



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE CACAO COLECCIÓN
CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA
CONTROLADO EN UN RANGO DE 60 A 70 °C, EN EL CANTÓN LA
MANÁ**

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

AUTORES:

Gipson Israel Guzmán Cuascota
Rodney Israel Pillajo Ramírez

TUTOR:

Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc.

LATACUNGA, FEBRERO 2025

LATACUNGA – ECUADOR
FEBRERO – 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Guzmán Cuascota Gipson Israel, con cédula de ciudadanía No. 175267573-4, Pillajo Ramirez Rodney Israel, con cédula de ciudadanía No, 1805175138 declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA CONTROLADO EN UN RANGO DE 60 A 70 °C, EN EL CANTÓN LA MANÁ**, siendo el Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc. Tutor del presente trabajo; 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 investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 25 febrero de 2025



Gipson Israel Guzmán Cuascota
C.I.: 175267573-4



Rodney Israel Pillajo Ramirez
C.I.: 180517513-8

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA CONTROLADO EN UN RANGO DE 60 A 70 °C, EN EL CANTÓN LA MANÁ”, de Guzmán Cuascota Gipson Israel; Pillajo Ramirez Rodney Israel, de la carrera de Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 25 febrero de 2025



Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc.
C.C: 050311373-0
TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Guzmán Cuascota Gipson Israel; Pillajo Ramirez Rodney Israel, con el título de Proyecto de Investigación: **ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE CACAO COLECCIÓN CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA CONTROLADO EN UN RANGO DE 60 A 70 °C, EN EL CANTÓN LA MANÁ** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 25 febrero del 2025

Para constancia firman:



Ing. Enrique Torres Tamayo, Ph.D.
CC: 175712194-0
LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso, Ph.D.
CC: 175836725-2
LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Cristian Fabián Gallardo Molina, M.Sc.
CC: 050284769-2
LECTOR 3 (MIEMBRO)

Agradecimiento

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por bendecirme con una familia que siempre me ha apoyado incondicionalmente, quiero extender mi abrazo de agradecimiento a mi tutor, Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc. que ha sido fundamental en el ámbito académico y práctico del presente trabajo, su comprensión y paciencia ha sido de profundo impacto positivo en mi persona. Así como al Ing. Enrique Torres Tamayo, Ph.D, que con su generosidad me ha guiado en el desarrollo y fundamento analítico del presente trabajo. Finalmente quiero extender mi abrazo de agradecimiento la fuente de conocimiento que ha sido la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, que, con su línea humanista de maestros, ingenieros, y alumnos sigue formando profesionales de calidad y excelencia para el país.

GIPSON GUZMÁN

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de fortaleza y sabiduría, por guiarme en cada paso de este camino, darme la paciencia para enfrentar los desafíos y la determinación para alcanzar esta meta.

Extiendo mi más sincero agradecimiento al Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez, M.Sc, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación en la tutoría de esta tesis. Su conocimiento y apoyo fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mi compañero de tesis, Gipson Israel Guzmán Cuascota, con quien compartí horas de esfuerzo, aprendizaje y perseverancia. Gracias por tu compromiso y trabajo en equipo, que hicieron posible este logro.

Finalmente, a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios para mi formación profesional. Su compromiso con la educación ha sido clave en mi desarrollo académico y personal.

A todos los que, de una u otra forma, contribuyeron en este proceso, mi más profundo agradecimiento.

RODNEY PILLAJO

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi madre que desde mi nacimiento ha dejado de dormir toda su vida por velar por mis metas y crecimiento personal, que con su amor y comprensión me han guiado y apoyado en todo el camino de mi vida siendo el pilar fundamental de consejos y aprendizajes.

A mi padre que con sus palabras ha sabido sacar lo mejor de mi muchas veces, que me ha enseñado el valor de llevar de la mano el deporte y el estudio, así como el valor de la unión en familia.

A mi hermana mayor que con su carisma y energía me ha dado el ejemplo de ser un buen hijo y hermano, a mi hermana menor que llena mi hogar de mucho amor y carácter.

Adicionalmente y aunque no lo lean quiero nombrar a mis mascotas Theo y Ahry que han sido de mis razones más grandes para no rendirme en mi camino.

Todo lo que me han enseñado queda plasmado en este logro que quiero compartir con ustedes cada día de mi vida.

GIPSON GUZMÁN

Dedicatoria

A mi madre, Lourdes Susana Ramirez Pilco, la mujer que, con su amor incondicional, esfuerzo y dedicación ha sido mi mayor inspiración. Gracias por cada palabra de aliento y por enseñarme que con valentía y perseverancia se pueden alcanzar los sueños. Sin tu apoyo y sacrificio, este logro no sería posible.

A mi padre, Dilon Ivan Pillajo Landa, por ser mi ejemplo de constancia y fortaleza. Gracias por cada enseñanza, por mostrarme la importancia del trabajo duro y por impulsarme a ser mejor cada día. Tu confianza en mí ha sido un motor que me ha llevado a superar cada obstáculo en este camino.

A mi hermana, Maryuri Damaris Pillajo Ramirez, por su compañía, apoyo y por ser una motivación constante en mi vida. Y a mi eterno amor, Valeria Carolina Pillajo Oñate, por estar a mi lado con amor y paciencia, compartiendo cada esfuerzo y cada logro.

A ustedes, con amor y gratitud infinita, les dedico este triunfo, es tanto mío como suyo.

RODNEY PILLAJO

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

**TITULO: “ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE CACAO COLECCIÓN
CASTRO NARANJAL 51 PARA UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA
CONTROLADO EN UN RANGO DE 60 A 70 °C, EN EL CANTÓN LA MANÁ”**

Autores:
Guzmán Cuascota Gipson Israel
Pillajo Ramirez Rodney Israel

RESUMEN

El presente estudio, analizó la incidencia de la aplicación de un régimen controlado de temperatura entre 60 y 70 °C para la validación de modelos matemáticos en la cinética de secado del cacao CCN-51, considerándose 3 tamaños de almendra. Con el fin de identificar los modelos matemáticos que mejor ajuste de curva presente, a través del estudio del contenido de humedad final en relación con el tiempo y la temperatura, bajo condiciones de secado controladas. Para ello, se clasificó las almendras de cacao CCN-51 según sus dimensiones (largo, ancho y espesor) y se calculó el diámetro equivalente, agrupándolas en tres categorías: grandes, medianas y pequeñas. Para la obtención de datos se utilizó dos analizadores de humedad (Moisture Russian Analyzer - RSSFY Series), se pesó 40 g de almendras por categoría, asegurando una tolerancia del 2.5 % entre las máquinas para garantizar condiciones iniciales similares antes del proceso de secado. A partir de los datos obtenidos, se construyeron curvas de pérdida de humedad, las cuales fueron ajustadas a 11 modelos matemáticos para determinar el modelo que presente el mejor coeficiente mediante la minimización del error. Los resultados indicaron que el modelo “Midili” Y “Henderson Modificado” presentaron una mejor bondad de ajuste con respecto a la curva experimental.

Palabras clave: Cacao CCN-51, Cinética de secado, Modelos matemáticos, Curvas de secado, Bondad de ajuste

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY

TOPIC: “ANALYSIS THE COCOA DRYING KINETICS CASTRO NARANJAL 51 COLLECTION FOR A TEMPERATURE REGIME CONTROLLED IN A RANGE 60 TO 70 ° C IN LA MANÁ CANTON”.

Authors:

Guzmán Cuascota Gipson Israel

Pillajo Ramirez Rodney Israel

ABSTRACT

In the present study, it was analyzed the incidence application a controlled regime of temperature between 60 and 70 ° C for the mathematical models' validation on the drying kinetics CCN-51 cocoa, considering 3 almond sizes. In order to identify the mathematical models, which best fitting by present curve, through the final moisture content study in relation to time and temperature, under controlled drying conditions. To do this, it was classified the CCN-51 cocoa almonds according to their dimensions (length, width and thickness) and were calculated the equivalent diameter, grouping them into three categories: large, medium and small. To data get, they were used two moisture analyzers (Moisture Russian Analyzer - RSSFY Series), it was weighed 40 g almonds per category, by ensuring a tolerance 2.5% between the machines to guarantee similar initial conditions before the drying process. From the got data, they were constructed moisture loss curves, which are adjusted to 11 mathematical models to determine the adjustment coefficient and the model, what presents the best coefficient, by means the error minimization. The results indicated, which the “Midili” and “Modified Henderson” models presented a better fit goodness with respect to the experimental curve.

Keywords: Cocoa CCN-51, Drying kinetics, Mathematical models, Drying curves, fit Goodness.

ÍNDICE DE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	3
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:	3
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN:.....	3
2.3.1. Objeto de investigación:	3
2.3.2. Campo de acción:	3
2.4. BENEFICIARIOS	3
2.4.1. Directo:	4
2.4.2. Indirecto:	4
2.5. JUSTIFICACIÓN	4
2.6. OBJETIVOS	4
2.6.1. General	4
2.6.2. Específicos	4
2.6.3. Sistema de tareas	5
3. FUNDAMENTACION TEORICA	6
3.1. ANTECEDENTES	6
3.1.1. Hipótesis	7
3.2. ORIGEN DEL CACAO CCN-51	8
3.3. CACAO CCN-51	9
3.4. CARACTERÍSTICAS DEL CACAO CCN-51	10
3.4.1. Origen y desarrollo del CCN-51	10
3.4.2. Características del fruto y almendras	10
3.4.3. Resistencia a enfermedades	11
3.4.4. Alto rendimiento	11

3.5.	CINÉTICA DE SECADO	11
3.6.	MODELOS MATEMÁTICOS.....	12
3.6.1.	Modelo matemático de Newton	12
3.6.2.	Modelo matemático de Page	12
3.6.3.	Modelo matemático de Henderson	13
3.6.4.	Modelo matemático Logarítmico	13
3.6.5.	Modelo matemático de Midili	13
3.6.6.	Modelo matemático de Dos Términos	13
3.6.7.	Modelo matemático de Henderson Modificado	14
3.6.8.	Modelo matemático de Verma	14
3.6.9.	Modelo matemático de Dos Términos Exponenciales	14
3.6.10.	Modelo matemático de Aproximado a la Difusión	15
3.6.11.	Modelo matemático de Wang Singh	15
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO	15
4.1.	MÉTODOLOGIA.....	17
4.1.1.	Metodología experimental	17
4.2.	VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA.....	18
4.3.	CLASIFICACIÓN POR DIAMETRO EQUIVALENTE	18
4.4.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS DE CINÉTICA DE SECADO DE CACAO, Y AJUSTE DE CURVAS.....	19
4.5.	MATERIALES DE MEDICIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS.....	20
4.5.1.	Calibrador pie de rey	20
4.5.2.	Analizador de humedad (Moisture Analyzer Ruishan RSSFY series)	20
4.5.3.	Medidor de humedad de granos AMT -155	21
4.6.	MÉTODOS DE CÁLCULO	21
4.6.1.	Modelos matemáticos.	21
4.7.	PROCESO DE CÁLCULO	22

4.7.1.	Características de secado de cacao	22
4.7.2.	Condiciones para realizar pruebas experimentales	23
4.7.3.	Propiedades del grano de cacao	23
4.8.	CÁLCULO DE HUMEDAD DEL MODELO EXPERIMENTAL	25
4.9.	CÁLCULO DE HUMEDAD en BASE A LOS MODELOS MATEMATICOS	26
4.10.	MODELOS DE AJUSTE DE HUMEDAD	26
4.10.1.	Modelo de Midili experimental	26
4.10.2.	Modelo de “Henderson Modificado” experimental	27
4.11.	CÁLCULO Y AJUSTE DEL ERROR DE LAS CURVAS	27
4.11.1.	Cálculo del error	27
4.11.2.	Suma de cuadrados de error	28
4.11.3.	Minimizar la suma del cuadrado de los errores	28
4.11.4.	Suma de cuadrados totales	28
4.11.5.	Bondad de ajuste de r cuadrado	29
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	29
5.1.	COEFICIENTES DE BONDAD DE AJUSTE DE CURVA DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	29
5.2.	ANÁLISIS DE CURVA DE SECADO DE COLECCIÓN NARANJAL 51 BAJO UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA DE 60, 65, 70°C	31
5.2.1.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlado de 60°C	31
5.2.2.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlado de 65°C	32
5.2.3.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlado de 70°C	33
5.2.4.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlado de 60°C	34

5.2.5.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlado de 65°C	35
5.2.6.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlado de 70°C	36
5.2.7.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlado de 60°C.	37
5.2.8.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlado de 65°C.	38
5.2.9.	Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlado de 70°C.	39
5.3.	AJUSTE DE CURVAS DE ACUERDO AL DIAMETRO EQUIVALENTE	41
5.3.1.	Ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 pequeñas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.....	41
5.3.2.	Ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 medianas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.....	43
5.3.3.	Ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 grandes bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.....	45
5.4.	COEFICIENTES DE AJUSTE DE CURVAS PARA EL CACAO MEJORADO CCN-51 DE ACUERDO A LOS DIÁMETROS EQUIVALENTES Y REGÍMENES DE TEMPERATURA DE 60, 65, 70°C.	46
5.4.1.	Parámetros de ajuste de curva de almendras pequeñas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.....	47
5.4.2.	Parámetros de ajuste de curva de almendras medianas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.....	49
5.4.3.	Parámetros de ajuste de curva de almendras grandes bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.....	52
5.5.	PRESUPUESTO REFERENCIAL.....	54
5.5.1.	Costos directos	54
5.5.2.	Costos indirectos.....	54

5.5.3. Presupuesto general.....	55
5. COCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
5.2. CONCLUSIONES	55
5.3. RECOMENDACIONES.....	56
6. REFERENCIAS	57
7. ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 1.	¡Error! Marcador no definido.
TOMA DE DATOS DE TAMAÑO DE DIAMETRO EQUIVALENTE;	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 2.	¡Error! Marcador no definido.
TABLA CONTROL DIAS DE MEDICION.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 3.	¡Error! Marcador no definido.
CONTROL TAMAÑO DE MUESTRA, Y CÁLCULO DE DIAMETRO EQUIVALENTE	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 4.	¡Error! Marcador no definido.
CONFIGURACION MANUAL DEL ANALIZADOR DE HUMEDAD.;	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 5.	¡Error! Marcador no definido.
TOMA DE DATOS EN EL ANALIZADOR DE HUMEDAD.;	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 6.	¡Error! Marcador no definido.
MEDIDA DE HUMEDAD FINAL AMT.	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 7.	¡Error! Marcador no definido.
DATOS: HUMEDAD EXPERIMENTAL, MASA Y PORCENTAJE DE HUMEDAD.	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 8.	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN COEFICIENTES DE AJUSTE DE CURVA Y AJUSTE DE ERROR ..	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 3.1. Imagen Referencial de Árboles de Cacao[14].	8
Figura. 3.2:Cacao CCN-51 [16].	9
Figura. 3.3:Plántula de cacao CCN-51 [18]	10
Figura. 3.4 Mazorca del CCN-51 [20]	10
Figura. 3.5: Escoba de bruja [22].	11
Figura. 3.6:Monilla [20].	11
Figura. 4.1.Diagrama de Flujo del Análisis de cinética de secado de cacao, y ajuste de curvas.	19
Figura. 4.2 Calibrador pie de rey [34]	20
Figura. 4.3. Mouisture Analyzer Ruishan RSSFY [35].	20
Figura. 4.4 Medidor de humedad de granos AMT155	21
Figura. 4.5.Cálculo del modelo matemático de Newton.	26
Figura. 4.6.Extensión Solver de ajuste de variables.	28
Figura. 5.1. Ajuste de curva Modelo de Henderson Modificado en almendras pequeñas	31
Figura. 5.2. Ajuste de curva modelo de MIDILI en almendras pequeñas	32
Figura. 5.3 Ajuste de curva modelo de Midili en almendras pequeñas	33
Figura. 5.4:Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Henderson Modificado en almendras medianas.	34
Figura. 5.5:Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Midili en almendras medianas	35
Figura. 5.6:Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Henderson en almendras medianas.	36
Figura. 5.7: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva modelo de Henderson Modificado en almendras grandes.	37
Figura. 5.8:Cinética de secado de cacao y ajuste de curva modelo de Midili en almendras grandes.	38

Figura. 5.9: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Midili en almendras grandes.....	39
Figura. 5.10.5. Curva cinética de secado de cacao CCN-51 diámetro equivalente y temperatura tiempo de secado	40
Figura. 5.11. Curva cinética de secado de cacao CCN-51 pérdida de humedad de acuerdo al régimen de temperatura de 60°C/ almendras pequeñas	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].	1
Tabla 2.1. Objetivos de sistema de tareas.	5
Tabla 3.1. Clasificación Taxonómica del Cacao [12]	9
Tabla 4.1. Variable Dependiente e Independiente.	18
Tabla 4.2. Variables del proceso de secado.	19
Tabla 4.3. Características Moisture Analyzer RSSFY series	21
Tabla 4.4. Modelos matemáticos de ajuste de curva de pérdida de humedad bajo diferentes esquemas de secado [36].	22
Tabla 4.5. Parámetros para evaluar al realizar la práctica	23
Tabla 5.1. Tabla de Bondad de Ajuste R2 bajo un régimen de temperatura de 60°C	29
Tabla 5.2. Tabla de Bondad de Ajuste R2 bajo un régimen de temperatura de 65°C.	30
Tabla 5.3. Tabla de Bondad de Ajuste R2 bajo un régimen de temperatura de 70°C.	30
Tabla 5.4. Coeficientes de ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 a 60°C pequeñas.	41
Tabla 5.5. Ajuste de curva en almendras pequeñas mediante el modelo de Midili y Henderson Modificado.	42
Tabla 5.6. Coeficientes de ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 a 60°C medianas.	43
Tabla 5.7. Ajuste de curva en almendras medianas mediante el modelo de Midili y Henderson Modificado.	44
Tabla 5.8. Coeficientes de ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 a 60°C grandes.	45
Tabla 5.9. Ajuste de curva en almendras grandes mediante el modelo de Midili y Henderson Modificado.	46
Tabla 5.10. Resumen Almendras pequeñas a 60°C, Método de Henderson Modificado	47
Tabla 5.11. Resumen Almendras pequeñas a 60°C, Método de Wang Singh.	48
Tabla 5.12. Resumen Almendras pequeñas a 65°C, Método de Midili	48

Tabla 5.13. Resumen Almendras pequeñas a 65°C, Método de Wang Singh.....	48
Tabla 5.14. Resumen Almendras pequeñas a 70°C, Método de Midili	49
Tabla 5.15. Resumen Almendras pequeñas a 70°C, Método de Wang Singh.....	49
Tabla 5.16. Resumen Almendras medianas a 60°C, Método de Henderson Modificado.	50
Tabla 5.17. Resumen Almendras medianas a 60°C, Método de Wang Singh.	50
Tabla 5.18. Resumen Almendras medianas a 65°C, Método de Midili.	50
Tabla 5.19. Resumen Almendras Medianas a 65°C, Método de Wang Singh.....	51
Tabla 5.20. Resumen Almendras medianas a 70°C, Método de Henderson Modificado	51
Tabla 5.21. Resumen Almendras medianas a 70°C, Método de Wang Singh	51
Tabla 5.22. Resumen Almendras grandes a 60°C, Método de Henderson Modificado	52
Tabla 5.23. Resumen Almendras grandes a 60°C, Método de Wang Singh.....	52
Tabla 5.24. Resumen Almendras grandes a 65°C, Método de Midili.....	53
Tabla 5.25. Resumen Almendras grandes a 65°C, Método de Wang Singh.....	53
Tabla 5.26. Resumen Almendras grandes a 70°C, Método de Midili.....	53
Tabla 5.27. Resumen Almendras grandes a 70°C, Método de Wang Singh.....	54
Tabla 5.28. Costos directos de cinética del cacao	54
Tabla 5.29. Costos indirectos de cinética del cacao	55
Tabla 5.30. Presupuesto General	55

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Análisis de la cinética del secado de cacao Colección Castro Naranjal 51 para un régimen de temperatura controlado en un rango de 60 a 70 °C, en el cantón La Maná

Modalidad de titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Ingeniería Electromecánica

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:

- Guzmán Cuascota Gipson Israel
- Pillajo Ramírez Rodney Israel
- Ing. Albarracín Álvarez Mauro Darío, M. Sc.

