



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

TÍTULO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

**“PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICA DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO
NARANJAL 51 PARA EL PROCESO DE SECADO”**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO.

AUTORES:

Edison Josué Lara Moya
Henry Paul Taco Vasquez

TUTOR:

Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, Ms.C

LATACUNGA, AGOSTO, 2025

Latacunga, julio 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Edison Josué Lara Moya y Henry Paul Taco Vasquez declaramos ser autores del proyecto de titulación **“PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICA DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA EL PROCESO DEL SECADO”**, siendo el Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, Ms.C tutor del presente trabajo de titulación; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

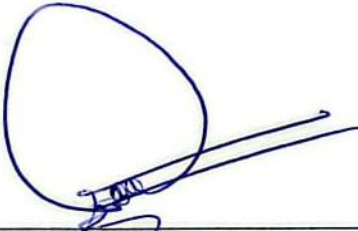
Edison Josué Lara Moya
CC. 1850247402

Henry Paul Taco Vasquez
CC. 0550466528

Latacunga, julio 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICA DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA EL PROCESO DEL SECADO”**, propuesto por los estudiantes Edison Josué Lara Moya y Henry Paul Taco Vasquez de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, Ms.C
C.C. 0503113730
TUTOR

Latacunga, julio 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

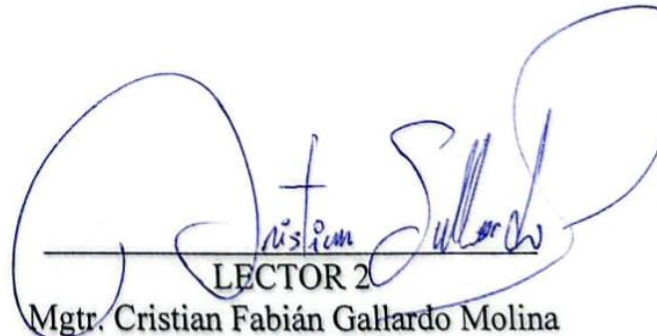
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título **“PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICA DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA EL PROCESO DEL SECADO”**, propuesto por los estudiantes Edison Josué Lara Moya y Henry Paul Taco Vasquez de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, nos permitimos indicar que los estudiante han concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de Aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad Proyecto de Investigación en virtud de lo cual los postulantes puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que ponemos en conocimiento para los fines legales pertinentes.

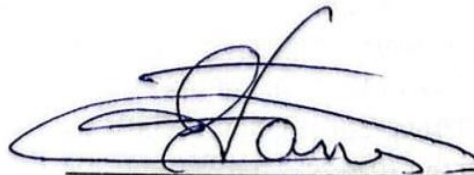
Atentamente,



LECTOR 1 (PRESIDENTE)
PhD. Héctor Luis Laurencio Alfonso
CC: 1758367252



LECTOR 2
Mgtr. Cristian Fabián Gallardo Molina
CC: 0502847692



LECTOR 3
PhD. Enrique Torres Tamayo
CC: 1757121940

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente inagotable de sabiduría y fortaleza, por acompañarme con su luz en cada etapa de este proceso académico y personal.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mi tutor, Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc, por su dedicación, orientación y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo de titulación. De igual manera, agradezco a Ing. Enrique Torres Tamayo PhD, cuya experiencia y guía fueron fundamentales para el sustento y consolidación de esta investigación.

Agradezco de manera especial a mi compañero/a de tesis Henry Paul Taco Vasquez, con quien compartí jornadas de trabajo, desafíos y aprendizajes. Su compromiso, entrega y espíritu colaborativo fueron clave para alcanzar este objetivo.

A mi familia, les debo un profundo reconocimiento por su amor incondicional y por ser mi soporte en los momentos más difíciles. A mi madre y Lety Moya, gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Su ejemplo y apoyo constante me dieron las fuerzas necesarias para seguir adelante.

A mi hijo, Santiago Vicente Lara Tobar, gracias por su compañía, comprensión y amor. Su presencia fue mi refugio en los momentos de incertidumbre y su cariño, la energía que necesitaba para seguir avanzando.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a los docentes, compañeros, amigos y a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarme las herramientas necesarias para mi formación académica y profesional. A todas las personas que, de una u otra manera, fueron parte de este proceso, les extiendo mi gratitud. Este logro no es solo mío, sino el reflejo de un esfuerzo compartido que guardaré con orgullo en mi memoria.

Edison Josue Lara Moya

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de fortaleza y sabiduría, por acompañarme en cada etapa de este camino.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mi tutor, Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc, por su valiosa orientación, paciencia. Así también, al Ing. Enrique Torres Tamayo, PhD, por su generosa guía y aporte al sustento de este trabajo. Agradezco de manera especial a mi compañero de tesis, Edison Josué Lara Moya, con quien compartí jornadas de esfuerzo, perseverancia y aprendizaje; su compromiso y trabajo en equipo fueron claves para alcanzar este logro.

A mi familia, gracias por su apoyo incondicional, amor y ejemplo de perseverancia, que me impulsaron a continuar en los momentos más exigentes. A mis padres, Luis Rigoberto Taco y Norma Jeanneth Vásquez, gracias por su guía, por enseñarme que con fe y esfuerzo todo es posible, y por ser mi mayor motivación para no rendirme. A Mónica Falconi y a mi hijo Josué Taco, les expreso mi más profundo agradecimiento: su compañía fue mi refugio y su amor, la fuerza que me sostuvo hasta el final.

Finalmente, agradezco a mis docentes, compañeros, amigos y a la Universidad Técnica de Cotopaxi, mi formación profesional y contribuir de forma significativa a mi crecimiento académico y personal. A todos quienes, de una u otra manera, aportaron a este proceso, les expreso mi gratitud. Este logro es fruto de un esfuerzo compartido y una etapa que recordaré con orgullo y agradecimiento.

Henry Paul Taco Vasquez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi abuelo, quien ya no se encuentra conmigo pero desde el cielo me acompañó en este difícil camino. Sus palabras sabias supieron sacar lo mejor de mí en muchas ocasiones. Me enseñó el respeto, la honestidad y el amor a la familia, y con su ejemplo, comprendí el verdadero sentido del esfuerzo y la dedicación en el trabajo, principios que hoy guían mi vida.

A mi madre, quien desde mi nacimiento ha sacrificado su descanso para cuidarme, acompañarme en cada meta y apoyarme con amor y comprensión incondicional. Sus enseñanzas han sido el pilar de mi crecimiento personal y emocional.

A mi hijo, quien ha sido mi mayor fuente de fuerza. Su amor, ternura y compañía me impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más duros. Este logro también les pertenece, porque sin su presencia, nada de esto habría tenido el mismo sentido.

A mis buenos amigos con quienes compartí gratos momentos de inicio a fin de mi carrera, a mis docentes con quienes forme una buena amistad y supieron guiarme a lo largo de este proceso.

Edison Josué Lara Moya

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi padre, por ser siempre una fuente de inspiración. Sus palabras sabias, han sabido sacar lo mejor de mí en muchas ocasiones. Me enseñó el valor del respeto, la honestidad y el amor a la familia, con su ejemplo me enseñó el valor del esfuerzo y la dedicación en el trabajo esto que hoy guía mi vida.

A mi madre, quien desde mi nacimiento ha sacrificado su descanso para cuidar de mí, acompañarme en cada meta y apoyarme con amor y comprensión incondicional. Sus consejos y enseñanzas han sido el fundamento de mi crecimiento personal.

A mis hermanos, por ser una fuente constante de alegría, motivación, Su energía, cariño y han enriquecido profundamente mi vida y fortalecido nuestros lazos familiares.

A mi compañera de vida a mi hijo, quienes han sido mi mayor fuente de fuerza y motivación. Su amor, compañía y ternura me han impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más duros. Este logro también les pertenece, porque sin su presencia, nada de esto habría tenido el mismo sentido.

A mi familia en especial a mi abuelita, que ahora me acompaña desde el cielo. Hoy cumplo la promesa que un día te hice: me gradué, y este logro también es tuyo.

Cada uno de ustedes está presente en este logro, que no es solo mío, sino una muestra viva del amor, los valores y las enseñanzas que me han acompañado siempre.

Henry Paul Taco Vasquez

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO: “PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICA DEL CACAO COLECCIÓN
CASTRO NARANJAL 51 PARA EL PROCESO DEL SECADO”**

Autores: Edison Josué Lara Moya y Henry Paul Taco Vasquez

RESUMEN

La limitada investigación sobre las propiedades físicas y térmica del cacao CCN-51 cultivado en La Maná ha limitado el diseño, modelación y simulación eficiente del proceso de secado, tanto en términos de tiempo como de consumo energético. Por ello, fue necesaria la determinación experimental de dichas propiedades mediante experimentos de laboratorio, con el objetivo de generar parámetros aplicables, al análisis térmico del grano. Se utilizaron métodos experimentales como análisis granulométrico digital y calorimetría diferencial de barrido (DSC), a fin de caracterizar la capacidad calorífica en función de la temperatura. Entre los principales resultados obtenidos se destacan: índice de esfericidad 0.756, índice de aplastamiento 0.354mm y capacidad calorífica promedio a 70°C 2.05 J/g.°C. Se evidencio un incremento de la capacidad especifica conforme aumenta la masa, lo cual influye directamente en la eficiencia térmica del secado. Asimismo, registro una granulometría promedio de 27.88mm para el cacao seco y 39.30mm para el cacao en baba, parámetros que favorecen una transferencia de calor uniforme. Las propiedades determinadas permiten caracterizar el comportamiento térmico del grano y constituyen una base técnica para el diseño de equipos y la simulación de procesos de secado. Esta investigación aporta información científica clave que puede fortalecer la cadena de valor del cacao mediante tecnologías mas eficientes y adaptadas a las condiciones locales producción.

Palabras clave:

Cacao CCN-51, propiedades físicas, capacidad calorífica, granulometría, factor de forma.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY
FACULTY OF APPLIED SCIENCES ENGINEERING

**TITLE: “CACAO PHYSICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CASTRO
NARANJAL 51 FOR THE DRYING PROCESS”**

Authors: Edison Josué Lara Moya and Henry Paul Taco Vasquez

ABSTRACT

The limited research on the physical and thermal properties of the cocoa Castro Naranjal 51 (CCN), that is grown in La Maná, has limited the efficient design, modeling, and simulation of the drying process, both in terms of time and energy consumption. Therefore, it was necessary to experiment with these properties through laboratory tests. The aim was to generate applicable parameters for the thermal analysis of the bean. Experimental methods such as digital granulometric analysis and differential scanning calorimetry (DSC) were used to characterize the heat capacity based on the function of the temperature. The results showed a sphericity index of 0.756, flattening index 0.354 mm, and average heat capacity at 70°C 2.05 J/g·°C. It evidenced an increase in the capacity as the mass grew. It directly influenced the thermal efficiency of drying. Likewise, it reported an average particle size of 27.88 mm for dry cocoa and 39.30 mm for cocoa slurry. These parameters favor uniform heat transfer. The properties allowed to determine the thermal behavior of the bean, and it constituted a technical basis for the design of equipment and the simulation of drying processes. This research provides vital scientific information that can strengthen the cocoa value chain through more efficient technologies adapted to local production conditions.

Keywords: CCN-51 cacao, physical properties, heat capacity, particle size distribution, shape factor.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Centro
de
Idiomas

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés de Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICAS DEL CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA EL PROCESO DEL SECADO”** presentado por: Lara Moya Edison Josué y Taco Vásquez Henry Paul egresados de la Carrera de: **Ingeniería Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Agosto de 2025.

Atentamente,

Mg. Abata Checa Fanny Mercedes.

Docente UTC Extensión Pujilí

CI: 0502278740

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	12
2. INTRODUCCIÓN.....	13
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	14
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	15
2.3.1. Objeto de Investigación:.....	15
2.3.2. Campo de Acción:	15
2.4. BENEFICIARIOS	15
2.4.1. Directos.....	15
2.4.2. Indirectos	15
2.5. JUSTIFICACIÓN	15
2.6. OBJETIVOS.....	16
2.6.1. General.....	16
2.6.2. Específico	16
2.6.3. Sistema de Tareas	17
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	17
3.1. ANTECEDENTES	17
3.2. MARCO CONCEPTUAL REFERENCIAL	19
3.2.1. Producción del cacao en el Ecuador	19
3.2.2. Propiedades físicas para el secado del cacao CCN-51	30

3.2.3. Propiedad térmica para el secado del cacao CCN-51	31
4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	32
4.1. PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CACAO CCN-51	34
4.1.1. Análisis morfológico	36
4.2. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR capacidad calorífica DEL CACAO CCN-51	37
4.2.1. Fórmulas para la capacidad calorífica del cacao CCN-51.....	37
4.2.2. Determinación de la ecuación de la capacidad calorífica (Cp) para el cacao CC-51	39
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
5.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CACAO CCN-51	40
5.1.1. Análisis granulométrico del cacao seco.....	40
5.1.2. Análisis granulométrico del cacao seco.....	42
5.2. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DEL CACAO CCN-51	43
5.2.1. Cálculo de los experimentos De La Capacidad Calorífica Del Cacao CCN-51.....	43
5.2.2. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura a diferentes masas.....	50
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
6.1. CONCLUSIONES	55
6.2. RECOMENDACIONES	55
7. REFERENCIAS	56
8. ANEXO	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cacao en Ecuador [11]	20
Figura 2. Evolución del valor exportado de cacao de Ecuador entre 219 y 2023[16].....	22
Figura 3. Secado del cacao [20].....	23
Figura 4. Temperatura en el proceso de secado [22].....	24
Figura 5. Corriente del aire a través del cacao [22].....	25
Figura 6. Fermentación en contenedores de plástico.....	26
Figura 7. Método de secado Rohan [26]	26
Figura 8. Método de secado en tendales.....	27
Figura 9. Secado tipo Elva [26].....	27
Figura 10. Secado en piso de cemento.	28
Figura 11. Marquesina o túnel de secado [27].....	28
Figura 12. Maquina secadora de cacao [31].....	29
Figura 13. Variables de las propiedades para el secado del cacao CCN-51.....	33
Figura 14. Equipo Camsizer IP50 [38].....	34
Figura 15. Medición de humedad.....	35
Figura 16. Imagen de partícula del cacao CCN-51 (en baba), obtenido mediante el análisis granulométrico.....	35
Figura 17. Imagen de partícula del cacao CCN-51 (seco), obtenido mediante el análisis granulométrico.....	35
Figura 18. Equipo DSC 3500 Sirius [44].	37
Figura 19. Grafica de la granulometría del cacao seco.....	41

Figura 20. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 9mg.	50
Figura 21. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 9.4 mg	51
Figura 22. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 11.9mg	51
Figura 23. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 12.7mg.	52
Figura 24. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 13.2mg.	52
Figura 25. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 13.9mg	53
Figura 26. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masas de 14.6mg	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Área de conocimiento UNESCO.....	12
Sistemas de tareas. Sistemas de tareas.	17
Tabla 2. Variedad de cacao en Ecuador [12].....	21
Tabla 3. Variables independientes de las propiedades para el secado del cacao CCN-51...33	
Tabla 4. Variables dependientes de las propiedades para el secado del cacao CCN-51.	33
Tabla 5. Parámetros de la granulometría.	36
Tabla 6. Dimensiones del crisol de referencia [45].	38
Tabla 7. Análisis granulométrico del cacao seco.	40
Tabla 8. Análisis granulométrico del cacao en baba.	42
Tabla 9. Datos de Ensayo	43
Tabla 10. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 9 mg44	
Tabla 11. Datos de Ensayo	44
Tabla 12. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 9.4 mg45	
Tabla 13. Datos de Ensayo	45
Tabla 14. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 11.1 mg	46
Tabla 15. Datos de Ensayo	46
Tabla 16. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 12.7 mg	47
Tabla 17. Datos de Ensayo	47

Tabla 18. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 13.9 mg	
48	
Tabla 19. Datos de Ensayo	48
Tabla 20. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 13.9 mg	
49	
Tabla 21. Datos de Ensayo	49
Tabla 22. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 14.6 mg	
50	
Tabla 23. Modelos de la capacidad calorífica en función de la Temperatura	54

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: “Propiedades físicas y térmica del cacao colección castro naranjal 51 para el proceso del secado”.

Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación.

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Lara Moya Edison Josué

Taco Vasquez Henry Paul

Ing. Albarracín Álvarez Mauro Darío

Tabla 1. Área de conocimiento UNESCO.

07 ingeniería, Industria y Construcción	071 ingeniería y Profesiones Afines	0713 – Electricidad y energía
---	-------------------------------------	-------------------------------

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Eficiencia energética e integración de fuentes de energía renovables.

2. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, es común que los agricultores vendan cacao “en baba”, es decir, recién cosechado y sin secar ni fermentar, debido a que intermediarios compran directamente en esta condición [1]. Aunque no hay estudios que indiquen que esto pasa específicamente en el cantón La Maná, es coherente con las practicas observadas en zonas rurales productoras de cacao en Cotopaxi. El secado de cacao se realiza de forma artesanal mediante exposición solar, lo que implica una supervisión constante, mayor tiempo de procesamiento. Este proceso varía entre 3 y hasta 22 días según la temporada y la alta vulnerabilidad de las condiciones adversas [2]. Aunque existen máquinas para el secado de cacao disponible en el mercado, para el grano, estas son utilizadas de forma empírica sin criterios técnicos que consideren las propiedades físicas y térmica específicas del grano.

Al depender de métodos artesanales, los productores quedan expuestos a pérdidas económicas por cambios climáticas, interrupción del proceso y deterioro del grano durante el almacenamiento. Esto se debió a que los granos eran frecuentemente secados bajo el sol, ya sea directamente en finca o a lado de carreteras, en superficies poco controladas [3]. El uso empírico de maquinarias, sin respaldo técnico sobre las propiedades del grano, agrava la situación.

Frente a este escenario se plantea la necesidad de estudiar las propiedades físicas y térmica del cacao (CCN-51), como la capacidad calorífica, granulometría. Estos parámetros permitirán analizar el comportamiento del secado del cacao desde un enfoque académico, identificando oportunidades de mejora para un sistema más eficiente y adaptable. Esta investigación aporta con información técnica clave que respalde futuros desarrollos tecnológicos para el secado de cacao, reduciendo tiempos del proceso y generando nuevas oportunidades comerciales para los agricultores.

A través del análisis de las propiedades físicas y térmica obtenidas por experimentos de laboratorio, se podrá establecer curvas de secado específicas para el cacao CCN-51, proporcionando información para futuras secadoras más eficientes y adaptables a condiciones locales de operación y a las características físicas del grano, con ello se garantizarían una mejor conservación de sus cualidades.

Los datos experimentales obtenidos en esta investigación permitirán comprender el comportamiento físicos y térmicos del cacao CCN-51 durante el proceso de secado, lo que

servirá como base para el análisis y proyección de escenarios futuros orientados a la mejora del proceso, los cuales incide en la calidad final del producto. Lo que facilitara la comercialización y aumentando su producción, cabe. El presente estudio se desarrolló bajo condiciones de experimentos del laboratorio de la Universidad Central del Ecuador, facultad de Ingeniería Química, del laboratorio de Termodinámica, los resultados representaron una primera aproximación técnica, contempladas con cálculos que permitirán estimar las propiedades del cacao, sin abordar aplicaciones del proceso.

El presente documento parte de la fundamentación teórica debidamente referenciada, describe la metodología, análisis de resultados permitiendo alcanzar conclusiones inherentes a propiedades tales como: granulometría, calor específico del cacao Colección Castro Naranjal (CCN-51), cultivado en el canto La Maná.

2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El cantón La Maná, ubicado en la provincia de Cotopaxi, Ecuador, se caracteriza por su clima subtropical, y suelos fértiles, condiciones ideales para el cultivo de cacao variedad CCN-51 (Colección Castro Naranjal-51) ha ganado popularidad entre los agricultores debido a su resistencia a las plagas, hongos. Sin embargo, a pesar de su creciente importancia económica, existe una notable carencia de estudios técnicos que aborden las propiedades físicas y térmica de esta variedad en el contexto de La Maná.

La ausencia de datos sobre parámetros como la granulometría, el factor de forma, la capacidad calorífica, limitaron la optimización de procesos poscosecha como el secado, esenciales para conservar la calidad del grano. Esta falta de información técnica afecto el desarrollo de métodos de secado alternativos, como aquellos basados en sistemas solares con figuras geométricas en el sistema de captación, al no contar con ecuaciones de modelación adecuadas. Si bien se dispone a estudios generales del cacao CCN-51 en otras regiones del país, estos no se consideran las condiciones locales necesarias para simular y diseñar tecnologías de secado. Por ello, resulto indispensable caracterizar las propiedades físicas y térmica del; caco CCN-51 cultivado en La Maná.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El diseño, modelación y simulación del proceso de secado del cacao CCN-51 cultivado en el cantón La Maná, se ven afectados a la escasa investigación de las propiedades físicas y térmica lo que limita la reducción del tiempo y consumo energético en el proceso.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de Investigación:

Cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN-51).

2.3.2. Campo de Acción:

3313.99 Otras – Propiedades físicas y térmica del cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN-51).

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Directos

- Pequeños productores de cacao

2.4.2. Indirectos

- Centros de investigación y universidades.
- Instituciones públicas: (MAG, INIAP, GADs)

2.5. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto desde el punto de vista técnico aborda la caracterización de propiedades físicas y térmicas del cacao CCN-51, variedad ampliamente cultivada en el cantón La Maná, Cotopaxi. La generación de datos sobre granulometría, y capacidad calorífica específica permitirá comprender el comportamiento del grano durante el proceso de secado, información clave para el desarrollo futuro de tecnologías poscosecha más eficientes y adaptadas a las condiciones locales.

Los resultados de este estudio pueden utilizarse como base para optimizar el secado del cacao, lo que incide directamente en la mejora de la calidad final del producto, reduciendo pérdidas y aumentando su valor comercial. Al contar con información técnica confiable, los productores podrán tomar decisiones fundamentadas que favorezcan la rentabilidad de su actividad y la competitividad del cacao CCN-51 en mercados nacionales e internacionales.

El impacto social, de este proyecto busca generar conocimiento útil y transferible para los medianos y pequeños productores de cacao, quienes actualmente dependen de métodos artesanales poco eficientes. La disponibilidad de parámetros técnicos contribuirá al

fortalecimiento de capacidades locales, la sostenibilidad de la producción y la mejora del ingreso de las familias vinculadas a esta cadena productiva.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

Determinar las propiedades físicas y térmica del cacao colección castro naranjal 51 (CCN-51), cultivado en el cantón la Mana, mediante experimentación física obteniendo parámetros que contribuyan al análisis del proceso de secado del grano.

2.6.2. Específico

- **Establecer los fundamentos teóricos relacionados con las propiedades físicas y térmicas del cacao (CCN51).**
- **Determinar el factor de forma, el índice de aplastamiento y la granulometría del cacao (CCN-51).**
- **Establecer la capacidad calorífica del cacao (CCN-51) en función de la temperatura y el contenido de humedad del producto.**

2.6.3. Sistema de Tareas

Sistemas de tareas. Sistemas de tareas.

Objetivos específicas	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Establecer los fundamentos teóricos relacionados con las propiedades físicas y térmicas del cacao (CCN51).	Revisión Bibliografía.	Sintetizar la literatura sobre propiedades físicas y térmicas del cacao CCN-51	Análisis.
	Definición de variables.	Determinación de variables dependientes, independientes	Identificación.
Determinar el factor de forma, el índice de aplastamiento y la Granulometría del cacao.	Reconocimiento técnico del laboratorio de análisis granulométrico, charla explicativa del procedimiento de operación del equipo Camsizer IP50, sus parámetros de medición.	Comprensión del protocolo de análisis granulométrico con el equipo Camsizer IP50, para garantizar la correcta ejecución de los experimentos y la confiabilidad de los datos.	Equipo Camsizer Ip50.
	Registro y análisis de datos obtenidos	Datos exactos de las propiedades de cacao.	
	Análisis de imagen digital para obtener la distribución de tamaño de partícula.	Tablas y gráficos de la distribución granulométrica, valores medios de esfericidad e índice de aplastamiento listos para integrar en el capítulo de resultados.	Análisis Granulométrico.
Establecer la capacidad calorífica del cacao (CCN-51) en función de la temperatura y el contenido de humedad del producto.	Reconocimiento técnico del laboratorio de termodinámica (Cp), charla explicativa del procedimiento de operación del equipo DSC 3500 Sirius, sus parámetros de medición.	Comprensión del procedimiento para determinar la capacidad calorífica con el equipo DSC 3500 Sirius, como base para realizar los experimentos térmicos de forma adecuada.	Equipo DSC 3500 Sirius (NETZSCH)..
	Caracterizar térmicamente el cacao CCN-51 mediante calorimetría diferencial de barrido para Cp	Curvas de Cp con identificación de picos y rangos de temperatura críticos, listas para modelar perfiles de secado.	Crisol de aluminio
	Registro y análisis de datos obtenidos.	Datos exactos de las propiedades de cacao.	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).
			Software Proteus Thermal Analysis.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

El cantón La Maná, en la provincia de Cotopaxi, cuenta con condiciones agroecológicas favorables para el cultivo de cacao, en particular de la variedad CCN-51. Esta variedad, desarrollada por el agrónomo ecuatoriano Homero Castro, destaca por su alta productividad y resistencia a enfermedades, y ha sido extensamente adoptada por los pequeños y medianos productores ecuatorianos.

El estudio técnico del cacao CCN-51 ha recibido atención en distintas regiones del Ecuador sobre todo en la provincia de Cotopaxi. Sin embargo, gran parte de los trabajos disponibles se enfocaron en aspectos agronómicos generales, calidad sensorial o fermentación, dejando vacío importante en cuanto a la caracterización física y térmica del grano, especialmente en contextos locales como el cantón La Maná.

En una investigación realizada por Streule, se monitorearon los procesos de fermentación y secado en dos localidades ecuatorianas, haciendo énfasis en la influencia de la temperatura y el tipo de secador sobre la calidad final del grano. El autor concluyó que: el estudio destaca los riesgos asociados con temperaturas de secado excesivamente altas (de hasta $95.2 \pm 13.7^\circ\text{C}$) y ciertos tipos de secadores, los cuales pueden alterar los resultados de las pruebas de corte e introducir sabores no deseados a quemado o tostado en el licor de cacao [4], este estudio aportó información valiosa sobre los efectos de la temperatura en la calidad sensorial del cacao. No obstante, se identificó como limitación que no se incluyeron mediciones directas de parámetros físicos, granulometría o capacidad calorífica, ni se abordaron condiciones específicas de microclimas como el de La Maná. El enfoque del trabajo fue principalmente cualitativo y sensorial, sin generar datos técnicos que permitan modelar o simular procesos de secado o base de características reales del grano Según Choi y Okos (1986), para determinar el calor específico y conductividad térmica del cacao, se requirió conocer las propiedades físico-químicas del cacao [5].

De manera complementaria, Castillo-Orozco desarrollaron un modelo computacional para simular el proceso de secado del cacao CCN-51 en condiciones controladas. En su trabajo afirmaron que: Se propuso una simulación CDF multidominio, que combina un modelo de transferencia de calor conjugada con un modelo de transferencia de masa semiconjugada, y se comparó con los resultados experimentales basados en la temperatura del grano y el transporte de humedad [6], pese a su relevancia, existe escasa investigación centrada en las características físico-térmicas del CCN-51 cultivado específicamente en La Maná. Esta falta de información impide una comprensión adecuada de su comportamiento durante procesos postcosecha como el secado, afectando la eficiencia energética y la calidad del producto final.

La investigación de las propiedades físicas y térmica del grano de cacao incluye parámetros como la granulometría, factor de forma. Estas propiedades se determinan mediante métodos como el análisis digital, medición con calibradores digitales, y pesaje con balanzas analíticas.

El uso de estas metodologías experimentales permite que la información clave mejore la cadena de valor del cacao, lo que fortalece la competitividad tanto en el mercado nacional como internacional.

EL trabajo de Castillo-Orozco también señala que: Para ello, se determinaron las propiedades termo físicas específicas de la variedad de cacao CCN-51 de Ecuador, en función de la temperatura dentro de los granos, tanto en la testa como en el cotiledón. De esta manera, fue posible estudiar los fenómenos de transferencia de calor, esto se traduce a una capacidad calorífica de 2.660 kJ/kg°C [6].

Aunque este valor de cp sea de la variedad CCN-51 no es específicamente de La Maná, pero podemos tomar como punto de referencia o de partida para el análisis.

La mejora en las prácticas de secado mediante métodos térmicos es esencial no solo para la calidad del grano, sino también para el bienestar de las comunidades productoras, ya que aumenta los ingresos y fortalece las cadenas de valor rurales. Este enfoque resalta la dimensión social de la investigación, ya que aplicar técnica como la DSC no solo contribuye al diseño eficiente de procesos de secado, sino que también empodera a los pequeños y medianos agricultores. El acceso a esta información técnica permite mejorar la calidad del producto, reducir pérdidas y facilitar su inserción en mercados más exigentes, generando así impactos positivos en las economías locales y promoviendo un desarrollo rural más equitativo y sostenible.

3.2. MARCO CONCEPTUAL REFERENCIAL

3.2.1. Producción del cacao en el Ecuador

Ecuador ocupa una destacada en el mercado mundial del cacao, siendo reconocido tanto por la calidad de su grano como por su volumen de producción.

Según el ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), en el año 2023 el país produjo aproximadamente 396.042 toneladas métricas de cacao, lo que ubica como el tercer exportador mundial, solo por detrás de Costa de marfil y Ghana [7].

Esta producción está respaldada por más de 609 mil hectáreas cultivadas, distribuidas principalmente en las provincias de Los Ríos, Manabí, Guayas [8]. En La Maná se cultivan dos variedades principales: el cacao Nacional fino de Aroma, reconocido por su perfil sensorial distintivo, y el clon CCN-51 (Colección Castro Naranjal 51), una variedad altamente productiva y resistente a enfermedades [9].

El CCN-51 se ha convertido en una alternativa estratégica para pequeños y medianos productores, ya que ofrece rendimiento anual total registrado en el clon CCN 51 durante 2016 y 2017 fue de 1,809 y 1,993 kg ha⁻¹ [10]. Esta variedad, desarrollada en Ecuador en, ha sido ampliamente adoptada en zonas donde el clima húmedo tropical por su rápido crecimiento, facilidad de adaptación y alta concentración de sólidos de cacao, lo que facilita su exportación como grano de tipo industrial.

