5,0 (figura 2.8).

- b)** La etapa de oxidación se inicia inmediatamente cuando hay mayor penetración de oxígeno. Consiste esencialmente en la oxidación y condensación de los compuestos polifenólicos en productos complejos aminoácidos volátiles solubles e insolubles que tienen poco o ningún sabor. Paralelamente con la condensación oxidativa, disminuye el contenido de humedad, hasta el punto en que la falta de agua detiene la actividad enzimática. Cuando el oxígeno tiene acceso a las células de los cotiledones durante la fase de condensación oxidativa, el color varía en toda la masa cotiledonar, se inicia el secado y se facilita la penetración del oxígeno al interior de los cotiledones.

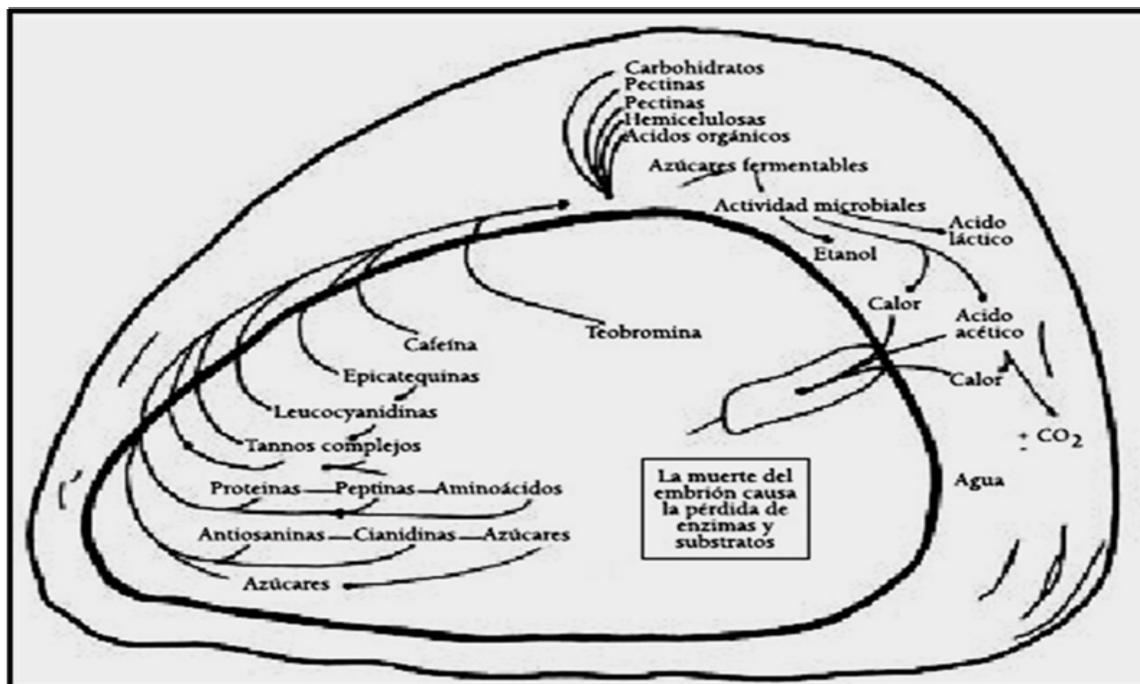


Figura 2.8 Dibujo esquemático de una almendra de cacao en proceso de fermentación [2]

2.2.7.2 Sistemas de fermentación

Mundialmente existe una diversidad de técnicas utilizadas para la fermentación del cacao, variando de acuerdo con el volumen de producción de la finca; para pequeñas cantidades resulta simple y económico, mientras que para grandes volúmenes es complejo y costoso. Actualmente existen cuatro tipos de fermentadores utilizados en Venezuela como se reseña en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Fermentadores de cacao y sus características [2].

Tipo	Producción (kg/ha)	Superficie
Rústico Caucagua	300 – 1.500	1 – 3 ha
Reymol (huacal plástico)	1.000 – 2.000	4 – 6 ha
Rohan	1.500 – 5.000	5 – 10 ha
Trinitario	Más de 5.000	Más de 10

- **Fermentador Caucagua**

Este fermentador rústico fue diseñado por Reyes (1964) [2], y consiste en un canasto de caña amarga, con dimensiones de 80 x 40 x 10 cm, con capacidad para 28 a 30 kg de cacao fresco (Figura 2.9).



Figura 2.9 Fermentador Caucagua [1]

- **Fermentador Reymol**

Ideado por Reyes y Molina (1977) [2], consiste en una cesta plástica (conocido en Venezuela como huacal) perforada de los usados comúnmente en los abastos y supermercados para el manejo de alimentos y productos, con dimensiones de 60 x 40 x 40 cm, con una capacidad de aproximadamente 70kg (Figura 2.10). Es ideal para pequeñas fincas cacaoteras de 3 a 6 ha. Con este fermentador se logra de 90 a 95 % de almendras bien fermentadas [1].



Figura 2.10 Fermentador Reymol [1]

- **Fermentador Rohan**

Consiste en una batería de cinco o más bandejas de madera, de tamaño variable, superpuestas, en las cuales se coloca el cacao fresco. Las bandejas deben tener el fondo enrejado, con el fin de permitir el drenaje de los líquidos que desprende la masa de cacao. La última bandeja de base estaría llena de aserrín lo cual permitirá el control de la aireación. La bandeja superior se cubre con sacos vacíos para evitar pérdidas de calor del sistema

(Figura 2.11). Las almendras deben ser volteadas dentro de las gavetas cada dos días para mejorar la fermentación, disminuir la incidencia de hongos, evitar el aglutinamiento y garantizar la uniformidad del proceso. Igualmente, las bandejas van siendo rotadas de posición, de abajo hacia arriba. [1]



Figura 2.11 Fermentador Rohan [1]

- **Fermentador trinitario**

Es un sistema utilizado para procesar grandes cantidades de cacao y consiste en una serie de cajones de 1 x 1 x 0,65 m, con una capacidad para 900 a 1.000 kg contruidos con maderas libres de olores, como el apamate o el saqui-saqui. Las tablas que formarán las paredes laterales deberán tener un grosor de 3 a 4 cm, para asegurar un aislamiento térmico efectivo entre la masa de cacao y el ambiente externo y deben quedar firmemente ajustadas entre sí. Se colocan sobre un marco que permita retirarlas fácilmente cuando se vaya a remover el cacao o a trasladarlo al cajón subsiguiente (Figura 2.12).

El fondo de la caja estará formado por una rejilla de madera (figura 2.12) que facilita el drenaje y la aireación, la cual debe quedar separada 15 a 20

cm del piso, donde habrá un canal de drenaje que recolecte los exudados de la masa en fermentación. [2]



Figura 2.12 Rejilla inferior del fermentador trinitario [2]

2.3 EL PROCESO DE SECADO

2.3.1 Generalidades sobre el proceso de secado

En términos generales, se entiende por secado a la eliminación de la humedad de los sólidos (también puede ser un líquido) por evaporación, con ayuda de un agente que transmita el calor necesario para ello, y que a la vez sea el agente transportador de dicha humedad separada. En la mayor parte de los casos la humedad a eliminar es agua y el agente transportador de calor y materia evaporada suele ser una corriente de aire (o gas inerte); aunque también se puede hacer uso de la radiación o la simple conducción de calor a través de una superficie metálica. [8]

2.3.2 Tratamiento de sólidos en los secadores

En el equipo de contacto gas-sólido, los sólidos pueden encontrarse en cualquiera de las cuatro condiciones siguientes:

a) Estático: éste es un lecho denso con láminas de sólidos, en el cual cada partícula descansa sobre otras, según la densidad de la masa de la fase sólida. Dicho de otra manera, no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas, como se puede observar en la figura 2.13.



Figura 2.13 Lecho estático (secador de bandejas) [8]

c) Móvil: es un tipo de lecho de sólidos, ligeramente restringido, en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. Por lo común, el flujo es descendente por acción de la fuerza de gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación, generada dentro del equipo del proceso como en los secadores rotatorios (figura 2.14). En algunos casos, la elevación de sólidos se lleva a cabo en equipos independientes y éstos fluyen en presencia de la fase gaseosa sólo en sentido descendente.



Figura 2.14 Lecho móvil dentro de un secador rotatorio con elevadores [8].

d) Fluidizado: se trata de una condición menos restringida aún, en la cual las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada. Es una condición inestable, porque la velocidad superficial ascendente del gas es menor que la velocidad final de asentamiento o sedimentación de las partículas sólidas; la velocidad del gas no basta para arrastrar y transportar en forma continua todos los sólidos (figura 2.15). Al mismo tiempo, dentro de la corriente de gas se registran turbulencias con velocidades bastante grandes para elevar transitoriamente las partículas. El movimiento de éstas es repetidamente ascendente y descendente. En realidad, la fase de los sólidos y la fase gaseosa están entremezcladas y se comportan juntas como un fluido en ebullición.

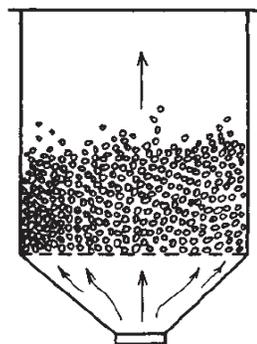


Figura 2.15 Lecho fluidizado [8]

e) **Diluido:** ésta es una condición de expansión total en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas sobre otras. A decir verdad, la fase de los sólidos está tan dispersa dentro del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa individual. Por lo común, esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos del sistema sobrepasa la velocidad final de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastradas continuamente por el gas; no obstante, no siempre será éste el caso (figura 2.16).

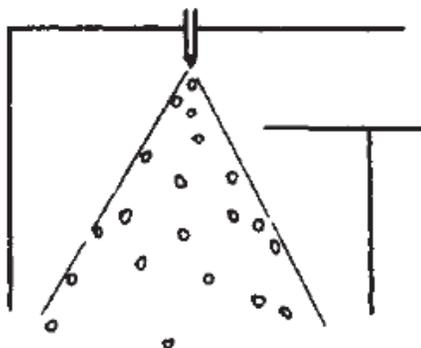


Figura 2.16 Sólidos en condición diluida cerca de la parte superior de un secadero por aspersión [8]

2.3.3 Contacto gas-sólido

Los términos que se utilizan en esta sección para describir el método por el cual el gas entra en contacto con un lecho de sólidos se definen a continuación:

a) **Flujo paralelo:** en este caso la dirección del flujo de gas es paralela a la superficie sólida. El contacto tiene lugar primordialmente en la interfaz comprendida entre dos fases, en donde se produce quizás una leve penetración del gas en los vacíos comprendidos entre los sólidos cercanos a la superficie. El lecho de sólidos se encuentra generalmente en condición estática (figura 2.17).

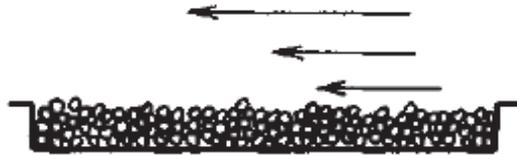


Figura 2.17 Flujo paralelo del gas sobre un lecho estático [8]

b) **Flujo perpendicular:** aquí la dirección de la corriente de gas es perpendicular normal en la interfaz de las fases; donde el gas choca contra el lecho de sólidos, (figura 2.18).

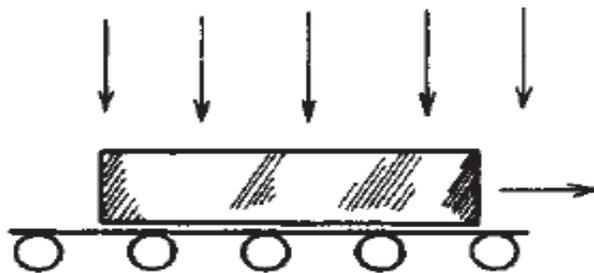


Figura 2.18 Gas circulante que choca contra un objeto sólido de gran tamaño, siguiendo un flujo perpendicular, en un horno con transportador de rodillos [8]

f) **Circulación directa:** el gas penetra y fluye directamente pasando a través de los intersticios de los sólidos, circulando de manera más o menos libre en torno a las partículas individuales (figura 2.19). Esto ocurre cuando los sólidos están en condición estática, móvil, fluidizada o diluida.

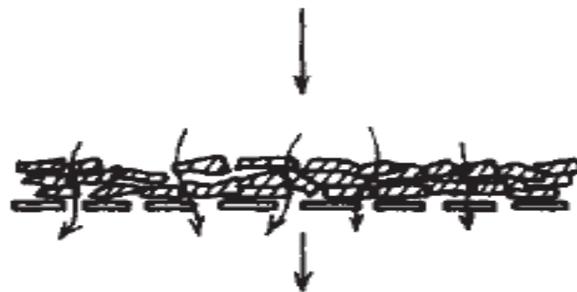


Figura 2.19 Circulación de gas en flujo directo a través de un lecho de sólidos preformados, sobre un transportador de plataforma perforada [8]

d) **Flujo de gas en contracorriente:** la fase gaseosa y las partículas sólidas se desplazan en la misma dirección, por el arrastre de éstas por el flujo de gas (figura 2.20).

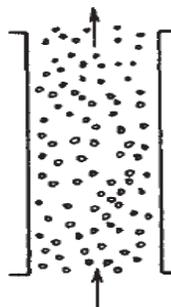


Figura 2.20 Flujo de corrientes paralelas de gas-sólidos en un transportador neumático de fase diluida y ascenso vertical [8]

e) **Flujo transversal del gas:** la dirección de la corriente del gas es exactamente opuesta a la que sigue el movimiento de los sólidos (figura 2.21).

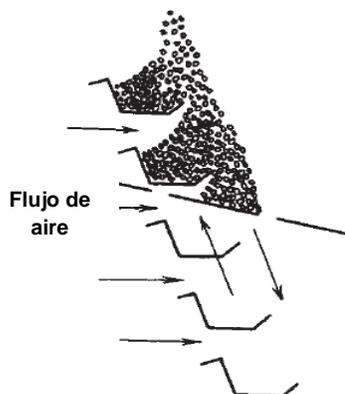


Figura 2.21 Flujo transversal de gas y sólidos en un secador por gravedad tipo cascada [8]

2.3.4 Clasificación de los secadores

Existen secadores continuos y otros por carga; unos mantienen agitado el sólido y otros no. Los equipos de secado pueden clasificarse en: (1) secadores en los que los sólidos se encuentran directamente expuestos a un gas caliente (generalmente aire), y (2) secadores en los que el calor es transmitido al sólido desde un medio externo (intercambiador de calor), generalmente a través de la superficie metálica con la que el sólido está en contacto. Los secadores que exponen los sólidos a un gas caliente se llaman adiabáticos o secadores directos; aquellos en los que el calor es transmitido desde un medio externo reciben el nombre de no adiabáticos o secadores indirectos. Los secadores calentados por energía radiante, dieléctrica o de

microondas, también son adiabáticos. Algunas unidades combinan el secado adiabático y no adiabático y se denominan secadores directos-indirectos [8].

2.3.5 Tipos de secadores

A continuación se muestran algunos tipos de secadores utilizados en la industria.

2.3.5.1 Secadores continuos de túnel

Los secadores continuos de túnel suelen ser compartimientos de bandejas o de carretillas que operan en serie, tal como se muestra en la figura 2.22. Los sólidos se colocan sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel, con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o en una combinación de ambos.

Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz, como el de la figura 2.22. Los sólidos granulares húmedos se transportan en forma de una capa que tiene entre 25 y 150 mm de profundidad, sobre una superficie de tamiz perforada a través de la cual se fuerza el paso de aire caliente, ya sea hacia arriba o hacia abajo. El secador consta de diversas secciones de serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera. En algunos casos los materiales en forma de pasta pueden ser preformados en cilindros y colocarse sobre el transportador para secarse [8].

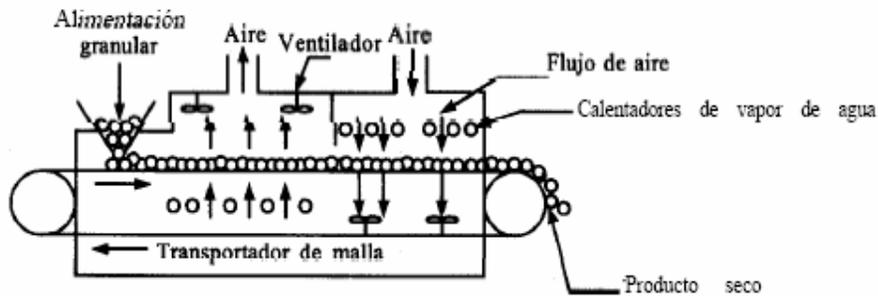


Figura 2.22 Secador continuo de túnel [8]

2.3.5.2 Secadores rotatorios

Un desecador rotatorio consiste en un cilindro que gira sobre cojinetes apropiados, teniendo por lo común, una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de 4 a más de 10 veces su diámetro, que oscila entre menos de 0,3 m hasta más de 3 m. Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación. El efecto de la carga y la pendiente del cilindro, se descargan por el otro extremo como producto acabado. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos, según que la circulación del gas sea a contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de los sólidos (figura 2.23).

Las partes de un secador rotatorio con aire caliente en contracorriente son: Carcasa del secador (A), rodillos para el soporte de la carcasa (B), engranaje (C), campana de descarga de aire (D), conducto de alimentación (F), pestañas elevadoras (G), descarga de producto (H) y calentador de aire (J) [8].

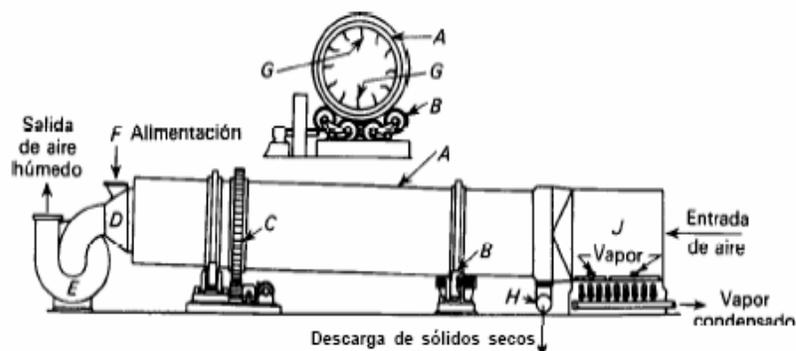


Figura 2.23 Secador rotatorio [9]

2.3.5.3 Secadores de tambor

Un secador de tambor consiste en uno o más rodillos metálicos calentados, en cuya superficie exterior se evapora hasta sequedad una delgada capa de líquido. El sólido seco es retirado de los rodillos a medida que éstos giran lentamente.

En la figura 2.24 se representa un secador de tambor típico, que es una unidad de doble tambor con alimentación central. El líquido de alimentación queda confinado en la parte superior de los dos rodillos y limitado por placas estacionarias. El calor es transmitido por conducción hacia el líquido que es parcialmente concentrado en el espacio comprendido entre los rodillos. El líquido concentrado desciende formando una capa viscosa que recubre el resto de la superficie de los tambores. Prácticamente todo el líquido se vaporiza al girar los tambores, dejando una delgada capa de material seco que es retirado mediante cuchillas rascadoras y cae en los transportadores situados debajo. La humedad evaporada se recoge y retira a través de la campana situada encima de los tambores.

Los secadores de doble tambor son eficaces con disoluciones diluidas, disoluciones concentradas de materiales muy solubles, así como con suspensiones de partículas relativamente finas. No son adecuados para disoluciones de sales de solubilidad baja o para suspensiones de sólidos abrasivos que sedimentan y crean una presión excesiva entre los tambores [8].

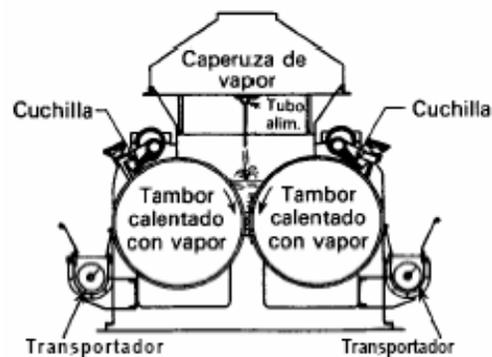


Figura 2.24 Secador de tambor [9]

2.3.5.4 Secadores de lecho fluidizado

Los secadores en los que los sólidos están fluidizados por el gas de secado se utilizan en diversos problemas de secado. Las partículas son fluidizadas con aire o gas en una unidad de lecho hirviente, tal como se muestra en la figura 2.25.

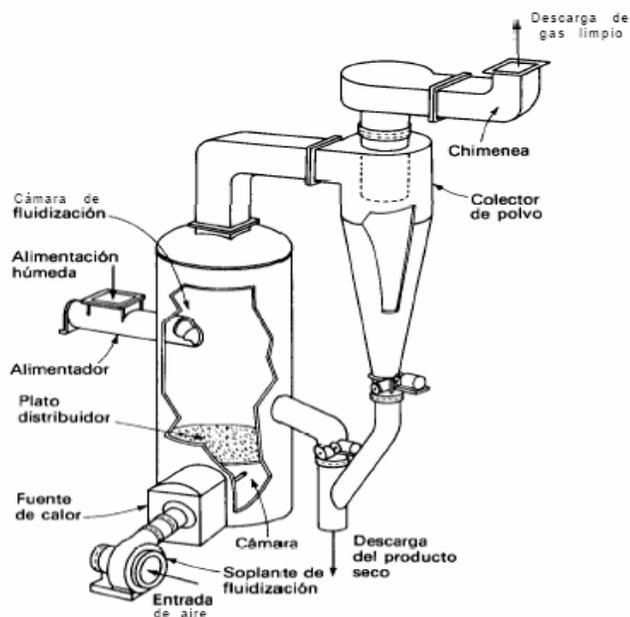


Figura 2.25 Secador de lecho fluidizado [8]

La mezcla y transmisión de calor son muy rápidas. La alimentación húmeda se introduce por la parte superior del lecho, el producto seco se retira lateralmente cerca del fondo. Algunos secadores de lecho poseen compartimientos fluidizados separados, a través de los cuales pasan secuencialmente los sólidos desde la entrada hasta la salida. Reciben el nombre de “secadores de flujo pistón” y en ellos el tiempo de residencia es casi el mismo para todas las partículas. Las condiciones de secado se pueden variar de un comportamiento a otro, y con frecuencia el último comportamiento está fluidizado con gas frío, con el fin de enfriar los sólidos antes de la descarga [8].

