



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

**ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE
DIFUSIVIDAD (D_{eff}) Y CONVECTIVO DE
TRANSFERENCIA DE MASA (h_m) EN EL SECADO DE
CAFÉ (*Coffea arabica*) VAR. CATIMOR A DIFERENTES
TEMPERATURAS**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Autor : Bach. Luidem Fernández Rosillo
Asesores : Dr. Frank Fernández Rosillo
Dr. Nestor Abel Sánchez Goycochea

Línea de investigación: LI_IIA_03 Ingeniería de Procesos Alimentarios

JAÉN – PERÚ

2025

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Caracteres reemplazados

36 caracteres sospechosos en N.º de páginas

Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2019-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 22 de diciembre del año 2025, siendo las 11:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Hubert Luzdemio Arteaga Miñano

Secretario: Dr. Ernesto Hernández Martínez

Vocal: Mg. Ralph Stein Rivera Botonares, para evaluar la Sustentación del Informe Final:

() Trabajo de Investigación

(☒) Tesis

() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "**Estimación de los coeficientes de difusividad (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m) en el secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor a diferentes temperaturas**" presentado por el Bachiller **Luidem Fernández Rosillo** de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(☒) Aprobar () Desaprobar (☒) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | () |
| c) Bueno | 14, 15 | (☒) |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 12:30 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación y confirma su participación mediante la suscripción de la presente.

Jaén, 22 de diciembre de 2025



Dr. Hubert Luzdemio Arteaga Miñano
Presidente



Dr. Ernesto Hernández Martínez
Secretario



Mg. Ralph Stein Rivera Botonares
Vocal

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, **Luidem Fernández Rosillo** identificado con **DNI N°70615888**, bachilleres de la carrera Profesional de **Ingeniería de Industrias Alimentarias** de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado: **“Estimación de los coeficientes de difusividad (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m) en el secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor a diferentes temperaturas”**.

Asesorado por el Dr. Frank Fernández Rosillo y el Dr. Nestor Abel Sánchez Goycochea.

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de Ingeniero en Industrias Alimentarias.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 20, enero y 2026.



Luidem Fernández Rosillo
DNI: 70615888

INDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
II. MATERIALES Y MÉTODOS	12
2.1. Lugar de ejecución.....	12
2.2. Población, Muestra y Muestreo	12
2.2.1. Población	12
2.2.2. Muestra	12
2.2.3. Muestreo	12
2.3. Variables.....	13
2.3.1. Variables independientes	13
2.3.2. Variables dependientes	13
2.4. Métodos, técnicas, procedimientos e instrumentos de recolección de datos ...	13
2.4.1. Métodos, técnicas y procedimientos.....	13
2.4.2. Diseño experimental	22
2.5. Análisis de datos	23
III. RESULTADOS.....	24
3.1. Tiempo de secado del café (<i>Coffea arabica</i>) var. Catimor	24
3.1.1. Curvas de secado y cálculo de parámetros cinéticos.....	24
3.2. Algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el cálculo y predicción de los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m).	28
IV. DISCUSIÓN.....	33
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	42

DEDICATORIA	51
AGRADECIMIENTO	52
ANEXOS.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA).....	22
Tabla 2. Tiempos de secado de café (Coffea arabica) var. Catimor a las temperaturas de estudio.....	24
Tabla 3. Estimación de la humedad de equilibrio (Meq) en el secado de café (Coffea arabica) var. Catimor a las temperaturas de estudio	26
Tabla 4. Funciones de regresión lineal asociadas	29
Tabla 5. Cálculo de los parámetros μ_1 , Bi_m y coeficientes D_{eff} y h_m	31
Tabla 6. Regresión lineal y cálculo de los parámetros del modelo de Arrhenius para D_{eff} y h_m	32
Tabla 7. Predicción de los coeficientes D_{eff} y h_m a diferentes temperaturas de secado .	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de secado del café (Coffea arabica) var. Catimor a las temperaturas de estudio.....	25
Figura 2. Curva de velocidad de secado del café (Coffea arabica) var. Catimor a diferentes temperaturas.....	27
Figura 3. Funciones de regresión lineal.....	30