El cacao ecuatoriano no solo es importante en términos de volumen, sino también por su aporte a la economía nacional. Durante el año 2023, las exportaciones de cacao y derivados superaron los 1374 millones de dólares [7], convirtiéndolo en el tercer producto agroexportador del país, después del banano y el camarón.

Sin embargo, a pesar del avance en la producción, persisten desafíos importantes en la etapa postcosecha, especialmente en el secado y la fermentación del grano, que en muchas zonas aun no realiza de manera artesanal. Estas prácticas pueden comprometer la calidad final del cacao, afectando su aroma, color, contenido de humedad y capacidad de conservación. Por ello, se vuelve fundamental desarrollar soluciones tecnológicas adaptadas a contextos locales como secadoras solares artificiales eficientes que mejoran la calidad del grano y aumentan su competitividad en el mercado internacional



Figura 1. Cacao en Ecuador [11]

Variedades de cacao en el Ecuador

Ecuador en todo el mundo es reconocido por ser uno de los mayores exportadores de cacao, principalmente de la variedad Nacional o CCN-51.

La diversidad genética del cacao ecuatoriano incluye también híbridos trinitarios, variedades criollas mejoradas, y sobre todo el clon CCN-51 (Colección Castro Naranjal 51), desarrollado en los años 60 por Homero Castro [12]. Esta variedad, aunque menos valorada por su perfil sensorial, se ha masificado por su alta productividad (más de 1,5 t/ha/año), su resistencia a

enfermedades fúngicas y su rápida adaptación agroclimática, siendo hoy en día cultivada en más del 50% de las superficie nacional de cacao, especialmente en provincias como Los Ríos, Manabí, Esmeraldas y Cotopaxi [8]. A continuación, se presenta una tabla comparativa entre las principales variedades cultivada:

Tabla 2. Variedad de cacao en Ecuador [12]

VARIEDAD	RENDIMIENTO (t/ha)	PERFIL SENSORIAL	RESISTENCIA ENFERMEDADES	A ZONA PREDOMINANTE
Nacional	0.4-0.8	Floral, afrutado	Media	Costa y Amazonia
CCN-51	1.2-2.0	Acido, astringente	Alta	Costa, Sierra Baja
Trinitario	0.8-1.5	Balanceado	Media	Zonas específicas

En el cantón La Maná, se cultivan principalmente dos variedades de cacao: el tradicional Nacional Fino de Aroma y el clon CCN-51. El nacional Fino de Aroma es apreciado por su perfil sensorial distintivo, con notas florales y afrutadas, y representa una parte significativa de la producción ecuatoriana de cacao fino de aroma. Por otro lado, el CCN-51 (Colección Castro Naranjal 51), desarrollado por el agrónomo ecuatoriano Homero Castro Zurita, quien lo selecciono a partir de múltiples hibridaciones para combinar alta productividad y resistencia a enfermedades como la escoba de bruja [12].

Origen del cacao clon CCN-51

Entre 1880 y 1915, Ecuador fue el principal exportador mundial de cacao. Sin embargo, este liderazgo se vio afectado por la aparición de dos enfermedades devastadoras: la podredumbre parda (*Moniliophthora roreri*) y la escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*), que provocaron una caída significativa de la producción, con una reducción del 63% entre 1915 y 1930 [13]. Tras esta crisis fitosanitaria, el sector cacaotero ecuatoriano se recuperó gracias al uso de variedades resistentes, entre ellas el clon híbrido CCN-51(Colección Castro Naranjal), desarrollado en 1960 por Homero Castro Zurita en el cantón Naranjal. Las primeras plantaciones de este clon se realizaron en la finca “Sofía”, propiedad de Cesar Amador Baquerizo. El clon se originó de un triple cruzamiento: primero se cruzaron los híbridos IMC-

67 (upper Amazon Foraster, colectado en Perú) e ICS-95 (Trinitario con aportes de forastero y criollo) y posteriormente su progenie se cruzó con la variedad local “Canelo” (Oriente 1). El híbrido Resultante se probó en múltiples experimentos hasta obtener el número 51, de donde se deriva su nombre [14].

Históricamente, Ecuador ha basado su producción en el tipo de cacao conocido como cacao Fino y de Aroma, también conocido como cacao nacional, se estima aproximadamente el 90 % de su producción de granos de cacao se produce en pequeñas plantaciones [15].

Aportes a la economía del Ecuador y el cantón La Maná

El cacao y elaborados: alcanzó registros históricos, al reportar un incremento en el valor exportado de 31,5 % (34,0 % en el valor unitario), lo que obedece al aumento a nivel global de los precios internacionales de este rubro, como consecuencia de la escasa oferta mundial del grano por factores climáticos extremos, especialmente en regiones como África occidental, donde se ubican los principales países productores [16], Consolidando como el tercer producto no petrolero más exportado en el país.



Figura 2. Evolución del valor exportado de cacao de Ecuador entre 2019 y 2023 [16].

El cacao y su sector representan una de las economías tradicionales fundamentales del Ecuador. Según datos del INEC, el cacao emplea aproximadamente al 5% de la población económicamente activa nacional y al 15% de la población rural. La producción de cacao representa el 7,8% del PIB agrícola del país, o el 0,5% del PIB total, y el 70% lo realizan pequeños productores, mientras que el resto se reparte entre medianas y grandes empresas [19].

Secado del cacao

El secado es una etapa post – fermentación destinada a reducir la humedad interna de los granos por calentamiento, normalmente con un contenido de humedad de aproximadamente 60%, que debe ser reducido hasta un valor próximo a 8% para evitar el desarrollo de mohos que deterioran la calidad y además para facilitar el almacenamiento, transporte, manejo y comercialización del

cacao [17]. El secado constituyó una etapa posterior a la fermentación destinada a reducir la humedad interna de los granos por calentamiento, disminuyendo el contenido desde aproximadamente el 60 % inicial hasta valores entre el 6 % y 8 %, con el propósito de evitar el desarrollo de mohos y facilitar el almacenamiento, transporte, manejo y comercialización [18]. El método tradicional al sol requería entre 5 y 7 días, y en temporadas húmedas podía extenderse hasta 22 días, lo que generaba riesgos de sobresecado superficial y contaminación microbiológica [19].



Figura 3. Secado del cacao [20].

Importancia del secado en la calidad

La calidad del grano de cacao depende de cada uno de sus procesos de producción, desde las prácticas agrícolas, la región de origen y el transporte hasta la planta industrial donde se lleva a cabo la transformación. Aunque la fermentación y el secado tienen influencias complementarias en la calidad del grano, un proceso de secado deficiente de granos de cacao bien fermentados puede resultar en granos de muy mala calidad, ya que los tratamientos térmicos afectan los parámetros de calidad del grano de manera diferente [19]. Un secado mal controlado puede provocar fermentación secundaria, desarrollo de mohos, pérdida, de compuestos volátiles deseables, así como alteraciones estructurales internas del grano, que afectan la textura y dificultan su posterior procesamiento. La velocidad de secado debe ser cuidadosamente ajustada para evitar el colapso celular o el encapsulamiento de humedad en el interior, lo cual puede comprometer tanto la calidad física como la composición química del producto final [20].

Además, el secado influye en propiedades funcionales clave como la capacidad de molienda, por ello métodos de secado tecnificados o mejorados, como el uso de sistemas solares optimizados o modelos térmicos adaptados a la geometría del secador, son esenciales para

conservar los atributos sensoriales y nutricionales del cacao, especialmente en regiones productoras como el cantón La Maná, donde predomina el uso de sistemas artesanales como escaso control de parámetros térmicos [20].

Factores que influyen al proceso secado del cacao CCN-51

A. Temperatura del secado y humedad

Uno de los factores que influye directamente en el proceso de secado del cacao es la temperatura. Este parámetro controla la velocidad de transferencia de calor y masa, afectando tanto el tiempo de secado como la eficiencia energética del proceso. Según una investigación reciente, se evaluaron temperaturas constantes de 40, 50, 60 y 70 °C, y se evidenció que, a mayor temperatura, el tiempo necesario para reducir la humedad del grano disminuye significativamente. Por ejemplo, el secado a 40 °C requirió aproximadamente 10,9 horas, mientras que a 70 °C solo se necesitaron 4,4 horas, lo que demuestra un incremento en la velocidad de evaporación del agua contenida en el grano. Esta relación fue confirmada mediante simulaciones numéricas y validaciones experimentales, las cuales arrojaron errores relativos promedio bajos en la predicción de temperatura (3,5 %) y contenido de humedad (5,2 %). Estos resultados confirman que la temperatura es un factor clave que debe ser cuidadosamente controlado para garantizar un secado eficiente y preservar la calidad del cacao [22].

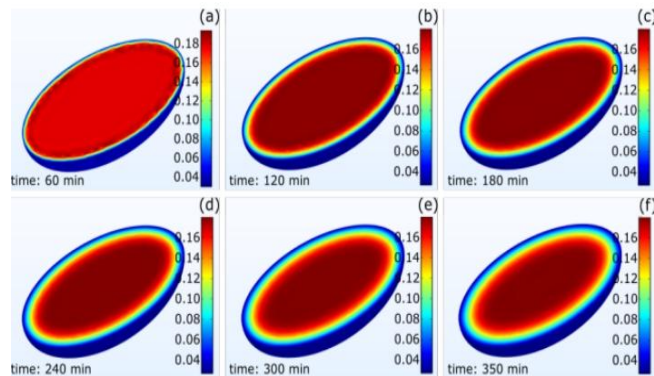


Figura 4. Temperatura en el proceso de secado [22].

B. Corriente de aire

La velocidad del aire en el proceso de secado del cacao actúa como un factor externo determinante, ya que incide directamente en la transferencia de masa y calor entre el grano y su entorno. A medida que aumenta la velocidad del aire, se facilita la eliminación de humedad, ácidos volátiles y compuestos aromáticos desde el interior del grano hacia el exterior. Este flujo

de aire acelera la difusión de vapor de agua y compuestos volátiles, lo cual contribuye a un secado más eficiente. Además, influye en la formación o no de capas endurecidas sobre la superficie del grano, lo que puede afectar la uniformidad del secado y la calidad final del producto [22].

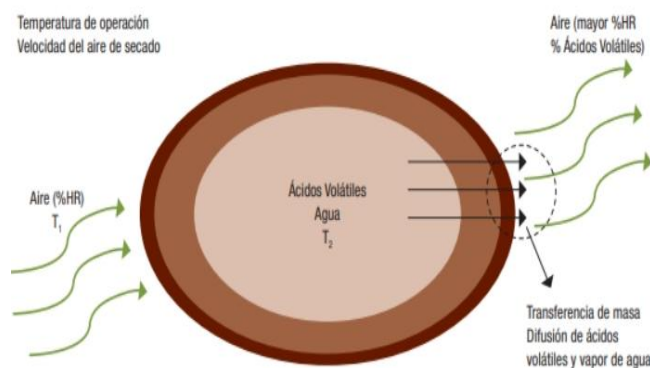


Figura 5. Corriente del aire a través del cacao [22]

Fermentación del cacao en Ecuador

En Ecuador, la fermentación del cacao es un proceso clave para el desarrollo de sus propiedades organolépticas. Se realiza típicamente en cajas de madera, sacos de yute, o contenedores plásticos, según la tradición regional y el tamaño de la finca [21].

Durante 3 a 7 días, los granos se remueven cada 24-48 h para asegurar una fermentación uniforme y evitar acumulaciones que puedan desarrollar mohos [22].

El arreglo tradicional en cajas de madera permite una mejor aireación y control térmico, facilitando que las temperaturas internas alcancen entre 45 y 50 °C lo cual es fundamental para eliminar la baba y activar las reacciones enzimáticas que contribuyen al aroma del cacao [22].

Asimismo, variantes como el método trapezoidal o “tipo escalera” han mostrado ser eficientes para maximizarla fermentación de granos de clones como CCN-51 [23].

Durante el proceso, se controla el pH de la testa y el cotiledón, buscando mantenerlo dentro del rango óptimo de 5.0 a 5.5, lo cual favorece la calidad organoléptica del grano final [21].

Gracias a estas prácticas, los productores ecuatorianos han logrado obtener granos con altos niveles de fermentación, generalmente superiores al 75%, cumpliendo así con los estándares exigidos en mercados de cacao fino [24].



Figura 6. Fermentación en contenedores de plástico

Los principales métodos de secado del cacao aplicando la luz solar como:

A. Método Rohan

EL secado de cacao se lo realiza al extender los granos sobre bandejas de manera elevadas A unos 50 cm del suelo para evitar la humedad. Estas estructuras deben estar libres de olores, sabores o pigmentos que puedan trasferir al cacao, y el proceso debe mantenerse por debajo de los 50°C [26].



Figura 7. Método de secado Rohan [26]

Método en tendales

El proceso consiste en colocar el cacao previamente fermentado en rejillas de secado o esteras de bambú expuestas al sol, y luego colocarlo de forma que pueda cubrirse o exponerse según las condiciones climáticas y el estado de los granos, esta técnica facilita el secado y lo protege temporalmente de las agresiones externas. Esta acción se realiza sobre soportes elevados, con el fin de garantizar una adecuada ventilación y evitar el contacto del grano con el suelo, la temperatura no debe exceder los 50 °C [26].



Figura 8. Método de secado en tendales.

B. Secado tipo Elva

Para volúmenes considerables de cacao fermentado, se recomienda el uso del sistema de cacao tipo Elva. Este método emplea camillas o bandejas de manera deslizables sobre rieles las cuales permiten un manejo eficiente del producto. El sistema se encuentra cubierto por una estructura fija o móvil que brinda protección frente a las condiciones climáticas.

La madera utilizada debe estar exenta de olores, sabores y colores que puedan ser absorbidos por los granos de cacao. Se debe controlar que la temperatura del proceso de secado no exceda los 50 °C, a fin de preservar el grano del producto [26].



Figura 9. Secado tipo Elva [26].

C. Secado en el piso de cemento

El método consiste en disponer los granos de cacao fermentado sobre superficies planas de cemento, ladrillo o madera, expuesta directamente al sol, ya sea con o sin cubiertas móviles. Es importante señalar que los patios destinados al secado del cacao no deben utilizarse para otros productos con olores intensos, a fin de evitar la contaminación sensorial del grano [27].



Figura 10. Secado en piso de cemento.

D. Marquesinas y túneles de secado

Se trata de estructuras de madera o metal recubiertas de materiales translucidos como el policarbonato, que permiten la penetración de la radiación solar. Las zonas de secado consisten en plataformas elevadas, generalmente cubiertas con esferas, marcos de bambú o, en algunos casos, malla plástica perforada con aberturas de $0.4 \cdot 0.4$ cm.

En este tipo de sistemas, el control de las condiciones micro climáticas, en particular la ventilación, la temperatura y la humedad relativa, es esencial para garantizar la eficiencia del secado. Estas variables pueden ajustarse parcialmente mediante cortinas laterales de control mensual, que modulan el intercambio de aire con el exterior [27].



Figura 11. Marquesina o túnel de secado [27].

Método secado artificial

El secado artificial es un método asistido que emplea máquinas para calentar el aire utilizando fuentes de energía distintas a la solar. Este tipo de secado se utiliza principalmente cuando las condiciones climáticas no permiten el secado natural, especialmente en épocas de lluvia. Su funcionamiento suele estar automatizado, lo que reduce la necesidad de mano de obra. Existen diversos modelos de secadoras artificiales que varían según la fuente energética disponible y la viabilidad económica del productor [30].