2.3.5.5 Secadores por aspersión

Las soluciones, suspensiones y pastas pueden ser secadas mediante su aspersión en pequeñas gotas dentro de una corriente de gas caliente en un secador por aspersión. En la figura 2.26 se muestra uno de estos aparatos. El líquido que se va a secar se atomiza y se introduce en una cámara grande de secado, en donde las gotas se dispersan en una corriente de aire caliente. Las partículas de líquido se evaporan rápidamente y se secan antes de que puedan llegar a las paredes del secador; el polvo seco que se obtiene cae al fondo cónico de la cámara y luego es extraído mediante una corriente de aire hasta un colector de polvos. La parte principal del gas caliente también se lleva al colector de polvos, como se muestra, antes de ser desgasado. El secado por aspersión ofrece la ventaja de lograr un secado extremadamente rápido para los productos sensibles al calor, un tamaño y densidad de la partícula de producto que son controlables dentro de ciertos límites y costos relativamente bajos de operación [10].

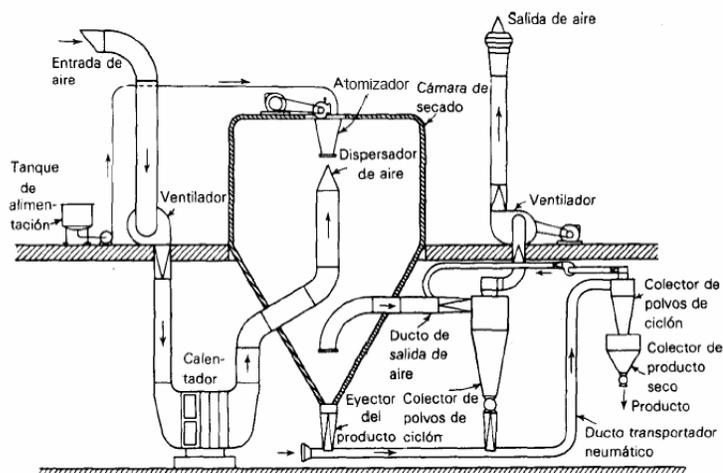


Figura 2.26 Secador por aspersión [9]

2.3.5.6 Secador de bandejas

En el secador de bandejas, que también se llama secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimientos, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad.

Un secador de bandejas típico se muestra en la figura 2.19, tiene bandejas que se cargan y se descargan en un gabinete. Un ventilador hace recircular el aire calentando con vapor paralelamente con la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es más bajo. Más o menos del 10% al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se reemplazan por otras con más material para secado.

Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas introducidas al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador. En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire **[10]**.

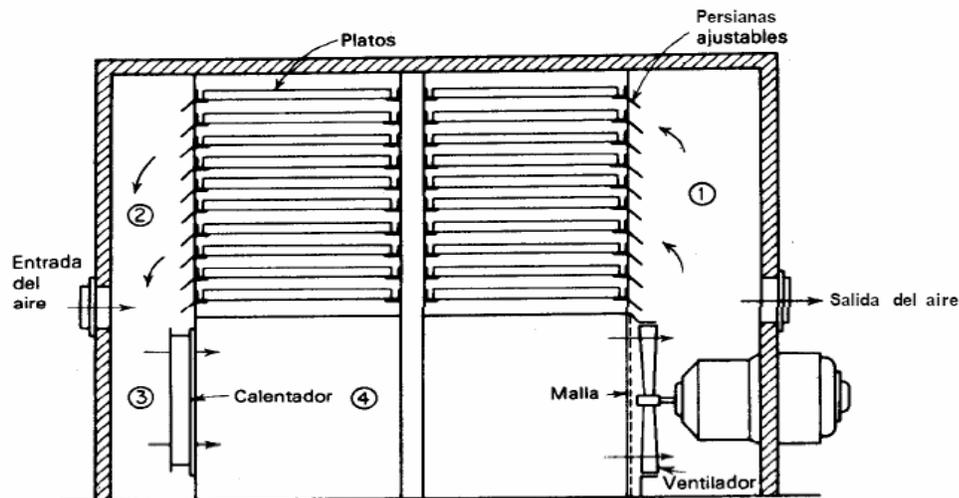


Figura 2.27 Secador de bandeja [10]

2.3.6 Cartas psicrométricas

Las cartas psicrométricas o cartas de humedad son gráficas donde se representan las propiedades de las mezclas gas – vapor, a la presión total del sistema, que en la mayoría de estas gráficas es a la presión atmosférica.

En los textos sobre este tema se encuentran disponibles cartas psicrométricas construidas para el sistema aire – vapor de agua, a una atmósfera de presión, en unidades del sistema internacional y del sistema inglés. Para el cálculo de las entalpías de la mezcla, las condiciones de referencia utilizadas son aire y agua líquida saturada a 0 °C, de tal forma que las cartas puedan ser empleadas en conjunto con las tablas de vapor.

Las humedades tomadas de estas gráficas para ciertos valores de temperaturas de bulbo húmedo y seco, se aplican sólo a una presión atmosférica de 760 mmHg [8].

En la figura 2.28 se muestra una carta de humedad para el sistema aire-vapor de agua en el sistema inglés, a una presión de una atmósfera (29,92 pulgadas de mercurio).

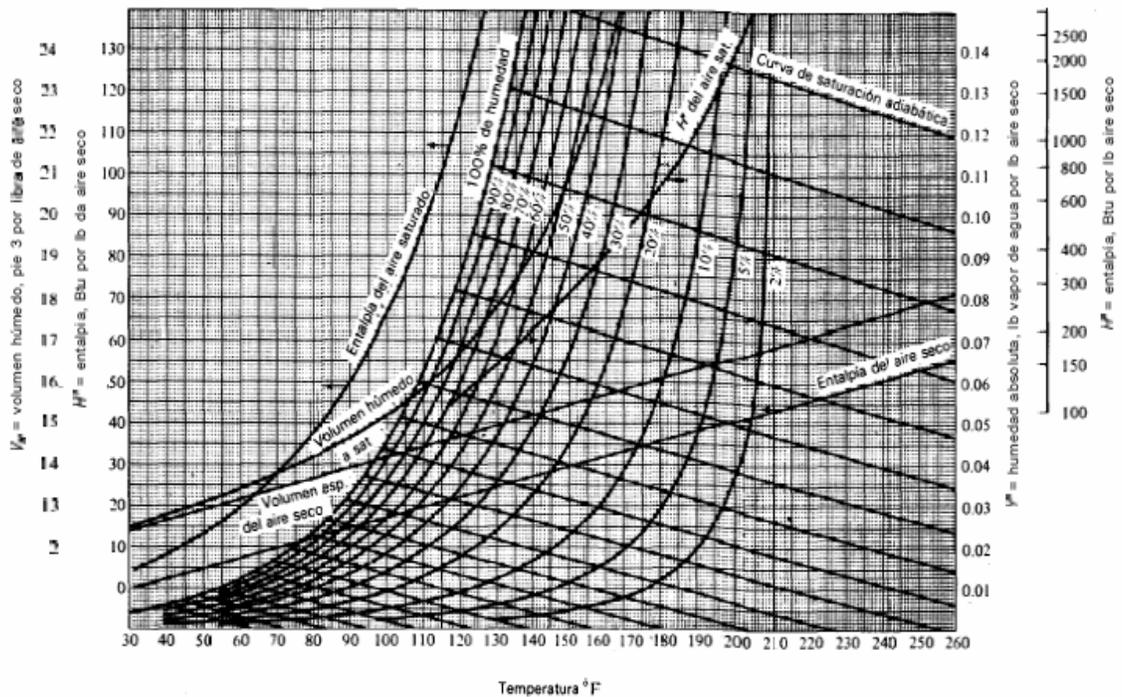


Figura 2.28 Carta psicr6metrica en sistema ingl6s de unidades [11]

En el eje de las abscisas se representan temperaturas de bulbo seco ($^{\circ}\text{F}$) y en las ordenadas se registran las humedades absolutas m6sicas (lb de agua / lb de aire seco). Cualquier punto dentro del diagrama representa las caracter6sticas de una mezcla gas - vapor de agua. El l6mite del diagrama, hacia la izquierda, es la curva 100% humedad relativa. Por otro lado, en cualquier punto situado por encima de esta curva se encuentra la zona de neblina, por la presencia del aire saturado y agua l6quida. Las curvas situadas por debajo de la curva de 100% representan valores de humedad relativa. Las l6neas rectas que descienden desde la l6nea de 100% de

humedad relativa son las líneas de bulbo húmedo, que son iguales para este sistema a las líneas de saturación adiabática y están superpuestas [11].

2.3.7 Tipos de humedad en el proceso de secado

La humedad de un sólido se puede expresar como:

- **Humedad en base húmeda (W):** es la relación entre la masa de agua y la masa del sólido húmedo.
- **Humedad en base seca (X):** relación entre la masa de agua y la masa del sólido seco.

Estos términos se definen matemáticamente de la siguiente manera: m_h = masa de agua, m_{sh} = masa del sólido húmedo y m_{ss} = masa del sólido seco. Por lo tanto, matemáticamente:

$$W = \frac{m_h}{m_{sh}}$$

[Ec.2.1]

$$X = \frac{m_h}{m_{ss}}$$

[Ec. 2.2]

donde:

$$m_h = m_{sh} - m_{ss}$$

[Ec. 2.3].

Al sustituir la ecuación 2.3, en las dos anteriores se obtiene:

$$W = \frac{(m_{sh} - m_{ss})}{m_{sh}}$$

[Ec. 2.4]

$$X = \frac{(m_{sh} - m_{ss})}{m_{ss}} \quad [\text{Ec. 2.5].}$$

Para las conversiones entre W y X se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$W = \frac{X}{(1 + X)}$$

[Ec. 2.6]

$$X = \frac{W}{(1 - W)}$$

[Ec. 2.7].

Resulta útil expresar el contenido de humedad en base seca (X), debido a que el denominador de su ecuación es un valor constante en todo el sistema.

En relación al sólido se emplean los siguientes términos para definir los diferentes tipos de humedad [8]:

a) Humedad de equilibrio: es la humedad limitante a la cual un material dado se puede secar en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire. Se encuentra representado por X^* .

b) Humedad ligada: en un sólido es aquel líquido que ejerce una presión de vapor inferior a la del líquido puro, a una temperatura dada. El líquido puede quedar ocluido por retención en capilares diminutos, por solución en celdas o paredes fibrosas, por solución homogénea a lo largo del sólido y por adsorción física o química en las superficies del sólido.

c) Humedad no ligada: en un material higroscópico es la humedad en exceso en relación con el contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad de saturación.

d) Humedad libre: es la humedad en exceso que contiene un sólido sobre la humedad de equilibrio; este valor puede llegar a incluir tanto la humedad ligada como la no ligada. Sólo la humedad libre puede ser evaporada y lógicamente depende de la concentración del gas a través de la humedad de equilibrio:

$$X_{\text{libre}} = X - X^* \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Estas relaciones se muestran esquemáticamente en la figura 2.29:

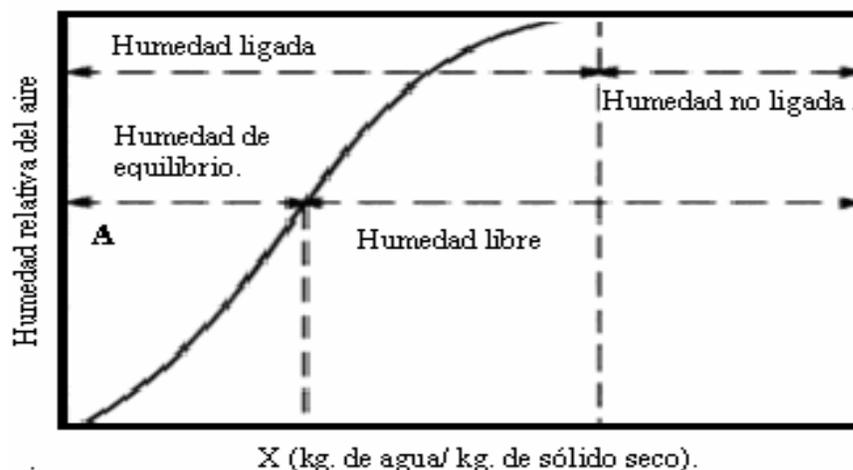


Figura 2.29 Relaciones existentes entre los diferentes tipos de humedades
[9]

2.3.8 Cinética de secado

En las experiencias de secado al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando en condiciones de secado y circulando el aire sobre el objeto a secar, se obtienen curvas del tipo indicado en la figura 2.30, en la que puede observarse que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado (porción recta de la representación), o lo que es lo mismo, durante este periodo la velocidad permanece constante.

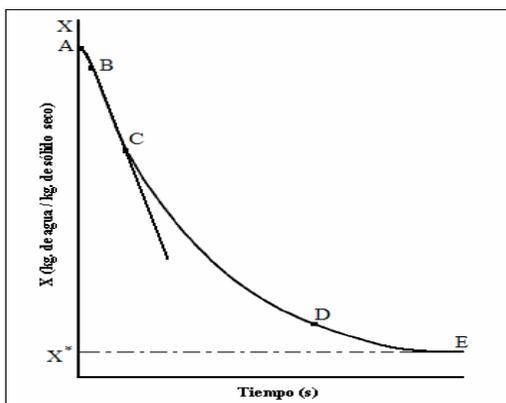


Figura 2.30 Humedad en base seca en función del tiempo [9]

El secado transcurre a esta velocidad constante hasta que la humedad del sólido alcanza un valor crítico (punto C), a partir del cual la velocidad de secado disminuye, llegando ésta a ser nula cuando la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio (punto E), con el aire en las condiciones constantes de operación, es decir cuando la humedad libre es cero.

En la figura 2.31 se muestra la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo por unidad de tiempo. Se especifican las variables presentes tales como humedad crítica (X_c), humedad de equilibrio

(X^*), etc.; las cuales se emplean para elaborar la gráfica de velocidad de secado frente a la humedad.

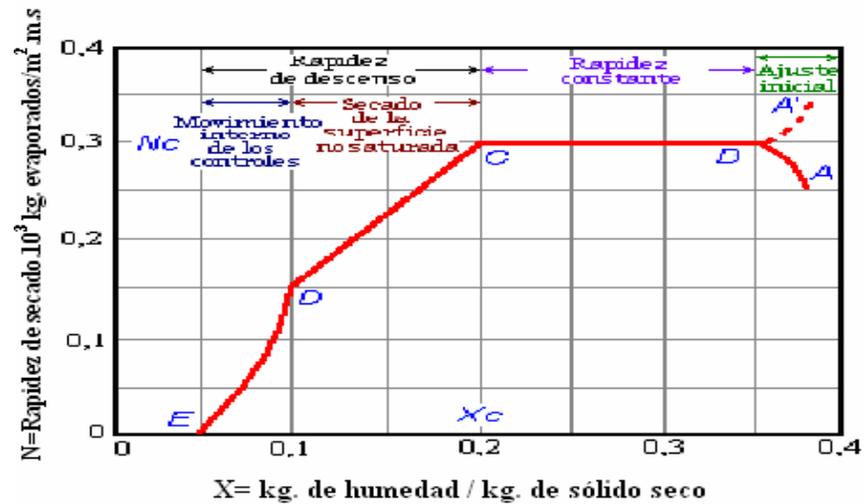


Figura 2.31 Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constante [9]

Período inicial (A-B): la evaporación ocurre desde una superficie libre y usualmente la temperatura se incrementa desde su valor inicial (T_0) hasta la

temperatura de bulbo húmedo del aire (T_w). En algunos casos cuando la temperatura del producto es mayor que la correspondiente temperatura de bulbo húmedo del aire, el producto disminuye su temperatura. Este período inicial dura pocos minutos, siendo X_0 el contenido de humedad justo al inicio del secado.

Período de velocidad constante (B-C): este período de secado se lleva a cabo por evaporación de la humedad desde una superficie saturada (evaporación desde una superficie libre), en ausencia de radiación o de transmisión de calor por conducción a través del contacto directo del sólido con superficies calientes. La temperatura del sólido durante el período de velocidad constante es la temperatura húmeda del aire (T_w). Sin embargo, este período se caracteriza porque la velocidad de secado es independiente del contenido de humedad. El sólido está tan húmedo que toda la superficie de secado está recubierta por una película continua de agua que se comporta como si el sólido no existiese. Si el sólido no es poroso, el agua separada durante este período es básicamente agua situada sobre la superficie del sólido. En un sólido poroso, la mayor parte de agua separada durante el período de velocidad constante corresponde a la existente en el interior del sólido. La mayoría de los productos alimenticios no exhiben un período de secado constante.

Primer período de velocidad decreciente (C-D): el contenido de humedad al final del período de velocidad constante es el contenido de humedad crítica. En este punto la superficie del sólido ya no se encuentra saturada de agua y la velocidad de secado disminuye con el decrecimiento en el contenido de humedad y el incremento de temperatura. En el punto final de este período, la capa de humedad superficial se ha evaporado completamente y con posterior decrecimiento en el contenido de humedad, la

velocidad de secado es controlada por la velocidad de movimiento de la humedad dentro del sólido.

Segundo período de velocidad decreciente (D-E): este período representa las condiciones correspondientes a una velocidad de secado totalmente independiente de las condiciones externas. La transferencia de humedad puede ocurrir por una combinación de difusión de líquido, movimiento capilar y difusión de vapor. La temperatura del producto se acerca a la de bulbo seco y el contenido de humedad se aproxima asintóticamente al valor de equilibrio (X_e). Los períodos A-B y B-C de la curva típica de rapidez de secado a condiciones constantes (figura 2.23), siguen la ley de transferencia de calor y masa para un objeto totalmente húmedo; y los períodos C-D y D-E siguen la ley de difusión de Fick [9].

2.3.9 Balanza de determinación de humedad (OHAUS)

La balanza de humedad Ohaus modelo MB200, se caracteriza por poseer una modalidad de autosecado; está diseñada para la determinación rápida y automática del contenido de humedad en sólidos o líquidos, utilizando una fuente de calor infrarroja. La balanza es programable para varios niveles de temperatura y distintos períodos de tiempo. Una balanza integrada pesa la muestra antes y después de la prueba. El cálculo de la pérdida y de contenido de humedad es automático.



Figura 2.32 Balanza Ohaus MB 200.

2.3.10 Variables que intervienen en el proceso de secado de bandeja

El control del equipo de bandejas y compartimientos se mantiene por lo común regulando la temperatura y velocidad del aire circulante (así como la humedad), y rara vez a través de la temperatura de sólidos. Por lo tanto, las principales variables son [12]:

a) Temperatura del aire (T): el comportamiento de un sólido secado a distintas temperaturas se encuentra representado por la figura 2.33, donde se puede apreciar que a mayor temperatura del aire (manteniendo constante el resto de las variables) mayor será la velocidad de secado, y las curvas presentarán mayor pendiente.

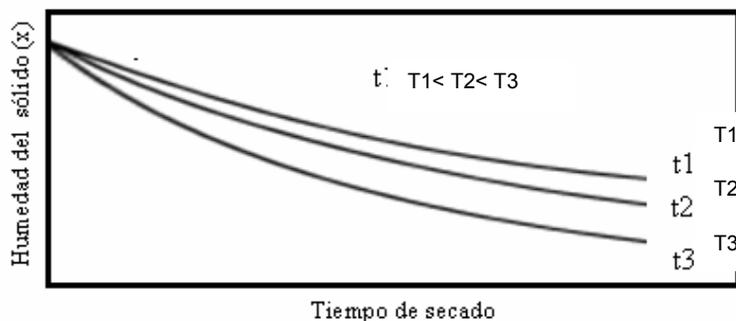


Figura 2.33 Comportamiento de secado de un sólido [12]

b) Velocidad másica del aire (G): típicamente se presenta el efecto de esta variable operacional según la figura 2.34, donde se observa cómo al aumentar la velocidad del aire también lo hace la velocidad de secado.

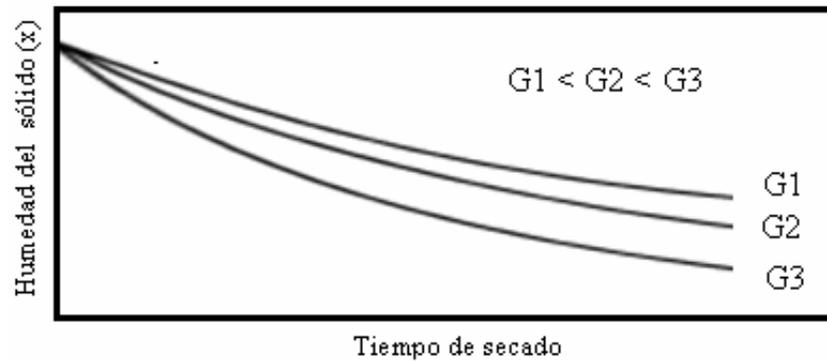


Figura 2.34 Variaciones de la humedad del sólido en el tiempo, a distintas velocidades másicas del aire [12]

g) Humedad absoluta del aire (Y): al aumentar la humedad absoluta del aire disminuye lógicamente la velocidad de secado, disminuyendo la fuerza impulsora o motriz de la transferencia de masa en la fase gas, como se muestra en la figura 2.35.

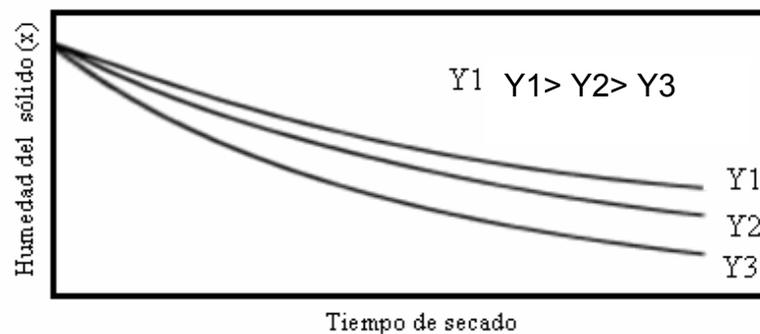


Figura 2.35 Variación de la humedad del sólido (X) con el tiempo (t) , a distintas humedades del aire (Y) [12]

d) Tamaño de partícula del sólido (D_p): si las características del sólido permiten obtener partículas uniformes, al variar el tamaño se puede observar que la velocidad de secado aumenta al disminuir el tamaño de partículas. Si por el contrario, si se trata de un sólido que no permite obtener tamaños uniformes, la influencia de la profundidad del lecho es similar a la anteriormente comentada. Al aumentar la altura del lecho disminuye la velocidad de secado (figura 2.36).

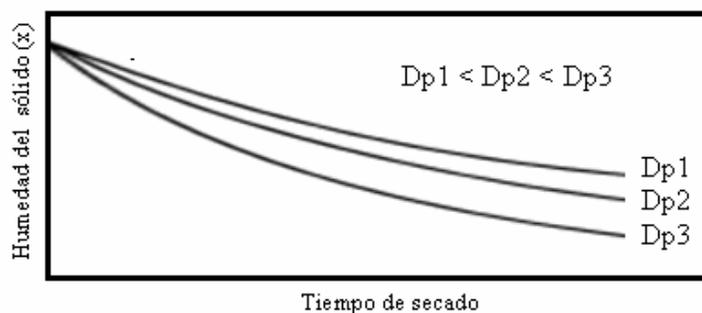


Figura 2.36 Variación del tamaño del sólido versus el tiempo [12]

2.3.11 Determinación de las ecuaciones de transferencia de masa en el proceso de secado

En todos los secadores el gas circula sobre o a través del sólido, la materia tiene que transferirse desde la superficie del sólido hasta el gas, y a veces a través de los poros interiores del sólido. La resistencia a la transferencia de materia puede ser controlada por la velocidad de secado. Desde el punto de vista del gas, este tipo de secado es muy parecido a la humidificación adiabática; y desde el punto de vista del sólido es análogo a la evaporación cuando el sólido está muy húmedo [9].