Área de Conocimiento:

Tabla 1.1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].

CAMPO	AREA	SUB ÁREA
07 ingeniería, industria y construcción	071 ingeniería y profesiones a fines	0713 Electricidad y energía.

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

Sublíneas de investigación de la Carrera: Eficiencia energética en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía

2. INTRODUCCIÓN

Ecuador se destaca a nivel mundial por su producción de cacao, siendo reconocido principalmente por dos variedades: el Cacao Nacional y el cacao Colección Castro Naranjal-51, considerados un símbolo del país, sobresale por su perfil sensorial, caracterizado por fragancias y notas frutales que han sido altamente valoradas en el mercado internacional. Esta especie de cacao, aporta aproximadamente el 12% de la producción mundial, y Ecuador aporta el 63% de este total, lo que lo posiciona como el principal productor global [2].

El cacao CCN-51 es un clon desarrollado en Ecuador en el año 1965 por el agrónomo Homero Castro Zurita. Esta variedad se distingue por su elevada productividad y su resistencia a enfermedades, lo que lo diferencia del Cacao Nacional, especialmente en términos de rendimiento y enfoque comercial. En el comercio exterior, el CCN-51 representa el 80% de las exportaciones ecuatorianas de cacao, mientras que el Cacao Nacional contribuye con el 20%, considerando así su importancia en la industria cacaotera del país [2].

De acuerdo con el Boletín Analítico de Comercio Exterior, en el año 2024, el cacao ecuatoriano alcanzó un récord en su valor exportado. Durante el segundo trimestre del mismo año, el precio del cacao experimentó un incremento del 78.1%, consecuencia de condiciones climáticas adversas que afectaron la oferta global. En términos internacionales, las exportaciones registraron un aumento del 228.1% impulsado principalmente por el incremento en el valor unitario y, en menor medida, por el crecimiento en el volumen exportado. Entre los principales mercados que contribuyeron a este crecimiento se encuentran, Alemania, Bélgica, Estonia y Corea del Sur, países que reflejaron un incremento significativo en la demanda de cacao ecuatoriano [3].

Dada la importancia de este producto para la economía del Ecuador, el presente trabajo busca analizar el proceso de secado del cacao CCN-51 bajo diferentes regímenes de temperatura, con el objetivo de caracterizar su cinética de secado y determinar el modelo matemático que mejor represente su comportamiento. El estudio se llevó a cabo en el Cantón La Maná, donde se evaluó la relación entre la temperatura y la pérdida de humedad en el proceso de secado. Para el análisis de la cinética de secado, se emplearon once modelos matemáticos con la finalidad de determinar cuál de ellos se ajusta mejor a los datos obtenidos, permitiendo seleccionar el modelo más representativo del proceso de secado bajo las condiciones establecidas.

2.1.SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

A pesar de la importancia del proceso de secado del cacao CCN-51, existe un desconocimiento sobre las curvas de cinética de secado cuando se aplica un régimen de temperatura controlada entre 60 y 70 °C. Esta falta de información dificulta la comprensión del comportamiento de la pérdida de humedad durante el proceso, ya que no se dispone de modelos matemáticos ajustados que lo describan con precisión bajo estas condiciones [4].

El estudio de la cinética de secado permitirá la generación de curvas representativas que establezcan la relación de la pérdida de humedad en función de la temperatura y el tiempo de secado. Por lo tanto, resulta necesario examinar la variación del contenido de humedad en función del tiempo, con el propósito de obtener modelos que caractericen con exactitud el comportamiento del secado del cacao CCN-51.

2.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

Incidencia de la aplicación de un régimen controlado de temperatura entre 60 y 70 °C en la validación de modelos matemáticos para la cinética de secado del cacao CCN-51 en almendras de 3 tamaños en el cantón La Maná.

2.3.OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN:

2.3.1. Objeto de investigación:

Proceso secado de las almendras de cacao CCN-51 en el cantón La Maná.

2.3.2. Campo de acción:

3313.99 Otros - Cinética de secado

2.4. BENEFICIARIOS

- El propósito central de esta investigación es comprender el proceso de secado del cacao en el Cantón La Maná, con el fin de ajustar las curvas de pérdida de humedad de las almendras de cacao CCN-51 para un mejor manejo del proceso de secado de los productores locales interesados, contribuyendo a la ejecución del proyecto de investigación académico científico “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”, que es desarrollado por el grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, por lo que se establece los siguientes beneficiarios:

2.4.1. Directo:

- Proyecto: Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación.
- Productores locales de cacao en el Cantón La Maná.

2.4.2. Indirecto:

- **Industria cacaotera y chocolatera:** Aproximadamente 15 empresas del sector.
- **Consumidores finales:** Se estima que el 30% de la población podría beneficiarse.

2.5. JUSTIFICACIÓN

El “Análisis de cinética del secado de cacao colección Castro Naranjal 51 para un régimen de temperatura controlado en un rango de 60, 65 y 70 °C”, en el cantón La Maná, constituye una parte fundamental en los procesos de secado, además de que permite aplicar conocimientos de transferencia de calor y pérdida de masa ajustados o modelados en base a los modelos matemáticos de ajuste de curva [3].

El presente estudio busca brindar conocimiento de los procesos de secado, para así determinar, la diferencia en el uso de los diferentes modelos matemáticos regidos al análisis de pérdida de humedad en condiciones artificiales de secado, aplicando las ecuaciones de conservación de masa seca y pérdida de humedad de acuerdo con un tiempo específico [5].

La presente investigación busca analizar los datos experimentales de pérdida de humedad en las almendras de cacao, así como el uso de metodologías experimentales de ajuste como Page, Henderson Modificado, Midili, Newton, Etc. Que se ajustan de acuerdo con coeficientes estadísticos como el coeficiente de bondad de ajuste R^2 [6].

2.6.OBJETIVOS

2.6.1. General

Identificar los modelos matemáticos de ajuste de curva a través del estudio del contenido de humedad final en relación con el tiempo y la temperatura, bajo condiciones de secado controlado, aplicado a la cinética de secado de cacao CCN-51.

2.6.2. Específicos

- Establecer los fundamentos teóricos de los métodos de secado y los ajustes de curva asociados al proceso de secado del cacao COLECCIÓN CASTRO NARANJAL-51

- Clasificar las semillas de cacao mediante una metodología basada en el régimen de tamaño y la masa de la almendra.
- Elaborar la curva de cinética de secado de las almendras de cacao a partir de los datos de pérdida de masa y humedad, obtenidos mediante el analizador de humedad (Moisture Analyzer Ruishan), en regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.
- Determinar el modelo matemático de secado que presente la mejor bondad de ajuste a la curva de humedad experimental en función del tiempo bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C, considerando el diámetro equivalente.

2.6.3. Sistema de tareas

Tabla 2.1. Objetivos de sistema de tareas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES (TAREAS)	RESULTADOS ESPERADOS	TÉCNICAS, MEDIOS E INSTRUMENTOS
Establecer los fundamentos teóricos de los métodos de secado y los ajustes de curva asociados al proceso de secado del cacao COLECCIÓN CASTRO NARANJAL-51.	Búsqueda exhaustiva de bibliografía y recursos necesarios.	Fundamentación teórica clara y detallada sobre los métodos de secado y su relación con los modelos de ajuste de curva.	Investigación documental.
	Identificación de las variables clave en el proceso de secado.	Establecimiento de similitudes en los procesos de secado	Artículos, tesis y revistas especializadas en el tema.
Clasificar las semillas de cacao mediante una metodología basada en el tamaño y la masa de la almendra.	Obtención de los equipos necesarios para medir el tamaño de las almendras de cacao.	Optimización de tiempos y recursos. Fiabilidad en las medidas	Observación. Calibrador pie de rey.
	Medición del tamaño y masa de las almendras de cacao para su clasificación.	Clasificación de almendras en grupos de pequeñas, medianas y grandes.	Observación. Balanza de precisión.
Elaborar la curva de cinética de secado de las almendras de cacao a partir de los datos de pérdida de Masa y humedad, obtenidos mediante el analizador de humedad (Moisture Analyzer Ruishan), en regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.	Recolección de datos de pérdida de masa y humedad en almendras de cacao a diferentes temperaturas.	Validación de la precisión de los datos obtenidos	Observación. Software de hoja de cálculo.
	Representación gráfica de la cinética de secado en función del tiempo y la temperatura.	Curvas de cinética de secado que describan el comportamiento del proceso en cada temperatura.	Registro de masa y humedad en distintos tiempos.
Determinar el modelo de secado que mejor se ajuste a la curva de humedad experimental en función del tiempo bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.	Ajuste de diferentes modelos matemáticos a los datos obtenidos.	Descarte de Modelos matemáticos.	Análisis de datos y procesamiento de datos Software de hoja de cálculo.
	Identificación del modelo que mejor se ajuste a la cinética de secado.	Generación de datos clave para el desarrollo de modelos de cinética de secado.	Software de hoja de cálculo.

3. FUNDAMENTACION TEORICA

3.1.ANTECEDENTES

Diversas investigaciones han abordado el estudio del proceso de secado del cacao en Ecuador, con el propósito de analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones y regímenes de temperatura. Estos estudios han permitido establecer una base teórica para comprender la influencia de variables como la temperatura y el tiempo en la cinética de secado del cacao producido en nuestro país.

La variedad CCN-51, ampliamente cultivada en el país, ha sido objeto de investigación debido a su alta productividad y resistencia. En este contexto, se han llevado a cabo estudios para evaluar la influencia de la temperatura y el tiempo de secado en la eliminación de la humedad del grano, lo que permite establecer modelos matemáticos que describan este proceso con mayor precisión [7].

El presente estudio se realizó en el cantón La Maná y tuvo como objetivo analizar la cinética de secado del cacao CCN-51 bajo temperaturas controladas de 60, 65 y 70°C. La información obtenida contribuirá a la caracterización del proceso de secado de esta variedad, proporcionando datos relevantes para futuras investigaciones.

El estudio de la cinética de secado del cacao ha sido objeto de diversas investigaciones con el propósito de comprender el comportamiento de la pérdida de humedad bajo diferentes condiciones térmicas y desarrollar modelos matemáticos que describan este proceso. La temperatura de secado se ha identificado como un factor determinante en la velocidad de deshidratación del grano, lo que ha motivado la aplicación de distintos enfoques metodológicos para analizar su influencia [8].

En esta línea, Medina Ramírez y Ortiz Lozano llevaron a cabo un estudio en la Universidad Surcolombia con el objeto de evaluar la cinética de secado del cacao a temperaturas de 40, 50 y 60°C. En su investigación, se determinan las curvas de secado mediante la aplicación de diversos modelos matemáticos, lo que permitió describir la relación entre el contenido de humedad y el tiempo de exposición al calor. Sus hallazgos resaltan la importancia de seleccionar un régimen de temperatura adecuado para optimizar el proceso de secado y garantizar la estabilidad del producto final [8].

Asimismo, Vargas realizó un estudio en la Universidad de Costa Rica, en el cual analizó el proceso de secado del cacao en combinación con el equilibrio higroscópico y la torrefacción.

A través de este trabajo, se evaluó la influencia de distintas condiciones ambientales y térmicas sobre la deshidratación del grano, estableciendo correlaciones entre la humedad residual y la temperatura aplicada durante el proceso [9].

En un estudio realizado en la Universidad Técnica de Cotopaxi, Chiguano Cuchiparte y Chimarro Tatillo analizaron la cinética de secado del cacao ecuatoriano, comparando las variedades Nacional y CCN-51 bajo distintas temperaturas. La investigación permitió determinar las curvas de secado y ajustar modelos matemáticos para describir el comportamiento de la humedad en función del tiempo [10].

Por otro lado, el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) ha desarrollado estudios sobre el secado del cacao, con énfasis en la reducción del contenido de humedad de las almendras hasta un 6 - 7%, con el propósito de garantizar la conservación del producto y prevenir deterioros microbiológicos [11].

El estudio de Carguachi Caizatoa analiza la cinética de secado del cacao en función de la temperatura, proporcionando información relevante sobre la relación entre el contenido de humedad y el tiempo de secado. En esta investigación, se evaluaron diferentes condiciones térmicas para determinar el comportamiento de la pérdida de humedad en las almendras de cacao. Los resultados obtenidos aportan datos significativos sobre la aplicación de modelos matemáticos para describir con precisión la cinética de secado y optimizar las condiciones del proceso en función de la temperatura utilizada [4].

Al destacarse la importancia del análisis de la cinética de secado bajo regímenes de temperatura controladas, mediante la aplicación de diversos modelos matemáticos; en el presente proyecto se presenta la importancia de seleccionar un régimen de temperatura de 60 a 70°C, además de analizar la incidencia de los factores climáticos del cantón La Maná en condiciones de secado artificiales, ya que al no tener observaciones que destaquen el énfasis de los 11 modelos matemáticos se infiere que la presente investigación tiene un aporte y relevancia para el entendimiento de la mecánica de secado de las almendras CCN-51.

3.1.1. Hipótesis

Existe incidencia del régimen de temperatura controlado entre 60 y 70°C en el tiempo de secado y la pérdida de humedad de las almendras de diferente diámetro equivalente, para la validación

modelos matemáticos de secado que describan dicho comportamiento en almendras de cacao CCN-51.

3.2.ORIGEN DEL CACAO CCN-51

De acuerdo con Barrionuevo [12] se le atribuye el origen del cacao a las estribaciones andinas, las cuales se encuentran en la cuenca del Amazonas, desde donde se extendió de manera natural hacia el resto del continente. En el año 1965 fue creado un clon del cacao, el cual utilizó una doble hidratación de las especies genéticas, conocido como CCN-51, que tiene un potencial mucho mayor en cuanto a rendimiento y alta resistencia a los hongos generalizados.

Habitualmente se ha sostenido que el punto de origen del cacao se encontraba en Mesoamérica entre México, Guatemala y Honduras, donde su uso y domesticación está atestiguado alrededor de 2,000 años antes de Cristo. No obstante, estudios recientes demuestran que por lo menos una variedad de *Theobroma Cacao* tiene su punto de origen en la Alta Amazonía y que ha sido utilizada dentro de la región hace más de 5000 años [12].

En Ecuador, la cultura cacaotera tiene una gran antigüedad, se conoce, que incluso en la llegada de los españoles en la costa del Pacífico, ya se avistaban árboles de cacao de gran tamaño, demostrando que existía el conocimiento acerca del uso de esta especie, de manera principal en la región costera (Ver Figura. 3.1). En el Ecuador actual se cultivan algunos tipos de cacao, pero la variedad conocida como Nacional es la más buscada entre los fabricantes de chocolate, esto debido a la calidad de sus granos y la finura de su aroma. Sin embargo, la llegada de enfermedades severas como la monoliosis o la escoba de bruja, hace unos 100 años, engendró la introducción masiva de cacao extranjero, proveniente particularmente de Venezuela [13].



Figura. 3.1. Imagen Referencial de Árboles de Cacao[14].

Mediante un proceso de fermentación correcto, el cacao CCN-51 puede desarrollar cualidades que lo proveen de una calidad extraordinaria y solo requieren de un correcto proceso de fermentación. Los principales males o enfermedades que puede tener el cacao son: la escoba de

bruja y Mal del Machete, por lo que esta variación en la genética del cacao permite una mayor resistencia ante este tipo de enfermedades que puede terminar completamente con la cosecha. A continuación, se presenta la Tabla 3.1. con la clasificación taxonómica del cacao.[15]

Tabla 3.1. Clasificación Taxonómica del Cacao [12]

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL CACAO	
TAXONOMIA	CARACTERÍSTICA
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Malvales
Familia	Esterciliaceae
Género	Theobroma
Especie	Theobroma cacao

3.3.CACAO CCN-51

El cacao CCN-51 es una variación que tiene la capacidad de resistir más a enfermedades que puedan afectar el producto final del grano y de alto rendimiento, el cual es cultivado para la producción comercial del chocolate. En las distintas áreas afectadas por la enfermedad conocida como escoba de bruja, se confía en que estas propiedades que presenta el cacao puedan asegurar una operación estable y sostenible. Sin embargo, existen expertos de la industria que pretenden que exista la producción de cacao de un solo tipo, sin variaciones ni modificaciones genéticas [7].



Figura. 3.2:Cacao CCN-51 [16].

Hoy en día, muchos productos comerciales a base de chocolate contienen CCN-51 en diversos grados. El informe USDA. (USDA, abreviado en inglés) de 2015 menciona que el 36% de la producción de cacao del país en ese momento era CCN-51, por lo tanto, se ha conseguido a través de las décadas un crecimiento en la inclusión en los productos de consumo frecuente [17].

El cacao CCN-51 se distingue por sus mazorcas, las cuales presentan un tono morado cuando están en su etapa temprana y adquieren una coloración rojiza al madurar. Esta variedad es reconocida por su resistencia a diversas enfermedades.

Cada mazorca tiene entre 20 y 50 almendras, las cuales están adheridas a un eje central conocido como placeta. Durante su desarrollo, la planta puede alcanzar una altura de entre 5 y 8 metros, dependiendo del nivel de sombra en el área de cultivo [6].

3.4. CARACTERÍSTICAS DEL CACAO CCN-51

3.4.1. Origen y desarrollo del CCN-51

El cacao CCN-51 (Colección Castro Naranjal) fue desarrollado en Ecuador en el año 1965 por el agrónomo Homero Castro Zurita, con el objetivo de obtener una variedad con mayor resistencia a enfermedades y mayor productividad en comparación con los cacaos tradicionales. Este híbrido es producto del cruce de diferentes variedades, combinando características de alto rendimiento y adaptación a diversas condiciones climáticas [2].



Figura. 3.3: Plántula de cacao CCN-51 [18]

3.4.2. Características del fruto y almendras

Las mazorcas del CCN-51 presentan una evolución cromática, mostrando un color morado durante su estado tierno y rojizo al alcanzar la madurez. Cada mazorca tiene entre 20 y 50 almendras, las cuales son de tamaño uniforme y poseen un índice de grano intermedio, lo que facilita su procesamiento y comercialización [19].