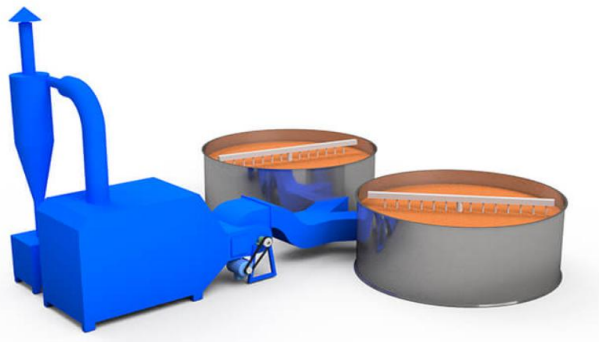


Figura 12. Máquina secadora de cacao [31].

Ventajas y desventajas asociadas a los métodos de secado del cacao

El secado de los granos de cacao mediante métodos tradicionales fue considerado óptimo; sin embargo, se identificó que los métodos de secado artificial representaban una alternativa indispensable en regiones con condiciones climáticas variables, especialmente durante épocas de lluvias prolongadas o cuando existían limitaciones de tiempo, lo que impedía completar el secado de toda la producción de forma oportuna.

Se analizaron las ventajas y desventajas asociadas a los métodos de secado del cacao. Algunos estudios desarrollaron prototipos de secadoras artificiales con sistemas de control de parámetros que resultaban difíciles de manejar en los métodos naturales. Esta innovación permitió reducir el tiempo del proceso de varios días a pocas horas [32].

Método Artificial	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción significativa del tiempo de secado (de días a horas). - Mayor control sobre temperatura y humedad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de secado no uniforme. - Interrupción de reacciones enzimáticas importantes. - Formación de almendras púrpuras con sabor astringente. - Endurecimiento prematuro de la testa que impide la difusión de compuestos volátiles.
Método Natural	<ul style="list-style-type: none"> - Mantiene condiciones más suaves que favorecen las reacciones bioquímicas. - Mejor desarrollo del aroma y sabor si se realiza correctamente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor tiempo de secado. - Alta dependencia de condiciones climáticas. - Difícil control de parámetros como la temperatura y humedad

3.2.2. Propiedades físicas para el secado del cacao CCN-51

El conocimiento detallado de las propiedades físicas del cacao, como la granulometría, el factor de forma y el índice de aplastamiento, es esencial para optimizar la postcosecha, especialmente el secado. Estas propiedades influyen directamente en la transformación de calor y masa, afectando la eficiencia energética del proceso.

Por, ejemplo la granulometría incide en la distribución térmica y en la velocidad de evaporación del agua contenida en el grano. un lecho de secado más denso reduce la circulación del aire caliente, retrasa la eliminación de humedad y puede generar condiciones de sobrefermentación o desarrollo de moho, así como endurecimiento o acidez excesiva del grano, comprometiendo su calidad final. Como señalan Mujaffar, Sankat y Ramlochan, aumento en la densidad de carga altera el comportamiento del secado, y la combinación de un secado lento en lechos densos puede llevar a estos defectos sensoriales [15].

Granulometría

La granulometría del cacao, entendida como el conjunto de características geométricas del grano (longitud, ancho, grosor), es una propiedad clave que influye directamente en la transferencia de calor y masa durante el sacado. En estudios realizados con la variedad CCN-51, se ha reportado que los granos presentan una longitud promedio de 2.55cm, ancho de 1.61 cm y un grosor de 1.37 cm con una esfericidad promedio de 0.58, lo que indica una morfología alargada [5]. Esta forma afecta la superficie de contacto con el aire caliente, influyendo en la uniformidad del secado. El índice de aplastamiento registrado para CCN-51 varía entre 1.47 y 1.71 g/grano, lo que permite evaluar la integridad estructural del grano frente a manipulaciones o presiones durante la poscosecha [5]. Además, el factor de forma, entendido como la relación

entre el diámetro equivalente y la longitud, es relevante para la simulación del secado. Estas propiedades son esenciales para diseñar estrategias de secado más eficientes, evitando gradientes térmicos internos que afectan la calidad sensorial del producto final.

Distribución de tamaños de partícula

La distribución de tamaños de partícula es un parámetro físico fundamental que describe la proporción de granos o partículas según su diámetro o clase de tamaño dentro de una muestra. En el caso del cacao, esta propiedad está directamente relacionada con el comportamiento del grano durante procesos de secado, fermentación, tostado y molienda, ya que determina la superficie específica de contacto, la difusión de humedad y transferencia térmica [28].

El análisis granulométrico puede realizarse mediante métodos tradicionales, como el tamizado con mallas estandarizadas, o técnicas más avanzadas basadas en imagen digital o difracción laser. En estudios postcosecha el tamizado es la técnica preferida, ya que clasifica el cacao en fracciones granulométricas específicas [29].

Los resultados se representan mediante la curva de distribución acumulada Q_3 (%) frente al tamaño de partícula (mm), usualmente mediante escala semilogarítmica. A partir de esta curva se obtienen parámetros clave como:

- **Symm3**: coeficiente de simetría, que indica sesgos hacia partículas más pequeñas o grandes

Factor de forma e índice de aplastamiento

El factor de forma (también referido como esfericidad o relación de dimensiones) menciona la proporción entre las medidas de longitud, ancho y grosor del grano. Estudios en variedades de cacao que incluyen el CCN-51, utilizando técnicas geométricas e instrumentales, han reportado valores de esfericidad promedio de 0,57-0,58 [30]. Esta homogeneidad geométrica favorece la exposición uniforme a calor y aire durante el secado, reduciendo la aparición de zonas con diferente grado de humedad o temperatura.

Por su parte, el índice de aplastamiento, estimado a partir del peso de grano, se utiliza como indicador de la resistencia mecánica del casi. El cacao CCN-51 procesado bajo normas INEN, se ha medido un índice de semilla entre 1,47 y 1,71 g por grano [31]. Un grano con mayor masa promedio tiende a presentar mayor integridad estructural durante el secado, lo que minimiza rupturas o fracturas y contribuye a mantener condiciones más uniformes en el lecho de secado

3.2.3. Propiedad térmica para el secado del cacao CCN-51

La importancia de las propiedades térmicas en el secado del cacao, en particular de la variedad CCN-51, radica en su capacidad de influir en la eficiencia energética y la calidad del producto final. Propiedades como la capacidad calorífica determinaron la forma en que el calor se transfirió al interior del grano, afectando directamente la velocidad de pérdida de humedad y la homogeneidad del proceso de secado. Además, del secado fue un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa. El calor fue necesario para evaporar humedad [32].

Capacidad calorífica

La capacidad calorífica específica representa una oportunidad térmica clave que determina la energía necesaria para aumentar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado Celsius. En el caso del cacao, esta característica es crucial para analizar su comportamiento térmico durante operaciones como el secado, ya que influyen directamente en el tiempo requerido y el diseño de los sistemas térmicos.

Esta propiedad se expresa en $J/(g\ ^\circ C)$ y su valor está determinado por factores como el contenido de humedad, la composición química del grano y la temperatura del proceso. El cacao con mayor capacidad calorífica requeriría mayor cantidad de energía para alcanzar la temperatura deseada, lo que afecta la eficiencia del proceso. Determinadas variables como el tiempo, temperatura y humedad establecieron la efectividad del secado de cacao [38]. Investigaciones realizadas con muestras de cacao CCN-51 han reportado valores promedio de capacidad calorífica entre 1.80 y 2.30 $J/(g\ ^\circ C)$, dependiendo principalmente de la temperatura y el nivel de humedad presente en los granos [39]. Esta información es esencial para optimizar los procesos térmicos, reducir el consumo de energía y prevenir daños por sobrecalentamiento.

HIPÓTESIS

Si se caracterizan de las propiedades físicas y térmica del cacao CCN-51 cultivado en la Mana, entonces la modelación y diseño del proceso de secado térmico será más eficiente energéticamente, reduciendo el tiempo de secado y el consumo de energía.

El análisis de parámetros físicos del cacao CCN-51, como el tamaño de partícula, forma y capacidad térmica, ayuda a mejorar la eficiencia del secado, reducir costos de energía y promover los costos de energía y promover la preservación de la calidad del producto final.

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Para lograr los objetivos de esta investigación, se organizaron diversas actividades experimentales en fases específicas. Cada fase sigue un conjunto de procedimientos estandarizados que permiten la recopilación, el procesamiento y el análisis de datos de forma

técnica fiable. Las principales variables del proceso del secado del cacao CCN-51 son las siguientes:



Figura 13. Variables de las propiedades para el secado del cacao CCN-51.

VARIABLES INDEPENDIENTES

Tabla 3. Variables independientes de las propiedades para el secado del cacao CCN-51.

Variables	Definición Conceptual	Unidades de medida
Temperatura del cacao CCN-51	Temperatura a la cual se mide la capacidad calorífica.	°C
Diámetro de partícula	Medida del tamaño promedio de las partículas del grano de cacao tras el tamizado o análisis granulométrico.	mm

VARIABLES DEPENDIENTES

Tabla 4. Variables dependientes de las propiedades para el secado del cacao CCN-51.

Variable	Definición Conceptual	Unidades de medida
Capacidad calorífica del cacao CCN-51	Cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de una unidad de masa del grano de cacao.	$\frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$
Esfericidad de las partículas	Relación geométrica entre el diámetro de una esfera de igual volumen y el diámetro de la partícula medida.	adimensional (valor entre 0 y 1)

4.1. PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CACAO CCN-51

Debido a la importancia que tiene el diámetro de las partículas en el secado del cacao CCN-51, se hace el análisis granulométrico con muestras tomadas desde las zonas de cultivo de esta variedad ubicadas en el Cantón La Maná.

El analizador Camsizer IP50 es el equipo de la Figura (14), utilizado para realizar el análisis de tamaño y forma de las partículas en Seco y en Baba del cacao CCN-51. Este instrumento está diseñado para medir de forma rápida y precisa las dimensiones y la geometría de los productos sólidos, proporcionando datos como el rango de tamaños, la forma de cada partícula, el diámetro promedio, el porcentaje de cada partícula en cada fracción y el índice de aplastamiento [42].

El equipo funciona mediante el método de análisis de imagen dinámicas en la que la partícula cae por gravedad a través de un campo de visión capturado por cámaras de alta resolución, generando datos como el tamaño equivalente esférico, la longitud, el ancho y la proporción de aspecto de cada partícula. Estos datos permiten construir una distribución granulométrica que facilita identificar la uniformidad y calidad del producto después del proceso de secado [42].

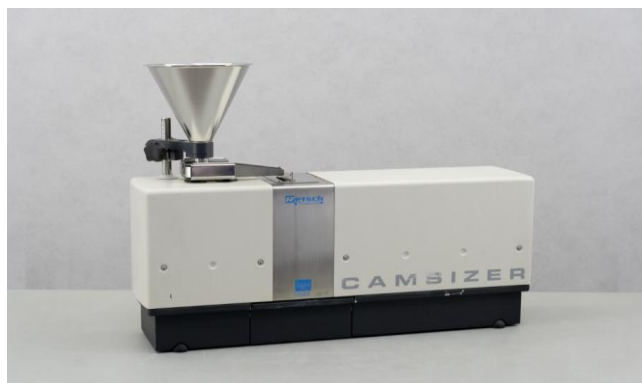


Figura 14. Equipo Camsizer IP50 [38].

Para la determinación el contenido de humedad de la partícula en Seco del cacao CCN-51 se utilizó el medidor Amtast AMT155 (figura 15), instrumento especializado en la medición rápida y precisa de humedad en productos sólidos. El procedimiento se lo realizó con 8 tomas de datos ocupando todo el espacio con el objetivo de observar posibles variaciones en la humedad del grano.

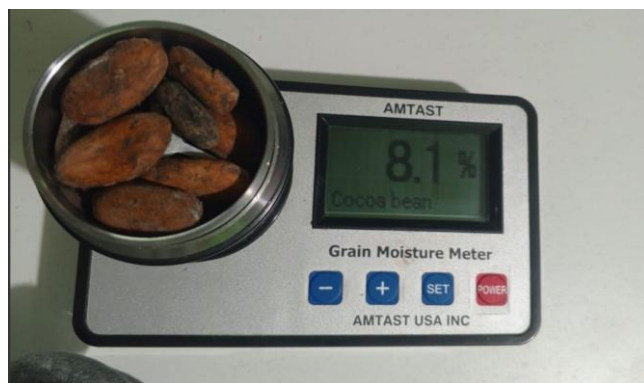


Figura 15. Medición de humedad.

El dispositivo proyecta una imagen de cada grano como se observa en la figura (16 y 17), midiendo su longitud, ancho y espesor con alta precisión. Los datos se agruparon por clase de tamaño (mm) y se procesaron para calcular:

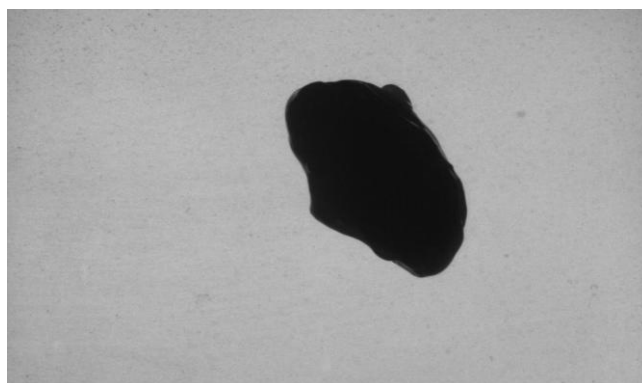


Figura 16. Imagen de partícula del cacao CCN-51 (en baba), obtenido mediante el análisis granulométrico

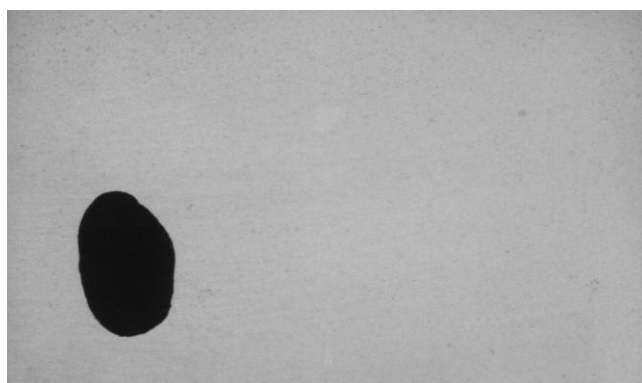


Figura 17. Imagen de partícula del cacao CCN-51 (seco), obtenido mediante el análisis granulométrico

4.1.1. Análisis morfológico

Con la misma plataforma de análisis de imagen de la figura (15 y 16), se obtuvieron parámetros geométricos relacionados con la forma de grano tanto en baba y en seco:

p_3 (%): porcentaje diferencial por clase.

Q_3 (%): porcentaje acumulado.

Q_3 normalizado (%).

Esfericidad (SPHT 3): indicador de cuan cercano es el grano a una esfera ideal.

Simetría (Symm 3): relación entre los ejes principales que determina la regularidad de forma.

Índice de aplastamiento (PDO): proporción de granos con deformación morfológica respecto al eje de simetría se observa en la Tabla (5).

Tabla 5. Parámetros de la granulometría.