En la figura 2.37 se muestra un diagrama de flujo para un secador continuo, arreglado para el flujo a contracorriente. El sólido entra con un flujo S_s (masa del sólido seco/tiempo.área); se seca de X_1 a X_2 (masa de agua/ masa sólido seco) y sufre un cambio de temperatura de t_{s1} a t_{s2} . El gas fluye con una rapidez G_s (masa gas seco/ tiempo.área), sufre un cambio de humedad de Y_2 a Y_1 (masa de agua/ masa de gas seco) y un cambio de temperatura t_{g2} a t_{g1} . Entonces, un balance de agua se expresa como:

$$S_s.X_1 + G_s.Y_2 = S_s.X_2 + G_s.Y_1$$

[Ec. 2.9]

$$S_s.(X_1 + X_2) = G_s.(Y_1 - Y_2) \quad \text{[Ec. 2.10].}$$

La entalpía del sólido húmedo está dada por la ecuación:

$$H'_s = C_s.(T_s - T_0) + X.C_A.(T_s - T_0) + \Delta H_A \quad \text{[Ec. 2.11]}$$

Donde:

H'_s = entalpía del sólido húmedo a T_s , con respecto al sólido a la temperatura de referencia T_0 (J/kg. sólido seco).

C_s = Capacidad calorífica del sólido seco (J/ kg de sólido seco. K)

C_A = Capacidad calorífica de la humedad, como un líquido (J/ kg de agua. K).

ΔH_A = Calor integral de humidificación (adsorción, hidratación o solución) con referencia al líquido y sólido puros, en T_0 , (J/ kg de aire seco).

La entalpía del gas se representa por H'_G , (J/kg gas seco). Si la pérdida neta de calor en el secador es Q (J/s), el balance de entalpía se vuelve:

$$S_S \cdot H_{S1} + G_S \cdot H_{G2} = S_S \cdot H_{S2} + G_S \cdot H_{G1} + Q \quad [\text{Ec. 2.12}]$$

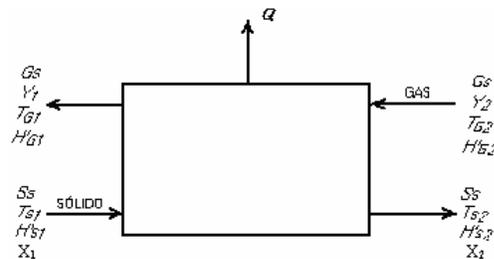


Figura 2.38 Diagrama de flujo de un secador continuo [9]

Para la operación adiabática, $Q = 0$; y si proporciona calor dentro del secador a un grado mayor que las pérdidas caloríficas, Q es negativa. Si el sólido se acarrea sobre camiones u otro soporte, el calor sensible del soporte también debe incluirse en el balance. Pueden hacerse los cambios obvios en las ecuaciones para los secadores en flujo paralelo [9].

2.3.12 Determinación de las ecuaciones de transferencia de calor en el proceso de secado

Por definición, el secado de los sólidos húmedos es un proceso térmico. Aunque con frecuencia se complica por la difusión de la humedad a través del sólido, es posible secar muchos materiales simplemente calentándolos por encima o más aún de la temperatura de ebullición del líquido, tal vez bastante por encima con el fin de liberar las últimas trazas del material adsorbido. Generalmente se comunica calor a un secador con los siguientes objetivos:

- a) Calentar la alimentación (sólidos y líquidos) hasta la temperatura de vaporización.
- b) Vaporizar el líquido.
- c) Calentar el sólido hasta su temperatura final.
- d) Calentar el vapor hasta su temperatura final.

Los objetivos a, c y d son con frecuencia despreciables en comparación con el objetivo b. En el caso más general, la velocidad global de transferencia de calor se puede calcular en la forma que se indica a continuación: si m_s es la masa de sólidos totalmente secos que han de secarse en la unidad de tiempo; y X_a y X_b los contenidos inicial y final del líquido, en masa de líquido por unidad de masa de sólido totalmente seco, la cantidad de calor transmitido por unidad de masa de sólido Q_T/m_s es:

$$\frac{Q_T}{m_s} = C_{ps}(T_{sb} - T_{sa}) + X_a C_{pl}(T_v - T_{sa}) + (X_a + X_b)\lambda + X_b C_{pl}(T_{sb} - T_v) +$$

$$(X_a + X_b).X_a.C_{pv}.(T_{vb} - T_v)$$

[Ec.

2.13]

donde:

Q_T = calor total (J)

T_{sa} = temperatura de la alimentación (K)

T_v = temperatura de vaporización (K)

T_{sb} = temperatura final de los sólidos (K)

T_{vb} = temperatura final del vapor (K)

λ = calor latente de vaporización (J/mol de agua)

C_{ps} , C_{pL} , C_{pv} = calores específicos del sólido, líquido y vapor, respectivamente (J/mol.K)

La ecuación anterior supone que los calores específicos y el calor latente de vaporización son constantes y que la vaporización transcurre a una temperatura constante (T_v). Estas condiciones raramente se cumplen pero esta ecuación 2.13 permite una estimación aceptable de la velocidad de transferencia de calor durante el secado, si las temperaturas son conocidas o pueden ser estimadas con de forma aproximación aceptable.

En los cálculos de secado se aplica la ecuación básica de transmisión de calor:

$$qT = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad \text{[Ec.} \quad \text{2.14]}$$

Donde:

U = coeficiente global de transferencia de calor ($J/m^2 \cdot K$)

A = área de transferencia de calor (m^2)

ΔT_m = diferencia media de temperatura (K)

En ocasiones se conocen A y ΔT_m mientras que la capacidad del secador se puede estimar a partir de un valor de U calculado o medido; pero con

frecuencia existe una considerable incertidumbre en el área realmente disponible para la transmisión de calor [9].

2.4 DIFUSIÓN DEL AGUA EN SÓLIDOS EN EL PROCESO DE SECADO

2.4.1 Proceso de difusión

La difusión es el movimiento, bajo la influencia de un estímulo físico, de un componente individual a través de una mezcla. La causa más frecuente de la difusión es un gradiente de concentración del componente que difunde. Un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente. Cuando el gradiente se mantiene mediante el suministro continuo de los componentes de baja y alta concentración, el flujo del componente que se difunde es continuo. Este movimiento es aprovechado en las operaciones de transferencia de materia. Aunque la causa habitual de la difusión es un gradiente de concentración, la difusión también puede ser originada por un gradiente de presión, por un gradiente de temperatura o por la aplicación de una fuerza externa como en el caso de una centrífuga. La difusión molecular inducida por un gradiente de presión (no presión parcial) recibe el nombre de difusión de presión, la inducida por la temperatura es la difusión térmica, y la debida a un campo externo es la difusión forzada. Las tres son muy poco frecuentes en ingeniería química, y aquí solamente se considerará la difusión bajo un gradiente de concentración.

La difusión no está restringida a la transferencia molecular a través de capas estacionarias de sólido o fluido. También tiene lugar en fases fluidas debido a la mezcla física o a los remolinos del flujo turbulento, de la misma

forma que el calor puede fluir en un fluido por convección. Este hecho recibe el nombre de difusión en régimen turbulento. A veces el proceso de difusión va acompañado de flujo global de la mezcla en una dirección paralela a la dirección de difusión, y con frecuencia está relacionada con el flujo de calor. **[10]**

2.4.2 Tipos de difusión en sólidos

La estructura del sólido y su interacción con la sustancia en difusión influyen profundamente en la forma en que ocurre la difusión y en la rapidez de transporte. **[10]**

2.4.2.1 Difusión a través de polímeros

En muchos aspectos, la difusión de solutos a través de ciertos tipos de sólidos poliméricos se parece más a la difusión a través de soluciones líquidas que a cualquiera de los otros fenómenos de difusión en sólidos, al menos cuando se trata de los gases incondensables como solutos. Imagínense dos cuerpos de un gas (por ejemplo, H₂) a presiones diferentes separados por una membrana polimérica (polietileno). El gas se disuelve en el sólido en las caras expuestas al gas en una extensión que generalmente se puede describir mediante la Ley de Henry: La concentración, directamente proporcional a la presión. Entonces, el gas se difunde desde el lado de presión elevada al de baja presión en una forma que generalmente se describe como “activada” (las cadenas poliméricas están en un estado de movimiento térmico constante y las moléculas en difusión brincan de una posición a otra sobre una barrera de potencial. Un brinco efectivo requiere que exista un hueco o paso del tamaño suficiente; esto, a su vez, depende del movimiento térmico de las cadenas de polímero. El término “activado” se

refiere a la dependencia de la temperatura de la difusividad, que sigue una expresión del tipo de la de Arrhenius. Para las difusividades de los gases incondensables, puede ser del orden de 10^{-10} m²/s.

En particular, para moléculas grandes, el tamaño y la forma de las moléculas en difusión (medidas en volumen molecular, ramificadas opuestas a estructuras lineales, etc.) determina el tamaño requerido de los huecos. Algunas veces, los disolventes para “plastificar” los polímeros, se difunden y, en consecuencia, la rapidez puede ser más elevada para buenos disolventes (por ejemplo benceno y cetona metilética en hules poliméricos) que para gases incondensables. Con frecuencia, estas difusividades dependen mucho de la concentración del soluto en el sólido. [10]

2.4.2.2 Difusión a través de sólidos cristalinos

Los mecanismos de difusión varían en gran medida dependiendo de la estructura cristalina y de la naturaleza del soluto. En el caso de cristales con redes de simetría cúbica, la difusividad es isotrópica, pero no lo es para cristales no cúbicos.

Para metales en particular, aunque no necesariamente, los mecanismos principales son los siguientes:

1. **Mecanismo intersticial.** Los puntos intersticiales son lugares entre los átomos de una red cristalina. Los átomos pequeños de soluto en difusión pueden pasar de un punto intersticial al siguiente, cuando los átomos formadores de la red cristalina se separan temporalmente proporcionando el espacio necesario. El carbono se difunde a través del α y γ -hierro de esta forma.

2. Mecanismo de hueco. Si, los sitios de la red están desocupados (vacantes), un átomo en un sitio adyacente puede brincar al vacante.

3. Mecanismo intersticial de hueco. En este caso un átomo grande que ocupa un punto intersticial empuja a uno de sus vecinos en la red cristalina a una posición intersticial y se mueve a la vacante que ha producido.

4. Mecanismo de iones amontonados. Un átomo extra en una cadena de átomos estrechamente empaçados puede desplazar varios átomos en la línea de su posición de equilibrio, produciendo así un flux de difusión.

5. Difusión a lo largo del límite del gránulo. La difusividad en un metal en cristal único es siempre sustancialmente menor que en una muestra multicristalina, debido a que en el último existe difusión a lo largo del límite de los gránulos (interfases cristalinas) y dislocaciones. **[10]**

2.4.2.3 Difusión en sólidos porosos

El sólido puede estar, en la forma de una barrera porosa o membrana, separando dos partes del fluido, como en el caso de la difusión gaseosa. Aquí, el movimiento del soluto puede ser por difusión de una parte del fluido a la otra, en virtud de un gradiente de concentración; también puede ser hidrodinámico, como resultado de una diferencia de presión. Alternativamente, en el caso de adsorbentes, gránulos de catalizador, sólidos que se van a secar, partículas metálicas en las que se va a llevar a cabo una lixiviación, y similares, el sólido normalmente está totalmente rodeado por un cuerpo único de fluido; el movimiento hacia afuera y hacia adentro del soluto a través de los poros del sólido se realiza únicamente por difusión. El movimiento difusivo puede ser dentro del fluido que llena los poros o puede también involucrar difusión superficial del soluto adsorbido. Los poros del

sólido pueden estar interconectados, lo cual significa que el fluido los puede alcanzar por los dos lados de los poros; vía cerrada o conectado al exterior del sólido por un único lado; o aislado, inaccesible al fluido externo. Se espera que los poros en la mayoría de los sólidos no sean ni rectos ni de diámetro constante. Se dice que están bidispersas, las partículas de catalizador fabricadas por prensado de polvos, que contienen microporos hasta gránulos, con macroporos que rodean las partículas de polvo de diferente orden de magnitud en tamaño. [10]

2.4.3 Relación entre la difusión y la transferencia de calor

Existe una analogía entre el flujo de calor y la difusión. En cada caso la causa del flujo es un gradiente. En transmisión de calor la fuerza impulsora es un gradiente de temperatura. En ambos casos la densidad del flujo es directamente proporcional al gradiente. Sin embargo la analogía no puede extenderse más allá, debido a que el calor no es una sustancia, sino energía en tránsito. Cuando el calor fluye de un punto a otro, no deja espacio detrás de sí ni requiere un espacio para una nueva localización. La difusión es un flujo físico de materia que transcurre con una velocidad definida. Un componente que se difunde deja detrás de él un espacio y es preciso disponer de un lugar para su nueva localización.

La naturaleza material de la difusión y el flujo que resulta conducen a tres tipos de situaciones:

1. Solamente se trasfiere un componente A de la mezcla hacia o desde la interfase y el flujo total es el correspondiente a A . La absorción de

un sólo componente desde un gas hacia un líquido es un ejemplo de ese tipo.

2. La difusión de un componente A en una mezcla está equilibrada por un flujo molar igual y de sentido contrario al componente B , de tal forma que no hay flujo molar neto. Esto ocurre generalmente en destilación, lo cual da lugar a que no haya flujo neto de volumen en la fase gaseosa. Sin embargo, generalmente existe un flujo neto de volumen o de masa en la fase líquida debido a la diferencia de densidades molares.
3. La difusión de A y B tiene lugar en sentidos contrarios, pero las densidades molares de flujo son diferentes. Esta situación se presenta con frecuencia en la difusión de especies que reaccionan químicamente hacia o desde la superficie de un catalizador. **[10]**

2.4.4 Proceso de difusión en el secado de sólidos

En todas las operaciones de transferencia de materia la difusión ocurre por lo menos en una fase, y con frecuencia en dos fases. En el caso de la operación de secado, el agua líquida difunde a través del sólido hacia la superficie del mismo, se evapora, y después se difunde como vapor en la fase gaseosa. La zona de evaporación puede estar bien en la superficie del sólido o en el interior del mismo. Cuando la zona de evaporación está en el sólido, la difusión tiene lugar en el sólido comprendido entre la zona de evaporación y la superficie, de forma que en el sólido hay difusión de líquido y de vapor.

En todos los secaderos en los que un gas circula sobre o a través de los sólidos, la materia tiene que transferirse desde la superficie del sólido hasta el gas, y a veces a través de los poros interiores de sólido. La resistencia a la

transferencia de materia, y no la transmisión de calor, puede controlar la velocidad de secado. Esto ocurre con más frecuencia en el secado con circulación sobre tablas, láminas o lechos de sólidos. Desde el punto de vista del gas, este tipo de secado es muy parecido a la humidificación adiabática; desde el punto de vista del sólido es análogo a la evaporación cuando el sólido está muy húmedo, y como la desorción de disolvente desde un adsorbente cuando el sólido está prácticamente seco [9].

2.4.5 Teoría capilar empleada en el proceso de secado

El fenómeno de la capilaridad es el responsable del movimiento del líquido en el lecho durante el proceso de secado. La estructura de los espacios libres entre los gránulos de los lechos de partículas es de gran importancia a la hora de explicar estos movimientos. Un sistema de partículas esféricas de tamaño uniforme puede empaquetarse regularmente en seis modos diferentes con distintas porosidades, aunque en este tipo de lechos los tamaños de los poros y sus conexiones están determinados y presentan una distribución discreta de tamaños de poro, siendo ésta la principal diferencia respecto a otros tipos de partículas, donde puede haber una distribución continua de tamaños de poros. En un lecho de esferas, cada grupo de las mismas rodea un espacio vacío que se conoce como poro. Los distintos poros están conectados por unos conductos de distinto tamaño, los menores de los cuales se conocen como angosturas.

Esta analogía se puede ajustar en este proceso, ya que cuando va avanzando el secado, la superficie del sólido se va secando y el frente de humedad va retrocediendo hacia las angosturas que lo conectan con otros poros, de modo que se establece un potencial de succión creciente en el líquido. Cuando el menisco del líquido en estos poros ha profundizado hasta

el final del mismo, ocurrirá una mayor evaporación, con lo que este menisco se romperá y los poros más grandes estarán secos y abiertos. Se formará un menisco en la angostura correspondiente. De este modo puede ir avanzando el proceso de secado.

El flujo de agua a través de las angosturas que rodean un poro abierto está regido por el tamaño de las mismas de la siguiente forma:

a) Si el tamaño de las angosturas es tal que el potencial de succión a su entrada es mayor que el potencial de succión a ese nivel en el lecho, el poro permanecerá lleno por establecimiento de un menisco en esa posición. Esta angostura protegerá a otros poros llenos adyacentes, que no podrán abrirse hasta que alguna angostura a la que esté conectado lo haga.

b) Si el tamaño de la angostura es tal que su potencial de succión es menor que el correspondiente a ese nivel en el lecho, el menisco se destruirá y se abrirá la estructura, permitiendo el avance de este proceso.

Conforme avanza el secado tienen lugar dos procesos simultáneamente:

a) El colapso de angosturas progresivamente menores, con la progresiva apertura de poros y angosturas conectadas.

b) El colapso de más angosturas llenas dentro del lecho y adyacentes a poros abiertos, con la consecuente apertura de poros adyacentes, que anteriormente estaban protegidos. Debe tenerse en cuenta, que aunque el potencial de succión efectivo de un poro o angostura supere el correspondiente a su entrada no se producirá necesariamente el colapso de este poro. Esto sólo puede ocurrir si está conectado con otros poros abiertos. Éste poro abierto sólo puede abrirse por el colapso de una angostura a la que esté conectado

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1.1 Propiedades fisicoquímicas del grano fermentado de cacao.

En esta etapa, al cacao fermentado obtenido anteriormente por la hacienda cacaotera, se le aplicaron las pruebas de humedad, cenizas, pH, acidez titulable, y contenidos de: carbohidratos, grasa, fibra y almidón, de acuerdo a las normas COVENIN (Tabla 3.1) para cacao.

Tabla 3.1 Normas COVENIN para la determinación de las propiedades fisicoquímicas.

NORMA COVENIN	TITULO
374:1995	Granos de cacao. Determinación de humedad.
376:1981	Cacao y derivados. Determinación de almidón.
429:1981	Café elaborado (cacao). Determinación del contenido de cenizas y sus características.
430:1982	Café elaborado (cacao). Determinación del contenido de fibra cruda.
1315:1979	Alimentos. Determinación de pH (acidez iónica).
1340:1995	Cacao y productos derivados. Determinación de la grasa cruda.

Los procedimientos fueron realizados por triplicado para cada muestra de cacao y se presentan a continuación:

A. Determinación del pH (Norma Covenin N°1315)

A.1. Preparación de las muestras:

A cada muestra de 5 g de cacao fermentado que era pesada cuidadosamente en un vaso precipitado de 200 ml, se le agregaba 90 ml de agua destilada. La suspensión obtenida era sometida a homogeneización hasta quedar libre de grumos. Luego, la suspensión era filtrada y se dejaba que el filtrado alcanzara un temperatura de 20 a 25 °C.

A.2. Determinación del pH

Los electrodos del potenciómetro eran sumergidos en un vaso precipitado con agua destilada. Se conectaba el aparato y se llevaba a la posición neutral. Luego de calentar por un lapso de 5 min, los electrodos eran sacados del agua destilada y secados con una toalla de papel. Se calibraba el equipo con soluciones tampón de 7 y 4, y se verificaba la temperatura de la muestra cuyo pH iba a ser medido. Se tomaba la muestra preparada anteriormente y se sumergían los electrodos en ella. Posteriormente el valor del pH de la muestra diluida de cacao era leído, y se regresaba el control a posición neutral. Los electrodos eran extraídos y secados, lavados con agua destilada y secados finalmente con toalla de papel fino.

B. Determinación de acidez titulable (Norma Covenin N°942)

Cinco gramos de la muestra de cacao fermentado era pesada y transferida a un matraz Erlenmeyer de 100 ml. Luego se agregaba 25 ml de alcohol etílico de 90% (V/V) neutralizado. El matraz era tapado y dejado en reposo durante 24 horas, agitándolo de vez en cuando. Entonces se tomaba una alícuota de 10 ml. del líquido claro y se colocaba en un matraz Erlenmeyer de 50 ml, donde se añadía 3 gotas de solución indicadora (fenolftaleína), y donde era titulada con una solución de NaOH al 0,05 N. Una vez alcanzado el equilibrio, se procedía a registrar el volumen de base gastada.

C. Determinación de humedad (Norma Covenin N°374)

Luego de registrar el peso de cápsulas de petri vacías con sus tapas, en cada una de ellas se colocó 10 g de la muestra de cacao fermentado previamente molido, y se volvió a pesar. Una vez que la estufa fue precalentada a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, cada muestra en su cápsula fue sometida a calentamiento en la estufa durante 16 horas. Transcurrido este período las cápsulas con las muestras fueron retiradas de la estufa y colocadas en el desecador, dejándolas enfriar hasta que alcanzara la temperatura ambiente; y finalmente pesadas una vez más.

D. Determinación del contenido de cenizas totales (Norma Covenin N°429)

Cada muestra de cacao (3 g) fue pesada en crisoles cuyos pesos vacíos habían sido determinados previamente en la balanza. Estos crisoles fueron colocados en la mufla por 24 horas a una temperatura

de 550 °C (figura 3.1); luego de ser retirados de la mufla fueron introducidos en la estufa a 100 °C durante 20 minutos. Después de extraídos de la estufa los crisoles con sus muestras fueron puestos en el desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente, y pesados de nuevo.



Figura 3.1 Crisoles con muestras en la mufla

E. Determinación del contenido de fibra (Norma Covenin N°430)

Los residuos de cada muestra proveniente de la determinación de grasa, fueron pesados en cada uno de los crisoles Gooch que contenían 1 g de caolín (secados y pesados con anterioridad). Luego, los crisoles con las muestras se colocaron en el equipo de extracción, sobre la placa de calentamiento y debajo del condensador (figura 3.2). Entonces se dio inicio a la circulación de agua en el condensador y luego se procedió a levantar la palanca para cerrar el sistema. Posteriormente, por la parte superior del equipo se añadió a cada crisol con muestra de cacao, 200 ml de solución de ácido sulfúrico preparada y unas gotas de octanol. Se encendió el equipo de calentamiento y se empezó a calentar cada muestra hasta ebullición

durante 30 min. (digestión ácida), agitando de vez en cuando. Posteriormente las muestras fueron filtradas utilizando la bomba del equipo, lavadas con porciones de agua destilada y filtradas una vez más.