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Galería de fotos: Proceso de secado	53
Anexo 2. Galería de fotos: Proceso de medición de porcentaje de humedad	54
Anexo 3. Datos de humedades para las temperaturas de secado (40 °C).....	55
Anexo 4. Datos de humedades para las temperaturas de secado (50 °C).....	56
Anexo 5. Datos de humedades para las temperaturas de secado (60 °C).....	57
Anexo 6. Datos de humedades para las temperaturas de secado (70 °C).....	58
Anexo 7. Arreglo logarítmico de humedades (40 °C).....	59
Anexo 8. Arreglo logarítmico de humedades (50 °C).....	60
Anexo 9. Arreglo logarítmico de humedades (60 °C).....	61
Anexo 10. Arreglo logarítmico de humedades (70 °C).....	62
Anexo 11. Código del algoritmo en MATLAB (Método bisección).....	63
Anexo 12. Diagrama de Flujo del algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el cálculo y predicción de los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m).....	67
Anexo 13. Regresiones del modelo de Arrhenius para D_{eff}	68
Anexo 14. Regresiones del modelo de Arrhenius para h_m	69
Anexo 15. Estadística descriptiva e inferencial (ANOVA y Tukey) de parámetros cinéticos calculados	70

RESUMEN

La comprensión de los mecanismos de transferencia de masa en el secado de café contribuye en la mejora de los procesos tecnológicos inmersos en su procesamiento. El objetivo de la investigación fue estimar experimentalmente los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m) en el secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor. El estudio se desarrolló bajo un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA), donde la temperatura de secado constituyó el factor experimental. El secado se realizó en un secador por convección automatizado modelo CE 130 a cuatro temperaturas constantes (40, 50, 60 y 70 °C) con velocidad del aire a 1.5 m/s, se calculó del tiempo de secado, humedad de equilibrio (M_{eq}) y humedad crítica (M_c), se desarrolló un algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el secado de café usando el software MATLAB con el cual se calculó los D_{eff} y h_m y con un ajuste con el modelo de Arrhenius se predijeron los coeficientes a diferentes temperaturas de secado comercial. Los tiempos de secado fueron 26.5, 17.5, 17.5 y 13.5 h para 40, 50, 60 y 70 °C respectivamente, la M_{eq} estuvo entre 11.30% y 11.76% y la M_c en 46% para todas las temperaturas. Los valores de D_{eff} estuvieron entre 0.232×10^{-10} y 1.397×10^{-10} m²/s y para h_m entre 1.668×10^{-09} y 3.998×10^{-09} m/s. Se evidenció una relación directa con la temperatura para ambos coeficientes, a medida que la temperatura aumenta, hay un incremento en la difusividad y la transferencia de masa.

Palabra clave: transferencia de masa, difusividad, Biot, energía de activación, Arrhenius.

ABSTRACT

Understanding the mechanisms of mass transfer in coffee drying contributes to the improvement of the technological processes involved in its processing. The objective of the research was to experimentally estimate the effective diffusivity (D_{eff}) and convective mass transfer coefficients (h_m) in the drying of coffee (*Coffea arabica*) var. Catimor. The study was conducted using a Completely Randomized Design (CRD), in which the drying temperature constituted the experimental factor. Drying was carried out in an automated convection dryer model CE 130 at four constant temperatures (40, 50, 60 and 70 °C) with an air velocity of 1.5 m/s. The drying time, equilibrium moisture content (M_{eq}) and critical moisture content (M_c) were calculated, and an algorithm was developed to solve Fick's second law for coffee drying using MATLAB software, with which D_{eff} and h_m were calculated and, with an adjustment using the Arrhenius model, the coefficients were predicted at different commercial drying temperatures. The drying times were 26.5, 17.5, 17.5 and 13.5 h for 40, 50, 60 and 70 °C, respectively. The M_{eq} was between 11.30 and 11.76% and the M_c was 46% for all temperatures. The D_{eff} values were between 0.232×10^{-10} and 1.397×10^{-10} m²/s and for h_m between 1.668×10^{-09} and 3.998×10^{-09} m/s. A direct relationship with temperature was evident for both coefficients; as the temperature increases, there is an increase in diffusivity and mass transfer.