Figura. 3.4 Mazorca del CCN-51 [20]

3.4.3. Resistencia a enfermedades

Una de las principales ventajas del CCN-51 es su tolerancia a enfermedades que afectan al cacao, como la monilla y la escoba de bruja, dos de las afectaciones más perjudiciales en las plantaciones cacaoteras. Gracias a esta resistencia, se reducen las pérdidas en la producción, garantizando una cosecha más estable y sostenible en el tiempo [21].



Figura. 3.5: Escoba de bruja [22].



Figura. 3.6: Monilla [20].

3.4.4. Alto rendimiento

El CCN-51 es ampliamente reconocido por su alta productividad, alcanzando rendimientos de hasta 50 quintales por hectárea, una cifra significativamente superior a la de otras variedades de cacao. Esta característica ha impulsado su adopción entre los productores, quienes buscan mejorar la rentabilidad de sus cultivos sin comprometer la calidad del grano [23].

3.5. CINÉTICA DE SECADO

El estudio de la cinética de secado en el cacao es fundamental para comprender la dinámica de la pérdida de humedad en los granos durante el proceso de secado. La aplicación de modelos matemáticos permite describir la variación de la humedad en función del tiempo, la reducción de humedad en los granos de cacao es un factor clave, ya que influye en la velocidad del proceso de secado [24]. Diversos estudios han abordado el modelo matemático del secado del cacao para evaluar la forma en que distintos factores afectan la velocidad del proceso. Pauzhi analizó treinta ecuaciones matemáticas con el objetivo de determinar cuál se ajusta mejor a la cinética de secado del grano de cacao. Utilizó coeficientes de determinación y errores cuadráticos medios como criterios de evaluación para seleccionar los modelos más representativos del comportamiento de secado [24]. Siendo el modelo de Two-term Model el que mejor se ajusta a las condiciones de modelamiento bajo sensores controlados por Arduino, en la provincia de Loja, cantón “El Valle”.

La temperatura juega un papel determinante en la cinética de secado del cacao. Investigaciones previas han demostrado que un incremento en la temperatura de secado puede reducir significativamente el tiempo necesario para alcanzar niveles adecuados de humedad. Un estudio realizado por Vargas evaluó el secado de granos de cacao a temperaturas de 35, 45, 55, 65 y 75 °C, desarrollando un modelo matemático para representar la cinética de secado y la pérdida de masa durante el proceso [9].

La aplicación de modelos matemáticos en el secado del cacao permite establecer condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso, facilitando la descripción de la variación del contenido de humedad en función del tiempo y proporcionando herramientas para mejorar su comprensión [24].

3.6.MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos desempeñan un papel fundamental en la comprensión y predicción del comportamiento del secado del cacao. El análisis de la cinética de secado en función de la temperatura permite determinar las variables clave que intervienen en el proceso. Un estudio realizado en condiciones controladas evaluó la influencia de la temperatura en la cinética de cacao, obteniendo ecuaciones matemáticas que describen la relación entre la humedad y el tiempo de secado. Este enfoque experimental y teórico proporciona información valiosa para ajustar las condiciones de secado [25].

3.6.1. Modelo matemático de Newton

El modelo matemático de Newton, también conocido como modelo de Lewis, es uno de los más simples y ampliamente utilizados para describir la cinética de secado en materiales como alimentos, biomateriales y productos agrícolas. Este modelo asume que la tasa de secado es proporcional a la diferencia entre la humedad actual del material y la humedad de equilibrio, describiendo la transferencia de humedad de manera análoga al flujo de calor desde un cuerpo sumergido en un fluido frío. Aunque su simplicidad facilita su aplicación, es más adecuado para materiales con baja resistencia interna a la transferencia de humedad [26].

3.6.2. Modelo matemático de Page

El modelo de Page es una extensión del modelo de Newton que introduce un exponente adicional para mejorar la precisión en la predicción de la cinética de secado. Este modelo es ampliamente utilizado en la ingeniería de alimentos y proceso agrícolas debido a su capacidad

para describir con mayor exactitud la disminución de la humedad en materiales biológicos durante el secado [27].

3.6.3. Modelo matemático de Henderson

El modelo matemático de Henderson es una herramienta ampliamente utilizada para describir la cinética de secado en materiales agrícolas. Este modelo es especialmente útil para materiales que no siguen una cinética de secado estrictamente exponencial útil y ha sido aplicado en diversos estudios para optimizar proceso de secado en la industria alimentaria [26].

3.6.4. Modelo matemático Logarítmico

Este modelo ha demostrado ser eficaz en la representación de proceso de secado en diversos productos agrícolas, proporcionando una mejor comprensión y control del proceso, este modelo matemático se emplea para describir la cinética de secado en materiales como alimentos, biomateriales y productos agrícolas [28].

3.6.5. Modelo matemático de Midili

El modelo matemático de Midili se ha consolidado como una de las opciones más precisas para analizar la cinética de secado en productos agrícolas y biomateriales. A diferencia de otros enfoques más simples, este modelo integra términos lineales y exponenciales, permitiendo representar con mayor exactitud la variación de humedad en función del tiempo. Su versatilidad radica en la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones experimentales, considerando factores que influyen en la transferencia de humedad dentro del material. Gracias a su mayor precisión, el modelo de Midili es ampliamente utilizado en estudios sobre la optimización del secado [24]

3.6.6. Modelo matemático de Dos Términos

El modelo matemático de dos términos es una de las metodologías utilizadas para describir con mayor precisión la cinética de secado en diversos materiales, incluidos productos agrícolas y alimentarios. A diferencia de modelos más simples, este enfoque incorpora dos componentes exponenciales que permiten representar de manera más detallada los mecanismos de transferencia de humedad que ocurren simultáneamente durante el secado. Su uso es especialmente relevante en materiales donde la resistencia interna a la difusión de la humedad no puede ser despreciada. No obstante, para su correcta aplicación, es necesario disponer de una cantidad suficiente de datos experimentales que permitan ajustar los parámetros del modelo con precisión [29].

3.6.7. Modelo matemático de Henderson Modificado

El modelo matemático de Henderson modificado es una extensión del modelo original de Henderson, diseñado para describir con mayor precisión la cinética de secado en materiales como alimentos, biomateriales y productos agrícolas. Este modelo introduce términos adicionales para considerar factores que afectan la tasa de secado, proporcionando una representación más detallada del proceso. Aunque su aplicación es más compleja que la del modelo de Newton, ofrece una mejor adaptación a materiales con resistencia interna significativa a la transferencia de humedad. Para una implementación efectiva, es esencial contar con datos experimentales precisos que permitan ajustar adecuadamente los parámetros del modelo [28].

3.6.8. Modelo matemático de Verma

El modelo matemático de Verma es una variante del modelo de Henderson que incorpora términos adicionales para mejorar la precisión en la descripción de la cinética de secado de productos agrícolas y alimenticios. A diferencia de modelos más simples, este considera tanto la difusión interna como la evaporación superficial, lo que permite una representación más realista del proceso de pérdida de humedad en materiales con resistencia interna significativa, u aplicación requiere datos experimentales detallados que permitan el ajuste preciso de sus parámetros, lo que lo hace más adecuado para estudios donde la heterogeneidad del material influye en la velocidad de secado. Aunque su implementación es más compleja, proporciona mejores resultados en comparación con modelos de primer orden, siendo especialmente útil en la optimización de procesos industriales de secado [27].

3.6.9. Modelo matemático de Dos Términos Exponenciales

El modelo matemático de dos términos exponenciales es utilizado para describir la cinética de secado en diversos materiales, incluyendo productos agrícolas y biomateriales. A diferencia de modelos más simples, este enfoque considera que el proceso de secado se compone de dos mecanismos simultáneos, cada uno representado por un término exponencial distinto, el modelo logra describir con mayor precisión materiales en los que la eliminación de humedad ocurre en diferentes fases, reflejando la variabilidad en la resistencia interna a la transferencia de agua. Aunque su aplicación requiere la determinación de múltiples parámetros, su capacidad para representar con mayor exactitud los procesos de secado lo hace una opción preferida en estudios avanzados de transferencia de masa en sólidos porosos [30].

3.6.10. Modelo matemático de Aproximado a la Difusión

El modelo matemático de Aproximación a la Difusión se basa en la segunda ley de Fick y es utilizado para describir el comportamiento de la humedad en materiales como alimentos y biomateriales durante el secado. A diferencia de modelos más simples, este enfoque considera la transferencia de humedad dentro del sólido como el principal mecanismo de control del proceso. Para ello, incorpora factores como la geometría del material y las condiciones de frontera, lo que permite una descripción más detallada de la evolución de la humedad en función del tiempo y el espacio, una de sus principales ventajas es que proporciona una representación más precisa de la cinética de secado en comparación con modelos empíricos. Sin embargo, su aplicación requiere la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, lo que implica un mayor esfuerzo computacional. Además, para una correcta implementación, es necesario conocer parámetros específicos del material, como la difusividad efectiva de la humedad, lo que puede representar un desafío en estudios experimentales [31].

3.6.11. Modelo matemático de Wang Singh

El modelo matemático de Wang Singh es una herramienta empleada para describir la cinética de secado en materiales como alimentos, biomateriales y productos agrícolas. Este modelo se basa en una ecuación polinómica de segundo grado que relaciona la humedad relativa con el tiempo de secado, permitiendo capturar de manera más precisa las variaciones en la tasa de secado a lo largo del tiempo, especialmente en etapas donde la velocidad de secado no es constante, una ventaja notable del modelo de Wang Singh es su capacidad para ajustarse a datos experimentales de secado sin requerir una comprensión detallada de los mecanismos internos de transferencia de masa. Sin embargo, debido a su naturaleza empírica, los coeficientes obtenidos son específicos para cada material y condiciones de secado, lo que limita su generalización a otros contextos sin una recalibración adecuada [26].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO

Para el desarrollo del proyecto de investigación se opta por el uso del cacao mejorado CCN-51, ya que de acuerdo con el “Informe de resultados de comercio exterior” del primer trimestre del 2023 generado por el Banco Central, constituye el tercer producto tradicional de mayor exportación en el país.

Además, tomando en cuenta la poca información de los métodos matemáticos aplicados al secado de almendras de cacao, se procede a evaluar las características físicas y mecánicas de la

pérdida de humedad del mismo, y se categoriza de acuerdo a una medida de diámetro equivalente medida en mm mediante un calibrador pie de rey, que nos ayuda a clasificar las almendras en una serie de intervalos de tamaños adecuados para su secado, siendo así, Pequeñas(16 a 17,99 mm); Medianas (18 a 19,99 mm) y Grandes (20 a 21,99mm) esto con el afán de determinar un tiempo de secado relacionado con la forma y tamaño de las almendras a un régimen de temperatura controlado de 60, 65 y 70°C.

Para el secado de las almendras se utiliza un analizador de humedad (MOISTURE ANALIZER - RUIZHAN), que inicia con una masa de 40 gr por muestra en cada máquina a modo de réplica, que, mediante la generación de un régimen de temperatura controlado de 60, 65 y 70°C. en la práctica; analiza la pérdida de humedad cada 5 minutos, Brindando así una tabla de datos de pérdida de humedad a través del tiempo, realizando una pesada por medio de una balanza de precisión al interior del analizador. A continuación, se toma los datos de humedad, masa perdida y porcentaje de humedad de cada intervalo de tiempo de 5 minutos, formando así una curva cinética de pérdida de humedad en el secado de almendras de cacao bajo un régimen controlado de 60, 65 y 70°C; Posteriormente y mediante un analizador de humedad se procede a medir el contenido de humedad final de cada muestra de la maquina 1 y 2, para establecer un sistema de datos al terminar la práctica y 10 minutos después.

La curva descrita por la pérdida de humedad de las almendras de cacao CCN-51, nos sirve para aplicar la metodología que consiste en calcular parámetros de pérdida de humedad a través del tiempo bajo un régimen de temperatura controlado de 60, 65 y 70°C, tales como; el porcentaje de humedad de las almendras de cacao cada 5 minutos; la humedad al inicio de la práctica es decir de 40 gr; humedad final siendo está el pesaje final después de haber logrado una convergencia en la humedad total del cacao; la masa perdida en gramos por cada intervalo de tiempo es decir cada 5 minutos, lo que nos ayudara a determinar la tasa de secado en función de tiempo y diámetro equivalente. A continuación, se calcula la masa de agua contenida por cada 5 minutos, con el fin de demostrar el porcentaje de agua restante antes de lograr la masa seca, y determinar el nivel de agua perdido al final del experimento; Al determinar el nivel de agua perdido al final de experimento se procede a restarlo de la masa total pesada al inicio de la práctica con el finde determinar el contenido de masa seca final de la práctica.

Con el fin de determinar el nivel de humedad obtenido en cada muestra de manera más general se calcula el modelo experimental basándonos en la humedad inicial en cualquier punto, y la humedad inicial y final de la práctica por cada régimen de temperatura controlado de 60, 65 y 70°C; describiendo así una curva de cinética de secado más general de acuerdo con el contenido

de humedad de la muestra y el contenido de masa seca: a continuación, se examina cada uno de los 11 modelos matemáticos investigados y asociados a la pérdida de humedad en granos.

Para determinar el modelo matemático de mejor ajuste a la curva trazada por el modelo experimental calculado gracias a las pérdidas de humedad; se procede al cálculo y ajuste del error; Para ello se toma los valores que describen una curva cinética trazada por el modelo experimental y el modelo matemático, aplicando la diferencia del cuadrado de la humedad experimental y la humedad del modelo matemático que se quiera comparar en cada dato de humedad por cada 5 minutos, con el fin de determinar el error entre la curva trazada por el cálculo del modelo experimental y el cálculo del modelo matemático; por consiguiente y para un ajuste de las curvas cinéticas se calcula la suma de los cuadrados de los errores con ayuda de la herramienta de Excel Solver, que disminuirá el valor de la suma de cuadrados de los errores. Otro parámetro a tener en cuenta para un mejor ajuste es la Bondad de Ajuste de R²; que se utiliza para determinar el mejor ajuste de curva cinética en relación al modelo experimental y a los modelos matemáticos; para ello se calcula la suma de cuadrados totales, sumando cada uno de los errores en cada intervalo de 5 minutos; posteriormente y aplicando la bondad de ajuste de R² se determina el valor de los modelos matemáticos que nos brinde un valor más cercano a 1. Este valor demarca que tan efectivo es cada uno de los modelos matemáticos en el ajuste de la curva cinética trazada por el proceso de secado de almendras de cacao en los regímenes de temperatura controlada de 60, 65 y 70°C.

Para determinar el tiempo óptimo de secado en los regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C se toma en cuenta el tiempo en alcanzar el contenido mínimo de humedad de las almendras de cacao apto para el consumo siendo este del 7%.

4.1. METODOLOGIA.

4.1.1. Metodología experimental

La metodología experimental de una investigación cubre gran parte de las etapas del método científico, ya que, tras la definición de los objetivos, se debe definir las variables del estudio, Una vez definidas las variables, es fundamental establecer el proceso de medición de las mismas y posteriormente el cómo serán analizadas. Una vez determinada la forma en la que se llevará a cabo la toma de datos experimentales, y el análisis de las variables, se debe pasar a la implementación de la metodología propuesta; esta fase posterior al diseño experimental se divide en:

- Pregunta de investigación/problema

- Documentación previa/antecedentes
- Hipótesis (opcional).
- Ejecución experimental u obtención de datos.
- Procesamiento y filtrado de los datos obtenidos
- Interpretación y análisis de datos.
- Difusión y divulgación.

4.2.VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA.

Medina y Ortíz señalan que, en la medida de lo posible, el secado debe realizarse utilizando la luz solar, ya que constituyen la fuente de calor más económica y adecuada. En caso de recurrir a un método de secado artificial, es esencial regular la temperatura para evitar que supere los 60°C. Asimismo, el proceso debe ejecutarse de manera progresiva y a bajas temperaturas [32]

La Tabla 4.1. presenta la relación entre las variables dependientes e independientes. En ella se identifica la temperatura como la variable independiente, con valores específicos de 60, 65 y 70°C, mientras que el tiempo máximo de secado se considera la variable dependiente. Esto sugiere que la temperatura y diámetro equivalente, influye directamente en el tiempo máximo de secado y humedad final.

Tabla 4.1. Variable Dependiente e Independiente.

VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE
Temperatura (60-65-70°C)	Tiempo máximo de secado
Diámetro Equivalente	Contenido de humedad final

4.3. CLASIFICACIÓN POR DIAMETRO EQUIVALENTE

Según Bowen la variabilidad en el tamaño y la morfología de los frutos está determinada por factores genéticos, las condiciones ambientales en las que se desarrolla el árbol y las prácticas de manejo implementadas en la plantación [33].

La Tabla 4.2 presenta las variables relacionadas con el proceso de secado de las almendras de cacao estableciendo una clasificación según su diámetro equivalente. Se identifican tres categorías de tamaño. Esta clasificación permite diferenciar las almendras según su tamaño, lo que resulta fundamental para determinar los parámetros óptimos de secado, dicho proceso es descrito en el Anexo.1.

Tabla 4.2. Variables del proceso de secado

DIAMETRO EQUIVALENTE DE LA ALMENDRA DE CACAO	TAMAÑO DE LA ALMENDRA DE CACAO
16 a 17.99mm	Almendra pequeña
18 a 19.99mm	Almendra mediana
20 a 21.99mm	Almendra grande

4.4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS DE CINÉTICA DE SECADO DE CACAO, Y AJUSTE DE CURVAS

El siguiente diagrama describe los pasos a seguir para la elaboración y justificación del proyecto, así como cada uno de los motivos de análisis siendo de entrada manual o de proceso.

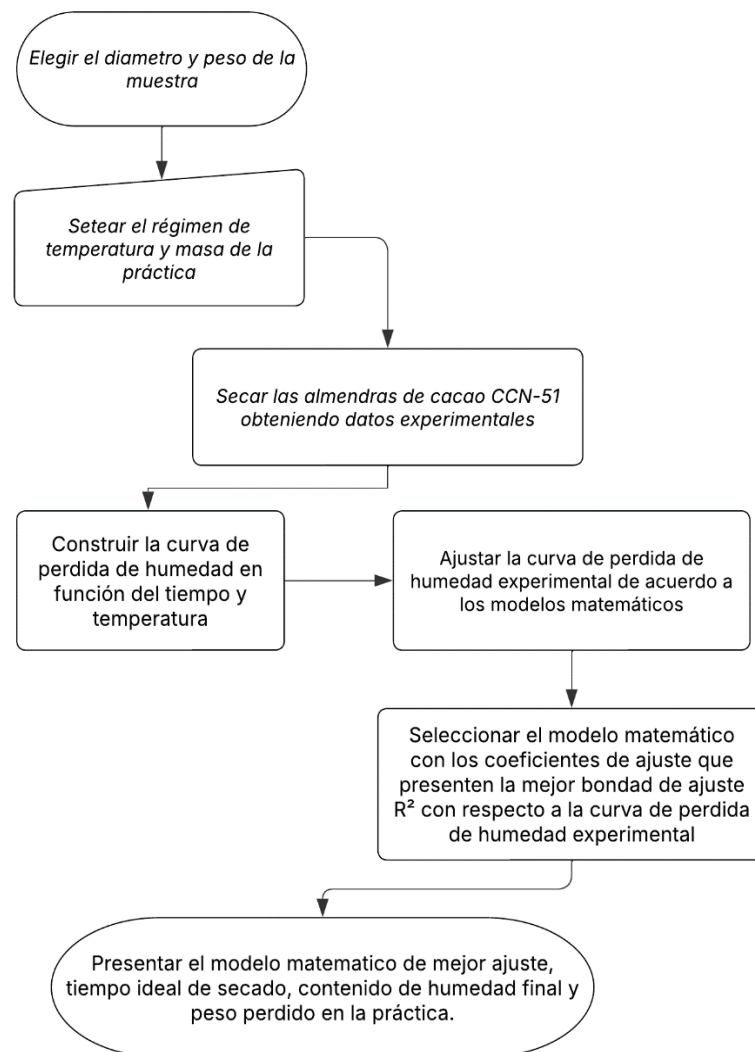


Figura. 4.1. Diagrama de Flujo del Análisis de cinética de secado de cacao, y ajuste de curvas.