Después, a cada crisol con muestra de cacao se añadió por la parte superior del equipo, 200 ml de la solución de NaOH preparada, y se comenzó la digestión alcalina por 30 min; se filtró cada muestra utilizando la bomba del equipo; se lavó a cada una de ellas con porciones de agua destilada, se filtró y se repitió la filtración una vez más. Luego se apagó el equipo, se subió la palanca para abrir el sistema, y los crisoles Gooch con las muestras fueron colocados en la estufa a 100°C, durante 6 h. Luego de retiradas de la estufa, las muestras se dejaron enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente. Se pesaron los crisoles con las muestras y se llevaron a la mufla a 550°C durante 3 horas. Concluido este calentamiento de las muestras en la mufla, éstas se dejaron reposar; posteriormente fueron sacadas, enfriadas en un desecador a temperatura ambiente y pesadas finalmente.

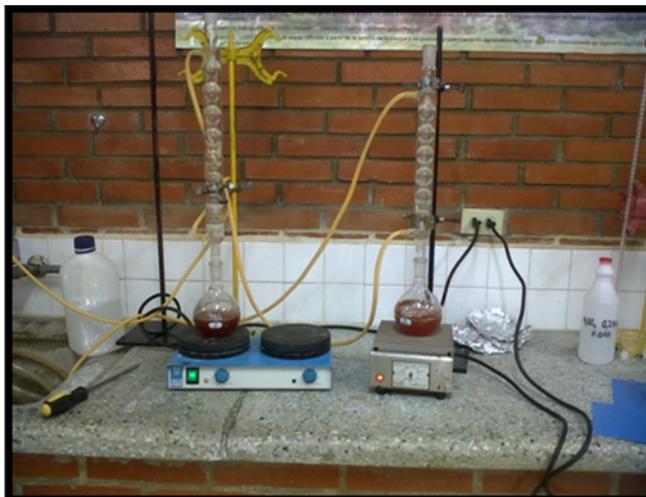


Figura 3.2 Balones con la muestra en el equipo de extracción, sobre la placa de calentamiento.

F. Determinación de proteínas

Una muestra de 2 g aproximadamente, fue pesada en un balón de 500 ml para digestión; luego se le añadió dos pastillas de catalizador en el balón de digestión y se le agregó 15 ml de ácido sulfúrico concentrado. Se comenzó la digestión de la muestra calentando a la temperatura baja (indicador en posición 5), hasta que el extracto estuvo completamente verdoso y claro, cuando comenzó a aparecer humo blanco del ácido sulfúrico. Después de apagado el calentador, la muestra digerida se dejó enfriar y fue transferida al tubo portamuestra del destilador automático (figura 3.3). Una vez encendido el destilador automático y programado para un tiempo de destilación de 4 min, se añadió 50 ml de agua destiladas, como también 50 ml de solución de NaOH (18 N). Por otra parte, se preparó 25 ml de solución receptora en la fiola, los cuales fueron colocados en el extremo del condensador para recoger el destilado (figura 3.4), y se comenzó el ciclo de

destilación. Una vez recogidos aproximadamente 75 ml del destilado, se procedió a titular hasta el viraje del indicador (de verde a morado), y a registrar el volumen de titulante gastado.



Figura 3.3 Muestras digeridas en tubos portamuestras.



Figura 3.4 Recolección del destilado en el digestor Kjeldahl.

G. Contenido de grasa

Cada muestra seca y pulverizada de 3 g fue pesada en cada dedal de extracción previamente tarado. Los dedales de extracción fueron fijados en el equipo de extracción Soxhlet (figura 3.5), y se agregó 80 ml de éter de petróleo en cada *beaker* como solvente. Una vez abierta la llave de agua de enfriamiento del condensador, fueron colocados los *beakers* con el solvente sobre las placas calientes, bajo el condensador. Seguidamente fue bajada la palanca que permite subir las placas calientes para el cierre hermético del sistema, y cada dedal de extracción fue sumergido en cada *beaker* con el solvente. Hecho esto el equipo fue encendido, fue seleccionado el ciclo de extracción (calentamiento-recirculación-recobro), y se dio inicio a dicho ciclo, siguiendo las indicaciones del equipo. Luego de finalizado el ciclo de extracción el equipo fue apagado, y se abrió el sistema subiendo la palanca que permite bajar las placas calientes. De inmediato fueron colocados los dedales y los *beakers* con el solvente y la grasa extraída en la estufa, a 100 °C por 20 min. Una vez sacados los dedales y los *beakers* de la estufa, fueron introducidos y enfriados en un desecador; y pesados finalmente.



Figura 3.5 Dedales de extracción colocados en el equipo Soxhlet.

H. Contenido de Almidón

Se pesaron 4 g de muestra aproximadamente en un papel de filtro, se colocó la muestra en el dedal de extracción, se introdujo el dedal dentro del aparato Soxhlet y se realizó la extracción de grasa con éter de petróleo, durante 6 horas. Se lavó el residuo que contenía el papel de filtro con 200 ml de agua destilada, se procedió a transferir el residuo a un matraz aforado de 500 ml con 200 ml de agua destilada y se añadió 20 ml de HCL. Posteriormente se colocó el matraz en Baño María durante 3 horas, se dejó enfriar y se neutralizó con NaOH 1N, como indicador se utilizó solución de fenolftaleína. Se llevó a un volumen con agua destilada y se procedió a filtrar a través del papel de filtro. El filtrado se colocó en una bureta de 50 ml, se mezclaron las dos soluciones de Fehling I y II, 5 ml de cada una y 5 ml de agua destilada en un matraz erlenmeyer de 250 ml. Se llevó a ebullición y luego se tituló la solución, utilizando azul de metileno como indicador, hasta que apareció la coloración rojo ladrillo.

3.1.2 Determinación del efecto de temperatura de la cámara del secador de bandeja sobre el tiempo de secado de los granos de cacao.

La determinación del efecto de temperatura es primordial para el secado de granos de cacao, asegurando que la temperatura de calentamiento sea aproximadamente de 50 a 70°C, según los estándares de calidad para los secadores artificiales. Para poder cumplir con el objetivo planteado se realizaron ensayos en el secador de bandeja con convección forzada de aire (figura 3.6) del Laboratorio de Alimentos de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui.



Figura 3.6 Secador de bandeja con convección forzada de aire.

Las temperaturas empleadas en el secado del grano de cacao fermentado fueron de 50, 60 y 70°C, con fluctuaciones de $\pm 5^\circ\text{C}$, donde se determinaron los diferentes tiempos para cada una de estas antes mencionadas, por medio de la realización de la respectiva curva de velocidad de secado. Se realizaron dos corridas a cada temperatura y se utilizó granos de cacao fermentado, de la unidad de producción comunitaria “Cacao de Paria 338”. El material fue recolectado al salir del fermentador ubicado en

dicha hacienda y se conservó congelado en bolsas plásticas hasta el momento de las experiencias.

3.1.3 Estudio del efecto de la variación del espesor del lecho de granos fermentados de cacao sobre el tiempo en un secador de bandejas con convección forzada de aire.

Según los niveles de temperatura establecidos para el secado de granos de cacao fermentado (50, 60 y 70) °C, el presente estudio consistió en aplicar calor a una capa (1,1 cm) y a dos capas de granos, aproximadamente 2,41 cm de espesor, determinando su comportamiento durante el proceso (superficie de evaporación y secado homogéneo). Se realizaron dos corridas para la monocapa y bicapa, respectivamente a las diferentes temperaturas.



Figura 3.7 Muestras de granos de cacao seco a 60°C. a) monocapa b) bicapa

3.1.4 Caracterización de las curvas de velocidad de secado de los granos de cacao en función de sus contenidos de humedad libre.

La realización de la curva de velocidad de secado es esencial, ya que todo sólido necesita tener una curva de secado para que su comportamiento durante el secado pueda ser caracterizado.

A. Proceso de secado del grano fermentado de cacao a temperatura de 50, 60 y 70°C, en el secador de bandejas con convección forzada de aire.

Luego de haber pesado las bandejas de aluminio (dimensiones en la tabla 3.1) vacías, fueron introducidos en ellas una cantidad de granos de cacao fermentado (8 granos, aproximadamente, monocapa), de tal forma que cubriera toda el área de la bandeja (en lo posible se trató de mantener constante esta masa total en el resto de las experiencias).

Con la ayuda del psicrómetro se midió las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire ambiental. Se introdujo la bandeja de aluminio con el sólido húmedo al secador, y se fijó la temperatura deseada. Cada 15 minutos la bandeja era retirada del secador y colocada en el desecador por 10 min (figura 3.8), luego de lo cual se pesaba la bandeja con la muestra contenida en ella, y enseguida se volvía a introducir nuevamente en el secador. Se tuvo el cuidado de remover los granos de cacao cada 3 horas. Los sólidos fueron sometidos a secado hasta alcanzar el equilibrio (peso constante). Con los datos recolectados, se procedió a construir la curva de velocidad de secado, tal como se muestra en la sección 4.1.2 (capítulo 4).

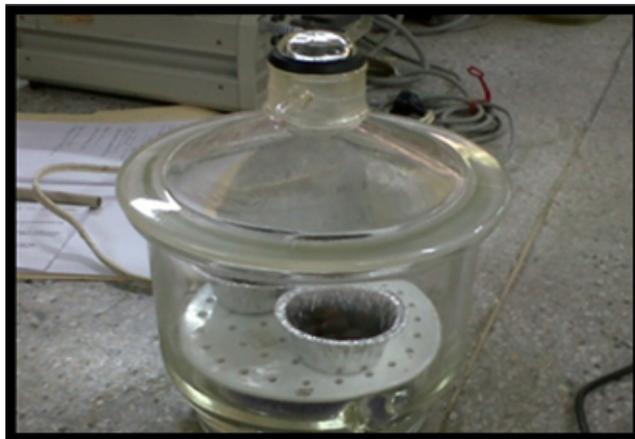


Figura 3.8 Muestras colocadas en el desecador.



Figura 3.9 Psicrómetro utilizado para medir la temperatura de bulbo seco y húmedo

B. Determinación de la humedad inicial a través del método de la estufa.

Es necesario conocer la humedad inicial del grano de cacao fermentado, para poder realizar los cálculos relativos a la construcción de la curva de velocidad de secado. El procedimiento seguido fue el siguiente:

Tres muestras de 10 g, aproximadamente, de sólido húmedo fueron tomadas, colocadas en crisoles previamente pesados y llevadas a la estufa a 103 °C por un tiempo de 16 horas. Se pesaron las muestras completamente secas y se les determinó la masa de cada una de ellas por diferencia de pesadas. La humedad inicial del sólido fue determinada aplicando la ecuación 2.4, promediando los valores de humedad obtenidos, los cuales se muestran en la Tabla A.5 del anexo A.

3.1.5 Comparación de las propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidratada de cacao, con las propiedades del cacao fermentado.

La determinación de las propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidratada de cacao se realizó del mismo modo, siguiendo las normas Covenin como en la sección 3.1.1 para el cacao fermentado. Luego de esto se compararon los resultados a sus diferentes condiciones, en la sección 4.1.5 (capítulo 4).

3.2 MATERIALES, EQUIPOS Y SUSTANCIAS UTILIZADOS

3.2.1 Materiales

- Platillos de aluminio portamuestras.
- Dedales de extracción.
- Mufla.
- Cilindros graduados.
- Crisoles de Gooch.

- Pinzas.
- Guantes de resistencia al calor.
- Tubos para digestión.
- Pipetas graduadas.
- Fiolas de 50 ml.
- Buretas graduadas.
- Matraces aforados.
- Embudos.
- Soporte para embudos y para buretas.
- Termómetro de bulbo seco, apreciación de 1°C, escala 0-100 °C .
- Termómetro de bulbo húmedo, apreciación de 1°C, escala 0-100 °C

3.2.2 Equipos

- Estufa con corriente de aire: marca Memmer de cuatro bandejas perforadas con dimensiones de 30 cm de ancho, 39 cm de largo y de profundidad de 1cm.
- Secador de bandeja con convección forzada de aire: fabricación casera de cuatro bandejas.
- Balanza digital: marca Denver Instrument Company, modelo P-114, capacidad de 210 gramos, con apreciación de $\pm 0,0001$ gramos.
- Balanza para determinación de humedad: marca Ohaus Corporación, modelo MB 200.
- Balanza: marca Ohaus Explorer Pro, modelo EP4102C. Capacidad máxima de 4100 gramos. Temperatura de 10-40°C.

- Aparato de extracción de grasa: marca Velp Scientifica, modelo SER 148.
- Aparato de extracción de fibra: marca Velp Scientifica, modelo 101201.
- Equipo para determinación de proteínas: Unidad de destilación automática a vapor. Marca Velp Scientifica. Modelo UDK 130D.
- Digestor Kjeldahl.
- Desecador con material adsorbente en el fondo.

3.2.3 Sustancias

- Silicagel, como material adsorbente para colocar en el desecador.
- Almendras de cacao.
- Hexano o éter de petróleo.
- Perlas de calentamiento.
- Solución de H_2SO_4 0,255 N (1,25 g de ácido/ 100 ml de solución).
- Solución de NaOH 0,313 N (1,25 g de base/ 100 ml de solución).
- Octanol.
- Ácido sulfúrico concentrado.
- Catalizador (sulfato de potasio-sulfato de cobre)
- Solución de NaOH 18 N.
- Solución de ácido bórico al 4% con indicadores (rojo de metilo y verde de bromocresol).
- Solución de HCl o ácido sulfúrico 0,1 N.
- Solución de glucosa al 0,5%.

- Acetato básico de Plomb al 10% (clarificante).
- Oxalato de sodio.
- HCl 1:1
- NaOH concentrado.
- Reactivo de Fehling A y B.
- Azul de metileno.

3.3 MUESTRA DE CÁLCULO

3.3.1 Cálculo de las propiedades fisicoquímicas para el cacao fermentado

3.3.1.1 Características Físicas

Esta prueba de las características físicas del grano de cacao fermentado permite determinar las dimensiones (ancho, largo y espesor), peso y el índice de la semilla, que están relacionadas con los factores genéticos y han sido ampliamente utilizadas para tipificar los cultivares de cacao y para catalogar comercialmente los diferentes tipos. A continuación se presentan los cálculos de cada una de ellas con un número de muestras de 10 granos de cacao de la siguiente manera:

A. Dimensiones de la semilla: ancho (A), largo (L) y espesor (E)

Los parámetros de tipificación en relación al largo, ancho y espesor se realizaron tomando el promedio de las medidas de 10 almendras y su

desviación estándar, de las muestras seleccionadas por el tamaño de la semilla, usando un medidor vernier de 15 cm con una precisión de 0,05 mm.

Para la primera muestra (semilla nº1):

Ancho (A) = 1,45 cm

Largo (L) = 2,25 cm

Espesor (E) = 1,05 cm

Como el ensayo se realiza con una población de muestra de 10 semillas (n=10), es necesario determinar los promedios de los cálculos de las dimensiones (A, L y E) mediante cálculos por separado, de la siguiente manera:

- **Ancho (A):**

$$A \text{ prom} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{(n=10)}}{10} \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Donde:

A prom = Ancho promedio de las semillas de cacao promedio (cm)

A₁ = Ancho de la semilla 1 (cm).

A₂ = Ancho de la semilla 2 (cm).

A_3 = Ancho de la semilla 3 (cm).

$A_{(n=10)}$ = Ancho de la semilla 10 (cm).

Para los valores de ancho de la semilla se tomaron los valores de la tabla A.1 del anexo A. Y sustituyendo en la ecuación 3.1, se tiene:

$A_1 = 1,45$ cm

$A_2 = 1,45$ cm

$A_3 = 1,35$ cm

$A_{(n=10)} = 1,15$ cm

$$A_{\text{prom}} = \frac{(1,45+1,45+1,35+1,15+1,25+1,35+1,25+1,25+1,35+1,15)}{10} \text{ cm}$$

A prom = 1,30 cm

- **Largo (L):**

$$L_{\text{prom}} = \frac{L_1+L_2+L_3+\dots+L_{(n=10)}}{10}$$

[Ec. 3.2]

Donde:

L_{prom} = Largo promedio de las semillas de cacao promedio (cm)

L_1 = Largo de la semilla 1 (cm).

L_2 = Largo de la semilla 2 (cm).

L_3 = Largo de la semilla 3 (cm).

$L_{(n=10)}$ = Largo de la semilla 10 (cm).

Los valores fueron tomados de la tabla A.1 y se sustituidos en la ecuación 3.2.

L_1 = 2,25 cm.

L_2 = 2,55 cm.

L_3 = 2,35 cm.

$L_{(n=10)}$ = 2,35 cm.

$$L \text{ prom} = \frac{(2,25+2,55+2,35+2,35+2,55+2,25+2,35+2,55+2,55+2,55) \text{ cm}}{10}$$

$$L \text{ prom} = 2,43 \text{ cm}$$

- **Espesor (E):**

Aquí se utilizaron los datos de la tabla A.1 y la Ec. 3.3

$$E \text{ prom} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{(n=10)}}{10} \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

Donde:

$E \text{ prom}$ = Espesor promedio de las semillas de cacao promedio (cm)

E_1 = Espesor de la semilla 1 (cm).

E_2 = Espesor de la semilla 2 (cm).

E_3 = Espesor de la semilla 3 (cm).

$E_{(n=10)}$ = Espesor de la semilla 10 (cm).

Así, por ejemplo para los datos de los espesores de cada semilla del cacao fermentado, se obtuvo:

$$E \text{ prom} = \frac{(1,05+1,05+1,05+0,95+1,05+1,05+1,05+0,95+1,05+1,05)}{10} \text{ cm}$$

$$E \text{ prom} = 1,03 \text{ cm}$$

A los resultados promedios se les calculó sus respectivas desviaciones estándar y estos valores se encuentran reportados en la tabla 4.1 (capítulo 4).

B. Peso de las semillas

Para la determinación del peso de las semillas, se usó una balanza analítica con precisión de 0,1 g. Al igual que para las dimensiones promedios de las semillas se tomó un población de muestra de 10 semillas clasificadas y se calculó similarmente.

$$P \text{ prom} = \frac{P_1+P_2+P_3+\dots+P_{(n=10)}}{10} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Donde:

P prom = Peso promedio de las semillas de cacao promedio (cm)

P_1 = Peso de la semilla 1 (cm).

P_2 = Peso de la semilla 2 (cm).

P_3 = Peso de la semilla 3 (cm).

$P_{(n=10)}$ = Peso de la semilla 10 (cm).

Se tomaron los valores de la tabla 3.1 y sustituyendo en la Ec. 3.4, se obtuvo:

$$P \text{ prom} = \frac{(2,47+2,36+2,23+1,84+2,20+2,23+2,18+2,20+2,17+1,91) \text{ g}}{10}$$

$$P \text{ prom} = 2,18 \text{ g}$$

Este valor se encuentra reportado en la tabla 4.1

C. Índice de la semilla

El índice de semilla se calculó según la siguiente ecuación para las cuatro zonas cacaoteras que se muestran en la tabla 4.1:

$$IS = P_s \text{ (g)} \times F_c \quad \text{[Ec. 3.5]}$$

Donde:

IS = Índice de la semilla

Ps = Peso de la semilla (g)

Fc = Factor de conversión (0,4)

Para evaluar el índice de la semilla de las tres zonas comparadas (Cumboto, Cuyagua y Barlovento), se tomó el peso registrado en la bibliografía y se multiplicó con el factor de conversión.

Para la zona de Río Caribe, la primera semilla se tomó el valor de su peso (o masa) de la tabla de datos A.1; y utilizando la ecuación 3.5, se obtuvo el resultado:

$$IS_1 = 2,47 \text{ g} \times 0,4$$

$$IS_1 = 0,99$$

Como los ensayos fueron realizados con una población de muestra (n = 10), se procedió para todas del mismo modo (Tabla A.1); por lo tanto, cada valor promedio de índice de semilla se determinó de la siguiente manera:

$$IS \text{ prom} = \frac{IS_1 + IS_2 + IS_3 + \dots + IS_{(n=10)}}{10} \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

donde:

IS prom = Índice de la semilla promedio

IS₁ = Índice de la semilla 1

IS₂ = Índice de la semilla 2

IS_3 = Índice de la semilla 3

$IS_{(n=10)}$ = Índice de la semilla 10

Sustituyendo en la ecuación 3.6, se tuvo como resultado:

$$IS \text{ prom} = \frac{(0,99+0,95+0,89+0,74+0,88+0,89+0,87+0,88+0,87+0,77)}{10}$$

IS prom = 0,87

Este valor anterior se ha reportado en la tabla 4.1 del capítulo 4.

3.3.1.2 Características Fisicoquímicas

Estos cálculos de propiedades fisicoquímicas de las semillas de cacao permitieron determinar los valores de pH, acidez titulable, humedad, porcentaje de ceniza, carbohidratos, contenido de grasa cruda, etc.; a fin de verificar si estos granos cumplen con las normas establecidas. A continuación se presenta cada una de los cálculos por triplicado.

A. Determinación de pH

Este cálculo permite determinar el pH (acidez iónica) en alimentos líquidos, semisólidos y sólidos. Basándose en introducir una muestra en una celda electrolítica compuesta por dos electrodos, se desarrolla un voltaje que es proporcional a la concentración de iones hidrógeno de la solución, el cual es expresado en unidades de pH. Como los ensayos se realizan por triplicado los promedios de pH fueron calculados de la siguiente manera:

$$\text{pH prom} = \frac{\text{pH}_1 + \text{pH}_2 + \text{pH}_3}{3} \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

Donde:

pH prom = Concentración promedio de iones de hidrógeno en la solución promedio.

pH₁ = Concentración de iones de hidrógeno de la solución 1.

pH₂ = Concentración de iones de hidrógeno de la solución 2.

pH₃ = Concentración de iones de hidrógeno de la solución 3.

Estos resultados fueron obtenidos a partir de las lecturas arrojados por el equipo de medición directa del pH de cada solución. La determinación del valor de pH se hizo por triplicado, con una tolerancia de 0,01 a 0,05 unidades. Como muestra de cálculo, para la primera corrida se tomaron los valores de la tabla *A.7 del apéndice A*; y se sustituyeron en la ecuación 3.7.

$$\text{pH}_1 = 5,34$$

$$\text{pH}_2 = 5,40$$

$$\text{pH}_3 = 5,37$$

$$\text{pH prom} = \frac{5,34 + 5,40 + 5,37}{3}$$

$$\text{pH prom} = 5,37$$

Los valores resultantes promedios de pH se reportan en la tabla 4.2.