Keywords: mass transfer, diffusivity, Biot, activation energy, Arrhenius.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo actual del mercado del café centrado en la competencia de calidad requiere relaciones confiables en la cadena de suministro y asumir retos tecnológicos e ingenieriles para mejorar los procedimientos de gestión agrícola y los procesos de manipulación de productos (Petkova, 2006). La producción de café en Perú, especialmente de la variedad Catimor, ha cobrado una importancia significativa en el ámbito agrícola, no solo por su contribución económica, sino también por su influencia en la sostenibilidad ambiental y social de cientos de millas de familias cafetaleras en el país. Perú se posiciona entre los diez principales productores de café a nivel mundial, con una producción anual que ronda las 210 000 toneladas, generando ingresos aproximados de 1.1 mil millones de dólares para pequeñas comunidades agrícolas (Corazon-Guivin et al., 2023). La variedad Catimor, un híbrido resistente a la roya del café (*Hemileia vastatrix*), ha sido adoptada ampliamente debido a sus características de alta productividad y resistencia frente a enfermedades (Hernández-Amasifuen et al., 2023). El Catimor se cultiva principalmente en regiones altas y húmedas, lo que contribuye a su perfil de sabor distintivo, apreciado en los mercados nacionales e internacionales (Jezeer et al., 2019). Debido a sus propiedades organolépticas y su resistencia a enfermedades, esta variedad ha favorecido la diversificación de cultivos en zonas donde anteriormente se cultivaban solo variedades como Typica y Caturra (Le et al., 2022).

El Perú produce café para exportación con sistemas de secado por convección natural la cual aprovecha las propiedades psicrométricas del aire (Hashim et al., 2014); no obstante, existen técnicas de secado con mayor eficiencia, como el secado por convección forzada (mecánico o artificial), que es el método más empleado para el secado de materiales agrícolas y que ofrece ventajas como la disminución de la mano de obra, reducción del

tiempo de secado y conservación de la calidad del grano (Motevali et al., 2016; Nuñez Vega et al., 2016). Por ende dentro del proceso de postcosecha, el secado, es crucial para la calidad del café, estudios recientes han investigado cómo diferentes técnicas y temperaturas de secado impactan las propiedades fisicoquímicas del grano (Alves et al., 2017; Coradi et al., 2021). Por ejemplo, el secado a temperaturas controladas puede optimizar la conservación de los compuestos fenólicos y la calidad sensorial del café, mientras que el secado en condiciones inadecuadas puede provocar pérdidas de calidad y alteraciones en los perfiles de sabor y aroma (Ponder et al., 2025), en este proceso el aire calienta la superficie del producto, produciendo la evaporación del agua y un incremento en la temperatura, como consecuencia dentro del alimento se genera una conducción de calor y difusión del agua (García-Alvarado et al., 2014). Por lo tanto el secado influye en la calidad del producto y por ende se debe garantizar eficacia y a la vez supervisar y regular todas las variables inmersas en ella (Henao Arismendy, 2016). Si existe una demora en el proceso de secado del café pergamino posterior al lavado, manteniendo una humedad entre 52 al 56% por más de 48 h o se desarrolla un secado deficiente donde el grano se almacena con humedades superiores al 12%, corre un riesgo alto de ser atacado por hongos y de ser contaminado con micotoxinas (Ruiz-López et al., 2011), provocando que el grano pierda calidad causando rechazo en el mercado, lo cual afecta drásticamente los ingresos de los caficultores dado su importancia económica y social en la región (Parra-Coronado et al., 2008). Según la regulación actual para su comercialización, los granos de café pergamino seco deben alcanzar un nivel de humedad que oscile entre 10 y 12% (Prada et al., 2019). Por lo tanto, existe la necesidad de entender y optimizar el proceso de secado del café también denominada cinética de secado.