Parámetro	Interpretación
SPHT 3 (Esfericidad)	Si se acerca a 1: partículas redondas. Valores bajos: alargadas o irregulares.
Symm 3 (Simetría)	Si se acerca a 1: partículas con forma simétrica. Valores bajos: forma irregular.
b/I3 (relación ancha/largo)	Muestra si las partículas son más esféricas o elongadas.
Sv (índice de aplastamiento)	está relacionado con la superficie específica, lo cual, indica el índice de aplastamiento del grano.

Con la misma plataforma de análisis de imagen Figura (16 y 17), se obtuvieron parámetros geométricos relacionados con la forma de grano tanto en baba y en seco:

- **p_3 (%)**: porcentaje diferencial por clase.
- **Q_3 (%)**: porcentaje acumulado.
- **Q_3 normalizado (%)**.
- **Esfericidad (SPHT 3)**: indicador de cuan cercano es el grano a una esfera ideal.
- **Simetría (Symm 3)**: relación entre los ejes principales que determina la regularidad de forma.
- **Índice de aplastamiento (Sv)**: esta relacionado con la superficie específica, lo cual, indica el índice de aplastamiento del grano.

En la tabla (8) se muestra una interpretación de los diferentes parámetros para esfericidad, simetría, relación ancha/largo y diámetro proyectado, además los datos obtenidos de los experimentos obtenidos de granulometría del grano seco se encuentran en el anexo A Figura (1 y 2) del grano en baba.

4.2. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR CAPACIDAD CALORÍFICA DEL CACAO CCN-51

Las mediciones de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 se realizó con el calorímetro diferencial de barrido (DSC) NETZSCH DSC 3500 sirius, modelo Dsc 3500A- 1033-L Figura (18). El método consistió en analizar muestras microscópicas trituradas de cacao CCN-51 insertadas en un crisol de aluminio con una tapa perforada, comparándolas con un crisol vacío.



Figura 18. Equipo DSC 3500 Sirius [44].

4.2.1. Fórmulas para la capacidad calorífica del cacao CCN-51

En el procedimiento es preciso determinar la cantidad de energía térmica necesaria en la reducción del contenido de humedad en función del tiempo. Para ello se calcula el flujo de calor en el proceso, por la siguiente ecuación.

$$Q = mc \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Donde:

mc: es la masa de cacao, mg.

C_p: capacidad calorífica, $\frac{mW}{mg \cdot \frac{^{\circ}C}{min}}$

La velocidad de calentamiento se determina por la siguiente ecuación

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

El procedimiento utilizado para determinar la capacidad calorífica es el siguiente:

$$C_p = \frac{60 \cdot (\Phi_m - \Phi_0)}{m \cdot \beta} \quad (3)$$

Donde:

Φ_m : flujo de calor medido, mW.

Φ_0 : flujo de calor de la línea cero, mW.

El flujo de calor medido y el flujo de calor de la línea cero se determinan de forma experimental mediante las gráficas de termografía del cacao que tienen cuenta el comportamiento del flujo de calor específico del material en función del tiempo y la masa de la muestra utilizada ver anexo C. Figura (1).

$$\Phi_m: mc \cdot DSCm \quad (4)$$

Donde:

DSCm: flujo de calor específico medido, $\frac{mW}{mg}$.

El flujo de calor de referencia en la línea cero (Φ_0) se determina utilizando el siguiente procedimiento:

$$\Phi_0: ma \cdot DSC^0 \quad (5)$$

Donde:

ma: es la masa del aire en el crisol de referencia, mg

DSC₀: flujo de calor específico de referencia, $\frac{mW}{mg}$

Para calcular la masa del aire en el crisol de referencia es necesario determinar el volumen del crisol mediante el diámetro y la altura del crisol como se observa en la siguiente tabla y en la ecuación numeración:

Tabla 6. Dimensiones del crisol de referencia [45].

Parámetros	Dimensiones
Diámetro del crisol	6.0 mm +- 0,01mm
Altura del crisol	0.5- 1.0 mm

$$V_c = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad (6)$$

Donde:

d: diámetro interno del crisol, mm

h: altura del crisol, mm

Con el valor del volumen del crisol se determina la masa de aire.

$$m_a = \rho_a \cdot V_c \quad (7)$$

Donde:

ρ_a : densidad del aire, $\frac{kg}{m^3}$

La densidad del aire se determina a partir de las condiciones ambientales en que se desarrollaron los experimentos (Presión, Pa = 101325 Pa y Temperatura ambiente, Ta = 18.6 °C).

$$\rho_a = \frac{Pa}{Ra \cdot Ta} \quad (8)$$

Donde:

Ra: constante particular del aire = 287 J/ kg*k, este valor se escoge la tabla de anexo B figura (1). Se promedió un rango de temperatura de 40 °C a 70 °C. en todos los experimentos realizados utilizamos este intervalo, con el fin de evaluar el comportamiento térmico del cacao CCN-51 durante el secado. Según Castillo Orozco en su estudio "Drying Kinetics and CFD Multidomain Model of Cocoa Bean Variety CCN51" [6], dicho rango es óptimo para el secado, ha sido validado tanto numérico como experimental [6].

4.2.2. Determinación de la ecuación de la capacidad calorífica (Cp) para el cacao CC-51

En procesos térmicos, la capacidad varía con la temperatura, se modela mediante ecuaciones polinómicas. Estas expresiones permiten describir con precisión el comportamiento de la partícula de cacao a distintas temperaturas.

Esta ecuación adopta una forma polinómica en función de la temperatura T, cuyo grado n puede variar entre los valores como 1,2,3,4.....Como por ejemplo:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots \quad (8)$$

Donde:

$$y = Cp$$

$$bx = T$$

$$cx^2 = T^4$$

$$dx^3 = T^4$$

$$ex^4 = T^4$$

$$R^2 = \text{coeficiente de correlacion}$$

Para el análisis de los datos se utilizó el Excel, mediante el ajuste de regresión polinomial no lineal obteniendo el modelo matemático con valores hasta nivel 4 y con un coeficiente de correlación R^2 próximo a 1.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CACAO CCN-51

5.1.1. Análisis granulométrico del cacao seco

A continuación, se presenta los resultados del análisis granulométrico realizado al cacao CCN-51 el estado de las pepas en seco y baba llevado a cabo en el laboratorio de termodinámica de la Universidad Central del Ecuador, con el propósito de establecer un perfil morfológico que permita interpretar la distribución física como se muestran en las figuras (20) y las tablas (7 y 8) respectivamente grano seco y baba.

Tabla 7. Análisis granulométrico del cacao seco.

Parámetro	Valor	Interpretación técnica
Esfericidad (SPHT ₃)	0.756	Mayormente redondos, pero con deformaciones
Simetría (Symm ₃)	0.885	Promedio alto, pero baja proporción con simetría ideal
Relación ancho/largo (b/l ₃)	0.579	Granos alargados o colapsados tras secado
Índice de aplastamiento (Sv)	0.354 mm ⁻¹	Estructura algo comprimida, mayor superficie específica

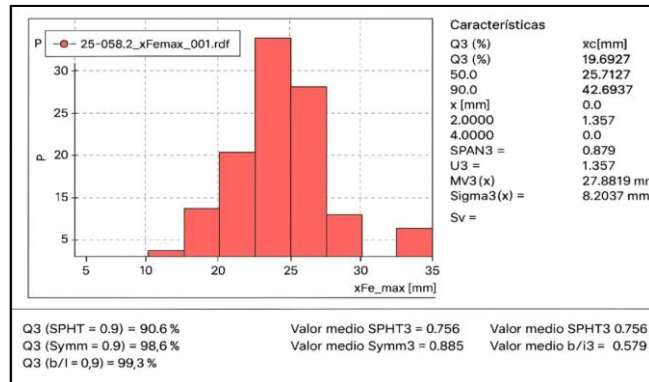


Figura 19. Grafica de la granulometría del cacao seco.

- Esfericidad (SPHT ≥ 0.9): 90.6%
- Valor medio: 0.756

El 90.6% de las partículas tiene esfericidad ≥ 0.9 , lo que indica que la mayoría de los granos mantienen una forma bastante redonda. Sin embargo, el valor promedio de 0.756 sugiere que hay también partículas ligeramente irregulares o alargadas. Esto es típico luego del secado, cuando algunos granos sufren deformaciones por pérdida de humedad.

Simetria (Symm₃ ≥ 0.9): 28.6%

- Valor medio: 0.885

Solo el 28.6% de los granos representan alta simétrica, aunque el promedio es relativamente alto (0.885). Esto indica que la forma se ha visto afectada parcialmente, probablemente por contracción desigual durante el secado o por aplastamiento en el proceso de manipulación.

- Relacion ancho/largo (b/l₃ ≥ 0.9): 99.3%
- Valor medio: 0.579

Aunque que casi todos los granos superan el umbral de 0.9 según el sistema de análisis, el valor medio real es bajo: 0.579, lo que indica que los granos están visiblemente alargados, probablemente por el colapso estructural o deformación al perder agua. Este alargamiento afecta su forma aerodinámica.

- Índice de aplastamiento (Sv):
- Sv : 0.354 mm⁻¹

Un índice de aplastamiento medio-alto como este sugiere que las partículas han perdido parte de su volumen original y presentan una mayor superficie específica.

Esto es típico en muestras secas, donde los granos tienden a aplanarse, aumentando el contacto con el aire y facilitando la deshidratación.

5.1.2. Análisis granulométrico del cacao seco

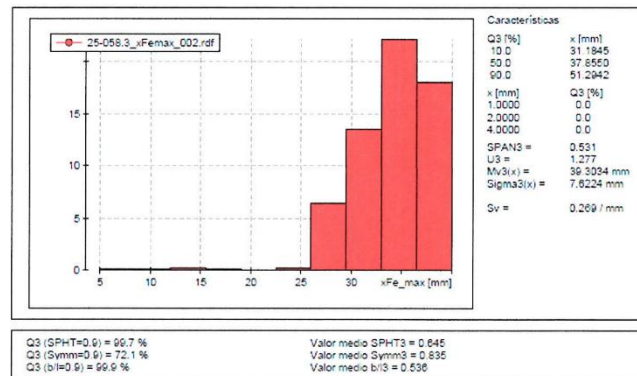


Tabla 8. Análisis granulométrico del cacao en baba.

Parámetro	Valor	Interpretación
Esfericidad (SPHT 3)	0.845	Buena forma redonda
Simetría (Symm₃)	0.835	Geometría regular y balanceada
Relación ancho/largo (b/l₃)	0.538	Grano alargado, forma elíptica
Índice de aplastamiento (Sv)	0.269 mm ⁻¹	Grano estructuralmente entero, no deformado

- Esfericidad (SPHT ≥ 0.9): 99.7%
- Valor medio: 0.845

El valor medio de 0.845 indica que los granos de cacao en baba presentan una forma mayormente redondeada, lo cual favorece la uniformidad en la transferencia de calor durante el secado. Un 99.7% de partículas con SPHT ≥ 0.9 evidencia una alta regularidad en la morfología esférica.

- Simetría (Symm₃ ≥ 0.9): 72.1%
- Valor medio: 0.835

Más del 70% de las partículas presentan buena simetría híbrida, y un valor medio de 0.835 lo confirma. Esto sugiere que los granos no están deformados ni elongados de manera irregular, lo cual es favorable por su manipulación mecánica y su comportamiento térmico.

- Relación ancho/largo (b/l₃ ≥ 0.9): 99.9%
- Valor medio: 0.538

Aquí hay un contraste importante. Aunque el 99.9% cumple con una relación ≥ 0.9 según criterios del software, el valor medio de 0.538 sugiere que, en realidad, los granos son alargados

(relación b/l mucho menos a 1). Puede haber una incongruencia por escalas o resolución de análisis, pero en promedio, los granos tienen una forma más elíptica o cilíndrica, más que redonda.

- Índice de aplastamiento (S_v)
- $S_v : 0.269\text{mm}^{-1}$

El índice de aplastamiento (S_v) está relacionado con la superficie específica. Un valor de 0.269mm^{-1} es moderadamente bajo, lo cual indica que los granos aún conservan su volumen y estructura (no están muy aplanados). Esto es consistente con el estado en baba, donde los granos no han sido sometidos a presión o secado que los deforme.

5.2. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DEL CACAO CCN-51

- Para el cálculo de la Capacidad calorífica (c_p) se aplicó la ecuación (3), Utilizando datos experimentales mediante el análisis DSC del cacao CCN-51.
- La masa de aire se calculó mediante la ecuación (7), utilizando la densidad del aire obtenida con la ecuación (8) y el volumen del crisol (V_c) determinado a la temperatura ambiente ($T_a=18.6\text{ }^\circ\text{C}$)
- Para el cálculo del flujo térmico de Φ_m se utilizó la ecuación (4).
- Para el cálculo del flujo térmico de Φ_0 se utilizó la ecuación (5) y el valor DSC_0 tomando de la gráfica del anexo B desde la Figura (B.1), hasta la Figura(B.10).
- La velocidad de calentamiento (β) se determinó con la ecuación (2).

Este procedimiento se aplicó para cada uno de los Experimentos.

5.2.1. Cálculo de los experimentos De La Capacidad Calorífica Del Cacao CCN-51

Calculo del experimento 1

Datos:

Tabla 9. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (m_c)	9	mg
Masa (m_a)	0.034	mg
DSC_0	-0.23	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 10. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.484°C y 69.984°C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.3891 J/g·K hasta 2.1345 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura.

Tabla 10. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 9 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	CpJ/g·°C
40.484	5.1708	0.1821	0.23	7.8294	1.6392	0.0078	1.3891
42.484	5.6643	0.1823	0.23	7.5003	1.641	0.0078	1.4516
44.484	6.1592	0.1829	0.23	7.2224	1.6464	0.0078	1.5124
46.484	6.6552	0.1835	0.23	6.9847	1.6512	0.0078	1.5686
48.484	7.1519	0.1846	0.23	6.7791	1.661	0.0078	1.6257
50.484	7.6493	0.1854	0.23	6.5998	1.669	0.0078	1.678
52.484	8.147	0.1867	0.23	6.4421	1.6802	0.0078	1.7307
54.484	8.6451	0.1879	0.23	6.3023	1.6912	0.0078	1.7807
56.484	9.1437	0.1892	0.23	6.1774	1.7027	0.0078	1.8291
58.484	9.6425	0.1904	0.23	6.0653	1.7132	0.0078	1.8744
60.484	10.1414	0.192	0.23	5.9641	1.7283	0.0078	1.9231
62.484	10.6403	0.194	0.23	5.8724	1.746	0.0078	1.9733
64.484	11.1395	0.196	0.23	5.7888	1.7637	0.0078	2.0222
66.484	11.6386	0.1986	0.23	5.7124	1.7876	0.0078	2.0771
69.984	12.5122	0.1998	0.23	5.5933	1.7986	0.0078	2.1345

Cálculo del experimento 2

Datos:

Tabla 11. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (mc)	9.4	mg
Masa (ma)	0.034	mg
DSC _o	-0.06	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 12. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.325 °C y 70.3250 °C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.1246 J/g·K hasta 1.7848 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura.

Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 9.4 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	Cp J/g·°C
40.325	5.1265	0.1472	-0.06	7.8659	1.3839	-0.002	1.1246
42.325	5.6214	0.1475	-0.06	7.5293	1.3865	-0.002	1.1771
44.325	6.1174	0.148	-0.06	7.2457	1.3907	-0.002	1.2269
46.325	6.614	0.1486	-0.06	7.0041	1.3969	-0.002	1.2749
48.325	7.1112	0.1493	-0.06	6.7957	1.403	-0.002	1.3198
50.325	7.6089	0.1499	-0.06	6.614	1.4091	-0.002	1.3618
52.325	8.1072	0.151	-0.06	6.4542	1.4198	-0.002	1.4061
54.325	8.6055	0.1521	-0.06	6.3128	1.4296	-0.002	1.4475
56.325	9.1043	0.1532	-0.06	6.1867	1.4401	-0.002	1.4879
58.325	9.6031	0.1545	-0.06	6.0735	1.4526	-0.002	1.5287
60.325	10.1019	0.156	-0.06	5.9716	1.4667	-0.002	1.5699
62.325	10.601	0.1577	-0.06	5.8791	1.4819	-0.002	1.6111
64.325	11.1003	0.1594	-0.06	5.7949	1.498	-0.002	1.6523
66.325	11.5996	0.1616	-0.06	5.7179	1.5186	-0.002	1.6975
69.825	12.4732	0.1658	-0.06	5.598	1.5587	-0.002	1.7796
70.3250	12.5981	0.1658	-0.0600	5.5822	1.5588	-0.0021	1.7848

Cálculo del experimento 3

Datos:

Tabla 12. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (mc)	11.1	<i>mg</i>
Masa (ma)	0.034	<i>mg</i>
DSC _o	0.19	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 14. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.048 °C y 70.048°C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.6257 J/g·K hasta 2.3875 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura.

Tabla 13. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 11.1 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	CpJ/g·°C
40.048	5.054	0.2153	0.19	7.9239	2.3896	0.0065	1.6257
42.048	5.548	0.2149	0.19	7.579	2.3858	0.0065	1.697
44.048	6.0433	0.2147	0.19	7.2887	2.3835	0.0065	1.7628
46.048	6.5395	0.2147	0.19	7.0415	2.3831	0.0065	1.8244
48.048	7.0365	0.2148	0.19	6.8284	2.3844	0.0065	1.8824
50.048	7.534	0.2149	0.19	6.643	2.3857	0.0065	1.936
52.048	8.0319	0.2152	0.19	6.4802	2.3892	0.0065	1.9875
54.048	8.5303	0.2156	0.19	6.336	2.3934	0.0065	2.0363
56.048	9.0289	0.216	0.19	6.2076	2.3979	0.0065	2.0824
58.048	9.5278	0.2166	0.19	6.0925	2.4046	0.0065	2.1277
60.048	10.0265	0.2175	0.19	5.9889	2.4139	0.0065	2.1729
62.048	10.5254	0.2187	0.19	5.8951	2.4278	0.0065	2.2202
64.048	11.0246	0.2205	0.19	5.8095	2.4472	0.0065	2.271
66.048	11.524	0.2227	0.19	5.7313	2.472	0.0065	2.3253
70.048	12.5226	0.2232	0.19	5.5937	2.4772	0.0065	2.3875

Cálculo del experimento 4

Datos:

Tabla 14. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (mc)	12.7	mg
Masa (ma)	0.034	mg
DSC _o	0.02	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 16. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.048 °C y 70.048°C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.4809 J/g·K hasta 2.2509 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura.

Tabla 15. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 12.7 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	CpJ/g·°C
40.048	5.0549	0.1956	0.02	7.9225	2.4841	0.0007	1.4809
42.048	5.5498	0.1961	0.02	7.5764	2.4905	0.0007	1.5526
44.048	6.0458	0.1967	0.02	7.2858	2.4978	0.0007	1.6193
46.048	6.5426	0.1976	0.02	7.0382	2.5094	0.0007	1.684
48.048	7.0402	0.1983	0.02	6.8249	2.5184	0.0007	1.7429
50.048	7.5381	0.1992	0.02	6.6394	2.5293	0.0007	1.7993
52.048	8.0364	0.1998	0.02	6.4765	2.5378	0.0007	1.8508
54.048	8.5349	0.2005	0.02	6.3326	2.546	0.0007	1.8989
56.048	9.0335	0.201	0.02	6.2045	2.5528	0.0007	1.9433
58.048	9.5323	0.2017	0.02	6.0896	2.5616	0.0007	1.9868
60.048	10.0314	0.2023	0.02	5.986	2.5687	0.0007	2.0268
62.048	10.5305	0.2031	0.02	5.8922	2.5794	0.0007	2.0676
64.048	11.0298	0.2041	0.02	5.8068	2.5922	0.0007	2.1085
66.048	11.5292	0.206	0.02	5.7288	2.6156	0.0007	2.1564
70.048	12.5276	0.2098	0.02	5.5915	2.6647	0.0007	2.2509

Cálculo del experimento 5

Datos:

Tabla 16. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (mc)	13.2	mg
Masa (ma)	0.034	mg
DSC _o	0.2547	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 18. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.745 °C y 70.245 °C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.6205 J/g·K hasta 2.6081 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura.

Tabla 17. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 13.9 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	CpJ/g·°C
40.745	5.2693	0.2095	0.2547	7.7325	2.7444	0.0087	1.6205
42.745	5.7558	0.2082	0.2547	7.4265	2.7281	0.0087	1.6771
44.745	6.245	0.2076	0.2547	7.1649	2.7201	0.0087	1.7333
46.745	6.7365	0.2074	0.2547	6.9391	2.7167	0.0087	1.7874
48.745	7.2298	0.2072	0.2547	6.7422	2.7139	0.0087	1.8377
50.745	7.7244	0.2074	0.2547	6.5694	2.7173	0.0087	1.8885
52.745	8.2201	0.2076	0.2547	6.4166	2.7193	0.0087	1.9348
54.745	8.7167	0.2078	0.2547	6.2805	2.7228	0.0087	1.9793
56.745	9.2138	0.2085	0.2547	6.1587	2.7308	0.0087	2.0244
58.745	9.7114	0.2087	0.2547	6.0491	2.7341	0.0087	2.0636
60.745	10.2097	0.2091	0.2547	5.9498	2.7393	0.0087	2.1021
62.745	10.7081	0.2102	0.2547	5.8596	2.7531	0.0087	2.1452
64.745	11.2069	0.2132	0.2547	5.7772	2.7924	0.0087	2.2069
66.745	11.7057	0.2208	0.2547	5.7019	2.8931	0.0087	2.317
69.745	12.4542	0.2397	0.2547	5.6001	3.1402	0.0087	2.5612
70.245	12.5791	0.2434	0.2547	5.5843	3.2129	0.0087	2.6081

Cálculo del experimento 6

Datos:

Tabla 18. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (mc)	13.9	<i>mg</i>
Masa (ma)	0.0342	<i>mg</i>
DSC _o	0.1645	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 20. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.035 °C y 70.035 °C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.1489 J/g·K hasta 1.8368 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura. Para visualizar los rangos de temperatura completos ver el anexo ()

Tabla 19. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 13.9 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	Cp J/g·°C
40.035	5.0517	0.1522	0.1645	7.925	2.115	0.0056	1.1489
42.035	5.547	0.1528	0.1645	7.578	2.1234	0.0056	1.2063
44.035	6.0431	0.1536	0.1645	7.2868	2.1343	0.0056	1.261
46.035	6.54	0.1545	0.1645	7.039	2.1474	0.0056	1.3134
48.035	7.0376	0.1556	0.1645	6.8254	2.1634	0.0056	1.3646
50.035	7.5356	0.1569	0.1645	6.6398	2.1804	0.0056	1.4138
52.035	8.0339	0.1581	0.1645	6.477	2.1981	0.0056	1.4612
54.035	8.5324	0.1593	0.1645	6.3329	2.2148	0.0056	1.5058
56.035	9.0312	0.1607	0.1645	6.2046	2.2333	0.0056	1.5498
58.035	9.5302	0.1624	0.1645	6.0896	2.2567	0.0056	1.5956
60.035	10.0292	0.1645	0.1645	5.986	2.2867	0.0056	1.6449
62.035	10.5282	0.1673	0.1645	5.8923	2.3251	0.0056	1.6992
64.035	11.0273	0.17	0.1645	5.807	2.3637	0.0056	1.7529
66.035	11.5266	0.1716	0.1645	5.7289	2.3848	0.0056	1.7927
70.035	12.5254	0.1716	0.1645	5.5914	2.385	0.0056	1.8368

Cálculo de experimento 7

Datos:

Tabla 20. Datos de Ensayo

Datos	Valor	Unidades
Masa (mc)	14.6	mg
Masa (ma)	0.0342	mg
DSC _o	0.29	$\frac{mW}{mg}$

La Tabla 22. Muestra los valores obtenidos del análisis termodinámico y cálculos que se interpretó. Seleccionando un rango de temperatura de 40.122°C y 70.122°C, evidenciando un mayor incremento de la capacidad calorífica Cp desde 1.4665 J/g·K hasta 2.2456 J/g·K lo que evidencia una mayor absorción de energía térmica mediante conforme aumenta la temperatura.

Tabla 21. Resultados de la capacidad calorífica del cacao CCN-51 para una masa de 14.6 mg.

Temp. /°C	Time /min	DSC (mW/mg)	DSC0 (mW/mg)	β °C/min	DSC _m	DSC _o	CpJ/g·°C
40.122	5.0646	0.1943	0.29	7.9221	2.8368	0.0099	1.4665
42.122	5.5602	0.1948	0.29	7.5757	2.8436	0.0099	1.5372
44.122	6.0567	0.1957	0.29	7.2848	2.8568	0.0099	1.606
46.122	6.5539	0.1964	0.29	7.0374	2.868	0.0099	1.6691
48.122	7.0511	0.1975	0.29	6.8247	2.8829	0.0099	1.73
50.122	7.5488	0.1985	0.29	6.6397	2.8984	0.0099	1.7878
52.122	8.0472	0.1993	0.29	6.477	2.9104	0.0099	1.8403
54.122	8.5458	0.2005	0.29	6.3332	2.9279	0.0099	1.8935
56.122	9.0443	0.2015	0.29	6.2052	2.9416	0.0099	1.9416
58.122	9.5433	0.2024	0.29	6.0903	2.9547	0.0099	1.9871
60.122	10.0424	0.2034	0.29	5.9868	2.9692	0.0099	2.0314
62.122	10.5415	0.2043	0.29	5.8931	2.9822	0.0099	2.0728
64.122	11.0406	0.2055	0.29	5.8078	3.0009	0.0099	2.1164
66.122	11.5398	0.2076	0.29	5.7299	3.0305	0.0099	2.1664
70.122	12.5386	0.21	0.29	5.5925	3.0659	0.0099	2.2456

5.2.2. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura a diferentes masas

Con el fin de interpretar y evaluar el comportamiento se desarrollaron diferentes representaciones gráficas que se puede evidenciar en las Figura (21) a la Figura (21).

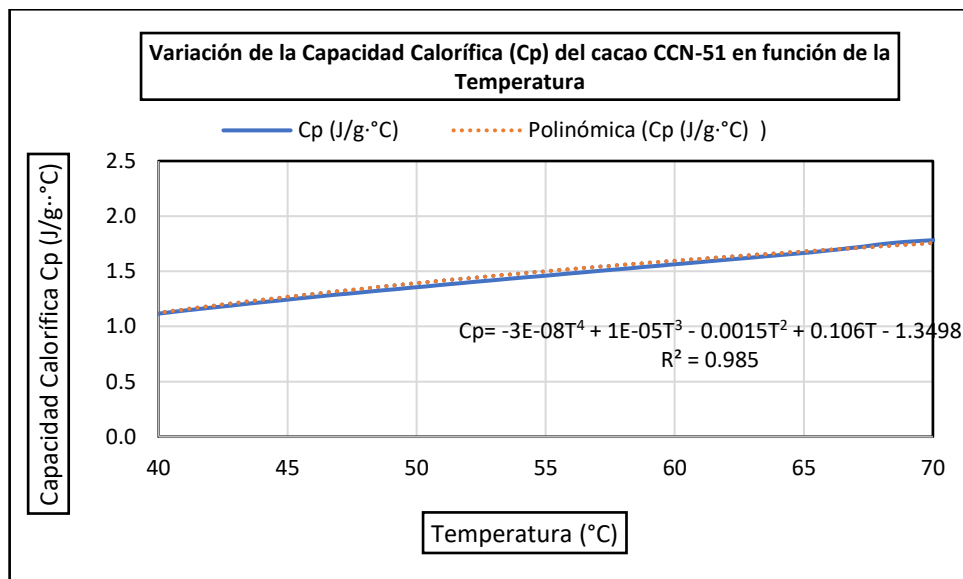


Figura 20. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 9mg.