B. Determinación de la acidez titulable

Aquí se usaron los datos de la tabla A.9, y se aplicó la Ec. 3.8

$$\% \text{ ácido acético} = 100(N_{\text{NaOH}} * V_{\text{NaOH}} * PE_{\text{ácido acético}}) / m_{\text{muestra}} \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

donde:

N_{NaOH} = normalidad (en N = 0,1 equiv.g/l) de la solución de NaOH.

V_{NaOH} = Volumen de la solución de hidróxido de sodio empleado en la titulación (l).

$PE_{\text{ácido acético}}$ = Peso equivalente del ácido acético igual (= 60 g/eqiv.g)

m_{muestra} = masa de la muestra de cacao (g).

Así, por ejemplo para el primer dato del cacao fermentado se tiene:

$V_{\text{NaOH}} = 0,0361$ l.

$m_{\text{muestra}} = 10,0135$ g cacao.

$$\% \text{ ácido acético} = 100(0,1 \text{ eq.g/l} * 0,0361 \text{ l} * 60 \text{ g/eq.g}) / 10,0135 \text{ g cacao}$$

$$\% \text{ ácido acético} = 2,1652 \text{ g}_{\text{ácido acético}} / \text{g}_{\text{cacao}}$$

Estos resultados fueron obtenidos a partir de las lecturas arrojadas por la titulación de la solución de NaOH. La determinación del valor del ácido acético se hizo por triplicado. Como muestra de cálculo, para la primera

corrida se tomaron los valores de la tabla A.9 del apéndice A; y se sustituyeron en la ecuación 3.8.

$$\% \text{ ácido acético}_1 = 2,1652 \text{ g}_{\text{ácido acético}}/\text{g}_{\text{cacao}}$$

$$\% \text{ ácido acético}_2 = 2,1358 \text{ g}_{\text{ácido acético}}/\text{g}_{\text{cacao}}$$

$$\% \text{ ácido acético}_3 = 2,1204 \text{ g}_{\text{ácido acético}}/\text{g}_{\text{cacao}}$$

Donde:

$$\% \text{ ácido acético prom.} = \frac{(2,1652 + 2,1358 + 2,1204) \text{ g}_{\text{ácido acético}}}{3 \text{ g}_{\text{cacao}}}$$

$$\% \text{ ácido acético prom.} = 2,1405 \text{ g}_{\text{ácido acético}}/\text{g}_{\text{cacao}}$$

Este procedimiento fue repetido de la misma manera para todos los datos de las corridas restantes; y los resultados se presentan en la tabla 4.2.

C. Determinación del porcentaje de humedad

Esta prueba consiste en la pérdida de peso que experimenta el cacao pulverizado al ser secado mediante calentamiento en la estufa a temperatura constante y a presión atmosférica normal, bajo condiciones tales que eviten cualquier cambio químico que pueda ocurrir en el cacao.

El contenido de humedad expresado en porcentaje en peso (o másico) base seca fue calculado mediante la siguiente fórmula, recomendada por la norma Covenin 374-95.

$$\% X = \frac{A-B}{A} * 100$$

[Ec. 3.9]

Donde:

%X = Porcentaje de humedad (% , base húmeda).

A = Peso de la muestra original (g).

B = Peso de la muestra seca (g).

Para la primera corrida fueron tomados los valores de la tabla A.6 del apéndice A, y procesados así:

A = 10,2298

B = 6,6515

$$X = \frac{10,2298 - 6,6515}{10,2298} * 100$$

$$X = 34,98\%$$

Estos resultados se exhiben en la tabla A.5 del anexo A. Considerando que los análisis fueron hechos por triplicado, se obtiene la humedad promedio se obtuvo de la siguiente manera:

%X₁ = 34,9792

%X₂ = 44,8211

%X₃ = 42,9398

$$\%X_{\text{prom}} = \frac{34,9792 + 44,8211 + 42,9398}{3}$$

$$X_{\text{prom}} = 40,9134\% \text{ (g agua / g sólido seco)}$$

Este procedimiento fue repetido de la misma manera para todos los datos de las corridas restantes; y los resultados se presentan en la tabla 4.2.

D. Determinación del porcentaje de ceniza

La prueba para la determinación del contenido de ceniza se basa en el residuo que se obtiene por incineración de una muestra de material bajo ensayo. Las cenizas representan la fracción mineral del material original. La expresión que rige este cálculo es la siguiente:

$$\%C = \frac{m_{\text{cenizas}}}{m_{\text{inicial}}} * 100 \quad [\text{Ec. 3. 10}]$$

Donde:

% C = Porcentaje de cenizas (%).

m_{cenizas} = masa de la muestra calcinada (g).

m_{inicial} = masa inicial de la muestra (g).

Para evaluar la primera corrida se tomaron los datos de la tabla A.5, y mediante sustitución en la ecuación 3.10, se obtuvo:

$$m_{\text{inicial}} = 20,0046 \text{ g} - 16,9859 \text{ g} = 3,0187 \text{ g}$$

$$m_{\text{cenizas}} = 17,1062 \text{ g} - 16,9859 \text{ g} = 0,1203 \text{ g}$$

tal que

$$\%C = \frac{0,1203\text{g}}{3,0187\text{g}} * 100$$

$$C = 3,9852 \% \left(\frac{g_{\text{ceniza}}}{g_{\text{cacao}}} \right)$$

Estos valores se encuentran ubicados en la tabla A.5 del anexo A. Tomando los tres valores de esta tabla se obtuvo el promedio del contenido de cenizas, de la siguiente manera:

$$\% C_1 = 3,9852 \%$$

$$\% C_2 = 4,2140 \%$$

$$\% C_3 = 4,1386 \%$$

$$\% C_{\text{prom}} = \frac{3,9852 + 4,2140 + 4,1386}{3}$$

$$C_{\text{prom}} = 4,1126\%$$

El procedimiento se realiza de la misma manera para todos los datos de las corridas restantes, y los resultados se expresan en la tabla 4.2.

F. Determinación del contenido de fibra cruda

El método consiste en digerir la muestra desgrasada, primeramente con solución de ácido sulfúrico, lavar y digerir nuevamente con solución de hidróxido de sodio; luego lavar, secar y finalmente calcinar hasta destrucción completa de la materia orgánica. La pérdida de peso después de la calcinación representa el contenido de fibra cruda en la muestra.

El contenido de fibra se expresa en porcentaje (%) y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F = ((M_1 - M_2) * 100) / M \quad \text{[Ec. 3.11]}$$

Donde:

F = contenido de fibra cruda en la muestra (%)

M = masa de la muestra (g)

M₁ = masa del crisol con el cacao más residuo seco antes de incinerar (g)

M₂ = masa del crisol con el cacao más el residuo después de incinerar (g)

En este caso, como muestra de cálculo se utilizó los datos de la tabla 3.3, para la primera corrida de cacao fermentado, y la Ec. 3.11.

M = 3,0251 g

M₁ = 0,4583 g

M₂ = 0,3415 g

$$F = ((0,4583 - 0,3415)g * 100) / 3,0251 g$$

$$F = 3,9267 g$$

Esto se repite para los demás datos, los resultados se expresan en la tabla 4.2 del capítulo 4.

G. Determinación del contenido de proteínas.

En esta prueba se somete a la muestra a un ataque con ácido sulfúrico concentrado, durante el cual el nitrógeno pasará a forma amoniacal (como sulfato amónico); el amonio del sulfato amónico pasará a amoníaco libre por tratamiento con hidróxido de sodio y el amoníaco así formado se separará

mediante destilación y se recogerá sobre una cantidad exactamente conocida de disolución ácida titulada. El amoníaco formado se determinará mediante valoración del exceso de ácido titulado.

$$\%N = ((V_{\text{HCL}} \text{ gastado} * N_{\text{HCL}} * 0.014) / M) * 100 \quad [\text{Ec. 3.12}]$$

$$P = N * F \quad [\text{Ec. 3.13}]$$

Donde:

N = Porcentaje de nitrógeno %.

P = Porcentaje de proteínas %.

$V_{\text{HCL}} \text{ gastado}$ = Volumen de ácido clorhídrico gastado en la titulación (ml)

N_{HCL} = Normalidad del ácido clorhídrico gastado en la titulación.

M = Masa de la muestra (g)

0,014 = Equivalente-gramo del nitrógeno.

F = Factor proteico = 6,25

En este caso se utilizan datos de la tabla 3.5 (primera corrida del cacao seco) y la Ec.3.12 y 3.13.

$V_{\text{HCL}} \text{ gastado}$ = 0,4 ml

N_{HCL} = 0,8552

M = 0,1822 g

$$N = ((0,4 \text{ ml} * 0,8552 * 0,014) / 0,1822) * 100$$

$$N = 2,5447\%$$

$$\text{Proteínas} = 2,5447 * 6,25$$

$$\%P = 15,9044\%$$

Estos resultados se presentan ubicados en la tabla A.3 del anexo A. Tomando los tres valores de cada corrida se obtuvo el porcentaje de proteínas promedio de la siguiente manera:

$$P_1 = 15,9044\%$$

$$P_2 = 12,2405\%$$

$$P_3 = 16,5553\%$$

$$P = \frac{(15,9044 + 12,2405 + 16,5553)\%}{3}$$

3

$$P = 14,9000\%$$

Este procedimiento se realizó de la misma manera para todos los datos de las corridas restantes; los resultados se expresan en la tabla 4.2.

H. Determinación de la grasa cruda

En este método se extrajo la grasa de la muestra con éter de petróleo. El solvente fue eliminado por evaporación; y luego de secar el residuo finalmente se determinó su masa.

El contenido de grasa se expresa en porcentaje (%) y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\%G = \frac{(M_{BG} - M_B)}{M_M} * 100 \quad [\text{Ec. 3.14}]$$

Donde:

G = Porcentaje de grasa %.

M_{BG} = Masa del *beaker* con la grasa extraída del cacao (g)

M_B = Masa del *beaker* vacío (g)

M_M = Masa de la muestra (g)

En esta muestra de cálculo se utilizan datos de la tabla 3.2 (primera corrida del cacao seco) y la Ec. 3.14.

$$M_{BG} = 77,8614 \text{ g}$$

$$M_B = 75,9663 \text{ g}$$

$$M_M = (5,6760 - 2,6311)\text{g} = 3,0449 \text{ g}$$

$$G = ((77,8614 - 75,9663)\text{g}/3,0449\text{g}) * 100$$

$$G = 42,6104 \%$$

Estos resultados se exhiben en la tabla A.4 del anexo A. Tomando los tres valores de cada corrida se obtuvo el porcentaje de grasa cruda promedio de la siguiente manera:

$$G_1 = 42,6104 \%$$

$$G_2 = 41,7158 \%$$

$$G_3 = 42,2596 \%$$

$$G_{\text{prom}} = \frac{(42,6104 + 41,7158 + 42,2596)\%}{3}$$

3

$$G_{\text{prom}} = 42,1953 \%$$

Este procedimiento fue realizado de la misma manera para todos los datos de las corridas restantes, y los resultados se muestran en la tabla 4.2.

I. Determinación de los carbohidratos totales

Los carbohidratos totales se calcularon por diferencia según la siguiente fórmula:

$$C_T = 100 - (P + G + C) \quad [\text{Ec. 3.15}]$$

Donde:

C_T = Porcentaje de carbohidratos totales

P = Porcentaje de proteínas.

G = Porcentaje de grasa cruda.

C = Porcentaje de cenizas.

Para la primera corrida:

P = 15,7537 %

G = 42,6104 %

C = 3,9852 %

Y sustituyendo en la Ec. 3.15:

$$C_T = 100 - (15,7537 + 42,6104 + 3,9852) \%$$

$$C_T = 37,6507 \%$$

Estos resultados se ubican en la tabla A.8 del anexo A. Considerando que se hicieron por triplicado, se obtiene los carbohidratos totales promedio de la siguiente manera:

$$C_{T1} = 37,6507$$

$$C_{T2} = 35,3186$$

$$C_{T3} = 34,4539$$

$$C_{Tprom} = \frac{(37,6507 + 35,3186 + 34,4539) \%}{3}$$

$$C_{Tprom} = 37,6508 \%$$

El procedimiento fue realizado de la misma manera para los datos de las corridas restantes, y los resultados se exhiben en la tabla 4.2.

J. Determinación del almidón

El contenido de almidón en las muestras se calculó de la siguiente manera:

$$\% A = (0,1202 \times V_1 \times 0,9 \times 100) / (V_2 \times M) \quad [\text{Ec. 3.16}]$$

Donde:

% A = Porcentaje de almidón presente en la muestra.

0,1202 = Equivalente de glucosa a 10 cc. de Fehling.

V_1 = Dilución a la que se llevo la muestra (ml).

0,9 = Factor para convertir la glucosa en almidón.

V_2 = Volumen gastado en la titulación (ml).

M = Masa de la muestra (g).

Para la primera corrida:

V_1 = 200 ml

V_2 = 67,6438 ml

M = 4,1259 g

Y sustituyendo en la Ec. 3.16, se tiene:

$$\% A = (0,1202 \times 200 \text{ ml} \times 0,9 \times 100) / (67,6438 \text{ ml} \times 4,1259 \text{ g})$$

$$\% A = 7,7523 \%$$

El mismo procedimiento se realizó con las siguientes corridas, obteniéndose un porcentaje de almidón promedio de 7,7159 g para el cacao fermentado, éstos datos se encuentran en la tabla A.11 del apéndice A y los resultados en la tabla 4.2, del capítulo 4.

3.3.2 Construcción de la curva de velocidad de secado.

La curva de velocidad de secado es una representación del comportamiento de la rapidez con que es retirada el agua contenida en el sólido, en función de la humedad libre de éste. Para construir la curva de velocidad de secado para las distintas temperaturas a las cuales se secó el sólido, se procedió de la siguiente manera:

Tomando los datos de la tabla A., se determinó la humedad inicial en base seca, utilizando la ecuación 3.16:

$$X_i = (m_{SH} / m_{Ss}) - 1 \quad [\text{Ec. 3.17}]$$

Donde:

X_i = humedad inicial del sólido en base seca (gH₂O/ gSs).

M_{SH} = masa del sólido húmedo. (g SH)

La curva de velocidad de secado es una representación del comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad libre. Para construir la curva de velocidad de secado para las distintas temperaturas a las cuales se secó el sólido, se procedió de la siguiente manera:

Tomando los datos de la tabla 3.1, se determinó la humedad inicial en base seca, utilizando la ecuación 3.19:

$$X_i = (m_{SH} / m_{Ss}) - 1 \quad [\text{Ec. 3.16}]$$

Donde:

X_i = humedad inicial del sólido en base seca (gH₂O/ gSs).

M_{SH} = masa del sólido húmedo. (g SH)

La curva de velocidad de secado es una representación del comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de

humedad libre. Para construir la curva de velocidad de secado para las distintas temperaturas a las cuales se secó el sólido, se procedió de la siguiente manera:

Tomando los datos de la tabla A.6, se determinó la humedad inicial en base seca, utilizando la ecuación 3.16:

$$X_i = (m_{SH} / m_{SS}) - 1 \quad [\text{Ec. 3.16}]$$

Donde:

X_i = humedad inicial del sólido en base seca (g H₂O/ g SS).

m_{SH} = masa del sólido húmedo. (g SH)

m_{SS} = masa del sólido seco (g SS)

Entonces, para el cálculo de la humedad inicial:

$$X_i = [(10,2298 \text{ g SH} / 6,6515 \text{ g SS}) - 1] \text{ g H}_2\text{O/g SS}$$

$$X_i = 0,5379 \text{ g H}_2\text{O/g SS}$$

3.3.2.1 Construcción de las gráficas de pérdida de humedad y de velocidad de secado.

Durante la operación del secador de bandeja es posible conocer, la pérdida de masa de los sólidos, por efecto del flujo de aire caliente con el transcurrir del tiempo. La masa de la muestra en el secador fue determinada cada quince minutos (15 min).

Se calculó las humedades en base húmeda (X_{BH}) para cada pérdida de masa en función del tiempo, mediante la ecuación 3.17:

$$X_{BH} = 1 - \frac{m_{STS}}{m_{SH}} \quad [\text{Ec. 3.17}]$$

Donde:

m_{STS} = masa del sólido totalmente seco (g).

m_{SH} = masa del sólido húmedo por cada tiempo (g).

Siendo para la primera corrida, el secado de un lecho de granos con espesor monocapa a 70°C.

Tiempo: 15 min

$m_{SH} = 14,8000 \text{ g}$

$m_{STS} = 8,9208 \text{ g}$

Sustituyendo en la ecuación 3.17, se tiene:

$$X_{BH} = 1 - \frac{8,9208}{14,8000}$$

$X_{BH} = 0,3972 \text{ g H}_2\text{O/ g SH}$

Luego, se obtuvo la cantidad de agua retenida en los sólidos con el paso del tiempo, con la siguiente ecuación:

$$m_{H_2O_R} = m_{SS_T} - m_{SS} \quad [\text{Ec.3.18}]$$

donde:

$m_{H_2O_R}$ = masa de agua retenida por los sólidos a un instante determinado (g).

m_{ss} = masa de sólido seco (g).

m_{ss_T} = masa de sólido seco a diferentes tiempos de secado (g).

Sustituyendo en la ecuación 3.18, se tiene:

$$m_{H_2O_R} = (14,8000 - 8,9208) \text{ g H}_2\text{O}$$

$$m_{H_2O_R} = 5,8792 \text{ g H}_2\text{O}$$

Se obtuvo la humedad en base seca (X_{BS}) como se muestra en la ecuación:

$$X_{BS} = \frac{m_{SH}}{m_{SS}} - 1 \quad [\text{Ec.3.19}]$$

Sustituyendo en dicha ecuación, con datos de la primera corrida (monocapa) a 70°C, en un tiempo transcurrido de 15 minutos, el contenido de humedad del sólidos en base seca es:

$$X_{BS} = \frac{14,8000 \text{ g}}{8,9208 \text{ g}} - 1$$

$$X_{BS} = 0,6590 \text{ g H}_2\text{O/g SS}$$

Finalmente se determinó la humedad en el equilibrio para cada caso (ver anexo B), y así poder conocer la humedad libre, como se muestra a continuación:

$$X_L = X_{BS} - X^* \quad \text{[Ec.3.20]}$$

La humedad de equilibrio para la primera corrida, fue $X^* = 0,0004 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{SS}}$.

Sustituyendo, en la ecuación 3.20, se tiene:

$$X_L = 0,6590 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{SS}}} - 0,0004 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{SS}}}$$

$$X_L = 0,6586 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{SS}}$$

Finalmente se graficó la humedad libre versus el tiempo. Para una mejor representación de las gráficas, a las curvas de pérdida de humedad se les aplicó regresión lineal y no lineal, dependiendo de la tendencia mostrada en cada gráfica.

En el caso de la primera corrida (figura B.20), el minuto 15 corresponde al período a velocidad de secado constante y se le aplicó regresión lineal arrojando una dispersión mínima ($R^2 = 0,9976$), para la ecuación resultante (3.20):

$$Y = - 0,0047x + 0,7234 \quad \text{[Ec.3.21]}$$

Al aplicarle la derivada a la ecuación 3.21, se obtiene la velocidad de secado para este período, de la siguiente manera:

$$N = -\frac{dx}{dt} = -0,0047x + 0,7234$$

donde:

N = Velocidad de secado ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{SS}} \cdot \text{h}$)

dx = Diferencial del contenido de humedad en base seca ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{SS}}$).

dt = Diferencial de tiempo (h)

$$N = -\frac{dx}{dt} = -0,0047x$$

Por ende la derivada de x es uno (1), se eliminan los signos negativos y la velocidad de secado para el período constante a 70°C es:

$$N = \frac{dx}{dt} = 0,0047 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{SS}} \cdot \text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}}$$

$$N = \frac{dx}{dt} = 0,2820 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{SS}} \cdot \text{h}}$$

A las ecuaciones arrojadas por las regresiones se les aplicó la primera derivada para obtener las velocidades de secado, las cuales fueron graficadas versus las humedades libres de las muestras.

3.3.3 Determinación de los tiempos de secado en función de la temperatura y de la variación del espesor.

Para calcular el tiempo de secado de un sólido a las mismas condiciones para las cuales se ha determinado completamente una curva del tipo humedad libre (X) vs. tiempo, se necesita la diferencia entre los instantes de tiempo que correspondientes a los contenidos inicial y final de humedades mediante la curva de secado.

La estimación del tiempo de secado fue iniciada a partir de la ecuación que define la velocidad de secado, de la manera siguiente:

$$N = -\frac{S}{A} \frac{dx}{dt} \quad [\text{Ec. 3. 28}]$$

Reordenando e integrando en la ecuación 3.22, en el intervalo de tiempo en que el contenido de humedad cambiaba de su valor inicial X_1 a su valor final X_2 , se tenía:

$$t = \int_0^t dt = \frac{S}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dt}{N} \quad [\text{Ec. 3. 29}]$$

Por lo tanto para el período de velocidad constante, si X_1 y $X_2 > X_c$ y $N = N_c$, la ecuación 3.23 se transforma:

$$t = - \frac{S(X_1 - X_2)}{AN_c} \quad [\text{Ec. 3. 30}]$$

donde:

S = masa del S_{TS} (g S_{TS})

A = área expuesta al secado (m^2)

N_c = Velocidad de secado constante (g agua evap./h* m^2).

Sin embargo, por lo antes mencionado en la sección 3.4.3, que la velocidad de secado depende de la ecuación de la regresión lineal o no lineal, la ecuación 3.24 se transforma a la siguiente:

$$t_{II} = - \frac{(X_c - X_i)}{\frac{dx}{dt}} \quad [\text{Ec. 3. 31}]$$

donde:

t_{II} = tiempo de secado en el período constante (h).

X_c = humedad libre crítica (g H_2O / g ss)

X_i = humedad inicial (g H_2O / g ss)

Para la primera corrida con el mínimo espesor a 70°C, sustituyendo los valores observados por la curva arrojada (figura B.22) en la ecuación 3.25 el tiempo de secado fue:

$X_c = 0,3025$ g H_2O / g ss

$$X_i = 0,6586 \text{ g H}_2\text{O} / \text{g ss}$$

$$dx/dt = 0,2820 \text{ g H}_2\text{O} / \text{g ss}$$

$$t_{II} = - \frac{(0,3025 - 0,6586) \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{g}_{\text{SS}}}{0,2820 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{g}_{\text{SS}} \cdot \text{h}}$$

$$t_{II} = 1,2628 \text{ h} = 75,77 \text{ min}$$

De la misma manera se realizó la operación con espesores bicapa de los lechos de granos de cacao, a la misma temperatura y ecuación 3.25

$$t_{II} = - \frac{(0,3914 - 0,7189) \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{g}_{\text{SS}}}{0,2640 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{g}_{\text{SS}} \cdot \text{h}}$$

$$t_{II} = 1,2405 \text{ h} = 74,43 \text{ min}$$

El período decreciente de la velocidad de secado tiene dos etapas: el período postcrítico I (recta) y el postcrítico II (curva), que significa que en este período el secado ocurre bajo condiciones cambiantes.