4.5.MATERIALES DE MEDICIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS.

4.5.1. Calibrador pie de rey

En la medición de almendras de cacao CCN-51, se utilizó un calibrador pie de rey, el mismo que permite determinar de manera precisa las dimensiones de largo, ancho y espesor de las almendras, facilitando así el análisis de la variabilidad de las dimensiones para posteriormente calcular el diámetro equivalente.

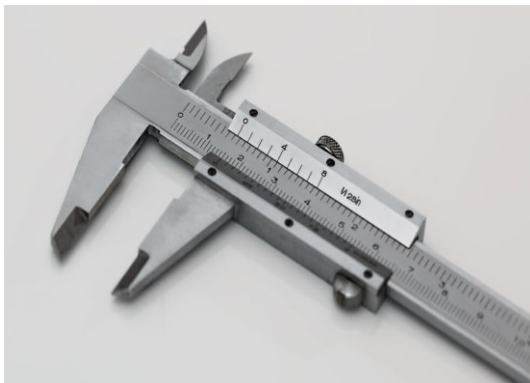


Figura. 4.2 Calibrador pie de rey [34]

4.5.2. Analizador de humedad (Moisture Analyzer Ruishan RSSFY SERIES)

El analizador de humedad “Moisture Analyzer Ruishan”, modelo RSSFY series (véase Figura. 4.3), tiene como principal herramienta una lámpara halógena de alta precisión; que permite la obtención de datos precisos en poco tiempo; además, de contar con características representadas en la Tabla 4.3.



Figura. 4.3. Moisture Analyzer Ruishan RSSFY [35].

Tabla 4.3. Características Moisture Analyzer RSSFY series

Características	Descripción
Modelo	RSSFY series
Alimentación	AC 110V
Precisión (Moisture Readibility)	0,02%
Consistencia (Repeatability)	0,2%
Rango temperatura	40 – 180°C
Tiempo de calentamiento	2 – 100 min (ajustable)
Modos de finalización	Automático – Manual – Timing
Rango de humedad	0 – 100 %
Rango de humedad	0 – 100 %

Dicho analizador de humedad será calibrado por cada práctica mediante el proceso descrito en el Anexo.4.

4.5.3. Medidor de humedad de granos AMT -155

El medidor de humedad de granos AMT-155, permite su uso en 17 tipos de granos diferentes; siendo: Arroz japonés, arroz índico, soja, sorghum, colza, mijo, maní, cebada, semillas de girasol, granos de café, granos de cacao, etc, Por lo que para el análisis de contenido de humedad final se usa dicho instrumento para determinar el porcentaje de la práctica, como se observa en el Anexo.6



Figura. 4.4 Medidor de humedad de granos AMT155

4.6.MÉTODOS DE CÁLCULO

4.6.1. Modelos matemáticos.

En la Tabla 4.4. se exponen los modelos matemáticos más importantes relacionados con la cinética de secado de los diferentes granos, leguminosas y procesos de descripción de curva cinética de pérdida de humedad. En ella se establece la relación de la cantidad de humedad en

el tiempo con el contenido de humedad inicial como estado de referencia (MR), como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Modelos matemáticos de ajuste de curva de pérdida de humedad bajo diferentes esquemas de secado [36].

NO	NOMBRE	ECUACIÓN
1	-Newton	$HR_{modelo} = Exp^{-k \cdot t}$
2	-Page	$HR_{modelo} = Exp^{-k \cdot t^n}$
3	-Henderson	$HR_{modelo} = a \cdot exp(-kt)$
4	-Logarítmico	$HR_{modelo} = a \cdot exp(-kt) + b$
5	-Midilli	$HR_{modelo} = a \cdot exp \cdot (-kt^n) + b \cdot t$
6	-Dos términos	$HR_{modelo} = a \cdot exp(kt) + b \cdot exp(-gt)$
7	-Henderson modificado	$HR_{modelo} = a \cdot exp(-kt) + b \cdot exp(-gt) + c \cdot exp(-ht)$
8	-Verma	$HR_{modelo} = a \cdot exp(-kt) + (1 - a) \cdot exp(-gt)$
9	-Dos términos exponenciales	$HR_{modelo} = a \cdot exp(-kt) + (1 - a) \cdot exp(-kat)$
10	-Aproximado a la difusión	$HR_{modelo} = a \cdot exp(-kt) + (1 - a) \cdot exp(-kbt)$
11	-Wang Singh	$HR_{modelo} = 1 + a \cdot t + b^2$

Donde:

HR= humedad del cacao de acuerdo a g/m^3

Exp= número de Euler (adimensional)

K= Constante de ajuste (adimensional)

t= variable de tiempo (s)

n=variable exponente del tiempo para el ajuste de humedad (adimensional)

a, b, c= constantes de ajuste (adimensional)

De los modelos expuestos en la Tabla 4.4. se escogieron los de Page, Midili, Henderson Modificado, ya que se considera el comportamiento exponencial y las constantes que permiten establecer el ajuste de la cantidad de humedad libre en el tiempo con el contenido de humedad inicial como estado de referencia.

4.7.PROCESO DE CÁLCULO

4.7.1. Características de secado de cacao

El estudio se ha realizado para comprender de mejor manera el proceso de secado de las almendras de cacao CCN-51; y de acuerdo con sus especificaciones técnicas y sus características, comprender cuales son los tiempos óptimos de secado, y el modelo matemático de mejor ajuste en función a un nivel de humedad óptimo para el consumo.

Por los cual se ha optado realizar las respectivas pruebas de secado por medio de un analizador de humedad el cual ayudara a simular las temperaturas a las que está sometido por cada prueba tomando en cuenta parámetros como:

- **Temperatura.** _ La temperatura de secado del cacao es muy importante ya que esta definirá el tiempo de secado siendo a mayor temperatura menor tiempo de secado y a menor temperatura un mayor tiempo de secado.
- **Porcentaje de Humedad.** _ El porcentaje de humedad esta dado por la cantidad de agua que contiene el grano al momento en que este se encuentre fresco.
- **Masa.** _ Es la cantidad de producto solido del cacao.
- **Diámetro Equivalente.** – Es el rango de clasificación de almendras para la comparación de tiempos de secado al alcanzar el porcentaje de humedad apto para el consumo.

4.7.2. Condiciones para realizar pruebas experimentales

Dentro de los parámetros a evaluar al realizar la práctica, se toma en cuenta las variables de ajuste y resultado tales como:

Tabla 4.5. Parámetros para evaluar al realizar la práctica

N°	Descripción	Unidades de medida
1	Temperatura de secado	Rango de 60°C-70°C
2	Humedad inicial	Rango de 47%-55%
3	Humedad final	Rango de 4.0%-6,5%
4	Masa perdida en gramos	Rango de 15g – 20g
5	Tolerancia	±0,5gr a 1 gr (2,5%)

El porcentaje de humedad deseado y apto para el consumo está en el 7%

4.7.3. Propiedades del grano de cacao

Los granos de cacao utilizados para las pruebas fueron seleccionados en base a la variedad más exportada y abundante en el ecuador por lo que a continuación se detalla el grano de cacao para realizar las prueba:

Cacao mejorado CCN-51. _ El tamaño de la mazorca es más grande en comparación con el cacao nacional tomando en cuenta que el grano tiene un mayor espesor y la cantidad contenedora por mazorca ha sido a diferencia del nacional mucho más abundante progresivamente.

4.7.3.1.Determinar el diámetro equivalente

Ayuda a determinar el factor de forma de las partículas teniendo en cuenta datos como largo, ancho y espesor, lo mismos datos que se obtendrán de manera manual mediante el uso del

calibrador pie de rey como se muestra en el anexo 1. Y se calcula mediante una hoja de Excel (Véase Anexo.2.), aplicando la ecuación.3.

$$deq = \sqrt[3]{\left(\frac{6}{\pi}\right) \cdot l \cdot a \cdot e} \quad (IV.3.)$$

Donde:

$l =$ largo (mm)

$a =$ ancho (mm)

$e =$ espesor (mm)

4.7.3.2. Determinar el volumen equivalente

Para la prueba se establece la cantidad de 40 g por cada muestra, por lo que el volumen basado en el diámetro equivalente se representa a partir de la siguiente formula:

$$Veq = \frac{\pi}{6} \cdot deq \quad (IV.4)$$

4.7.3.3. Cálculo de masa de agua

El porcentaje de agua perdido durante el proceso es importante ya que el grano de cacao habrá perdido esa Masa en agua; y se representa mediante la ecuación.5

$$M_{h2O} = Mt - Mf \quad (IV.5)$$

Donde:

$M_{h2O} =$ Masa de agua (g)

$Mt =$ Masa total húmeda (g)

$Mf =$ Masa final de la prueba (g)

4.7.3.4. Cálculo de porcentaje de agua restante para lograr la masa seca

La masa completamente seca está en un porcentaje de humedad 0 y se calcula de acuerdo con el Masa y la humedad final del proceso; y se representa mediante la ecuación.6

$$M_{h2Orestante} = \frac{Mf \cdot hf}{100} \quad (IV.6)$$

Donde:

$M_{h2Orestante} =$ Masa de agua restante (g)

$hf =$ Humedad dinal de las pruebas a cualquier regimen de temperatura (%)

$Mf =$ Masa final de la prueba sin inportar el regimen de températura(g)

4.7.3.5. Cálculo de masa seca

La masa seca nos ayudara a calcular el contenido de agua de las variables iniciales e intermedias en base a la masa inicial y la masa de agua contenedora total del grano de cacao; y se representa mediante la ecuación.7

$$Ms = M_f - M_{h2Orestante} \quad (IV.7)$$

Donde:

$Ms = Masa\ seca\ (g)$

$M_f = Masa\ final\ de\ prueba\ (g)$

$M_{h2Orestante} = Masa\ de\ agua\ restante\ en\ la\ prueba\ (g)$

4.7.3.6. Cálculo de porcentaje de humedad

La humedad calculada será obtenida a base a el grano de cacao completamente seco para tomar como referencia un valor 0 para la humedad. Y se representa mediante la ecuación.8

$$\%h = \frac{Ms}{Mc} \cdot 100\% \quad (IV.8)$$

Donde:

$\%h = Porcentaje\ de\ humedad\ (\%)$

$Ms = Masa\ seca\ (g)$

$Mc = Masa\ del\ cacao\ (g)$

4.8. CÁLCULO DE HUMEDAD DEL MODELO EXPERIMENTAL

El cálculo del modelo experimental nos ayudara a determinar el nivel de humedad al que se está realizando la prueba igualándolo al modelo de ajuste de acuerdo a la clasificación por diámetro equivalente y su modelo matemático en relación al régimen de temperatura de los mismos. Se representa mediante la ecuación.9

$$hR_{exp} = \frac{H_{in} - H_f}{H_i - H_f} \quad (IV.9)$$

Donde:

$hR_{exp} = humedad\ experimental.\ (g/mm^3)$

$H_{in} = Humedad\ inicial\ en\ cualquier\ punto\ de\ prueba.\ (g/mm^3)$

$H_i = humedad\ inicial\ (g/mm^3)$

$H_f = Humedad\ final\ (g/mm^3)$

4.9. CÁLCULO DE HUMEDAD EN BASE A LOS MODELOS MATEMATICOS.

Dentro del cálculo de los modelos matemáticos, se procede a crear una base de datos bajo el software “Excel”, en el que se definirán las variables de acuerdo a las celdas del mismo y se aplicara la ecuación que describa cada modelo de regresión lineal, teniendo como ejemplo la aplicación del modelo de Newton como se muestra en la Figura. 4.5. Dicho procedimiento será aplicado a los 11 modelos matemáticos teniendo en cuenta las variables y formando así una base de datos de curva de humedad de acuerdo a los modelos matemáticos.

The image shows an Excel spreadsheet with a formula bar at the top containing the formula $=EXP(-K$4*(C5))$. Below the formula bar is a table with the following data:

Cinetica de secado de cacao Nacional 40°C							Ajuste de variables	
Tiempo	Peso	Humedad	MR (exp)	MR (Modelo)	Error	SCT	K	
0	40,657	55,98564	1	=EXP(-K\$4*(C5))	0	0,575229	PROMEDIO	0,004756042
5	40,19	54,837	0,977978	0,976500311	2,18E-06	0,542309	SCR	0,014294176
10	39,675	53,57031	0,953692	0,953552858	1,95E-08	0,50713	SCT	11,81098262
15	39,218	52,44627	0,932142	0,931144663	9,94E-07	0,476901	R ²	0,998789756
20	38,764	51,32961	0,910733	0,909263053	2,16E-06	0,44779		

Figura. 4.5.Cálculo del modelo matemático de Newton.

4.10. MODELOS DE AJUSTE DE HUMEDAD.

Para determinar las curvas cinéticas de secado de almendras de cacao descritas por el modelo experimental calculado en base a las pérdidas de humedad, se debe comparar con los modelos de mejor ajuste, es decir que presenten un coeficiente de ajuste más cercano a 1, teniendo como resultado el uso de los siguientes modelos.

4.10.1. Modelo de Midili experimental

El segundo modelo para analizar es el de Midili, ya que es el segundo modelo en ajustarse a la curva cinética de humedad del secado de Cacao, siendo particularmente usado para granos clasificados como: Pequeñas, en los regímenes de temperatura de 65 y 70°C, así como en granos clasificados como; Grandes, en el régimen de temperatura de 70°C. se representa mediante la ecuación.10.

$$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt \quad (IV.10)$$

Donde:

MR_{modelo} = humedad ajustada al modelo de midili(g/mm³)

Exp = exponencial o numero de euler (adimensional)

k, n = constante de ajuste (adimensional)

$a, b =$ Constantes de ajuste(adimensional)

$t =$ variabe de tiempo(s)

4.10.2. Modelo de “Henderson Modificado” experimental.

Siendo el tercer modelo por usar; es el modelo de mejor ajuste a la curva cinética de humedad en relación al tiempo; siendo particularmente usado para granos clasificados como grandes en un régimen de temperatura de 60°C, y se representa mediante la ecuación.11

$$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht) \quad (V.11)$$

Donde:

$MR_{modelo} =$ humedad ajustada al modelo de Henderson Modificado((g/mm³)

$Exp =$ exponencial o numero de euler(adimensional)

$k, g, h =$ constante de ajuste (adimensional)

$a, b, c =$ Constantes de ajuste(adimensional)

$t =$ variabe de tiempo(s)

4.11. CÁLCULO Y AJUSTE DEL ERROR DE LAS CURVAS

El ajuste de curvas para determinar el modelo matemático utilizado, se describe mediante el uso de regresiones lineales en base al cálculo del error, suma de cuadrados del error teniendo en cuenta que se debe minimizar la suma de los cuadrados de los errores, para obtener como resultado una suma lo más alejada de la unidad posible. Finalmente se aplica la fórmula de la bondad de ajuste R², para determinar el valor más cercano a 1.

4.11.1. Cálculo del error

Este cálculo de error nos ayudara a determinar el error entre el valor del modelo experimental y el cálculo del modelo de page como se muestra en la siguiente ecuación12.

$$error = (MR_{exp} - MR_{modelo})^2 \quad (IV.12)$$

Donde:

$error =$ diferencia de error (adimensional)

$MR_{exp} =$ Humedad experimental (g/mm³)

$MR_{modelo} =$ humedad del modelo de page((g/mm³)

4.11.2. Suma de cuadrados de error

La suma de cuadrados del error para ajustar la curva de cinética de secado de cacao se determina mediante el ajuste lineal de los valores de K y N mediante “Solver”, en la que se declara las variables y se ajusta mediante la misma extensión, y mediante la ecuación.13, y siguiendo el formato de la Figura. 4.6.

$$SCR = \sum(MR_{exp} - MR_{modelo})^2 \quad (IV.13)$$

Donde:

\sum = sumatoria

SCR = Suma de cuadrados del error. (adimensional)

MR_{exp} = Humedad experimental (g/mm³)

MR_{modelo} = Humedad del modelo de page (g/mm³)

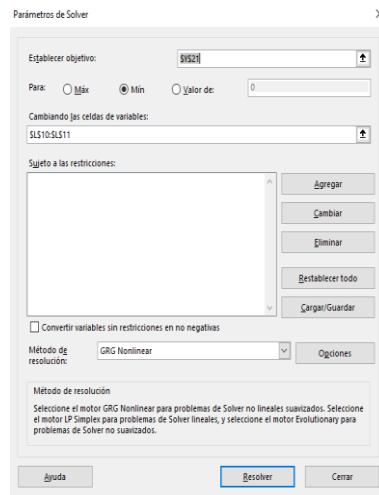


Figura. 4.6. Extensión Solver de ajuste de variables.

4.11.3. Minimizar la suma del cuadrado de los errores.

Dentro de las extensiones de ajuste de valores, se toma en cuenta la herramienta “Solver”, dicha herramienta varía los valores de las constantes a valores que nos permitan reducir dicha suma de cuadrados al valor mínimo, reduciendo así la distancia entre curvas y por tanto disminuyendo el error de ajuste del método a la curva experimental.