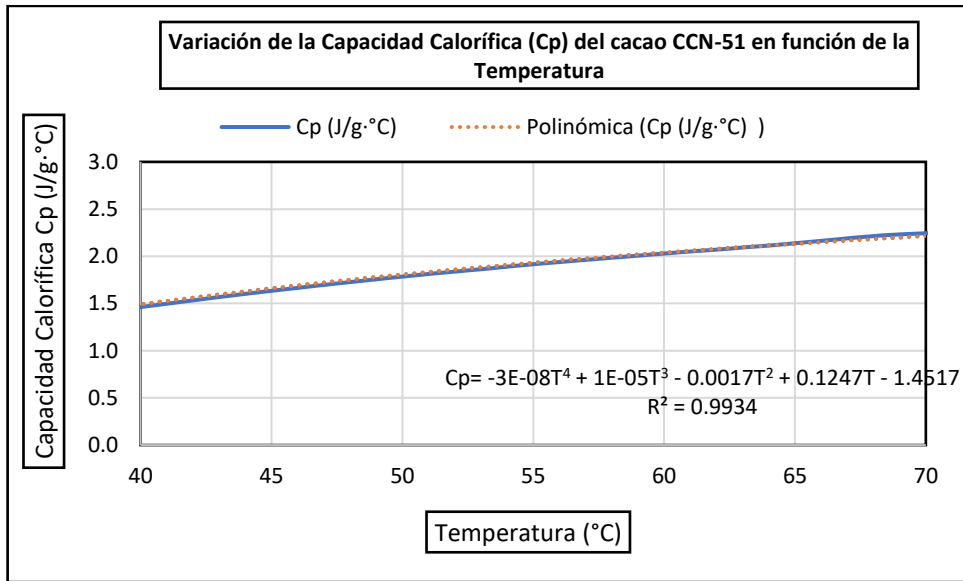


Figura 21. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 9.4 mg

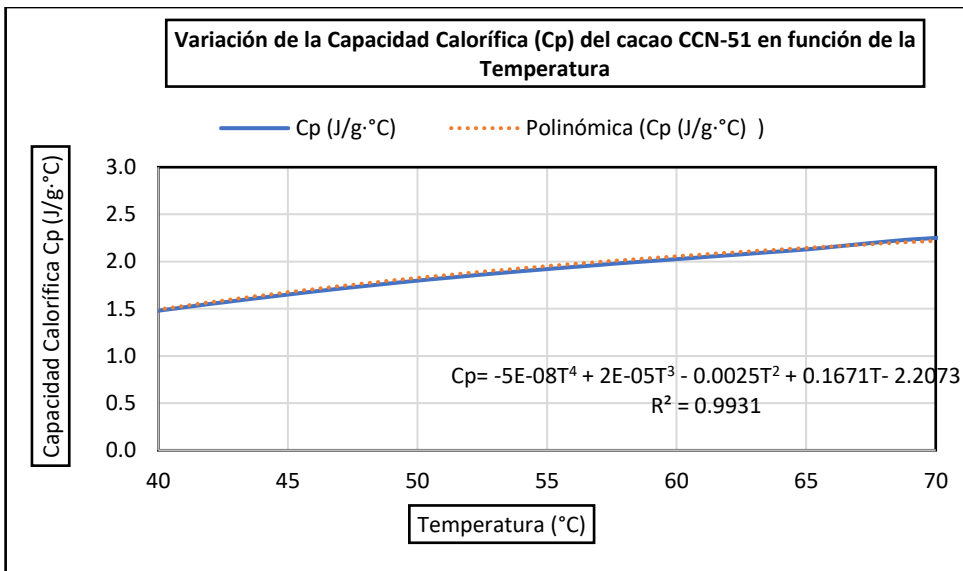


Figura 22. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 11.9mg

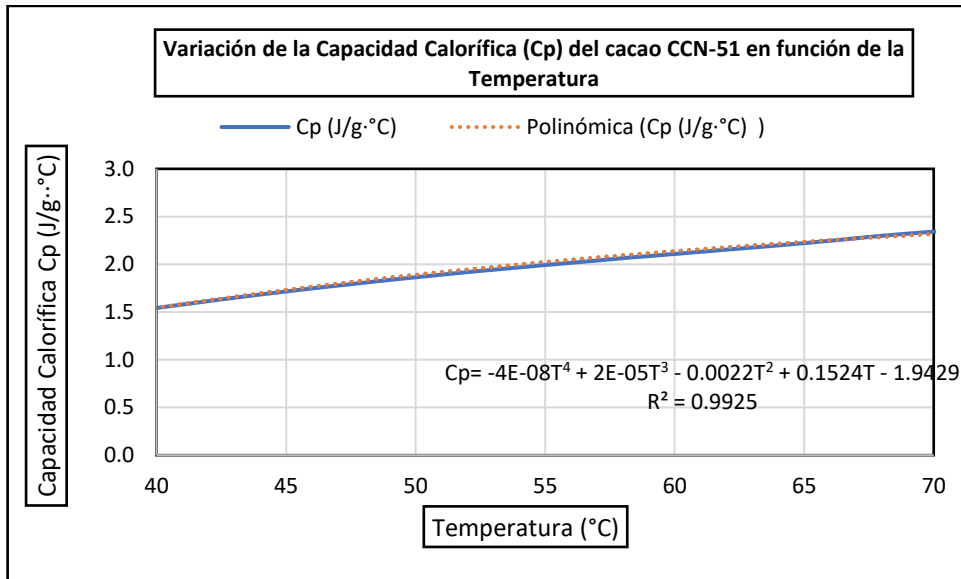


Figura 23. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 12.7mg.

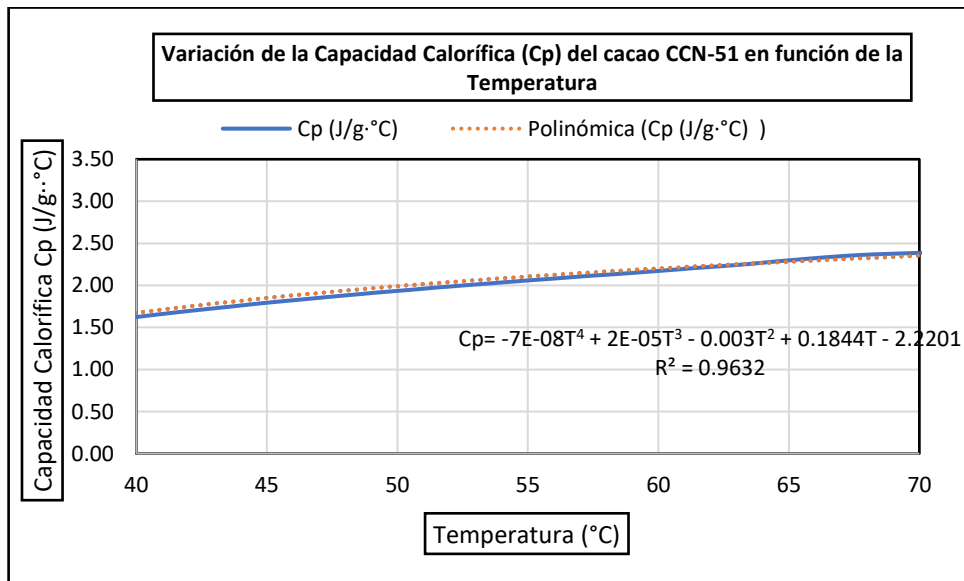


Figura 24. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 13.2mg.

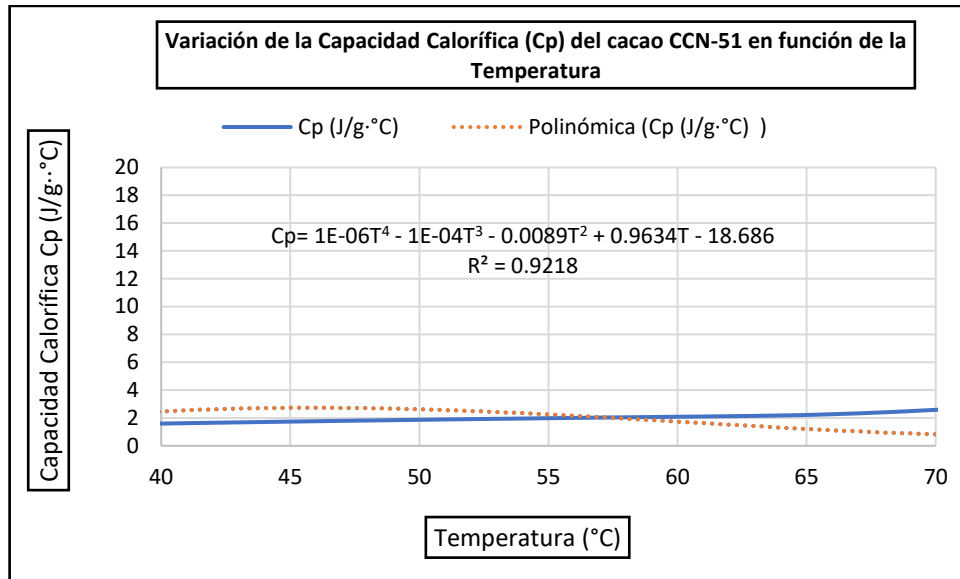


Figura 25. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masa de 13.9mg

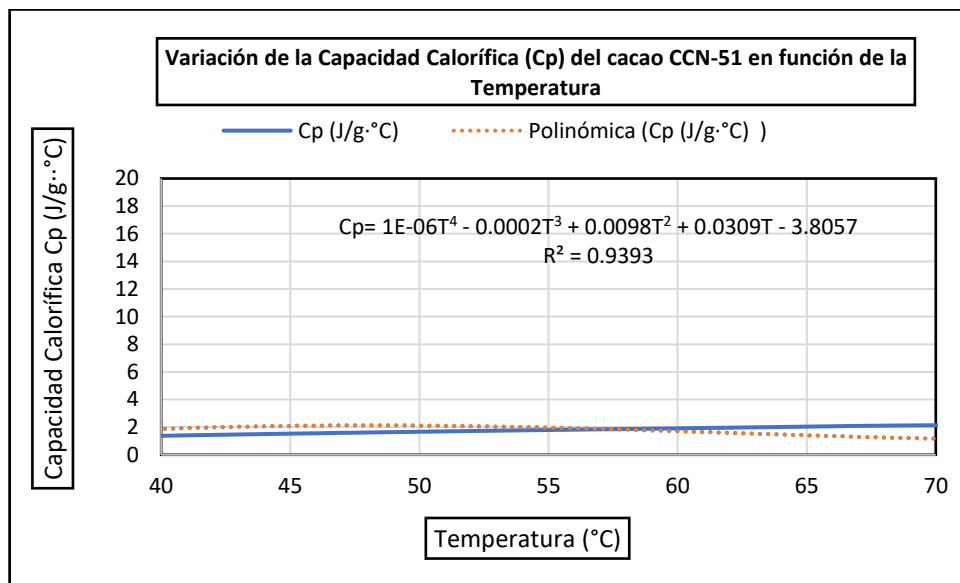


Figura 26. Grafica de variación de la capacidad calorífica en función de la temperatura y masas de 14.6mg

Modelos de ecuaciones

LA Tabla 23 muestra los modelos de ecuaciones polinómicas obtenidas para la capacidad calorífica Cp del cacao CCN-51 en función de la temperatura, con sus respectivos coeficientes de correlación (R^2) e intervalo de ajuste. Las curvas correspondientes a cada modelo se pueden observar en las figuras indicadas en la última columna.

Tabla 22. Modelos de la capacidad calorífica en función de la Temperatura

Ensayo	Capacidad Calorífica Cp (J/g·°C)	Intervalo °C	R^2	Núm. Figura
Ensayo (1)	$C_p = -3E-08T^4 + 1E-05T^3 - 0.0015T^2 + 0.106T - 1.3498$ $R^2 = 0.985$	22.535-120.035	0.985	20
Ensayo (2)	$C_p = -3E-08T^4 + 1E-05T^3 - 0.0017T^2 + 0.1247T - 1.4517$ $R^2 = 0.9934$	19.622-120.622	0.9934	21
Ensayo (3)	$C_p = -5E-08T^4 + 2E-05T^3 - 0.0025T^2 + 0.1671T - 2.2073$ $R^2 = 0.9931$	21.548-120.548	0.9931	22
Ensayo (4)	$C_p = -4E-08T^4 + 2E-05T^3 - 0.0022T^2 + 0.1524T - 1.9429$	24.814-149.814	0.9925	23
Ensayo (5)	$C_p = -7E-08T^4 + 2E-05T^3 - 0.003T^2 + 0.1844T - 2.2201$	22.757-120.757	0.9632	24
Ensayo (6)	$C_p = 1E-06T^4 - 1E-04T^3 - 0.0089T^2 + 0.9634T - 18.686$	24.484-119.984	0.9218	25
Ensayo (7)	$C_p = 1E-06T^4 - 0.0002T^3 + 0.0098T^2 + 0.0309T - 3.8057$	26.245-119.745	0.9393	26

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El cacao CCN-51 cultivado en La Maná presenta una granulometría promedio de 27.88mm para el cacao seco y 39.30mm para el cacao en baba que facilita una transferencia de masa eficiente durante el secado, permitiendo reducir gradientes internos de humedad y temperatura.
- El factor de forma (esfericidad $\approx 0,756$) y el índice de aplastamiento (0.354) del grano contribuyen a un secado más uniforme, al asegurar un contacto regular entre el grano y el flujo de aire, minimizando zonas de secado desigual.
- La capacidad calorífica específica del cacao CCN-51 incrementa con el incremento de la temperatura. Se observa un cambio del patrón de comportamiento con el incremento de la masa, los valores ascendentes se observan a partir de una masa de 13.9 mg. El valor promedio para una temperatura de 70 °C es de ($C_p \approx 2,05 \text{ J/g}\cdot\text{K}$), el c_p total del cacao CCN-51 incrementa con el aumento de la temperatura, se observa un cambio de patrón de comportamiento de la capacidad calorífica específica con el incremento de la masa

6.2. RECOMENDACIONES

- El análisis termogravimétrico identifica tres etapas claras de pérdida de masa (30–150 °C, 150–350 °C y >350 °C), lo que permite diseñar procesos de secado que extraigan primero el agua libre y luego estabilicen el grano sin iniciar la degradación de componentes valiosos.
- Adoptar secadores híbridos: Evaluar la viabilidad de secadores solares-eléctricos en La Maná para reducir costos operativos y consumo de combustibles fósiles, apoyándose en datos energéticos del 40 % de reducción de tiempo de secado.
- Monitoreo continuo de humedad: Incorporar sensores de humedad y temperatura en tiempo real durante el secado para ajustar dinámicamente la velocidad del aire y la temperatura, asegurando uniformidad y calidad del grano.
- Evaluar tecnologías emergentes: Realizar estudios piloto de secado al vacío y microondas para determinar su rentabilidad y escalabilidad en el contexto de pequeños y medianos productores de La Maná, con especial atención a la retención de compuestos bioactivos.

7. REFERENCIAS

- [1] A. R. García-Briones, B. F. Pico-Pico, R. Jaimez, A. R. García-Briones, B. F. Pico-Pico, y R. Jaimez, «La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción», *Rev. Digit. Novasinerгия*, vol. 4, n.º 2, pp. 152-172, nov. 2021, doi: 10.37135/ns.01.08.10.
- [2] M. Santander *et al.*, «Unravelling Cocoa Drying Technology: A Comprehensive Review of the Influence on Flavor Formation and Quality», *Foods*, vol. 14, n.º 5, Art. n.º 5, ene. 2025, doi: 10.3390/foods14050721.
- [3] S. Streule, S. Freimüller Leischtfeld, M. Galler, D. Motzer, M. Poulouse-Züst, y S. Miescher Schwenninger, «Variations in Ecuadorian Cocoa Fermentation and Drying at Two Locations: Implications for Quality and Sensory», *Foods*, vol. 13, n.º 1, p. 137, dic. 2023, doi: 10.3390/foods13010137.
- [4] S. Streule, S. Freimüller Leischtfeld, M. Galler, D. Motzer, M. Züst, y S. Schwenninger, «Variations in Ecuadorian Cocoa Fermentation and Drying at Two Locations: Implications for Quality and Sensory», *Foods*, vol. 13, dic. 2023, doi: 10.3390/foods13010137.
- [5] E. O. Daniela, B. R. J. Alexander, A. M. Julián, y H. R. C. Frank, «IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR DE CACAO A PEQUEÑA ESCALA PARA DISMINUIR EL TIEMPO DE SECADO Y CONSERVAR LAS PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS EN EL CONSEJO COMUNITARIO LAS VARAS TUMACO (NARIÑO)».
- [6] E. Castillo-Orozco, O. Garavito, O. Saavedra, y D. Mantilla, «The Drying Kinetics and CFD Multidomain Model of Cocoa Bean Variety CCN51», *Foods*, vol. 12, n.º 5, p. 1082, mar. 2023, doi: 10.3390/foods12051082.
- [7] Ministerio de agricultura y ganadería (MAG), «Boletín Situacional Cacao 2023». Accedido: 5 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://online.fliphtml5.com/ijia/xduu/>
- [8] Ministerio de agricultura y ganadería (MAG), «Cacao ecuatoriano: el nuevo motor exportador que transforma la balanza comercial – Grupo Transoceanica». Accedido: 5 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://transoceanica.com.ec/en/ecuadorian-cocoa-the-new-export-engine-that-transforms-the-trade-balance/>
- [9] J. Fiallos-Cusquicusma, L. Tigasi-Guamangate, J. López-Bósquez, y W. Pincay-Ronquillo, «Omisión de macro nutrientes primarios en la producción de cacao fino de aroma», *MQRInvestigar*, vol. 9, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2025, doi: 10.56048/MQR20225.9.1.2025.e51.
- [10] R. E. Jaimez, L. Barragan, M. Fernández-Niño, O. J. Larreal B, y B. Flores, «Pod Production Dynamics and Pod Size Distribution of Theobroma cacao L. Clone CCN 51 in Full Sunlight», *Int. J. Agron.*, vol. 2024, n.º 1, p. 4242270, 2024, doi: 10.1155/2024/4242270.
- [11] Ahmed, G. et al. (2015), «Better than gold: how Ecuador cashed in on surging cocoa prices». 24 de junio de 2025.
- [12] COCOA RUNNERS, «CCN-51: Are we barking up the wrong (fruit) tree? - Cocoa Runners», <https://cocoarunners.com/>. Accedido: 5 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cocoarunners.com/blog/ccn-51-are-we-barking-up-the-wrong-fruit-tree/>
- [13] «ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE CACAO EN EL CANTÓN SAN LORENZO, PROVINCIA DE ESMERALDAS». Accedido: 5 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/0536fed2-4d63-4e3b-8e56-f180bb581bf8/content>