Teóricamente, las ecuaciones para estas dos etapas postcríticas, son; **[12]:**

Para una recta:

$$t_{IIIa} = -\frac{S}{A} \frac{(X_C - X_A)}{(N_C - N_A)} * \text{Ln} \left(\frac{N_A}{N_C} \right) \quad [\text{Ec.3.32}]$$

Para una curva:

$$t_{IIIb} = -\frac{S}{A} \int_{X_A}^{X_B} \frac{dx}{N} \quad [\text{Ec.3.33}]$$

Para la primera corrida (mocosca) a 70°C, se tiene:

Para el período postcrítico I (recta):

$$X_A = 0,2590 \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS}$$

$$X_C = 0,3025 \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS}$$

$$N_A = 0,1611 \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS}$$

$$N_C = 0,2820 \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS}$$

$$t_{IIIa} = -\frac{(0,3025 - 0,2590) \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS}}{(0,2820 - 0,1611) \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS} * \text{h}} * \text{Ln} \left(\frac{0,1611}{0,2820} \right) \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS} * \text{h}$$

$$t_{IIIa} = 0,2014 \text{ h} = 12,09 \text{ min}$$

Para el período postcrítico II (curva); y sustituyendo en la ecuación 3.27:

$$t_{IIIb} = \frac{(0,0310 - 0,2590) \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS}}{(0,0127 - 0,1611) \text{ g H}_2\text{O} / \text{g SS} * \text{h}}$$



$$t_{mb} = 1,5364 \text{ h} \approx 92 \text{ min}$$

De la misma manera se calculó, para las bicapas a las diferentes temperaturas.

Estos resultados son exhibidos en la tabla 4.3.

3.3.4 Caracterización de las curvas de velocidad de secado en función de sus contenidos de humedad libre crítica.

En esta etapa se observaron los valores arrojados por la curva de velocidad de secado, a través de los resultados de la derivada de las regresiones para cada caso. Dichos valores se muestran en la tabla 4.4.

3.3.5 Propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidratada de cacao.

Estos propiedades fueron evaluadas de la misma manera como en la sección 3.4.1 para el cacao fermentado. Los resultados comparativos de estos se exhibidos en el capítulo 4 (sección 4.1.5).

CAPITULO 4

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1 Análisis de las propiedades fisicoquímicas del cacao fermentado

La calidad es uno de los aspectos de mayor importancia en el proceso productivo cacaotero, ya que su nivel determinará las mayor o menor demanda que obtenga en el mercado el producto final (almendras de cacao). Para lograr un cacao de alta calidad es necesario cumplir con una serie de requisitos que se inician con la escogencia del sitio de establecimiento de la plantación, el material de la siembra, sistemas de manejo agronómico, entre otros. La calidad del cacao tiene generalmente entre sus parámetros, aspectos principales en cuanto a las características físicas de: tamaño, peso, grosor, color; y las intrínsecas de calidad y las características químicas de: humedad, fibra, carbohidratos, proteínas, grasa, etc.

A continuación se evalúa cada parámetro dentro de sus características físicas y químicas del cacao fermentado.

4.1.1.1 Características Físicas del cacao fermentado.

Con el propósito de definir y comparar los perfiles de calidad de los diferentes genotipos de cacao, este estudio consistió en evaluar las características físicas de la almendra del cacao fermentado en condiciones experimentales de la zona de Río Caribe, estado Sucre con otras zonas cacaoteras de Venezuela.

Entre los parámetros que influyen en la selección de un determinado tipo de cacao para los fabricantes de este, se encuentran aspectos físicos tales como, el tamaño y peso del grano como se muestra en la tabla 4.1.

La semilla de cacao está recubierta por una pulpa mucilaginosa de color blanco, sabor azucarado y ácido. Al eliminar el mucílago o pulpa aparece una envoltura delgada de color rosado que constituye el tegumento o cáscara de la semilla. Las dimensiones de ésta son variables, oscilando el largo entre 20 y 30 mm, el ancho entre 10 y 17 mm y el espesor entre 7 y 12 mm [2]. La forma también es variable y puede ser triangular, ovoide, alargada, redondeada, aplanada, dependiendo de las condiciones ambientales y del número de semillas por fruto.



(a)

(b)

Figura 4.1 Granos de cacao. a) fresco con la cubierta mucilaginosa b) en el proceso de fermentación.

Tabla 4.1 Características físicas de las semillas de los granos de cacao fermentado de la localidad estudiada (Río Caribe) y otras zonas cacaoteras de Venezuela.

Parámetros	Unidad	Experimental "Río Caribe" (a)	Cuyagua (b)	Cumboto (c)	Barlovento (d)
Largo	cm	2,430 ± 0,132a	2,320 ± 0,190b	2,390 ± 0,220c	2,310 ± 0,010b
Ancho	cm	1,300 ± 0,108a	1,310 ± 0,140ab	1,340 ± 0,120c	1,330 ± 0,020cd
Espesor	cm	1,030 ± 0,042a	1,000 ± 0,050b	1,030 ± 0,050ac	1,000 ± 0,030bd
Peso de una semilla	g	2,179 ± 0,186a	3,550 ± 0,720b	3,970 ± 0,630c	3,200 ± 0,020d
Índice de Semilla	-	0,872 ± 0,074a	1,430 ± 0,280b	1,590 ± 0,250c	1,280 ± 0,260d

(a): Este trabajo. Cacao Trinitario.

(b), (c) y (d): Cacao criollo. [12, 13 ,14]

En las dimensiones de las semillas (ancho, largo y espesor) se observan las diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tipos de zonas cacaoteras (tabla 4.1), presentando el cacao estudiado de la zona de Río Caribe los valores más altos en dos dimensiones, las más largas (2,430 cm) y de mayor espesor (1,030 cm) con una desviación estándar (0,042 cm); sin embargo no se aleja bruscamente de los otros valores, ya que la zona de Cumboto obtuvo el mismo espesor y estadísticamente son iguales. Entre Cumboto y Cuyagua, dos zonas del Estado Aragua, se observó variabilidad encontrándose en Cumboto los mayores valores, mientras que en Cuyagua se caracterizó por presentar

las menores dimensiones, esto se debe a que las condiciones agroclimáticas no son representativas en todo el estado, así como también puede diferir el manejo agronómico [13]. En Barlovento, estado Miranda presenta el tamaño promedio de todas las zonas comparadas ancho (1,330 cm), largo (2,310 cm) y espesor (1,000 cm), ya que estadísticamente algunos parámetros concuerdan con otros, estos resultados del programa estadístico se presentan en los anexos D.

Los resultados de este estudio son similares a los obtenidos por otros investigadores; sin embargo, algunas pequeñas diferencias se pueden atribuir al hecho de que mientras más altas sean las temperaturas durante el período de formación de los frutos, éstos madurarán en menor tiempo y sus semillas serán más pequeñas. También influye la fertilidad del suelo en el tamaño de la semilla, pues los suelos más fértiles producen semillas más grandes que las producidas en suelos pobres en fertilidad.



Figura 4.2 Peso de las semillas de cacao de cuatro zonas diferentes de Venezuela.

Como se muestra en la figura 4.2 el cacao de la zona experimental (Río Caribe) presenta menor peso de las semillas en comparación con las otras zonas cacaoteras, notándose estadísticamente en la tabla 4.1 con

un valor de 2,179 g muy por debajo del mayor valor que se encuentra en la zona de Cumboto (3,970 g peso de semilla), estos resultados se deben a la diferencia de genotipos expuesto anteriormente, ya que el cacao trinitario tiene características diferentes al cacao tipo criollo, acertando estos resultados con la literatura, de igual forma puede atribuirse a que la población de semillas estudiadas se seleccionó por su diversidad de tamaños en pequeñas, medianas y grandes, lo cuál se trabajó con granos medianos presentando estas características particulares, aunado a eso también se dice que cuando se cosecha después de una época seca, los granos son más pequeños que lo cosechados después de la época de lluvias y dentro de las exigencias de las industrias chocolateras aceptan como mínimo un peso de 1 g/semilla [2], lo cuál quiere decir que todas se encuentran dentro del rango y la variación sustancialmente depende del área o zona donde se cultive.

El IS mostró la misma tendencia que el peso de la semilla (figura 4.3), es decir, los cacaos tipo criollo pertenecientes a la zona del estado Aragua presentaron mayores índices, Cumboto (1,590) y Cuyagua un índice de 1,430; presentando el menor índice el cacao tipo trinitario como es el caso de Río Caribe 0,872; el índice de la semilla, definido como el peso promedio de una semilla fermentada y seca, tiene gran importancia comercial por ser utilizado para fijar el precio en el mercado, el cuál será más alto cuanto mayor sea el IS correspondiente.[13] Quiere decir según lo antes mencionado, que el estado Sucre posee el menor precio del mercado.

La figura 4.3 demuestra que el índice de las semillas fue diferente en los dos diferentes genotipos y en las zonas comparadas, también se puede decir que el peso de la semilla es directamente proporcional al índice, como se muestra en la figura A.1 del anexo A.



Figura 4.3 Índice de las semillas de cuatro zonas cacaoteras de Vzla.

Cinco son los factores determinantes de la calidad de la almendra de cacao: el genotipo, el clima imperante, los suelos donde se cultiva, el manejo agronómico y fitosanitario que se ofrezca a las plantas y la tecnología post-cosecha que se utilice. [2]

4.1.1.2 Características químicas

A continuación, se analizarán cada una de las propiedades fisicoquímicas determinadas para el cacao fermentado, antes de someterlo al proceso de secado. Los resultados que se presentan, son los promedios totales de todas las corridas de cada análisis (los resultados originales se presentan en las tablas A.2 a A.8 del apéndice A).

Según la tabla 4.2, se puede apreciar que el contenido de humedad, cenizas y proteínas fue mayor en la zona de Río Caribe (experimental), que en las otras zonas a comparar, esto se puede atribuir a las condiciones climáticas imperantes de cada región y en este caso los resultados expuestos de las otras regiones dependen de la temperatura ambiente, puesto que el calor y el movimiento del aire contribuyen a la remoción de la humedad, de igual manera sucede con el contenido de cenizas obteniendo el menor valor la zona de Barlovento y las zonas de Cuyagua y Cumboto dieron un resultado con poca diferencia significativa 3,79 y 3,81% respectivamente, al igual que su contenido proteico ya que reflejaron el mismo resultado de 16,12%, Barlovento 16,24% y como se

mencionó anteriormente Río Caribe con un contenido de proteínas del 17,85%, estos resultados pueden verse afectados con el sistema y las diferentes técnicas de fermentación que se utilizaron, ya que existen algunas diferencias entre ellos como bien se refirió en la sección 2.1.6.2 del capítulo 2.

Tabla 4.2 Promedios de las características químicas del grano de cacao fermentado (porcentajes en base seca)

Parámetros	Unidad	Experiment al "Río Caribe" ^(a)	Cuyagua ^(b)	Cumboto ^(c)	Barlovento ^(d)
Contenido de Humedad	%	55,36 ± 14,40	54,06 ± 12,01	57,13 ± 10,56	55,91 ± 12,42
Contenido de Cenizas totales	%	4,15 ± 0,16	3,79 ± 0,15	3,81 ± 0,10	3,77 ± 0,09
Contenido de Grasa cruda	%	42,13 ± 0,76	58,42 ± 15,24	54,04 ± 16,21	59,38 ± 16,25
Contenido de Proteínas totales	%	17,85 ± 1,83	16,12 ± 1,68	16,12 ± 1,52	16,24 ± 2,01
Contenido de Fibra cruda	%	3,93 ± 0,08	-	-	-
pH		5,37 ± 0,03	6,40 ± 0,08	5,98 ± 0,03	6,35 ± 0,02
Acidez titulable*	%	2,14 ± 0,02	0,33 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,35 ± 0,02
Contenido de Almidón	%	8,36 ± 0,04	-	-	-
Contenido de Carbohidratos totales	%	37,65 ± 1,65	-	-	-

(a): Este trabajo. Cacao Trinitario Método de secado artificial.

(b), (c) y (d): Cacao criollo. Método de secado al sol. [12, 13, 14]

*La acidez titulable usada por las otras zonas cacaoteras fue el ácido láctico y la usada en la zona experimental es el ácido acético.

Durante el proceso fermentativo varía la composición química; el contenido de grasa cruda de los granos de cacao en la zona de Río Caribe fue menor a las otras zonas e inclusive menor a las especificaciones por las Normas Covenin con un resultado del 42,13%, este contenido se encuentra influenciado por el genotipo donde se demuestra, que las zonas con el cacao tipo criollo los valores son muy cercanos al 60%, que de por sí este alimento es conocido por su alto contenido graso (>50%), el valor resultante de la zona experimentada indica que las muestras de cacao no contenían suficiente grasa en su interior, esto puede cumplirse por la manipulación que se le dan a los granos durante la fermentación y el nivel de precipitaciones recibidas por la planta durante el período de formación de los frutos, ya que las unidades ecológicas de estas regiones son diferentes bosque húmedo tropical (Río Caribe), mientras en la región Centro-norte-costera (Cuyagua, Cumboto y Barlovento) predomina el bosque seco tropical como se mencionó anteriormente en la sección 2.2.6; porque mientras más altas sean las temperaturas éstos madurarán en menor tiempo y sus semillas serán más pequeñas, por lo tanto menor incremento de grasa. Por otra parte, es importante recalcar nuevamente que los granos de cacao fueron congelados durante su almacenamiento después de fermentarse, pudiendo perder propiedades propias de este.

El pH y la acidez titulable según la tabla 4.2, es ácido en las zonas de Río Caribe y Cumboto y menos ácido en Barlovento y Cuyagua, esto

puede estar influenciado al tipo de suelo y minerales contenidos en él, que desde la siembra del fruto van tomando características organolépticas propias y en el proceso fermentativo se desarrollan diferentes etapas que favorecen las fases anaeróbicas y alcohólicas, donde se evidencia el aumento de la acidez por contener más azúcar en la pulpa o mucilago. Este parámetro químico es importante sobre la calidad del cacao, ya que es el responsable del sabor del mismo.

Los contenidos de almidón y fibra cruda se encuentran dentro de los parámetros de calidad para el cacao venezolano al igual que el contenido de carbohidratos totales para la zona estudiada, éste último fue calculado por diferencia incluyendo los porcentajes de cenizas, proteínas y grasa dentro de la ecuación correspondiente, el resultado de éste parámetro tiene un valor de 37,65%, en las bibliografías estudiadas no evaluaron las tres características químicas en estas zonas a comparar; por lo tanto, no se hacen referencia en la tabla 4.2. Sin embargo, se puede decir que el resultado es óptimo por las exigencias de las normas Covenin, presentes en el anexo D.

La discordancia de los resultados de este estudio con los de la bibliografía consultada podría atribuirse a la aplicación de procesos diferentes de fermentación, así como al uso de materiales de cacao distintos.

4.1.2 Curvas de velocidad de secado del grano de cacao.

El flujo capilar en los sólidos se caracteriza por tener una doble curvatura y un punto de inflexión al graficar la variación de la humedad libre en función del tiempo, mientras que el flujo de difusión es una curva

suave [10]. Las curvas de secado obtenidas revelan que el flujo capilar es uno de los mecanismos que predomina en el secado del grano de cacao, ya que se cumple lo antes mencionado, como se muestra en las curvas de las figuras 4.3 y 4.4. Además se comprobó que cuando se seca un sólido a temperaturas relativamente mayores, se alcanza el equilibrio en un tiempo mas corto.

Cambios de la humedad del sólido con respecto al tiempo utilizando diferentes temperaturas de secado. En las figuras 4.3 y 4.4 se presentan las primeras experiencias de los valores de humedad del sólido ($\text{g H}_2\text{O/g ss}$) a lo largo del tiempo (min) en el proceso de deshidratación en bandeja de granos de cacao a 50, 60 y 70°C. En la figura 4.1, durante los primeros 100 minutos del proceso, se observó una disminución significativa de la humedad del sólido en todas las temperaturas evaluadas. Esta disminución está incluso por debajo de la mitad del valor de humedad inicial del sólido, siendo comparables las caídas de humedad para las temperaturas de 50 y 60°C durante los primeros 150 minutos de secado y más drásticas aún cuando observamos el perfil de secado del sólido a 70°C. Por otra parte, la caída de humedad del sólido es mucho más moderada (menor pendiente) a partir de los primeros 100 minutos de secado.

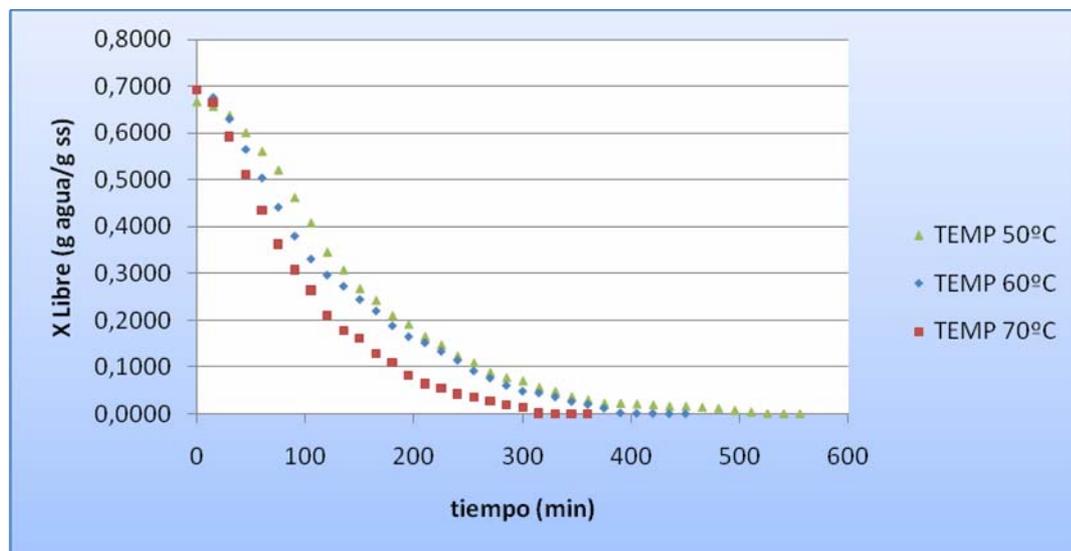


Figura 4.3 Curvas de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70°C. (monocapa)

Lo anterior es explicado por la facilidad de arrastre que tiene el proceso de secado debido a la presencia de agua libre en una superficie del sólido que está suficientemente saturada y que pasa directamente de la superficie al aire de arrastre antes de los primeros 100 minutos de secado lo cual genera una fuerte caída de la humedad del sólido; luego, es moderada porque el agua primero tiene que pasar del interior a la superficie por mecanismos de difusión [10,11]. Este mecanismo es propio de alimentos altamente poroso como es el caso de los granos de cacao.

A 70°C fue más fuerte la caída de humedad porque a esta temperatura la evaporación del agua es más rápido, ocurrió durante los primeros 75 minutos, siguiendo un comportamiento lineal (figura C.1) según el modelo de regresión obtenido, y con una dispersión mínima de los datos experimentales ($R^2 = 0,9969$), con una humedad libre registrada de 0,6933 g agua/g ss y al final una humedad de equilibrio (X^*) de 0,0138 g agua/g ss, aproximadamente a los 300 minutos (5 horas) de haber iniciado el proceso de secado, Posterior a los 100 minutos de secado los

perfiles de deshidratación de las temperaturas de 50 y 60°C fueron acercándose hasta llegar a un punto de coincidencia que es logrado a los 345 minutos del proceso el cual es prácticamente un valor cercano a la humedad de equilibrio.

Por su parte la temperatura de 60°C, con una humedad libre de 0,6923 g agua/ g ss y notándose que la temperatura de 50°C se mantiene alejado del contenido de humedad del sólido con respecto al resto en este intervalo de tiempo, con la menor humedad libre de 0,6660 g agua/ g ss y una humedad de equilibrio (X^*) de 0,0304 g agua/g ss. Como podemos observar, a pesar de las diferentes trayectorias al final del secado, de las temperaturas de 60 y 70°C durante los primeros 100 minutos de secado ambos lograron contenidos de humedad semejante, lo que quiere decir que se obtiene el mismo efecto en la disminución del contenido de agua, no así para la temperatura de 50°C, en la que fue necesario exponer el alimento a períodos más prolongados de secado.

En la figura 4.4, se puede apreciar los cambios de la humedad del sólido en función del tiempo (min) en proceso de secado en bandeja con dos capas de granos (bicapa) de aproximadamente 2,41 cm de espesor a 50, 60 y 70°C. Durante los primeros 100 minutos de secado fue registrada una fuerte caída de la humedad del sólido en todas las temperaturas de trabajo, para hacerse menos acentuada, luego de haber transcurrido estos 100 minutos, se alcanza la humedad de equilibrio en todos los tratamientos a partir de los 350 minutos de secado.

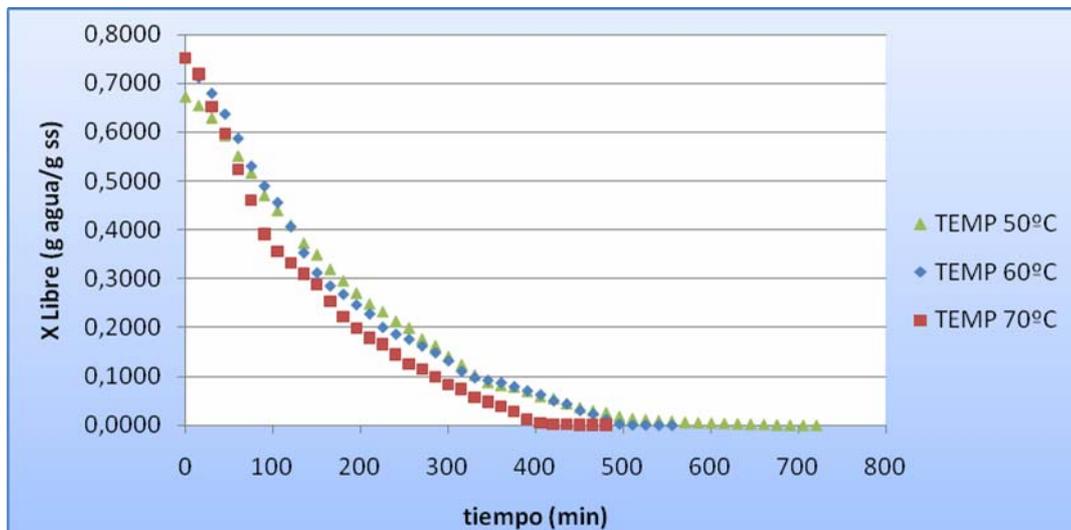


Figura 4.4 Curvas de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70°C. (bicapa)

Al comparar la humedad del sólido entre las tres temperaturas empleadas, se observa que fue más significativa la caída de humedad a los 70°C se registró durante los primeros 90 minutos del proceso de secado, siguiendo un comportamiento lineal (figura C.3), con una dispersión mínima de los datos experimentales ($R^2 = 0,9989$); y luego se hizo más lenta hasta alcanzar finalmente una X^* de 0,0037 g agua/g ss, a los 390 minutos (figura 4.2); exhibiendo una tendencia no lineal, con un coeficiente de regresión polinomial R^2 de 0,9983 (figura C.4), luego le sigue a 60°C y por último a 50°C, cuya pendiente es menos pronunciada (menor pérdida de humedad) durante los primeros 150 minutos, con una dispersión mínima ($R^2 = 0,9962$) y una humedad de equilibrio (X^*) de 0,0041 g agua/ g ss.