4.11.4. Suma de cuadrados totales

El cálculo de la suma de cuadrados totales nos sirve para calcular la bondad de ajuste del error.

$$SCT = \sum(MR_{exp} - \bar{M}_R)^2 \quad (IV.14)$$

Donde:

$SCT =$ sumatoria de cuadrados totales.(adimensional)

$MR_{exp} =$ humedad experimental (g/mm³)

$\bar{M}_R =$ media de la humedad experimental (g/mm³)

4.11.5. Bondad de ajuste de r cuadrado

Se utiliza para saber qué tan eficiente fue el ajuste en relación con el ajuste experimental y el ajuste de page.

$$R^2 = \frac{SCT-SCR}{SCR} \quad (IV.15)$$

Donde:

$R^2 =$ Bondad de ajuste del error (adimensional)

$SCT =$ suma de cuadrados totales (adimensional)

$SCR =$ suma de cuadrados del error (adimensional)

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1.COEFICIENTES DE BONDAD DE AJUSTE DE CURVA DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

Los coeficientes de bondad de ajuste nos ayudan a seleccionar los modelos matemáticos de acuerdo a las características distintivas de las almendras de cacao, tomando en cuenta también los regímenes de temperatura controlados, además nos ayudan a construir las curvas de modelos matemáticos de pérdida de humedad, teniendo, por consiguiente:

- a. Régimen de temperatura de 60°C

Tabla 5.1. Tabla de Bondad de Ajuste R2 bajo un régimen de temperatura de 60°C

60°C	Grandes		Medianas		Pequeñas	
R2 Modelo	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 1	Maquina 2
Newton	0,9896	0,9841	0,9888	0,9938	0,9988	0,9979
Page	0,9898	0,9842	0,9898	0,9940	0,9994	0,9987
Henderson	0,9898	0,9841	0,9890	0,9939	0,9989	0,9980
Logarítmico	0,9898	0,9844	0,9904	0,9939	0,9998	0,9998
Midili	0,9898	0,9845	0,9904	0,9940	0,9998	0,9998
Dos Términos	0,9898	0,9847	0,9907	0,9939	0,9996	0,9992
Henderson Modificado	0,9898	0,9856	0,9914	0,9939	0,9998	0,9998
Verma	0,9896	0,9841	0,9888	0,9938	0,9988	0,9979
Dos Términos Exponenciales	0,9898	0,9847	0,9907	0,9939	0,9996	0,9992
Aproximado a la Difusión	0,9898	0,9841	0,9902	0,9938	0,9996	0,9990
Wang Singh	0,9020	0,9231	0,9577	0,9222	0,9629	0,9719

b. Régimen de temperatura 65°C

Tabla 5.2. Tabla de Bondad de Ajuste R2 bajo un régimen de temperatura de 65°C.

65°C	Grandes		Medianas		Pequeñas	
R2 Modelo	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 1	Maquina 2
Newton	0,9990	0,9974	0,9944	0,9944	0,9936	0,9895
Page	0,9995	0,9994	0,9953	0,9956	0,9942	0,9897
Henderson	0,9992	0,9985	0,9953	0,9955	0,9939	0,9900
Logarítmico	0,9993	0,9986	0,9957	0,9958	0,9939	0,9907
Midili	0,9995	0,9998	0,9973	0,9974	0,9943	0,9912
Dos Términos	0,9995	0,9995	0,9958	0,9961	0,9937	0,9907
Henderson Modificado	0,9995	0,9997	0,9960	0,9962	0,9943	0,9902
Verma	0,9995	0,9995	0,9958	0,9962	0,9942	0,9902
Dos Términos Exponenciales	0,9993	0,9990	0,9955	0,9959	0,9939	0,9901
Aproximado a la Difusión	0,9995	0,9995	0,9958	0,9962	0,9942	0,9902
Wang Singh	0,9231	0,9134	0,9327	0,9289	0,9099	0,9390

c. Régimen de temperatura de 70°C

Tabla 5.3. Tabla de Bondad de Ajuste R2 bajo un régimen de temperatura de 70°C.

70°C	Grandes		Medianas		Pequeñas	
R2 Modelo	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 1	Maquina 2
Newton	0,9431	0,9406	0,9844	0,9816	0,9924	0,9907
Page	0,9546	0,9478	0,9875	0,9859	0,9937	0,9949
Henderson	0,9492	0,9434	0,9855	0,9840	0,9934	0,9924
Logarítmico	0,9504	0,9450	0,9875	0,9854	0,9938	0,9931
Midili	0,9559	0,9490	0,9879	0,9867	0,9959	0,9954
Dos términos	0,9492	0,9434	0,9867	0,9867	0,9942	0,9955
Henderson Modificado	0,9553	0,9488	1,0000	0,9995	0,9943	0,9957
Verma	0,9526	0,9457	0,9882	0,9866	0,9942	0,9954
Dos Términos Exponenciales	0,9554	0,9486	0,9880	0,9866	0,9928	0,9953
Aproximado a la Difusión	0,9553	0,9486	0,9882	0,9866	0,9942	0,9954
Wang Singh	0,9379	0,9314	0,7967	0,7933	0,9258	0,8635

Después de obtener los coeficientes de bondad de ajuste R2 de acuerdo al diámetro equivalente y régimen de temperatura, se procede a analizar de acuerdo a las prácticas realizadas el coeficiente que presente el valor más cercano a 1. Los modelos matemáticos de ajuste de curva cinética de secado de granos en general nos brindan la suficiente información para comprender el comportamiento de la pérdida de humedad en general, por lo que, de acuerdo a la fiabilidad de los datos, se toma en cuenta los modelos Matemáticos de mejor ajuste siendo Henderson Modificado y Midili, ya que nos brinda un mejor coeficiente de ajuste R2 del error. Por otro lado, la metodología de clasificación de semillas de acuerdo a su diámetro equivalente ayuda a

identificar la predominación de almendras de tamaño Pequeño (16 a 17,99mm), Mediano (18 a 19,99mm) y Grande (20 a 21mm). Las pruebas realizadas a regímenes de temperatura controladas de 60, 65 y 70 Celsius, por medio del “MOISTURE ANALIZER - RUSHIAN”, y mediante la adquisición de datos cada 5 minutos nos permite asegurar la fiabilidad de los datos de prueba se realiza con dos pruebas simultaneas con su respectiva replica, partiendo de una masa de 40 gr y una tolerancia de 2,5 % para trazar las curvas de perdida de humedad a través del tiempo. Para el análisis del tiempo que toma a la almendra en llegar a la pérdida total de humedad, se toma el contenido de humedad cercano al 6% al 7% tomando en cuenta que el porcentaje mínimo de humedad aceptado para el consumo es de 7%.

5.2. ANÁLISIS DE CURVA DE SECADO DE COLECCIÓN NARANJAL 51 BAJO UN RÉGIMEN DE TEMPERATURA DE 60, 65, 70°C.

Dentro de las siguientes graficas de datos se proporcionan valores tales como, tiempo de la prueba, masa del tipo de cacao, contenido de agua que se pierde en la prueba y el porcentaje de humedad de acuerdo a su diámetro equivalente, así como, el modelo de ajuste del mismo como se muestra a continuación.

5.2.1. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlado de 60°C.

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao pequeñas a 60°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 540 min, se logró obtener un contenido de humedad del 6,17677077 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 19,836g.

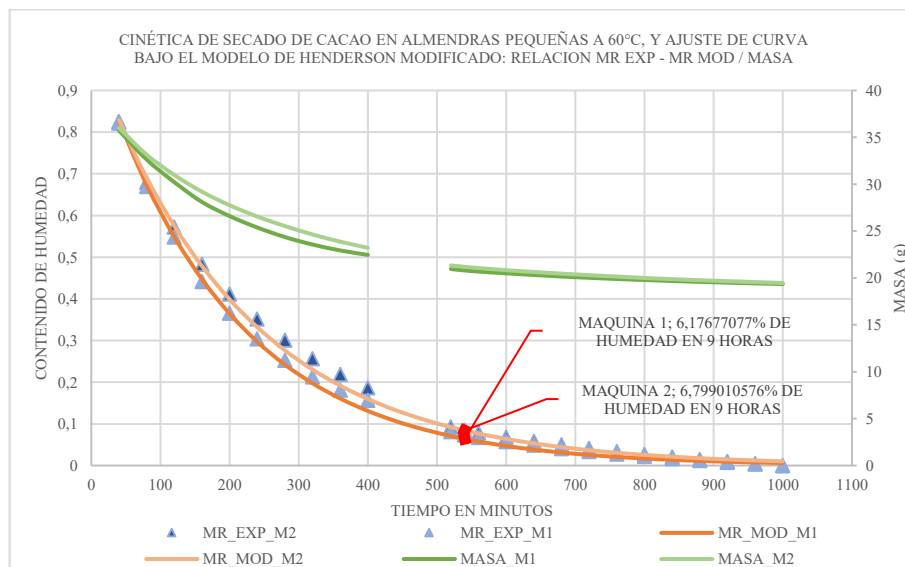


Figura. 5.1. Ajuste de curva Modelo de Henderson Modificado en almendras pequeñas

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje Masa, las curvas verdes.

Debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de Masa y Humedad se ajusta en base al modelo de Henderson modificado en las almendras definidas como Pequeñas y en un régimen de temperatura de 60°C, siendo este modelo el que nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R^2 promedio 0,987729. Como se registra en la Tabla 5.10. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático de ajuste de Henderson Modificado.

por otro lado, en la maquina 2, en un periodo de tiempo de 540 minutos, se obtuvo un contenido de humedad del 6,799010576 %, una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 18,425g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7% como se muestra en la Figura. 5.1.

5.2.2. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlado de 65°C

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao pequeñas a 65°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 520 min , se logró obtener un contenido de humedad del 6,98101828168331 % y una pérdida de Masa en la práctica de 17,04g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 7,52093139849038%, y una pérdida de Masa en la práctica de 16,571 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%.

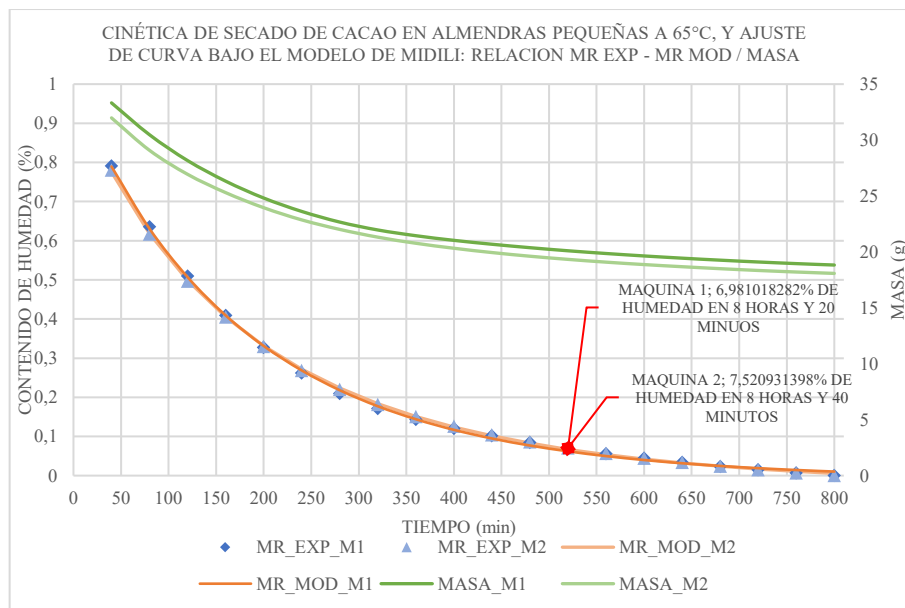


Figura. 5.2. Ajuste de curva modelo de MIDILI en almendras pequeñas

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje Masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.2 debido a la trayectoria continua registrada por los valores de Masa y Humedad en relación al tiempo en almendras pequeñas y bajo un régimen de temperatura de 65°C, se opta por el ajuste en base al modelo de MIDILI, ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R^2 de 0,999682; Como se registra en la Tabla 5.12. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático de ajuste de MIDILI.

5.2.3. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlado de 70°C.

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao pequeñas a 70°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 355 min , se logró obtener un contenido de humedad del 9,77321016166 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 16,747g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 10,1336875395%, y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 17,469 g. Tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%, y que ninguna de las muestras presenta dicho valor de humedad final, se considera que las 5 horas con 55 minutos traducidos de 355 minutos, es un tiempo insuficiente para llegar al punto mínimo de humedad apto para el consumo.

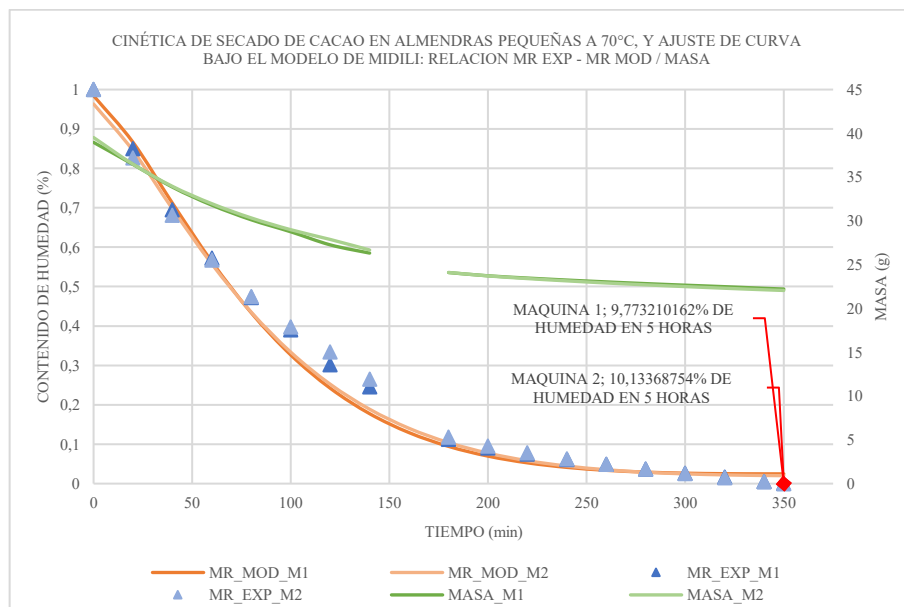


Figura. 5.3 Ajuste de curva modelo de Midili en almendras pequeñas

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje Masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.3 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de Masa y Humedad en relación al tiempo en almendras pequeñas a un régimen de temperatura de 70°C, y al haber interrupciones en el proceso de medición, se opta por el ajuste en base al modelo de Midili, ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R2 de 0,952440; Como se registra en la Tabla 5.14. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático de ajuste de Midili.

5.2.4. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlado de 60°C

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao medianas a un régimen de temperatura de 60°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 540 min, se logró obtener un contenido de humedad del 6,75369992184151 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de masa en la práctica de 17,562g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 7,541024677%, y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 17,976 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%. Sin embargo, hay que tener en cuenta la diferencia de 6% y 7% de humedad en la maquina 1 con la maquina 2.

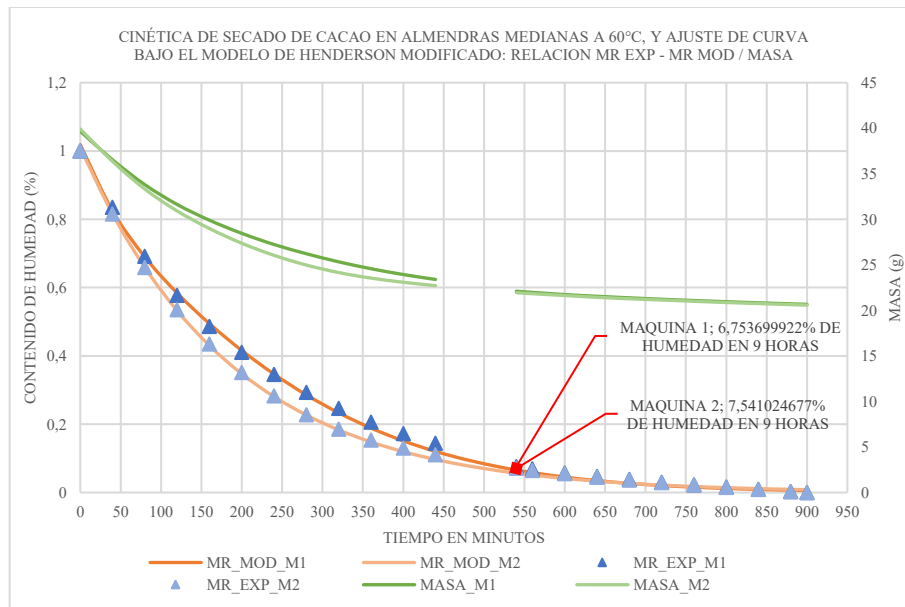


Figura. 5.4: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Henderson Modificado en almendras medianas

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.4 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de masa y humedad en relación al tiempo en almendras medianas a un régimen de temperatura de 60°C se opta por el ajuste en base al modelo de Henderson Modificado, ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R2 de 0,992637. Como se registra en la Tabla 5.16. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático.

5.2.5. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlado de 65°C

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao medianas a 60°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 545 min , se logró obtener un contenido de humedad del 6,24533306130776 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 19,32g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 6,42470397733022 %, y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de masa en la práctica de 18,952 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%.

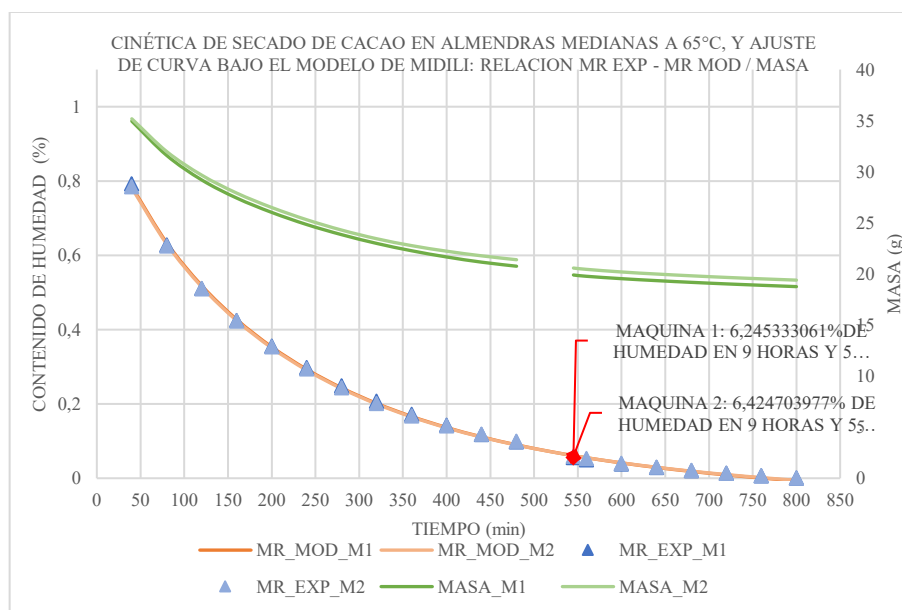


Figura. 5.5: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Midili en almendras medianas

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje Masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.5 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de Masa y Humedad en relación al tiempo en almendras Medianas a un régimen de temperatura de 65°C se opta por el ajuste en base al modelo de Midili, ya que este modelo

nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R^2 de 0,997358. Como se registra en la Tabla 5.18. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático.

5.2.6. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlado de 70°C

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao medianas a 70°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 480 min , se logró obtener un contenido de humedad del 6,371443154 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 18,569; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 5,90188870579287 %, y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de masa en la práctica de 18,925 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%.