- [14] R. Jaimez *et al.*, «Theobroma cacao L. cultivar CCN 51: A comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects», *PeerJ*, vol. 10, ene. 2022, doi: 10.7717/peerj.12676.
- [15] A. Villacis, V. Barrera, J. Alwang, C. Caicedo Vargas, J. Quiroz, y IDB Invest, «Strategies to Strengthen Ecuador's High-Value Cacao Value Chain», Inter-American Development Bank, ene. 2022. doi: 10.18235/0003960.
- [16] «Memoria Anual BCE 2023».
- [17] Ing Rocio Valdivia Arrunategui, «FUNDAMENTOS DEL SECADO DEL CACAO», p. 48.
- [18] K. P. P. Nair, *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World*. Elsevier, 2010.
- [19] E. Ackah y E. Dompey, «Effects of fermentation and drying durations on the quality of cocoa (*Theobroma cacao* L.) beans during the rainy season in the Juaboso District of the Western-North Region, Ghana», *Bull. Natl. Res. Cent.*, vol. 45, n.º 1, p. 175, oct. 2021, doi: 10.1186/s42269-021-00634-7.
- [20] M. Santander *et al.*, «Unravelling Cocoa Drying Technology: A Comprehensive Review of the Influence on Flavor Formation and Quality», *Foods*, vol. 14, n.º 5, p. 721, feb. 2025, doi: 10.3390/foods14050721.
- [21] J. F. Tejada, J. Arango-Angarita, y J. L. Cuervo, «Effect of Solar Pre-Drying and Yeast Starter Inoculation Treatments on the Chemical Composition of Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Beans from Southwestern Colombia», *Foods*, vol. 12, n.º 24, p. 4455, dic. 2023, doi: 10.3390/foods12244455.
- [22] I. X. Cerón Salazar *et al.*, *Estrategias tecnológicas para el manejo del cultivo y el beneficio del cacao*, Primera. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), 2020. doi: 10.21930/agrosavia.institutional.7403572.
- [23] «(PDF) Métodos de fermentación en el cacao CCN-51 con norma INEN 176 en la parroquia Guasaganda», ResearchGate. Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/373545302_Metodos_de_fermentacion_en_el_cacao_CCN-51_con_norma_INEN_176_en_la_parroquia_Guasaganda
- [24] «DISEÑO DE UN FERMENTADOR Y SECADOR SOLAR PILOTO, PARA DOS VARIETADES DE CACAO (*Theobroma cacao* L), EN EL CANTÓN EL EMPALME PROVINCIA GUAYAS».
- [25] «DISEÑO DE UN FERMENTADOR Y SECADOR SOLAR PILOTO, PARA DOS VARIETADES DE CACAO (*Theobroma cacao* L), EN EL CANTÓN EL EMPALME PROVINCIA GUAYAS».
- [26] J. Nogales, «MÉTODOS DE SECADO DE CACAO», Poscosecha Cacao. Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://poscosechacacao.com/2017/08/metodos-de-secado-de-cacao/>
- [27] P. G. N. Diana, «Estudio de métodos de fermentación y secado del cacao».
- [28] «Análisis de Necesidades para promover la sostenibilidad de las pequeñas comunidades productoras de cacao en Ecuador». Accedido: 5 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.arcolab.org/en/portfolio/need-analysis-cacao-ecuador/>
- [29] J. Nogales, «MÉTODOS DE SECADO DE CACAO», Poscosecha Cacao. Accedido: 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://poscosechacacao.com/2017/08/metodos-de-secado-de-cacao/>
- [30] «Manual-de-poscosecha-cacao-fino-y-de-aroma.pdf». Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.descubre.cr/wp-content/uploads/2025/04/Manual-de-poscosecha-cacao-fino-y-de-aroma.pdf>

- [31] «Oreadora Secadora para Café y Cacao – IMSA Perú». Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imsacafe.com/producto/cafe/beneficio-humedo-seco/oreadora-secadora/>
- [32] P. G. N. Diana, «Estudio de métodos de fermentación y secado del cacao».
- [33] A. Feichtinger, E. Scholten, y G. Sala, «Effect of particle size distribution on rheological properties of chocolate», *Food Funct.*, vol. 11, n.º 11, pp. 9547-9559, nov. 2020, doi: 10.1039/D0FO01655A.
- [34] «ULEAM-AGRO-0177.pdf». Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/4662/1/ULEAM-AGRO-0177.pdf>
- [35] A. tobias Baeza, «Determination of geometric properties of cocoa beans (*Theobroma cacao* L.)», *Agro Product.*, may 2024, doi: 10.32854/AGROP.V17I5.2582.
- [36] A. tobias Baeza, «Determination of geometric properties of cocoa beans (*Theobroma cacao* L.)», *Agro Product.*, may 2024, doi: 10.32854/AGROP.V17I5.2582.
- [37] «(PDF) Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao (*Theobroma cacao*)», *ResearchGate*, may 2025, doi: 10.15446/ing.investig.n18.24483.
- [38] H. Tinoco y D. Ospina, «Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado», *Rev. EIA*, vol. 13, pp. 53-63, ene. 2010, doi: 10.24050/reia.v7i13.232.
- [39] C. A. Carvajal-Jara, P. M. Tafur-Escanta, Á. H. Villavicencio-Poveda, y E. R. Gutiérrez-Gualotuña, «Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico», *Científica*, vol. 22, n.º 2, Art. n.º 2, 2018.
- [40] «TGA ¿Qué es el análisis termogravimétrico?» Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/tga-que-es-el-analisis-termogravimetrico/>
- [41] D. C. Meza-Sepúlveda, C. Hernandez-Urrea, y H. Valencia-Sanchez, «Thermochemical characterization of cellulose extracted from the cocoa pod husk of *Theobroma cacao* L.», *Ind. Crops Prod.*, vol. 226, p. 120579, abr. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.120579.
- [42] «Camsizer_english_2007_11_20_UM». Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://faculty.washington.edu/kate1/ewExternalFiles/manual_camsizer_led_en.pdf
- [43] «Retsch/Jenoptik Camsizer particle size/shape analyzer», Gemini BV. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.geminibv.com/labware/retschenoptik-camsizer-particle-size-shape-analyzer/>
- [44] «DSC_3500_Sirius_en_web.pdf». Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/d/3/1/4/d314ec8a4e2b92925c22fc25250ae64653cbc323/DSC_3500_Sirius_en_web.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [45] «DSC 3500 Sirius». Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://at-messe.netzsch.com/en/products/differential-scanning-calorimeter-dsc-differential-thermal-analyzer-dta/dsc-3500-sirius>
- [46] M.-T. I. I. all rights reserved, «Thermal Analysis System TGA/DSC 3+». Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/us/en/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/ta-instruments/thermal-analysis-system-TGA-DSC-3-plus.html

8. ANEXO

ANEXO A

Clase de tamaño	[mm]	p3 [%]	Q3 [%]	SPHT3	Symm3	b/13	Pd0
	< 5.0000	0.00	0.00	0.764	0.838	0.739	9256
5.0000	8.5000	0.00	0.00	0.045	0.232	0.026	1
8.5000	12.0000	0.03	0.03	0.854	0.920	0.653	2
12.0000	15.5000	0.88	0.91	0.922	0.958	0.820	13
15.5000	19.0000	6.62	7.53	0.881	0.941	0.734	77
19.0000	22.5000	14.17	21.70	0.843	0.943	0.628	128
22.5000	26.0000	29.93	51.63	0.820	0.946	0.565	212
26.0000	29.5000	23.06	74.69	0.781	0.923	0.553	124
29.5000	33.0000	6.36	81.05	0.762	0.891	0.550	26
33.0000	36.5000	3.35	84.40	0.628	0.767	0.504	9
36.5000	40.0000	5.38	99.78	0.544	0.719	0.546	13
> 40.0000		10.22	100.00	0.448	0.616	0.521	15

Figura 1. Granulometría de partículas cacao seco.

Clase de tamaño	[mm]	p3 [%]	Q3 [%]	SPHT3	Symm3	b/13	Pd0
	< 5.0000	0.05	0.05	0.961	0.964	0.935	222
5.0000	8.5000	0.13	0.18	0.976	0.969	0.906	8
8.5000	12.0000	0.19	0.37	0.929	0.953	0.743	3
12.0000	15.5000	0.23	0.60	0.800	0.829	0.609	2
15.5000	19.0000	0.17	0.77	0.722	0.799	0.522	1
19.0000	22.5000	0.09	0.86	0.485	0.734	0.294	1
22.5000	26.0000	0.29	1.15	0.419	0.729	0.287	3
26.0000	29.5000	6.43	7.58	0.774	0.864	0.679	10
29.5000	33.0000	13.48	21.06	0.719	0.851	0.637	13
33.0000	36.5000	22.16	43.22	0.744	0.899	0.552	19
36.5000	40.0000	18.02	61.24	0.671	0.875	0.493	18
> 40.0000		38.76	100.00	0.528	0.769	0.487	21

Figura 2 Granulometría de partículas cacao en baba.

ANEXO B

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases

(a) At 300 K

Gas	Formula	Gas constant, R kJ/kg-K	C_p kJ/kg-K	C_v kJ/kg-K	k
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Figura 1 Tabla de los gases ideales

ANEXO C

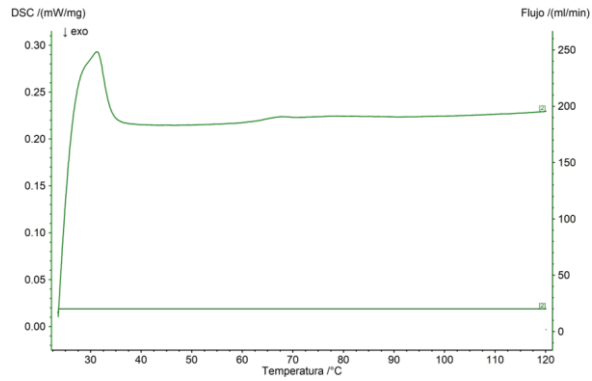


Figura 1. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente a la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.

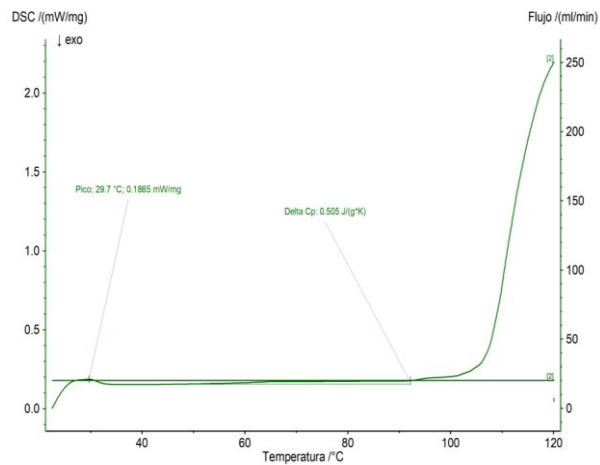


Figura 2. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente a la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.

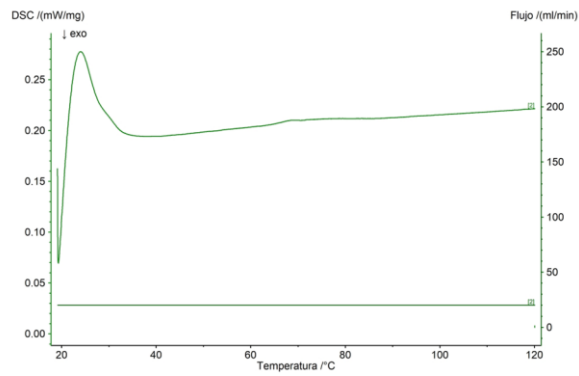


Figura 3. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente a la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.

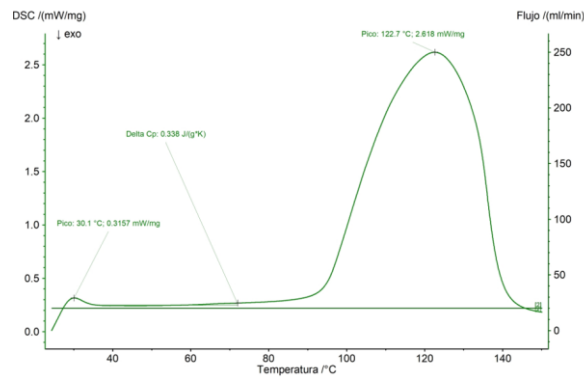


Figura 4. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente a la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.

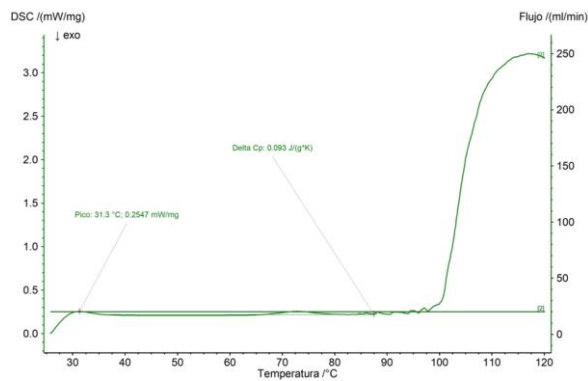


Figura 5. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente a la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.

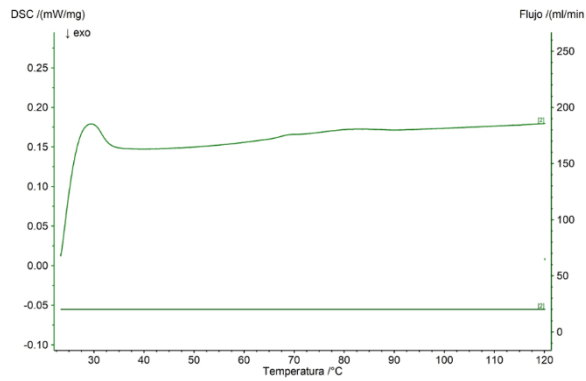


Figura 6. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente al la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.

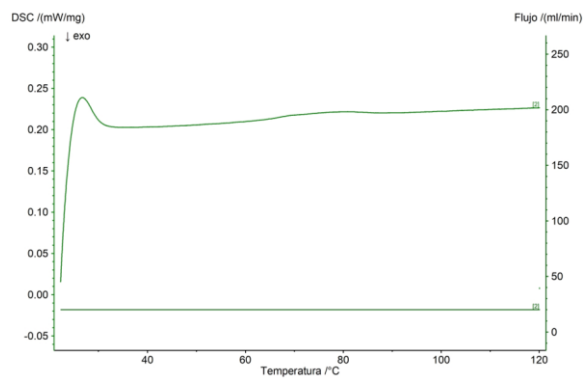


Figura 7. Curva DSC experimento 1, del cacao CCN-51 frente al la Temperatura con una línea horizontal que representa el valor cero del flujo térmico.