Es interesante destacar en la curva de 70°C en ambos espesores, que pequeñas variaciones en el tiempo de secado para los primeros 100 minutos de secado, generan grandes pérdidas de humedad.

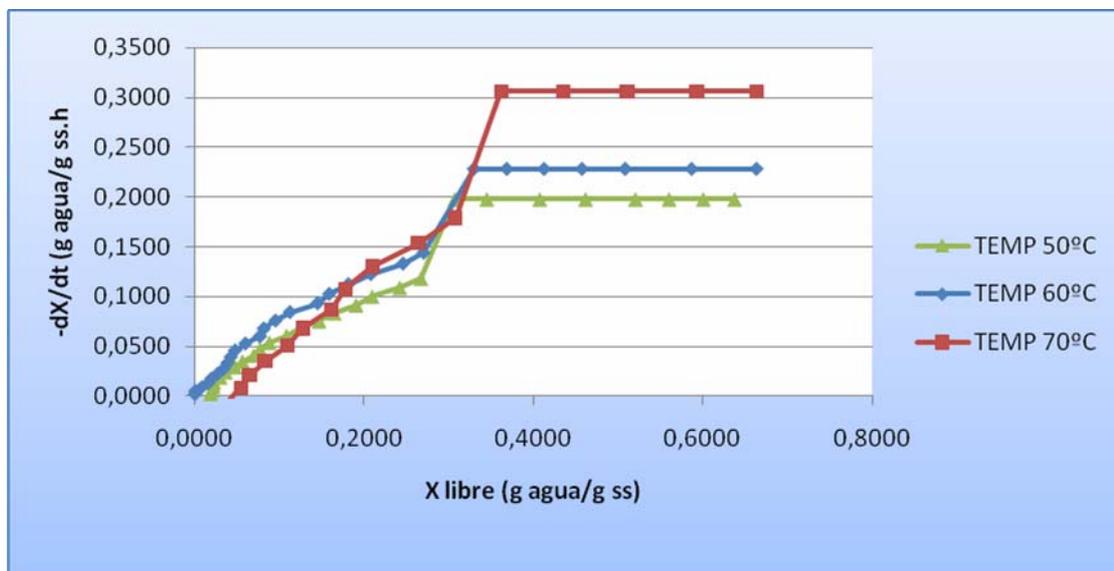


Figura 4.5 Curvas de velocidad de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70 °C (monocapa).

Es importante conocer el contenido de humedad de equilibrio del sólido en el secado, porque representa el contenido de humedad limitante en ciertas condiciones de humedad y temperatura, es decir, si se seca el sólido a un contenido de humedad inferior al que posee normalmente en equilibrio, volverá a su valor de equilibrio al almacenarse.

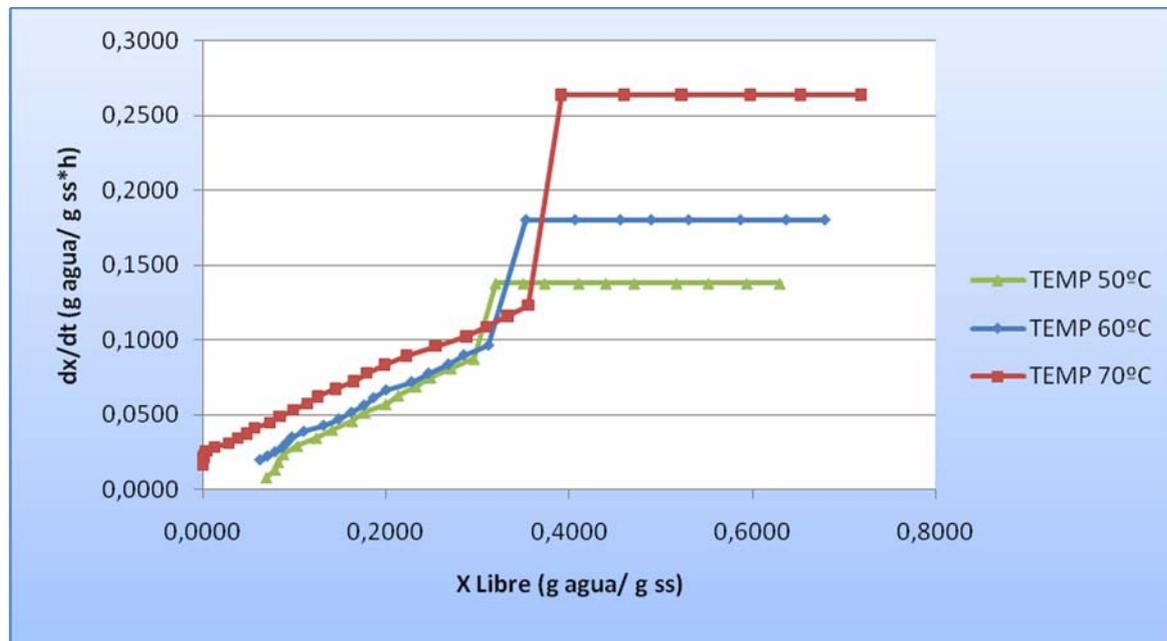


Figura 4.6 Curvas de velocidad de secado encontradas en la primera experiencia a las temperaturas de 50, 60 y 70 °C (bicapa).

Igualmente se puede notar que para las temperaturas de secado de 50 y 60°C en las figuras 4.5 y 4.6, cuya diferencia es de 10°C, las velocidades de secado constantes tienen una discrepancia de 0,0300 g H₂O/g ss*h y 0,0420 g H₂O/g ss*h aproximadamente. Ahora al comparar las velocidades de secado constante obtenidas a las temperaturas de 60 y 70°C, se puede observar una diferencia mayor en ambas figuras (0,1080 y 0,1260 g H₂O/ g ss*h, respectivamente) aun cuando la divergencia es de 10°C. Posiblemente esto se debe a cambios climáticos durante el desarrollo de las experiencias, ya que la velocidad de secado constante sólo depende de las condiciones en la superficie del material y por lo tanto el espesor no influye en los valores registrados. Sin embargo, en el período de velocidad decreciente, la velocidad de secado esta contralada por la velocidad de migración del agua a la superficie donde se produce la evaporación, y es evidente, que el incremento de espesor provocó una disminución de la velocidad media de secado como se muestran en las

figuras 4.5 y 4.6. También puede tener el efecto de aumentar la humedad crítica, con la consiguiente de disminución de velocidad de secado, como se demuestra gráficamente en la figura 4.7.

4.1.3 Efecto de la variación del espesor del lecho de granos sobre la temperatura y tiempo de secado.

La zona de velocidad constante para las muestras de cacao, donde la superficie total expuesta del sólido está saturada de agua además el movimiento de agua desde el interior del sólido hasta la superficie ocurre en la misma velocidad de evaporación, aumentó con el espesor (bicapa) del grano en función de la temperatura (tabla 4.3), duró 82 minutos para la temperatura de 70°C, 120 minutos a 60°C y 146 minutos para la temperatura de 50°C. Esto se atribuye, ya que el tiempo para el secado entre contenidos fijos de humedad dentro del período de rapidez constante será entonces directamente proporcional al espesor [11].

Por su parte, para la monocapa con una temperatura de 50°C el período a velocidad constante de deshidratación duró 100 minutos, en cambio para dos capas de espesor perdió agua no ligada a condiciones de saturación (velocidad constante) durante 146 minutos, con una diferencia de 46 minutos; esto significa que a mayor contenido de masa evaluada mayor es el tiempo de secado a una rapidez constante.

Tabla 4.3 Duración de los períodos de secado en función de la temperatura y espesor

Espesor del grano de cacao	Temperatura de secado (°C)	Duración de los períodos de secado (min)		
		Período a velocidad constante	Período a velocidad decreciente	
			I Postcrítico	II Postcrítico
Monocapa	50	100	15	128
	60	88	15	114
	70	75	15	92
Bicapa	50	146	15	169
	60	120	15	114
	70	82	15	92

En relación a los períodos de velocidad decreciente para las muestras de sólido de los dos tipos de espesores, arrojaron resultados similares de 15 minutos aproximadamente, durante el primer período postcrítico, donde la caídas lineales de las velocidades de secado fueron cortas, y las humedades internas de las partículas de la muestra eran retiradas mediante el mecanismo de difusión. Este comportamiento se debe, a que las partículas presentaban esencialmente una cubierta porosa a través de la cual difundía la humedad libre interna (tabla 4.3).

Posteriormente, la velocidad de secado comienza a decaer lentamente, dando comienzo al segundo período postcrítico, donde se evidenció su presencia en todas las muestras granulares, donde la rapidez de secado varía no linealmente respecto a la pérdida de humedad libre, en forma de una curva cóncava hacia abajo (figura 4.3 y 4.4). Durando 169 minutos a 50°C, con una diferencia de 41 minutos con

respecto a la monocapa; sin embargo, se puede observar que en las temperaturas de 60 y 70°C para ambos grosores el resultado fue el mismo 114 y 92 minutos, estos valores se pueden atribuir a que pudo haber pérdida de humedad cuando se trabajó con el doble lecho de granos de cacao y no se trabajaron a las mismas condiciones dentro del laboratorio, también se puede decir que a estos tiempos ya la muestra estaba lo suficientemente seca, predominando un mecanismo capilar para la migración de la humedad al exterior, por tortuosidades internas de las partículas más compactas

Durante el primer período poscrítico, la velocidad de secado está regida por la evaporación del agua sobre una parte de la superficie útil total a través del mecanismo de difusión del líquido hacia la superficie. Durante el segundo período poscrítico, la superficie está seca, de modo que la velocidad de secado solo puede evaluarse atendiendo el proceso de transporte de humedad desde el interior del sólido a la superficie.

4.1.4 Variación de la velocidad de secado de los granos de cacao en función de sus contenidos de humedad libre.

El contenido de humedad crítica de los sólidos se reduce conforme disminuye la velocidad de secado constante, y ésta a su vez decrece con la disminución de la temperatura de secado, debido a que la transferencia de calor es menor; operando bajo condiciones constantes, tales como: flujo de aire, espesor y grado de subdivisión del sólido [15]. Con base a esto se puede observar que los granos de cacao se secan cumpliendo lo antes mencionado, y se refleja gráficamente en las figuras 4.7 y 4.8, que se derivan de la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Humedades libres críticas y velocidades de secado en función de las temperaturas.

Espesor del grano de cacao	Temperatura de secado (°C)	Humedad Crítica (Xc) (g agua/ g ss)	Velocidad de secado $-dx/dt$ (g agua/g ss*h)
Monocapa	50	0,3070	0,1980
	60	0,3298	0,2280
	70	0,3622	0,3060
Bicapa	50	0,3200	0,1380
	60	0,3530	0,1800
	70	0,3914	0,2640

El contenido de humedad de equilibrio depende fundamentalmente de la naturaleza del sólido; en el caso de materiales no porosos, es decir, no higroscópicos el contenido es prácticamente cero a todas las temperaturas y humedades [10].

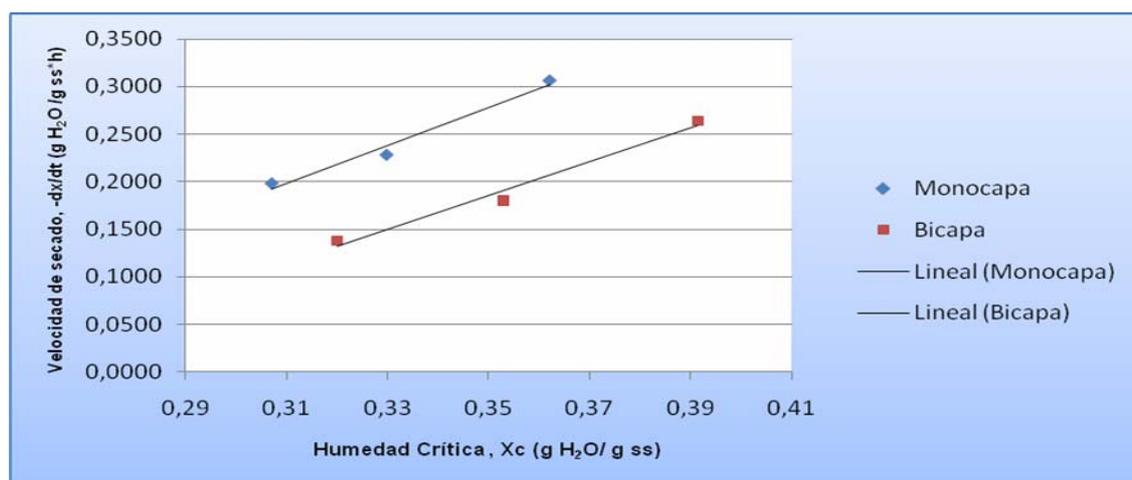


Figura 4.7 Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad crítica.

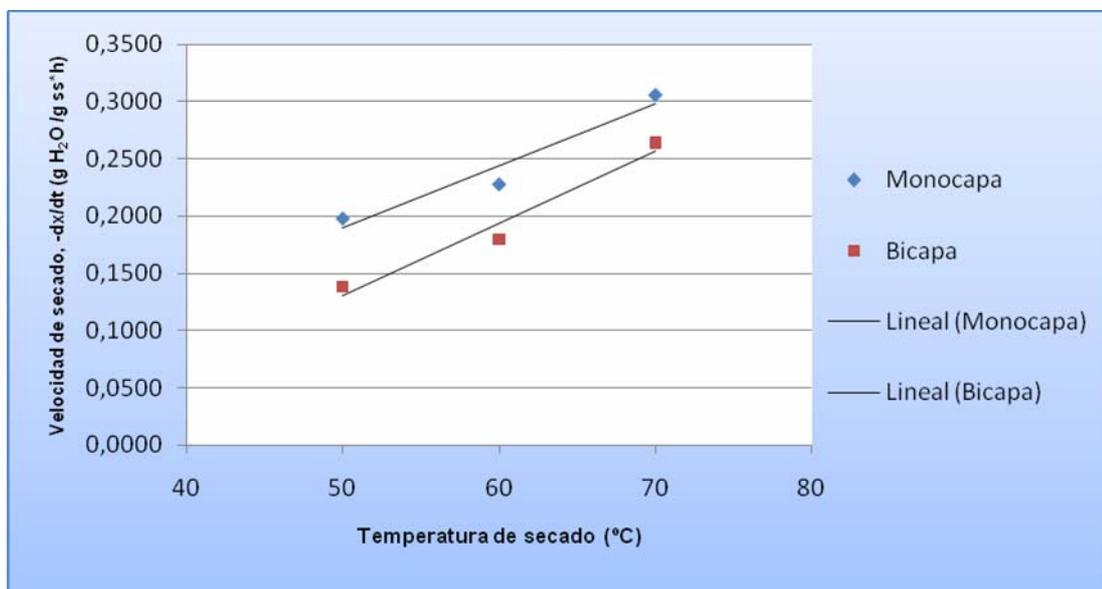


Figura 4.8 Variación de la velocidad constante de secado en función de la temperatura de secado.

En las figuras 4.5 y 4.6, se muestran las curvas de velocidad de secado del grano de cacao, obtenida al derivar la curva de secado (anexo B), donde se demuestra que el grano de cacao es un material higroscópico debido a que su contenido de humedad de equilibrio es diferente a cero. El grano de cacao es un material orgánico de composición variable y presenta agua libre eliminada durante el proceso de secado y agua ligada formando parte de compuestos como proteínas, carbohidratos, etc. Posiblemente a esto se debe que la humedad de equilibrio no se devuelva a cero.

En la figura 4.7, se muestra que a mayor humedad crítica tiene el sólido mayor la velocidad de secado y viceversa, de acuerdo a sus parámetros como en el caso de la monocapa, la mayor humedad libre crítica es de 0,3622 g H₂O/g ss con una velocidad de secado de 0,3060 g

H_2O/g $ss \cdot h$, como se especifica para las diferentes temperaturas y humedades en la tabla 4.2; de la misma manera, esto aplica en la figura 4.6 a mayor temperatura mayor velocidad de secado, notándose que para los diferentes espesores sigue un patrón de regresión lineal.

4.1.5 Comparación de las propiedades fisicoquímicas de la almendra deshidrata de cacao, con las propiedades del cacao fermentado.

A continuación, se analizarán cada una de las propiedades fisicoquímicas determinadas para el cacao fermentado y seco. Los resultados y desviaciones que se presentan, son los promedios totales de todas las corridas en base seca de cada análisis (los valores desglosados se presentan en las tablas A.2 al A.8 del anexo A).

Tabla 4.6 Resultados de los parámetros fisicoquímicos del cacao fermentado y seco. (Base seca)

Parámetros	Unidad	Fermentado	Seco
Peso de la semilla	g	2,18 ± 0,19a	1,29 ± 0,13a
Índice de la semilla	IS	0,87 ± 0,07a	0,51 ± 0,04a
Largo	cm	2,43 ± 0,13a	1,43 ± 0,12a
Ancho	cm	1,30 ± 0,10a	0,77 ± 0,07a
Espesor	cm	1,03 ± 0,04a	0,61 ± 0,05a
Contenido de Humedad	%	55,36 ± 5,17a	6,59 ± 0,21b
Contenido de Cenizas totales	%	4,15 ± 0,16a	3,23 ± 0,04a
Contenido de Grasa cruda	%	42,20 ± 0,70a	56,86 ± 0,72a
Contenido de Proteínas totales	%	17,85 ± 1,83a	15,07 ± 2,46a
Contenido de Fibra cruda	%	3,93 ± 0,08a	4,28 ± 0,02a
Ph		5,37 ± 0,03a	5,72 ± 0,02a
Acidez titulable ¹	%	2,14 ± 0,02a	2,50 ± 0,01a
Contenido de Almidón	%	8,36 ± 0,04a	7,43 ± 0,03a
Contenido de Carbohidratos totales ²	%	37,65 ± 1,65a	28,01 ± 2,04a

Los resultados se expresan como el promedio ± la desviación estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

¹ Expresado como porcentaje de ácido acético.

² Carbohidratos Totales calculados por diferencia = 100 (% Proteína cruda + % Grasa cruda + % Ceniza).

Los parámetros de tipificación en relación al peso, largo, ancho y espesor se realizaron tomando el promedio de las medidas y pesadas de 10 almendras de cacao.

I. Peso e índice de la semilla

El peso de la semilla disminuyó considerablemente en el proceso de secado 1,29 g con respecto al fermentado 2,18 g que es de mayor valor como se muestra en la tabla 4.6 debido a su alto contenido de humedad, en el secado también ocurre la pérdida por evaporación de los ácidos volátiles, lo que hace que la semilla reduzca su tamaño y obtenga menor peso. Pero de acuerdo al análisis estadístico de la comparación de las desviaciones típicas con un intervalo de confianza del 95%, estos valores no tienen diferencia significativa ubicándose dentro de los rangos de la distribución normal como se muestra a continuación en la figura 4.9.

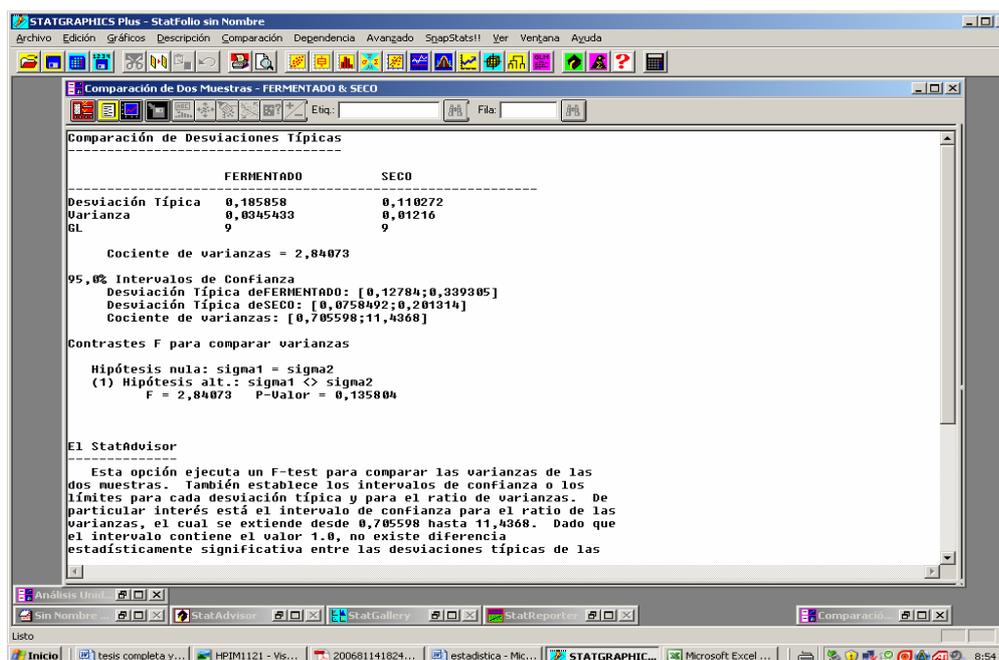


Figura 4.9 Comparación de desviaciones típicas de dos muestras utilizando Stargrafics.

Estos resultados estadísticos indican que las varianzas de las dos muestras (fermentado y seco) obtienen comportamientos similares independientemente del proceso al que se trabajó. También establece los intervalos de confianza o los límites para cada desviación típica y para el ratio de varianzas. De particular interés está el intervalo de confianza para el ratio de las varianzas, el cual se extiende desde 0,705598 hasta 11,4368. Dado que el intervalo contiene el valor 1.0, no existe diferencia estadísticamente significativa.

De la misma manera se refleja el resultado del índice de la semilla con un valor mayor en el fermentado y menor en el secado de acuerdo a que es directamente proporcional al peso, también se puede notar que las desviaciones estándar son muy pequeñas; esto quiere decir que el lote seleccionado es muy similar y no hay muchas diferencias significativas de una semilla a otra, como en el caso anterior.