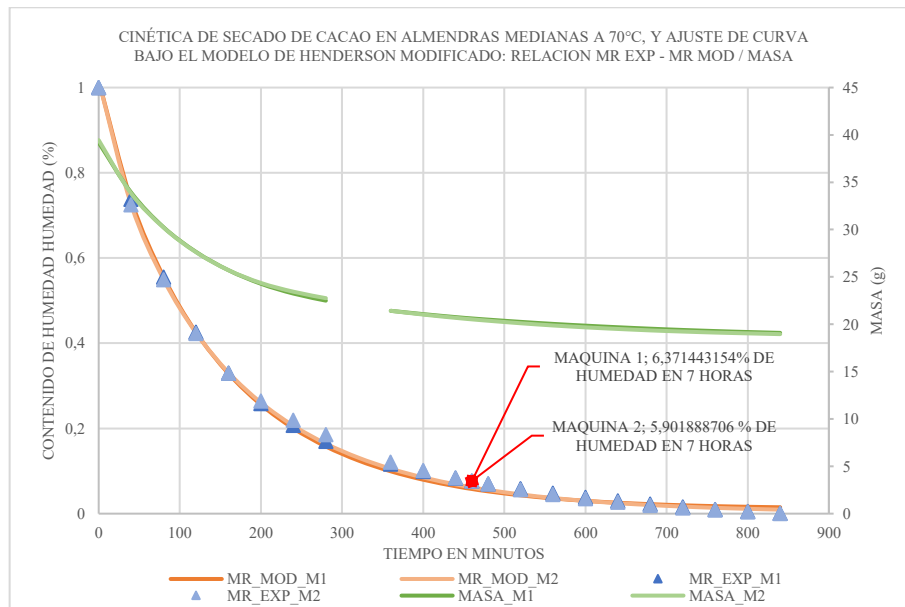


Figura. 5.6: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Henderson en almendras medianas.

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.6 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de Masa y Humedad en relación al tiempo en almendras Medianas a un régimen de temperatura de 65°C se opta por el ajuste en base al modelo de Henderson Modificado, ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste de 0,999728. Como se registra en la Tabla 5.20. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático.

5.2.7. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlado de 60°C.

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao descritas como Grandes a 60°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 620 min , se logró obtener un contenido de humedad del 6,21314902722778 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 20,236 g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 6,93441620391888 %, y una pérdida de Masa en la práctica de 20,298 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%.

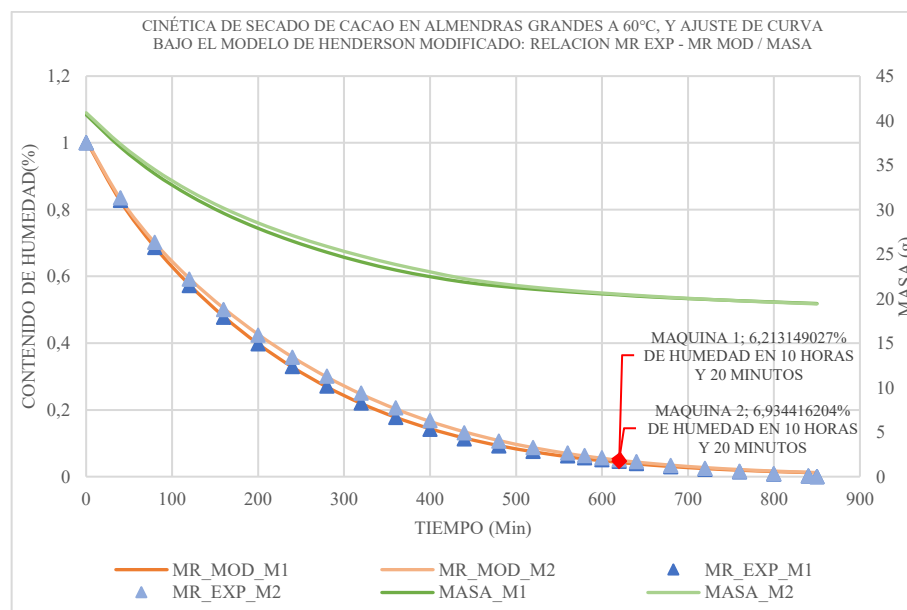


Figura. 5.7: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva modelo de Henderson Modificado en almendras grandes

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje Masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.7 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de Masa y Humedad en relación al tiempo en almendras Grandes a un régimen de temperatura de 60°C se opta por el ajuste en base al modelo de Henderson Modificado; ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R2 de 0,999811 como se registra en la Tabla 5.22. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático.

5.2.8. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlado de 65°C.

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao descritas como Grandes a 65°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 550 min Se logró obtener un contenido de humedad del 6,065323425 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de Masa en la práctica de 20,004 g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 7,234484681 %, y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de masa en la práctica de 19,823 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%.

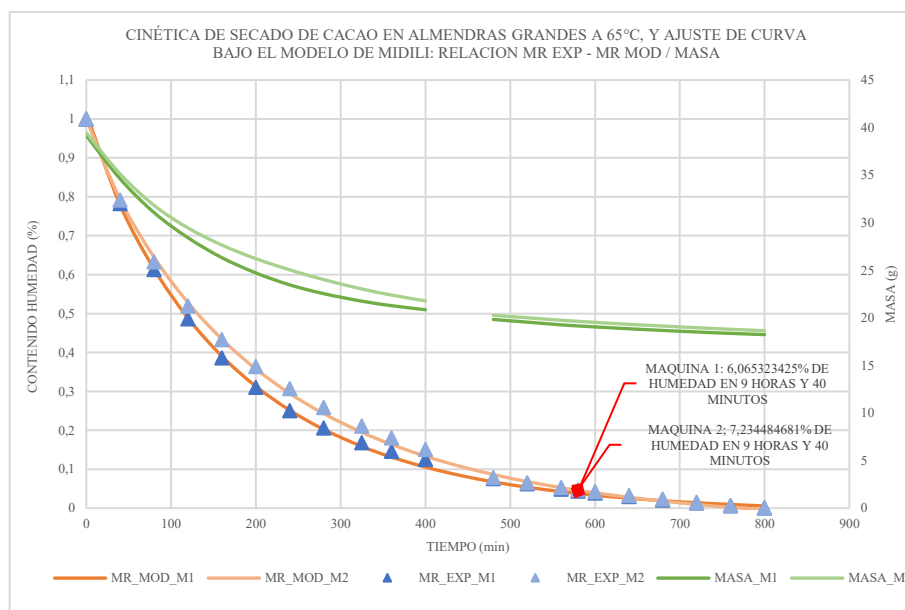


Figura. 5.8: Cinética de secado de cacao y ajuste de curva modelo de Midili en almendras grandes

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.8 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de Masa y Humedad en relación al tiempo en almendras Grandes a un régimen de temperatura de 65°C se opta por el ajuste en base al modelo de Midili, ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de 0,992762. Como se registra en la Tabla 5.24. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático.

5.2.9. Curva de secado de cacao CCN-51 en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlado de 70°C.

De acuerdo con los datos obtenidos en la prueba realizada en almendras de cacao descritas como Grandes a 70°C en la maquina 1, en un periodo de tiempo total de 540 min , se logró obtener un contenido de humedad del 5,80024503798088 % y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de masa en la práctica de 21,974 g; por otro lado, en la maquina 2, en el mismo periodo de tiempo, se obtuvo un contenido de humedad del 6,2255502439996%, y una disminución de contenido de agua calculada en base a la pérdida de masa en la práctica de 21,441 g; tomando en cuenta que el contenido de humedad para el consumo es de 7%.

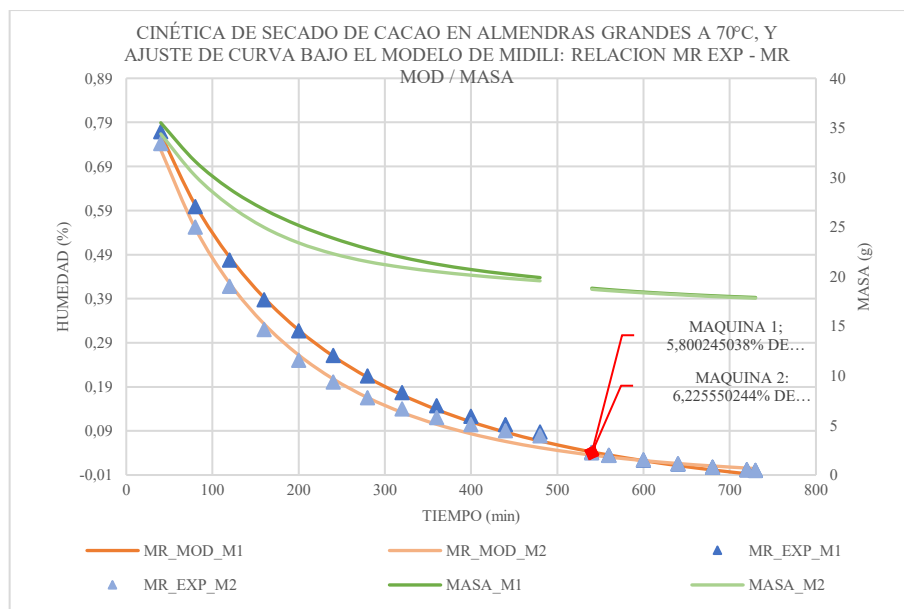


Figura. 5.9. Cinética de secado de cacao y ajuste de curva Modelo de Midili en almendras grandes

(*) El eje de humedad cubre las curvas naranjas y azules, mientras que el eje Masa, las curvas verdes.

Adicionalmente como se muestra en la Figura. 5.9 debido a la trayectoria discontinua registrada por los valores de masa y humedad en relación al tiempo en almendras grandes a un régimen de temperatura de 65°C se opta por el ajuste en base al modelo de Midili, ya que este modelo nos brinda un coeficiente de correlación de ajuste R2 de 0,995677. Como se registra en la Tabla 5.26. de coeficientes obtenidos al aplicar el modelo matemático.

5.2.10. Curva de secado de cacao CCN-51 de acuerdo al diámetro equivalente

Para entender el comportamiento de la cinética de secado en las almendras de acuerdo a los 3 diámetros a analizar se procede a comparar la curva de pérdida de humedad de acuerdo al régimen de temperatura controlado, teniendo así.

a. Ajuste de curva en almendras de diferente diámetro equivalente bajo un régimen de temperatura de 60°C

En el siguiente grafico se muestra la relación del diámetro equivalente y la temperatura en el tiempo de secado, considerando que el tiempo de secado está caracterizado de acuerdo a la curva de convergencia, por lo que de acuerdo a la Figura. 5.10, por lo que se puede inferir que a menor diámetro el tiempo que le tomará a las almendras a un régimen de convergencia será menor, no siendo así en las almendras de diámetro mediano o grande; en el que se infiere que, de acuerdo a la temperatura de 60°C, se denota una pérdida de humedad similar tomándoles más tiempo en lograr el mismo nivel de convergencia.

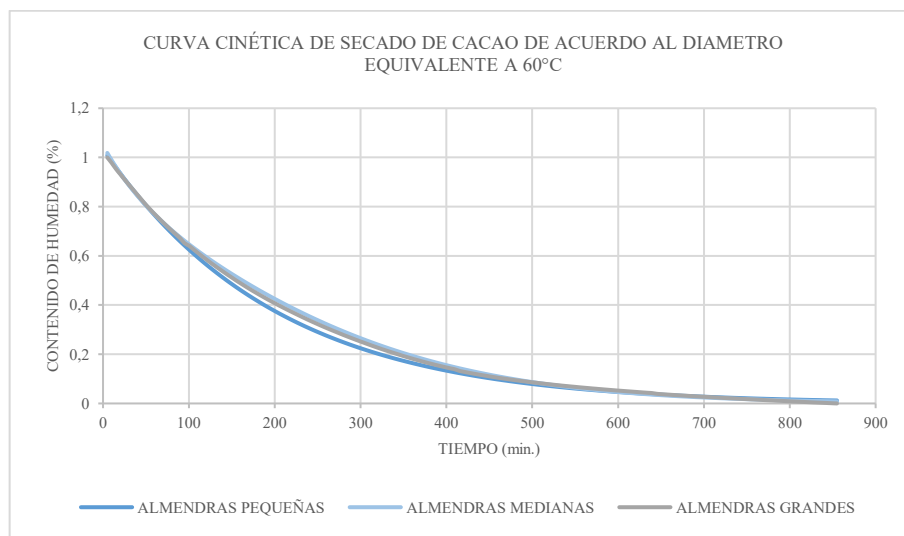


Figura. 5.10.5. Curva cinética de secado de cacao CCN-51 diámetro equivalente y temperatura tiempo de secado

5.2.11. Curva de secado de cacao CCN-51 de acuerdo al régimen de temperatura controlado.

En el siguiente grafico se muestra la relación del régimen temperatura en el contenido de humedad relativo obtenido bajo los modelos matemáticos de ajuste, considerando que el contenido de humedad relativo está caracterizado de acuerdo a la curva de convergencia, por lo que de acuerdo a la, por lo que se puede inferir que a menor diámetro el tiempo que le tomará a las almendras a un régimen de convergencia será menor, no siendo así en las almendras de diámetro mediano o grande; en el que se infiere que de acuerdo a la temperatura de 60°C, se

denota una pérdida de humedad similar tomándoles más tiempo en lograr el mismo nivel de convergencia.

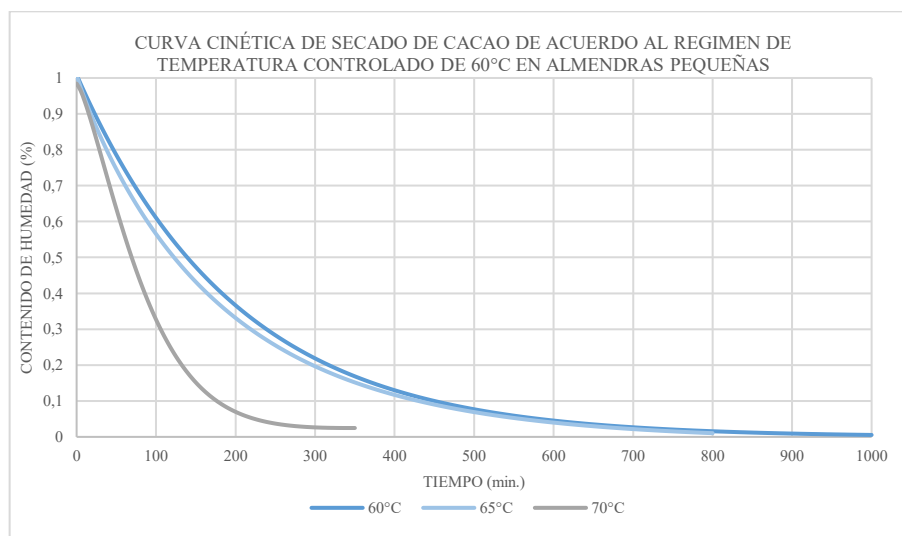


Figura. 5.11. Curva cinética de secado de cacao CCN-51 pérdida de humedad de acuerdo al régimen de temperatura de 60°C/ almendras pequeñas

5.3. AJUSTE DE CURVAS DE ACUERDO AL DIÁMETRO EQUIVALENTE

El ajuste de curva obtenido mediante los coeficientes de los modelos matemáticos nos permite determinar el comportamiento de la pérdida de humedad de las almendras, describiendo una curva de acuerdo a los modelos matemáticos de Midili y Henderson Modificado. Por lo que, de acuerdo a su diámetro equivalente, la curva descriptiva de la cinética de cacao CCN-51 se clasificará de la siguiente manera para una mejor comprensión.

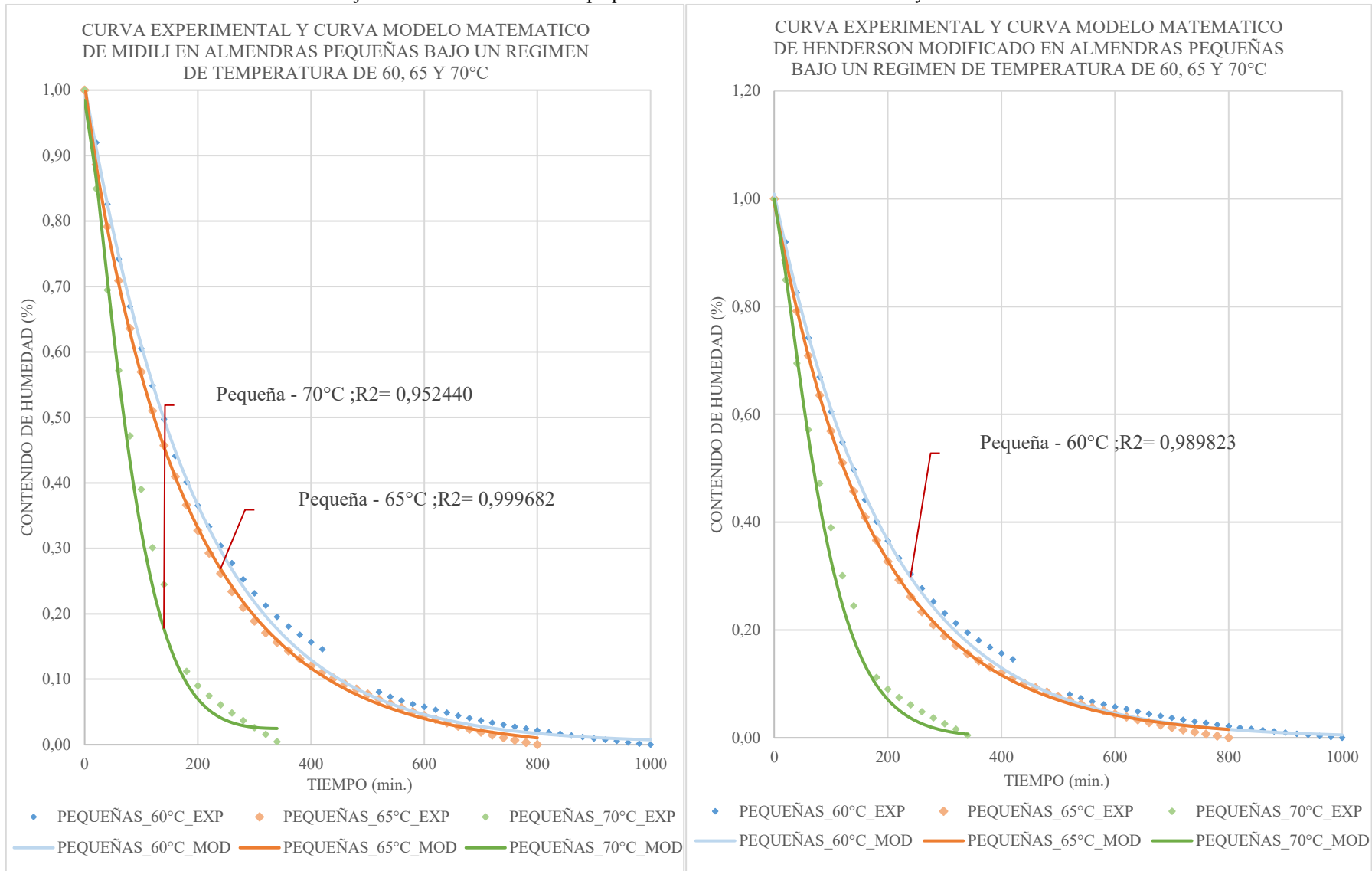
5.3.1. Ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 pequeñas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.

Dentro de los métodos matemáticos seleccionados para el ajuste de curva en almendras pequeñas bajo un régimen de temperatura controlada de 60 a 70°C, se ha considerado al modelo de Midili, que describe el comportamiento de las almendras pequeñas a una temperatura de 70°C y 60°C, considerando así, su bondad de ajuste R^2 de 0,95244 y 0,99682 respectivamente; Además se consideró al modelo de Henderson Modificado que describe de mejor manera el comportamiento de secado en un régimen de temperatura de 60°C, Como se muestra en la Tabla 5.5 ofreciendo como resultado una bondad de ajuste R^2 de 0,989823.

Tabla 5.4. Coeficientes de ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 a 60°C pequeñas.

MODELO	TEMPERATURA		
	60	65	70
MIDILI	0,989823	0,99952725	0,95590426
HENDERSON MODIFICADO	0,989786	0,999682	0,95244

Tabla 5.5. Ajuste de curva en almendras pequeñas mediante el modelo de Midili y Henderson Modificado.



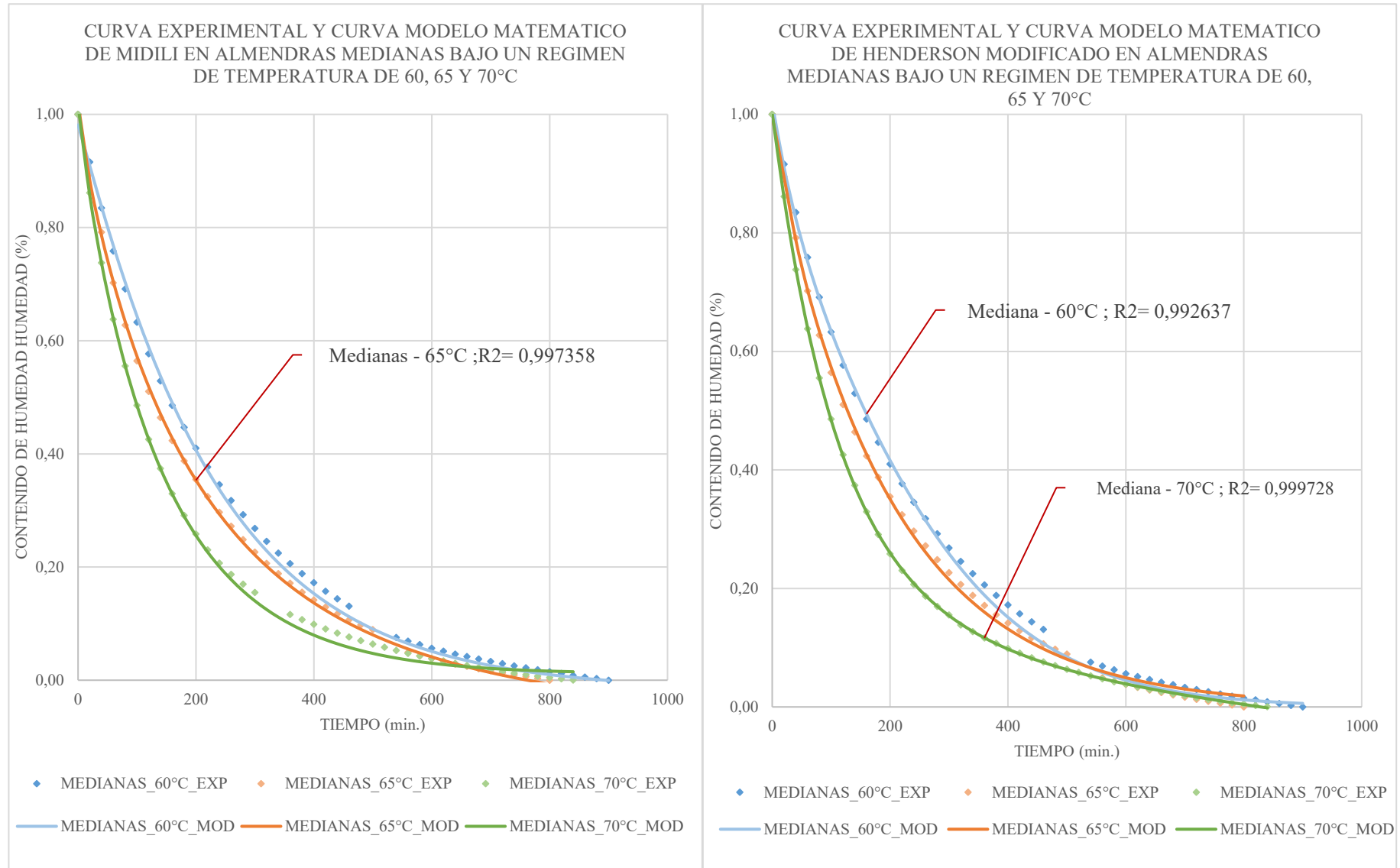
5.3.2. Ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 medianas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.

Para el ajuste de curva en almendras medianas bajo un régimen de temperatura controlada de 60 a 70°C, se ha considerado al modelo de Midili, que describe el comportamiento de las almendras medianas a una temperatura de 65°C, considerando así, su bondad de ajuste R^2 de 0,997358; Además se consideró al modelo de Henderson Modificado que describe de mejor manera el comportamiento de secado en un régimen de temperatura de 60°C y 70°C, como se muestra en la Tabla 5.7. ofreciendo como resultado una bondad de ajuste R^2 de 0,992637 y 0,999728 respectivamente.

Tabla 5.6. Coeficientes de ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 a 60°C medianas.

MODELO	TEMPERATURA		
	60	65	70
MIDILI	0,990429	0,997358	0,987871
HENDERSON MODIFICADO	0,992637	0,995258	0,999728

Tabla 5.7. Ajuste de curva en almendras medianas mediante el modelo de Midili y Henderson Modificado.



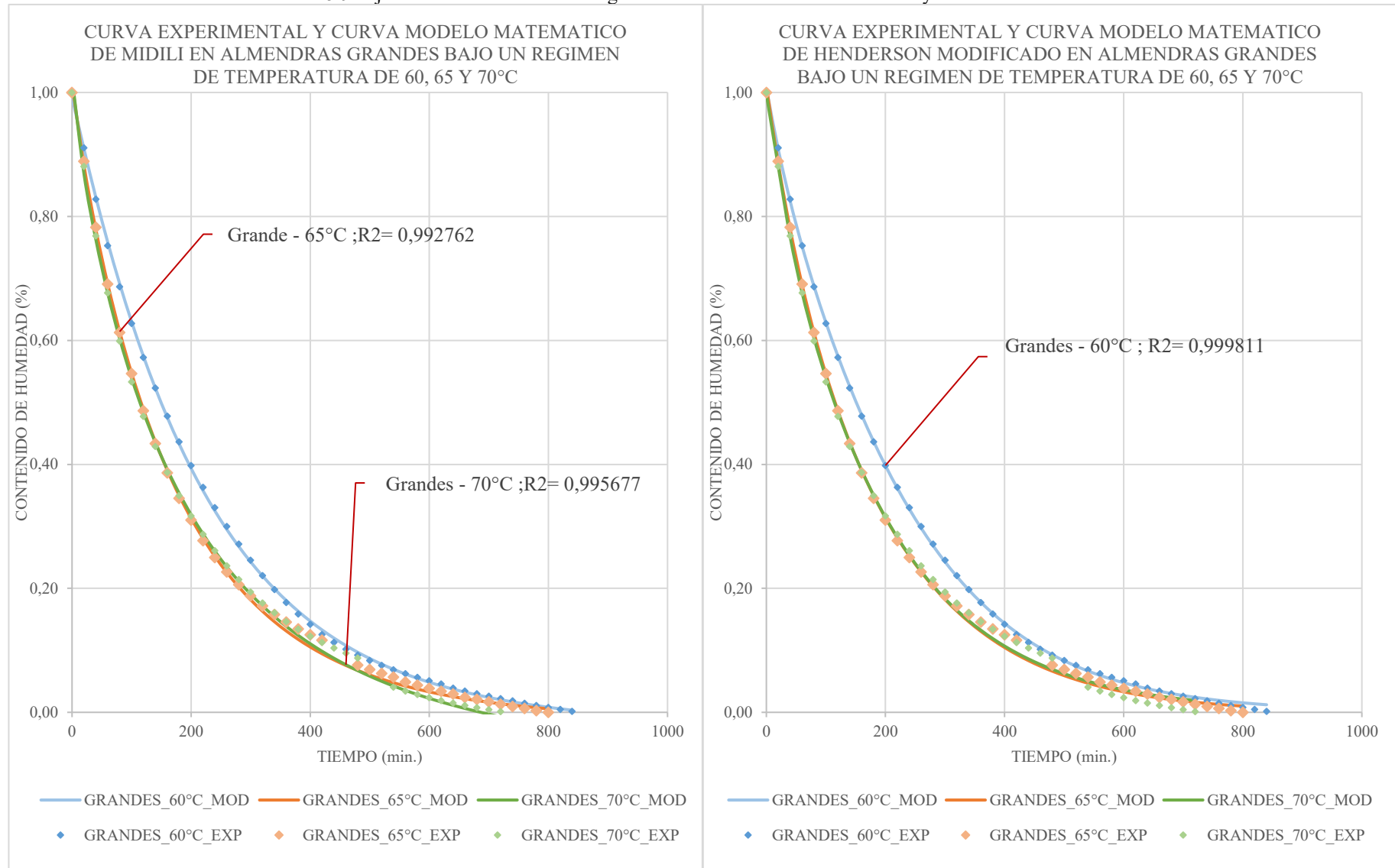
5.3.3. Ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 grandes bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C.

Dentro de los métodos matemáticos seleccionados para el ajuste de curva en almendras grandes bajo un régimen de temperatura controlada de 60 a 70°C, se ha considerado al modelo de Midili, que describe de mejor manera el comportamiento de secado a una temperatura de 65°C y 70°C considerando así, su bondad de ajuste R2 de 0,992762 y 0,995677; Además en el comportamiento de almendras grandes se consideró al modelo de Henderson Modificado que describe de mejor manera el comportamiento de secado en un régimen de temperatura de 60°C, como se muestra en la Tabla 5.9. ofreciendo como resultado una bondad de ajuste R2 de 0,99811.

Tabla 5.8. Coeficientes de ajuste de curva en almendras de cacao CCN-51 a 60°C grandes.

MODELO	TEMPERATURA		
	60	65	70
MIDILI	0,999816	0,992762	0,995677
HENDERSON MODIFICADO	0,999811	0,990890	0,993444

Tabla 5.9. Ajuste de curva en almendras grandes mediante el modelo de Midili y Henderson Modificado.



**5.4. COEFICIENTES DE AJUSTE DE CURVAS PARA EL CACAO MEJORADO
CCN-51 DE ACUERDO A LOS DIÁMETROS EQUIVALENTES Y RÉGIMENES
DE TEMPERATURA DE 60, 65, 70°C.**

Los coeficientes de los modelos de ajuste curvas de cinética dentro del proceso de secado de cacao, nos ayuda a encontrar el punto de convergencia en la curva describir; por lo que, dentro del ajuste del mismo se tuvo en cuenta la curva experimental obtenida bajo la metodología experimental de prueba y error, que será evaluada y posteriormente comparada bajo el uso del análisis de error que existe en la relación de la curva experimental con la curva trazada por el modelo matemático que corresponda.

5.4.1. Parámetros de ajuste de curva de almendras pequeñas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C

Para el ajuste de curva de humedad en relación al tiempo, en almendras pequeñas, se debe tener en cuenta que el coeficiente de determinación mínimo del error es decir R^2 debe ser lo más cercano a 1. Por lo que, teniendo en cuenta lo expuesto se puede determinar que:

- a. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como pequeñas bajo el diámetro equivalente de 16 a 17.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 60°C, se ajusta bajo el modelo de Henderson modificado, ya que su valor de R^2 promedio entre la presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,987729) cómo se observa en la Tabla 5.10., que a diferencia del anterior, toma valores lejanos a la unidad siendo (0,918248) en promedio como se muestra en la Tabla 5.10. de la tabla de coeficientes de Wang Singh

Tabla 5.10. Resumen Almendras pequeñas a 60°C, Método de Henderson Modificado

Temperatura:	60°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
HENDERSON MODIFICADO	HUMEDAD INICIAL	53,081751	53,304475	53,193113
	HUMEDAD FINAL	2,469382	2,457659	2,463520
	k	0,005601	0,015838	0,010720
	g	0,005365	0,005933	0,005649
	h	0,007207	0,011438	0,009323
	a	0,286149	1,232246	0,759197
	b	0,968047	1,893482	1,430764
	c	-0,245584	-2,110735	-1,178159
	SCR	0,131043	0,189159	0,160101
	SCT	12,876424	13,167914	13,022169
	R^2	0,989823	0,985635	0,987729
			16,6	
	HORAS DE SECADO			

Tabla 5.11. Resumen Almendras pequeñas a 60°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	52,860235	53,675849	53,268042
	HUMEDAD FINAL	3,548154	4,028187	3,788171
	a	-0,003513	-0,003498	-0,003506
	b	3,0357E-06	3,0152E-06	3,0255E-06
	SCR	0,775785	0,846596	0,811191
	SCT	10,084264	9,778971	9,931618
	R ²	0,923070	0,913427	0,918248
	HORAS DE SECADO		16,6	

- b. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como pequeñas bajo el diámetro equivalente de 16 a 17.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 65°C, se ajusta bajo el modelo de MIDILI, ya que su valor de R² promedio presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,999682) cómo se observa en la Tabla 5.12. no siendo así el método de Wang Singh que a diferencia del anterior, toma valores lejanos a la unidad siendo (0,918248) en promedio como se muestra en la Tabla 5.13.

Tabla 5.12. Resumen Almendras pequeñas a 65°C, Método de Midili

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
MIDILI	HUMEDAD INICIAL	52,860235	53,675849	53,268042
	HUMEDAD FINAL	3,548154	4,028187	3,788171
	k	0,007624	0,010832	0,009228
	a	1,008281	1,019228	1,013755
	b	-8,4932E-06	-2,3803E-05	-1,6148E-05
	n	0,939725	0,873654	0,906689
	SCR	0,004767	0,001609	0,003188
	SCT	10,084264	9,778971	9,931618
	R ²	0,999527	0,999836	0,999682
	HORAS DE SECADO		13,3	

Tabla 5.13. Resumen Almendras pequeñas a 65°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	52,860235	53,675849	53,268042
	HUMEDAD FINAL	3,548154	4,028187	3,788171
	a	-0,003513	-0,003498	-0,003506
	b	3,03568E-06	3,01525E-06	3,02546E-06
	SCR	0,775785	0,846596	0,811191
	SCT	10,084264	9,778971	9,931618
	R ²	0,923070	0,913427	0,918248
	HORAS DE SECADO		13,3	

- c. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como pequeñas bajo el diámetro equivalente de 16 a 17.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 70°C, se ajusta bajo el modelo de MIDILI, ya que su valor de R^2 promedio presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,952440) cómo se observa en la Tabla 5.14, no siendo así el método de Wang Singh que, como se muestra en la Tabla 5.15. toma valores de (0,934627).

Tabla 5.14. Resumen Almendras pequeñas a 70°C, Método de Midili

Temperatura:	70°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
MIDILI	HUMEDAD INICIAL	52,747293	54,331031	53,539162
	HUMEDAD FINAL	9,773210	10,133688	9,953449
	k	0,002311	0,002680	0,002496
	a	0,984292	0,963388	0,973840
	b	6,4171E-05	4,6234E-05	5,5203E-05
	n	1,343335	1,301551	1,322443
	SCR	0,272982	0,303457	0,288220
	SCT	6,190671	5,947262	6,068967
	R ²	0,955904	0,948975	0,952440
	HORAS DE SECADO		5,83	

Tabla 5.15. Resumen Almendras pequeñas a 70°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	70°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	52,747293	54,331031	53,539162
	HUMEDAD FINAL	9,773210	10,133688	9,953449
	a	-0,007705	-0,007643	-0,007674
	b	1,46966E-05	1,4495E-05	1,4596E-05
	SCR	0,384707	0,408006	0,396357
	SCT	6,190671	5,947262	6,068967
	R ²	0,937857	0,931396	0,934627
	HORAS DE SECADO		5,83	

5.4.2. Parámetros de ajuste de curva de almendras medianas bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C

Para el ajuste de curva de humedad en relación al tiempo, en almendras medianas, se debe tener en cuenta la suma del cuadrado de los errores que debe dar como resultado el valor más bajo posible además el coeficiente de determinación mínimo del debe ser lo más cercano a 1

- a. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como medianas bajo el diámetro equivalente de 18 a 19.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 60°C, se ajusta bajo el modelo de Henderson Modificado, ya que su valor de R^2 promedio presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,992637) cómo se observa en la Tabla 5.16., no siendo así el método de Wang Singh que, a diferencia del anterior, que como se muestra en la Tabla 5.17. toma valores lejanos a la unidad siendo (0,939972)

Tabla 5.16. Resumen Almendras medianas a 60°C, Método de Henderson Modificado.

Temperatura:	60°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
HENDERSON MODIFICADO	HUMEDAD INICIAL	51,031742	52,576726	51,804234
	HUMEDAD FINAL	3,125634	4,123763	3,624698
	k	0,011792	0,005330	0,008561
	g	0,007519	0,005330	0,006425
	h	0,009637	0,005329	0,007483
	a	4,798486	0,392603	2,595544
	b	6,675560	0,346436	3,510998
	c	-10,455673	0,269810	-5,092932
	SCR	0,110067	0,071512	0,090790
	SCT	12,738619	11,750693	12,244656
	R ²	0,991360	0,993914	0,992637
	HORAS DE SECADO		15	

Tabla 5.17. Resumen Almendras medianas a 60°C, Método de Wang Singh.

Temperatura:	60°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	51,031742	52,576726	51,804234
	HUMEDAD FINAL	3,125634	4,123763	3,624698
	a	-0,003057	-0,003211	-0,003134
	b	2,29839E-06	2,50676E-06	2,4026E-06
	SCR	0,538224	0,914261	0,726243
	SCT	12,738619	11,750693	12,244656
	R ²	0,957749	0,922195	0,939972
	HORAS DE SECADO		15	

- b. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como medianas bajo el diámetro equivalente de 18 a 19.99 mm, bajo el régimen de temperatura de 65°C, se ajusta bajo el modelo de Midili , ya que su valor de R2 promedio, no siendo así el método de Wang Singh siendo (0,930831) en promedio como se muestra en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18. Resumen Almendras medianas a 65°C, Método de Midili.

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
MIDILI	HUMEDAD INICIAL	55,515965	54,375316	54,945640
	HUMEDAD FINAL	3,348261	3,434116	3,391188
	k	0,010894	0,010916	0,010905
	a	1,019521	1,015627	1,017574
	b	-5,18462E-05	-4,90491E-05	-5,04477E-05
	n	0,858672	0,859225	0,858948
	SCR	0,027607	0,026222	0,026914
	SCT	10,249432	10,124789	10,187111
	R ²	0,997307	0,997410	0,997358
	HORAS DE SECADO		13,3	

Tabla 5.19. Resumen Almendras Medianas a 65°C, Método de Wang Singh.