I. Dimensiones de la semilla: Ancho (A), Largo (L) y Espesor (E)

Las dimensiones de la semilla variaron en función de los resultados de las medias entre los dos tipos de procesos estudiados, notablemente presentando el fermentado de mayor valor para las tres dimensiones y el seco de menor valor, esto es similar a los resultados de peso e índice de la semilla ($p < 0,05$), ya que ellos están asociados al tamaño y en el secado como bien se ha mencionado antes, ocurren pérdidas del contenido de agua (humedad) presentes en las muestras, mediante el proceso de evaporación por aire caliente y por ende se comprimen las semillas,

distorsionando las dimensiones de esta. Las figuras concernientes a estos resultados se encuentran en los anexos C.

I. Contenido de humedad

El contenido de humedad es un factor de calidad para preservación, conveniencia en empaque, transporte y almacenamiento, también constituye un criterio de identidad [16].

Se ha encontrado que las semillas de cacao estudiadas en el laboratorio contienen aproximadamente un 55,36% de agua en base seca para el cacao fermentado, este alto contenido de humedad en la fermentación es debido a la descomposición microbiana de la pulpa que produce desprendimiento de jugos. La característica química del grano de cacao fermentado varió significativamente ($P < 0,05$) durante el transcurso del secado (Figura 4.10), la humedad descendió, en el cuál la reducción fue de 6,59%, un valor concurrente con el rango (6-8%) establecido por COVENIN (1995) como requisito de calidad y requerido por los mercados internacionales para la comercialización del cacao. La humedad

obtenida al final del secado es apropiada porque impide el crecimiento de hongos en el almacenamiento y que el grano se quiebre fácilmente, en el se producen reacciones térmicas y se originan fracciones volátiles mediante reacciones de oscurecimiento no enzimático vía Maillard y formación de pigmentos marrones. [2]

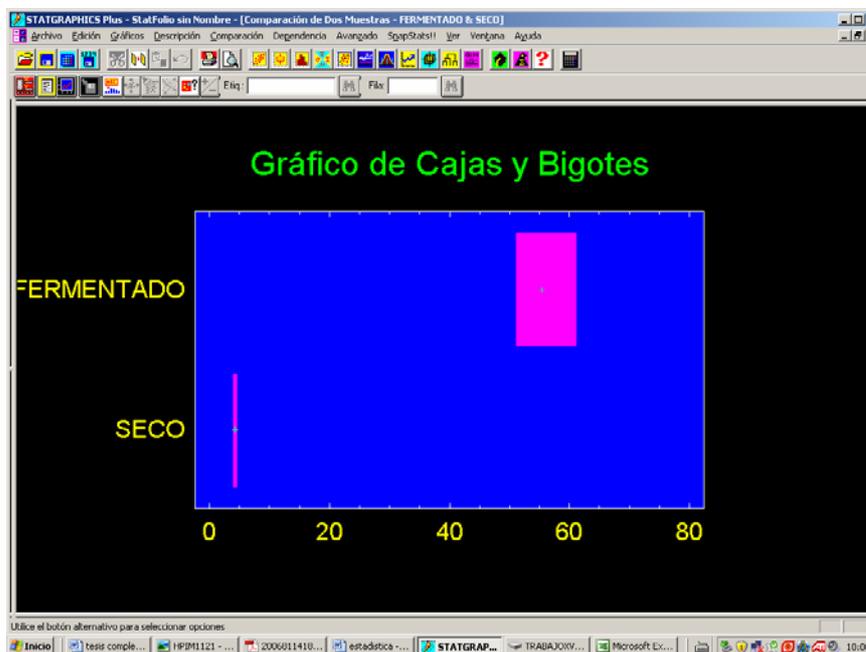


Figura 4.10 Análisis gráfico estadístico de las humedades del cacao fermentado y seco.

I. Contenido de cenizas

En los resultados de porcentaje de cenizas se puede notar un leve descenso en el cacao seco en comparación con el cacao fermentado, arrojando un resultado de 4,15% para el fermentado y 3,23% para el seco; esta disminución pudiese estar relacionada con la mayor eliminación de agua en este análisis, la cual difunde a través de los poros al medio, arrastrando consigo a minerales hidrosolubles; sin embargo, las desviaciones típicas de cada proceso fluyeron similarmente no encontrándose diferencia significativa entre ellas (Anexo D).

I. Contenido de grasa cruda

El contenido de grasa varió en los promedios de ambos procesos de 42,20 a 56,86% como se muestra en la tabla 4.6, pero siguió el mismo patrón en el análisis de la varianza ($p < 0,05$) siendo significativamente

similares en comportamiento, como se demuestra en la figura 4.11 del resumen estadístico del programa. Estos valores concuerdan con las exigencias de la norma Covenin 1340 para cacao, ya que la velocidad y el tiempo de extracción Soxhlet deben ser exactamente los especificados (6 horas) debido a la solubilidad de la grasa de este tipo de muestra con alto contenido graso; este crecimiento se debe a que la grasa se traslada a la concha durante el secado, se evapora todo el agua contenida y la semilla queda rica en grasa.

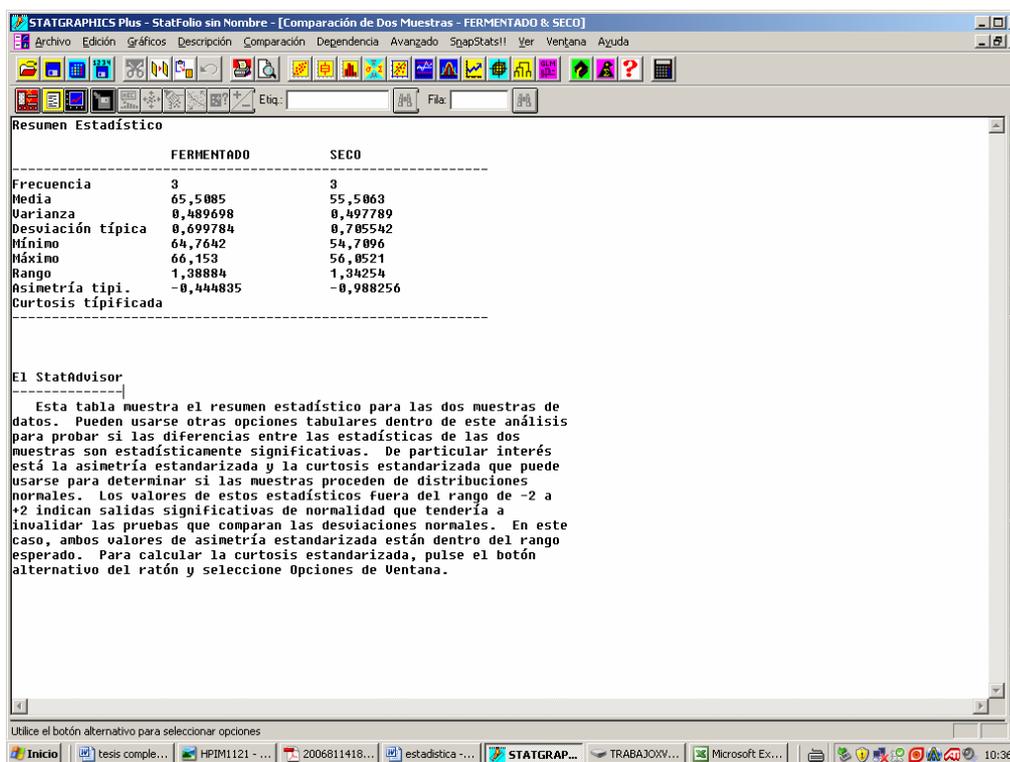


Figura 4.11 Resumen estadístico señalando diferentes parámetros de evaluación para la grasa cruda.

I. Contenido de proteínas totales

El porcentaje proteico disminuyó en el proceso de secado a 15,07% y presentando un valor mayor en el fermentado con 17,85% mostrándose

ambas muestras promedios sin ningún nivel de significancia, lo que indica que en el secado, la degradación de proteínas que se inicia en la fermentación según los días expuestos en las cajas de maderas continúa, como se degradan mediante la digestión favorecen la actividad de proteasas definidas como la proteínasa aspártica y de la carboxipeptidasa por las temperaturas mayores de 40°C durante la exposición de la muestra en el secador con aire caliente. Estas enzimas originan aminoácidos, cuya concentración descienden rápidamente al aumentar la temperatura durante el secado.

G. Contenido de Fibra cruda

La determinación del análisis de fibra cruda es el residuo libre de cenizas que resulta del tratamiento en caliente con ácidos y bases fuertes; ésta constituye el 20-50% de la fibra dietética total, lo cuál es de suma importancia que el producto final (chocolate) cumpla con los valores nutricionales y funcionales en el organismo, el resultado de esta prueba presente en el cacao fermentado y seco fueron similares de acuerdo a la comparación de las desviaciones típicas ($p < 0,05$), obteniendo mayor contenido en el seco con 4,28% y 3.93% para el fermentado; estos resultados se encuentran dentro del rango de los requerimientos en las normas venezolanas para su exportación e importación.

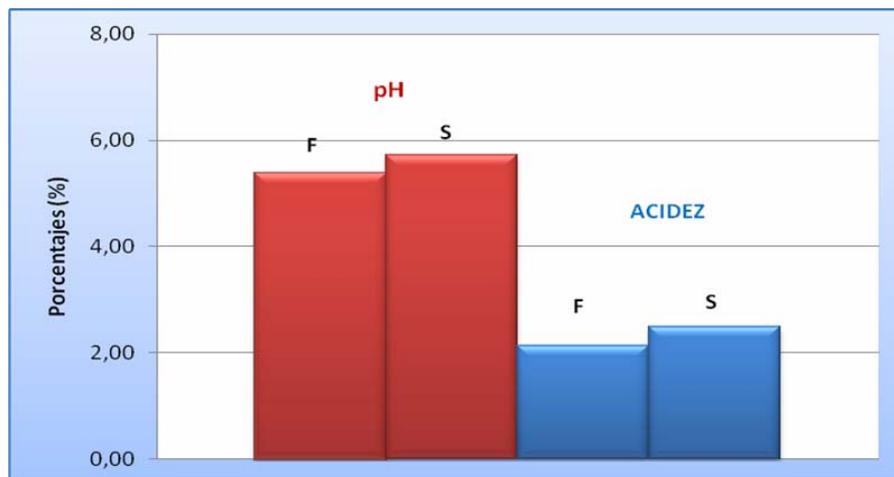


Figura 4.12 Porcentajes promedios de pH y acidez presentes en los granos de cacao fermentado y seco.

H. pH y Acidez titulable

De los resultados de pH se puede notar que existen pocas diferencias entre el pH del cacao fermentado con el seco, dando una desviación estándar muy similar; siendo el fermentado el más ácido y el último de mayor valor de pH el menos ácido (Figura 4.12). Esto se puede atribuir a que el cacao fermentado tiene un alto contenido de azúcares en la pulpa y esto favorece el desarrollo de las levaduras durante el proceso fermentativo, las cuales promueven la fermentación alcohólica, con un consecuente aumento de la acidez. Esta acidificación de los granos tiene un efecto favorable sobre el sabor del cacao.

En el secado, el pH se incrementa debido a la pérdida de ácidos conjuntamente con la evaporación del agua. Además, los compuestos fenólicos disminuyen por difusión fuera del cotiledón y por la formación de complejos con las proteínas y los polisacáridos.

I. Contenido de almidón

La composición química de las semillas está determinada genéticamente pero las cantidades relativas pueden variar en función de algunos factores ambientales como la presencia de nutrientes minerales o el clima. La forma del grano depende de la cantidad de amilosa, uno de los polímeros que conforman este polisacárido; así mientras más redondeados sean, mayor cantidad de amilosa poseen, lo que quiere decir según los resultados de la tabla 4.6 que durante el proceso de secado al perder humedad, la semilla se redujo y pierde parte del contenido de almidón presente en ella obteniendo un valor de 7,43% y en el fermentado 8,36%, sin embargo la diferencia en promedios no es mucha quedando la almendra rica en almidón, y la desviación sigue el mismo patrón para ambas determinaciones (3) como se muestra en la figura 4.13.

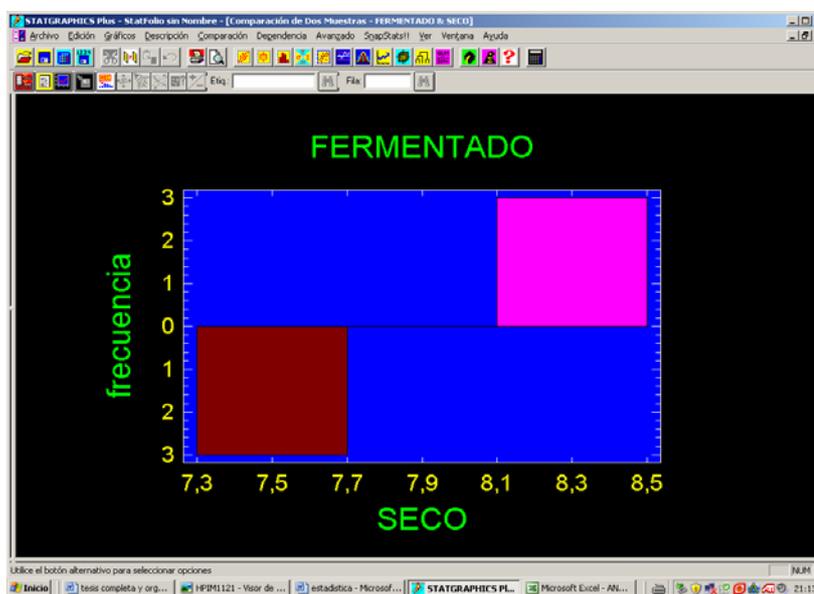


Figura 4.13 Histograma de frecuencia del cacao fermentado y secado para el análisis de almidón ($p < 0,05$).

J. Contenido de carbohidratos totales

El contenido de carbohidratos totales calculados por diferencia, varía entre 37,65 a 28,01% para el cacao seco, cabe destacar que calculados de esta manera entran en juego los resultados de las propiedades de grasa, cenizas y proteínas de este alimento, ya que son compuestos que contienen en su estructura una mayor proporción de carbono, hidrógeno y oxígeno, también se encuentran los monosacáridos, disacáridos, trisacáridos y polisacáridos. Es importante conocer este contenido ya que, constituyen un aporte de energía importante para el organismo.

En este caso el contenido de carbohidratos fue mayor en el proceso fermentativo y menor en el secado, esto puede atribuirse a que en el secado se afectan las características químicas del grano, ya que además de continuar las reacciones que se inician en la fermentación, se producen reacciones térmicas que ocasionan cambios en los compuestos precursores del sabor y pierden propiedades mediante la exposición al fluido caliente a mayor temperatura y tiempo, mientras que en el fermentado su condición persiste a que acumule más propiedades en el pericarpio de la semilla, en la testa, por el tipo de fermentador y por la frecuencia de remoción de la masa fermentante.

Los análisis estadísticos de todos los parámetros estudiados se encuentran en los anexos D.

4.2 CONCLUSIONES

- 1.** Las características físicas de las semillas de cacao presentaron una gran variabilidad entre los tipos y las zonas, destacándose el tipo criollo (Cumboto) por mayor peso de semillas, semillas más anchas y gruesas, así como un índice de semilla superior al de los cacaos trinitarios (Barlovento y Río Caribe).
- 2.** Las diferentes curvas de secado presentan el mismo comportamiento para ambos espesores del lecho del grano de cacao.
- 3.** El grano de cacao se comporta como un material poroso durante el proceso de secado.
- 4.** El grano de cacao puede ser deshidratado a la temperatura de 70°C sin que su composición química se altere significativamente.
- 5.** La velocidad de secado y la humedad crítica del grano de cacao se incrementa al aumentar la temperatura.
- 6.** El método de extracción soxhlet es completamente empírico y solo se pueden obtener resultados duplicados si se siguen de manera estricta todos los detalles.
- 7.** El grano de cacao deshidratado posee una composición química favorable para ser utilizada en la industria chocolatera.

4.3 RECOMENDACIONES

- 1.** Estudiar la cinética de degradación de los almidones en los granos de cacao ensayados.
- 2.** Hacer el estudio microbiológico a las muestras de cacao.
- 3.** Realizar una planta piloto de secado para la posible producción de cacao.
- 4.** Determinar otros parámetros físicos y químicos que permitan diferenciar concluyentemente la calidad del Cacao de las distintas zonas productoras de Venezuela.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- VIVAS, J. **“Cacao, cosecha, fermentación y secado”**. Editorial CESVI. Caracas, Julio **2005**.
- 2.- REYES, H., L, CAPRILES de REYES. **“El cacao en Venezuela. Moderna Tecnología para su cultivo”**. Editorial Chocolates el Rey. C.A. Caracas, Venezuela **(2000)**.
- 3.- RAMOS, G., RAMOS, P y A. AZÓCAR. **“Beneficio del cacao (*Theobroma cacao L.*)”**. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Mérida. Serie B. Maracay, Venezuela **(1993)**.
- 4.- MANRIQUE, M. 2003. **“Evaluación del proceso de secado de la base avena instantánea en el secador de doble tambor (*drum dryer*) en una industria de alimentos”**. Universidad de Oriente. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Puerto La Cruz **(2003)**.
- 5.- L. ORTIZ de BERTORELLI, L. GRAZIANI de FARIÑAS, G. CAMACHO. 2004. **“Efecto del secado al sol sobre la calidad del grano fermentado de cacao”**. *Agronomía Trop.* 51(1):119-13 1.
- 6.- MALAVÉ, D y W. FERNÁNDEZ. **“Elaboración de harina de batata (*Ipomoea batatas*) utilizando los procesos de secado, molienda, tamizado y su efecto sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales”**. Universidad de Oriente. Trabajo de grado. Puerto La Cruz **(2005)**.

- 7.- GARCÍA, P y J. PLANCHA. **“Diseño preliminar de un secador rotatorio y sus equipos auxiliares para deshidratar pulpa de café”**. Universidad de Oriente. Trabajo de grado. Puerto La Cruz (2006).
- 8.- W. McCABE y J. SMITH, **“Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”**, Cuarta Edición, Editorial McGraw-Hill, España (1999).
- 9.- SING, P. y HELDMAN, D., **“Introducción a la Ingeniería de los Alimentos”**. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España.(2000).
- 10.- J. COULSON y J. RICHARDSON, **“Ingeniería Química Operaciones Básicas”**, Tercera Edición, Editorial Reverté Tomo II, España (1981).
- 11.- MAUPOEY, P., BARAT, J. **“Introducción al secado de alimentos por aire caliente”**. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. P: 43-49.
- 12.- ALVAREZ, C., PEREZ, E y M. LARES. **“Caracterización física y química de almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en la región de Cuyagua, Estado Aragua”**. Agronomía tropical. 57 (4): 249-256 (2007).
- 13.- J. ANGULO, L. ORTIZ y GRAZIANI, L. **“Caracterización física de la semilla de los cacaos criollos, forasteros, amazónico y trinitario de la localidad de Cumboto, Estado Aragua”**. Agronomía tropical. P: 203-219 (2007).
- 14.- R. ACOSTA, L. ORTIZ y GRAZIANI, L. **“Influencia de varios factores sobre características del grano de cacao fermentado y secado al sol”**. Agronomía tropical. 59 (2): 119-127 (2009).
- 15.- BRAUDEAU, J. 1970. **“El cacao. Técnicas agrícolas y producciones tropicales”**. Barcelona, España. Editorial Blumé. 297 p.

16.- BARBOSA, G., A. IBARZ. **“Operaciones unitarias en la industria de los alimentos”**. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE GRANOS DE CACAO FERMENTADO, EN UN SECADOR DE BANDEJAS CON CONVECCIÓN FORZADA DE AIRE”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
MIRANDA L. GEORGINA	CVLAC: 18.603.243 EMAIL: gmiranda245@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Evaluación, Secado de granos, Cacao Fermentado, Secador de Bandejas

Convección.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En este proyecto se evaluó el proceso de secado de granos de cacao fermentado (*Theobroma cacao L.*), en un secador de bandejas con convección forzada de aire. Las muestras estudiadas fueron suministradas por la unidad de producción comunitaria "Cacao de paria 338", ubicada en la localidad de Río Caribe, estado Sucre. La caracterización física de la semilla de cacao fue realizada mediante la evaluación de las variables: peso, dimensiones e índice de las semillas. Para cumplir con el objetivo planteado se determinó la cinética de secado a tres temperaturas (50, 60 y 70 °C) hasta alcanzar la humedad de equilibrio a las condiciones empleadas, y el efecto de la variación del espesor del lecho de granos con una y dos capas. Todas las cinéticas de secado se ajustaron a un modelo de tipo exponencial, observándose además el período de velocidad constante y el período de velocidad decreciente en dos etapas (períodos postcrítico I y postcrítico II) del proceso de secado para ambos espesores de 1,03 y 2,41 cm. En el período de secado de velocidad constante los valores de la pendiente (velocidad de secado) fueron aumentando a medida que aumentó la temperatura del secador, obteniéndose la mayor velocidad a 70

°C (0,3060 y 0,2640 g agua/g ss.h) y la menor a 50 °C (0,1980 y 0,1380 g agua/g ss.h) respectivamente, lo cual concuerda con los datos reportados de las propiedades termodinámicas, en donde a mayor temperatura mayor energía cinética de las moléculas del agua. Los tiempos transcurridos necesarios hasta alcanzar los períodos de secado a velocidad decreciente fueron menores a temperaturas más altas. Los resultados revelaron una gran variabilidad entre los tipos de zonas comparadas (Cumboto, Cuyagua y Barlovento), presentando la zona estudiada las semillas más largas y de mayores espesores. Las muestras de cacao fermentado presentaron aumentos de humedad, cenizas, proteínas y valores inferiores de pH. Durante el secado disminuyeron la humedad, proteínas, cenizas, pero con incrementos de pH; mientras que el tamaño de las semillas se redujo debido a la pérdida de humedad mediante el proceso de evaporación. En conclusión, las propiedades del grano seco variaron en función de los factores evaluados, en tanto que las características químicas dependieron de la condición del grano.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Álvarez M. Lucas	ROL	CA	AS-X	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Silva. Héctor	ROL	CA	AS	TU	JU-X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Obando. Yaneis	ROL	CA	AS	TU	JU-X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	04	30
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE: SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis. Secado de granos de cacao fermentado.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J
K L M N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z . 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.**

ALCANCE

ESPACIAL: Laboratorio de Alimentos UDO ANZ. (Dpto. de Química)
(OPCIONAL)

TEMPORAL: 3 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la

Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines

**con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien
deberá**

**participarlo previamente al Consejo Universitario, para su
autorización”.**

AUTOR 1**Georgina Miranda Lara**

AUTOR 2

AUTOR 3

TUTOR**Lucas Álvarez M.**

JURADO 1**Yaneis Obando**

JURADO 2**Héctor Silva****POR LA SUBCOMISION DE TESIS**