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SING	HUMEDAD INICIAL	55,515965	54,375316	54,945640
	HUMEDAD FINAL	3,348261	3,434116	3,391188
	a	-0,003388	-0,003399	-0,003393
	b	2,84937E-06	2,86713E-06	2,8582E-06
	SCR	0,689461	0,719575	0,704518
	SCT	10,249432	10,124789	10,187111
	R ²	0,932732	0,928929	0,930831
	HORAS DE SECADO		13,3	

- c. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como medianas bajo el diámetro equivalente de 18 a 19.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 70°C, se ajusta bajo el modelo de Henderson Modificado ya que su valor de R2 promedio presenta un valor de (0,999728). Wang Singh que, a diferencia del anterior, toma valores de (0,794967) en promedio como se muestra en laTabla 5.20.

Tabla 5.20. Resumen Almendras medianas a 70°C, Método de Henderson Modificado

Temperatura:	70°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
HENDERSON MODIFICADO	HUMEDAD INICIAL	53,759474	53,880086	53,819780
	HUMEDAD FINAL	2,459232	1,921663	2,190448
	k	0,002569	0,004924	0,003747
	g	0,009532	0,004924	0,007228
	h	-0,001960	0,017987	0,008014
	a	0,265540	0,430883	0,348211
	b	0,742772	0,270417	0,506595
	c	-0,006281	0,306187	0,149953
	SCR	0,000245	0,004562	0,002403
	SCT	8,988411	8,838620	8,913516
	R ²	0,999973	0,999484	0,999728
	HORAS DE SECADO		14,083	

Tabla 5.21. Resumen Almendras medianas a 70°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	70°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	53,759474	53,880086	53,819780
	HUMEDAD FINAL	2,459232	1,921663	2,190448
	a	-0,003695	-0,003676	-0,003686
	b	3,22229E-06	3,19393E-06	3,2081E-06
	SCR	1,873470	1,875142	1,874306
	SCT	9,214437	9,069726	9,142082
	R ²	0,796681	0,793253	0,794967
	HORAS DE SECADO		14,083	

5.4.3. Parámetros de ajuste de curva de almendras grandes bajo regímenes de temperatura de 60, 65 y 70°C

Para el ajuste de curva de humedad en relación al tiempo, en granos grandes, se debe tener en cuenta que la suma del cuadrado de los errores debe dar como resultado el valor más bajo posible; y la suma de los cuadrados totales que demarcaran el coeficiente de determinación mínimo del error es decir R² que mide la precisión de un modelo de regresión debe ser lo más cercano a 1. Por lo que, teniendo en cuenta lo expuesto se puede determinar que:

- a. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como grandes bajo el diámetro equivalente de 20 a 21.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 60°C, se ajusta bajo el modelo de Henderson Modificado ya que su valor de R² promedio presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,999811) cómo se observa en la Tabla 5.22., no siendo así el método de Wang Singh que a diferencia del anterior, toma valores lejanos a la unidad siendo (0,967413) en promedio.

Tabla 5.22. Resumen Almendras grandes a 60°C, Método de Henderson Modificado

Temperatura:	60°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
HENDERSON MODIFICADO	HUMEDAD INICIAL	55,985636	56,796203	56,390920
	HUMEDAD FINAL	3,827336	4,272903	4,050119
	k	0,016711	0,011137	0,013924
	g	0,005748	0,006689	0,006219
	h	0,011195	0,009083	0,010139
	a	0,457468	3,227764	1,842616
	b	1,537677	4,397608	2,967642
	c	-0,988474	-6,616475	-3,802475
	SCR	0,002033	0,002492	0,002263
	SCT	11,810983	12,059144	11,935063
	R ²	0,999828	0,999793	0,999811
	HORAS DE SECADO	14,16		

Tabla 5.23. Resumen Almendras grandes a 60°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	60°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	55,985636	56,796203	56,390920
	HUMEDAD FINAL	3,827336	4,272903	4,050119
	a	-0,003174	-0,003048	-0,003111
	b	2,4979E-06	2,3303E-06	2,4141E-06
	SCR	0,438206	0,338541	0,388373
	SCT	11,810983	12,059144	11,935063
	R ²	0,962899	0,971927	0,967413
	HORAS DE SECADO	14,16		

b. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como grandes bajo el diámetro equivalente de 20 a 21.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 65°C, se ajusta bajo el modelo de Midili ya que su valor de R2 promedio presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,992762) cómo se observa en la Tabla 5.24., no siendo así el método de Wang Singh que como se muestra en la Tabla 5.25., toma valores lejanos a la unidad siendo (0,924479) en promedio.

Tabla 5.24. Resumen Almendras grandes a 65°C, Método de Midili

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
MIDILI	HUMEDAD INICIAL	57,149365	57,468893	57,309129
	HUMEDAD FINAL	3,726142	4,725679	4,225910
	k	0,008577	0,007747	0,008162
	a	1,013457	0,999249	1,006353
	b	-1,14413E-05	-4,02071E-05	-2,58242E-05
	n	0,927436	0,918369	0,922903
	SCR	0,056896	0,092610	0,074753
	SCT	10,028259	10,521937	10,275098
	R^2	0,994326	0,991198	0,992762
	HORAS DE SECADO		13,3	

Tabla 5.25. Resumen Almendras grandes a 65°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	65°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	57,149365	57,468893	57,309129
	HUMEDAD FINAL	3,726142	4,725679	4,225910
	a	-0,003561	-0,003362	-0,003462
	b	3,10103E-06	2,8129E-06	2,957E-06
	SCR	0,903405	0,641374	0,772389
	SCT	10,028259	10,521937	10,275098
	R^2	0,909914	0,939044	0,924479
	HORAS DE SECADO		13,3	

c. La curva descrita en el secado las almendras de cacao definidas como grandes bajo el diámetro equivalente de 20 a 21.99 mm, y bajo el régimen de temperatura de 70°C, se ajusta bajo el modelo de Midili ya que su valor de R2 promedio presenta el valor más cercano a 1, siendo (0,995677) cómo se observa en la Tabla 5.26., no siendo así el método de Wang Singh que a diferencia del anterior, como se muestra en la Tabla 5.27 toma valores lejanos a la unidad siendo (0,894633) en promedio.

Tabla 5.26. Resumen Almendras grandes a 70°C, Método de Midili

Temperatura:	70°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
MIDILI	HUMEDAD INICIAL	59,644891	59,609177	59,627034
	HUMEDAD FINAL	3,509140	3,994697	3,751918
	k	0,012999	0,016144	0,014572
	a	1,023498	1,037732	1,030615

b	-6,1309E-05	-1,8992E-05	-4,0151E-05
n	0,842552	0,837019	0,839785
SCR	0,037885	0,039102	0,038493
SCT	9,346936	8,511839	8,929388
R ²	0,995946	0,995406	0,995677
HORAS DE SECADO	12,16		

Tabla 5.27. Resumen Almendras grandes a 70°C, Método de Wang Singh

Temperatura:	70°C	MAQUINA 1	MAQUINA 2	PROMEDIO
WANG SINGH	HUMEDAD INICIAL	59,644891	59,609177	59,627034
	HUMEDAD FINAL	3,509140	3,994697	3,751918
	a	-0,003745	-0,004019	-0,003882
	b	3,4619E-06	3,9041E-06	3,683E-06
	SCR	0,693670	1,162046	0,927858
	SCT	9,346936	8,511839	8,929388
	R²	0,925786	0,863479	0,894633
	HORAS DE SECADO	12,16		

5.5.PRESUPUESTO REFERENCIAL.

En el apartado siguiente se detallará los costos directos, costos indirectos y así como también el costo general en donde se incluirán materiales, equipos y los presupuestos relacionados con la parte financiera para el desarrollo del proyecto de investigación.

5.5.1. Costos directos

Gastos relacionados con equipos y materiales utilizados para el análisis de la cinética del secado de cacao nacional ecuatoriano y mejorado CCN-51, toman en cuenta los factores de energía presentados durante los meses de prueba por lo que se tuvo que optar por medios de generación eléctrica alternativa, siendo estos presentados en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28. Costos directos de cinética del cacao
PRESUPUESTOS PARA LA ELABORACIÓN

Equipos y Materiales	Cantidad	Valor Unitario \$	Valor Total \$
Moisture Analyzer RUIZHAN	2	600	1200
Medidor de humedad	1	117	117
Mazorca de cacao	25	25	25
Generador 800W	1	250	250
UPS	1	260	260
Gasolina (gl)	2	2.713	5.426
Mano de obra	30	46	1380
Total \$			3237,43

5.5.2. Costos indirectos

Todos los gastos indirectos que influyeron para la elaboración del análisis de la cinética del secado de cacao nacional ecuatoriano y mejorado CCN-5, se tomaron de acuerdo al contexto,

siendo que el proyecto se realizó en el cantón la Mana, se considera parámetros como Transporte, Alimentación y comunicación, teniendo los siguientes resultados.

Tabla 5.29. Costos indirectos de cinética del cacao

PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN				
Recursos	Cantidad	Unidad	Valor unitario \$	Valor Total \$
Transporte	4	Viajes	4	16
Alimentación	5	Semanas	30	150
Comunicación	3	Recargas	3	9
			Total \$	175

5.5.3. Presupuesto general

Tabla 5.30. Presupuesto General

PRESUPUESTO GENERAL	
Costos	Valor Total \$
Costos Directos	1.857,48
Costos Indirectos	175
Total \$	20032,48

Debido a la ineficiencia energética vivida durante el periodo de octubre, noviembre y diciembre en el país, se tuvo en consideración el uso de fuentes de energía alternativa para asegurar una toma de datos lo más continua posible por lo que como gastos directos se tuvo una representación monetaria de 3237,43 dólares, en la que para futuras pruebas y dependiendo de las condiciones energéticas se puede obviar materiales como el generador de 800W, el UPS, y la gasolina.

5. COCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.2. CONCLUSIONES

- La revisión bibliográfica de la cinética de secado, no brinda suficiente información del proceso de secado de almendras de cacao mejorado CCN-51, ya que los modelos encontrados en la literatura se refieren a granos tales como el maíz, frejol, cebada, maní, entre otros, así como en procesos de secado bajo condiciones artificiales, lo que nos permiten comprender la mecánica del contenido de humedad en función del tiempo y los diferentes regímenes de temperatura.
- Al aplicar una metodología de clasificación que consiste en la medida de características físicas como el largo, ancho y es Masar de 242 almendras de cacao seleccionadas de manera aleatoria, se pudo determinar la medida de diámetro equivalente en intervalos como:

Pequeño (16 a 17,99mm); Mediano (18 a 19,99 mm) y semillas Grandes (20 a 21,99 mm), además de soslayar intervalos de medida de 8,5 – 15,8 mm y 22 – 23 mm al ser semillas de poco impacto en cada mazorca, siendo extremadamente pequeñas o grandes.

- Los resultados obtenidos a través del analizador de humedad nos permitieron describir el comportamiento de la curva de pérdida de humedad en función del régimen de temperatura de 60 a 70°C y el tiempo, alcanzando un nivel de convergencia continua a partir de las 9 horas y perdiendo así cerca de 50% de Masa en el proceso de secado.
- El ajuste de curvas cinéticas del proceso secado en las almendras de cacao Colección Castro Naranjal 51, logró definir al modelo matemático de Midili es el más confiable en almendras: Pequeñas a 65°C de (0,999682); Pequeñas a 70°C (0,952440); Medianas a 65°C (0,997358); Grandes a 65°C (0,992762); Grandes a 70° (0,995677).
- El ajuste de curvas cinéticas del proceso de secado en las almendras de cacao Colección Castro Naranjal 51, logro determinar al modelo de Henderson Modificado como el más confiable en almendras: Pequeñas a 60°C (0,987729); Medianas a 60°C (0,992637); Medianas a 70°C (0,999728) y Grandes a 60°C (0,99811), teniendo en cuenta los valores de bondad de ajuste de R2 promedio.

5.3. RECOMENDACIONES

- El uso de tecnologías para el análisis de reajuste de curvas puede ser mejor implementado bajo software externos de programación, siendo así el uso de Python, Matlab, etc,
- Ampliar el umbral de regímenes de temperatura para una mejor comprensión en el comportamiento del secado de almendras de cacao.
- Examinar los parámetros de clasificación de almendras para un menor error humano, basándose en el volumen equivalente de cada almendra para una mejor división de tamaños de muestra y pesaje.
- Con el objetivo de definir el número mínimo de mediciones para determinar la curva de cinética de secado de cacao Colección Castro Naranjal 51.

6. REFERENCIAS

- [1] “Área de conocimiento subárea de conocimiento subárea específica de conocimiento”.
- [2] “Tipos de Cacao - Anecacao.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://anecacao.com/cacao-en-el-ecuador/tipos-de-cacao/>
- [3] B. Central del Ecuador, “Boletín analítico trimestral de comercio exterior.” [Online]. Available: www.bce.ec
- [4] J. B. Carguachi Caizatoa, “Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura.,” 2023, *Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)*. Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10481>
- [5] P. Parra Rosero, R. Saavedra, and W. Ipanaqué, “Modelación y simulación en ambiente ecosimpro de una cámara de secado para cacao”.
- [6] A. M. Pazuzhi Jiménez, “Evaluación de modelos matemáticos aplicables al proceso de secado de los granos de cacao en un secador accionado por un módulo de inducción,” Jan. 2025, Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/31863>
- [7] “Cacao variedad CCN-51 - GrandSur.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://grandsur.com/cacao-variedad-ccn-51/>
- [8] D. R. Medina Ramírez and O. L. Carlos Gabriel, “Determinación de la cinética de secado del cacao (*Theobroma cacao* L.) a temperaturas de 40, 50 Y 60 °C y evaluación de los productos resultantes” 2013.
- [9] R. Vargas, “Análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la torrefacción de los granos de cacao (*Theobroma cacao*).”
- [10] W. P. Chiguano Cuchiparte and L. V. Chimarro Tatillo, “Análisis de la cinética del secado de cacao nacional ecuatoriano y mejorado ccn-51.,” 2023, *Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)*. Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10355>

- [11] Q. (Ecuador). E. E. T. Pichilingue. P. N. de C. y C. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, “Secado del cacao,” 2006, Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1662>
- [12] C. Barrionuevo, “Simulación y aprovechamiento de la placenta del cacao CCN-51 (ramilla) para la obtención de néctar de cacao,” 2023.
- [13] J. E. J. Rubio, “Analizar y validar un programa de rehabilitación en la poscosecha del Cacao CCN51, en la finca Rami, en la Provincia de Los Ríos.”.
- [14] “Ame1007-venezuela-cacao.jpg (900×599).” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://i0.wp.com/efe.com/wp-content/uploads/2024/03/AME1007-venezuela-cacao.jpg?resize=900%2C599&ssl=1>
- [15] Ramírez Gladys and Zambrano Bryan, “Comportamiento agronómico del cacao CCN51 (*Theobroma cacao* L) usando bioestimulante orgánico a base de extractos de algas marinas,” Mar. 01, 2021. Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/124613556/Comportamiento_agron%C3%B3mico_d_el_cacao_CCN51_Theobroma_cacao_L_usando_bioestimulante_org%C3%A1nico_a_base_de_extractos_de_algas_marinas
- [16] “Cacao-02.jpg (640×480).” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://perfectdailygrind.com/es/wp-content/uploads/sites/2/2019/11/cacao-02.jpg>
- [17] Cadby Jeana, “Variedad CCN - 51: ¿Una Amenaza Para la Industria Del Cacao? - Perfect Daily Grind Español.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://perfectdailygrind.com/es/2019/07/19/variedad-ccn-51-una-amenaza-para-la-industria-del-cacao/>
- [18] “Plantula-de-cacao-ccn-51.jpg (700×800).” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: https://tienda.ecoyuma.com.co/133-large_default/plantula-de-cacao-ccn-51.jpg
- [19] “Introducción: cacao CCN-51.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: https://ecu-red-cacao.blogspot.com/2020/08/introduccion-cacao-ccn-51.html?utm_source=chatgpt.com
- [20] “343c177dabf5690cc2a3d906b38f4a8a420f7b35.jpg (512×341).” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available:

https://s.yimg.com/ny/api/res/1.2/Bww6AyeAtbI2IESk2n6XFQ--/YXBwaWQ9aGlnaGxhbmRlcjt3PTUxMjtoPTM0MQ--/https://media.zenfs.com/es_US/News/es.afp.com/343c177dabf5690cc2a3d906b38f4a8a420f7b35.jpg

- [21] “GrandSur cocoa beans”, Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://grandsur.com/fr/variete-de-cacao-ccn-51/>
- [22] “1712926412773-800x445.jpg (800×445).” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://lamananadigital.com/wp-content/uploads/2024/04/1712926412773-800x445.jpg>
- [23] J. A. Carrión Santos, “Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad CCN-51, Jama-Manabí,” 2012, Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1451>
- [24] A. M. Pauzhi Jiménez, “Evaluación de modelos matemáticos aplicables al proceso de secado de los granos de cacao en un secador accionado por un módulo de inducción.”
- [25] J. B. Carguachi Caizatoa, “Análisis de la cinética del secado de cacao en función de la temperatura,” 2023, *Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)*. Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10481>
- [26] D. A. Unigarro Bolaños, “Secado de café arábigo *coffea arábico* L. De la variedad caturra mediante lecho fluidizado.”
- [27] K. J. Ramirez Rojas and L. R. Silva Verde, “Análisis de los parámetros cinéticos de secado convectivo usando el modelo de Page en frutas y hortalizas pretratadas con diferentes métodos”.
- [28] L. Puente Díaz, E. Echegaray Pacheco, E. Castro Montero, and K. Di Scala, “Aplicación de modelos matemáticos al proceso de secado asistido por infrarrojos de descartes de limón (*Citrus limon* (L.) Burm. F. Cv. Genova),” vol. 80, pp. 91–97, 2013.
- [29] J. Candelario, Luna, and A. Guadalupe, “Determinación de parámetros característicos del proceso de secado en Mango y Zanahoria aplicando modelos

- cinéticos,” *Artículo Revista de Simulación y Laboratorio Diciembre*, vol. 4, no. 13, pp. 28–32, 2017, Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia
- [30] A. Ocampo, “Modelo cinético del secado de la pulpa de mango,” *Revista EIA*, vol. 3, no. 5, pp. 119–128, Oct. 2013, Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/153>
- [31] A. D. Giraldo Zuniga, A. Arévalo Pinedo, A. F. Silva, P. F. Silva, J. C. Valdes Serra, and M. C. de M. Pavlak, “Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas,” *Ciênc. Tecnol. Aliment*, vol. 30, no. 1, pp. 179–182.
- [32] D. Jose Duban Henao Cuellar, “Determinación,” 2013.
- [33] J. M. Pinargote Bowen, “Comportamiento productivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 ante diferentes formulaciones de fertilización. Quevedo, 2014.” 2015.
- [34] “Calibrador-pie-de-rey.jpg (982×548).” Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://tiendapapel.pochteca.com.mx/media/blog/c/a/calibrador-pie-de-rey.jpg>
- [35] “712-8eWfIVL._SL1500_.jpg (1500×1500).” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: https://m.media-amazon.com/images/I/712-8eWfIVL._SL1500_.jpg
- [36] “(PDF) Modelamiento de la operación unitaria de deshidratación bajo diferentes esquemas de secado.” Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/283732938_Modelamiento_de_la_operacion_unitaria_de_deshidratacion_bajo_diferentes_esquemas_de_secado