La ingeniería de alimentos se basa en las derivaciones de las ecuaciones, y la manipulación cuantitativa de las ecuaciones para resolver problemas que surgen en los

procesos industriales, tanto en el diseño de un proceso o en transcurso de este. El modelamiento en la industria alimentaria es un desafío preponderante debido a la dificultad en la comprensión de los fenómenos, experimentos e incertidumbres vinculados con la confiabilidad de los datos obtenidos y las propiedades de los alimentos (Peralta et al., 2021), este proporciona información relacionada con las características de los alimentos y los diferentes fenómenos y condiciones de operación (Fito et al., 2007). Es por ello que la ingeniería de procesos alimentarios permite comprender un determinado fenómeno basado en el conocimiento teórico existente y las mediciones disponibles, para el diseño de procesos y control (Trystram, 2012). Datta y Rattray, (2009) especifican dos usos principales del modelado de procesos alimentarios, el primero para comprender mejor un proceso y el segundo para comprobar varios escenarios hipotéticos cuando se aplica el modelo.

Un modelo constituye una representación o abstracción de la realidad, La modelación matemática es un intento de describir alguna parte del mundo real en términos matemáticos (Brito-Vallina et al., 2011). El modelamiento matemático se utiliza como una herramienta con la cual se puede determinar los efectos e inferencia de estos en los resultados y características de un proceso (Sandeep y Irudayaraj, 2001).

El desarrollo y aplicación de técnicas de simulación matemática del secado ejecutadas por ordenadores, por medio de los cuales se analizan las predicciones del comportamiento de los granos durante el proceso y se efectúan las recomendaciones para el dimensionamiento y operación de los sistemas de secado ayudan a la toma de decisiones (Parra-Coronado et al., 2008). Por lo tanto existen diversos factores que influyen en el proceso de secado, por lo cual la aplicación de métodos de simulación y/o modelación es una herramienta eficiente para evaluar el procesamiento en la industria alimentaria (Nuñez Vega et al., 2016). En consecuencia se deben incrementar los esfuerzos

ingenieriles hacia construir herramientas de modelado y simulación tanto en la industria como en el mundo académico, para alcanzar un mayor nivel de competencia y conciencia de su potencial industrial.

La Ley de Fick, que describe la difusión de masa, ha sido fundamental en el estudio de fenómenos de transferencia de masa, especialmente en el secado de alimentos. Fick formuló dos leyes que se utilizan para modelar cómo las sustancias se mueven desde áreas de alta concentración a áreas de baja concentración. En el contexto del secado de alimentos, la segunda ley de Fick se aplica para modelar la reducción de la humedad en productos alimenticios, un proceso crítico para garantizar la calidad y la vida útil de los productos (Guine et al., 2017). Diversos mecanismos y modelos han sido propuestos para abordar esta ley, desde soluciones analíticas hasta enfoques numéricos, reflejando la complejidad del proceso de secado bajo distintas condiciones.

El estudio de la difusividad del agua y la modelización del proceso de secado han revelado desafíos significativos. Por un lado, se ha demostrado que la variabilidad en las propiedades físicas de los alimentos, como la geometría y la porosidad, puede afectar drásticamente el coeficiente de difusión del agua (Ramallo y Albani, 2007). En estudios recientes, se utilizó la Ley de Fick para derivar coeficientes de difusión efectivos a partir de datos experimentales en procesos de secado convectivo de productos alimenticios (Guine et al., 2017; Ribeiro, 2025). Sin embargo, la inconsistencia observada en la regulación de la transferencia de masa durante el secado se traduce en que en las etapas iniciales el secado es rápido y luego experimenta un periodo de secado lento que necesita un ajuste continuo del modelo (Silva Júnior et al., 2023). Esto plantea una problemática relevante: la dificultad de definir un modelo único que describa efectivamente el proceso de secado, dado que los diferentes métodos de aproximación pueden producir resultados

disparos en función de las condiciones experimentales y las características de los alimentos.

Adicionalmente, la aplicación de modelos numéricos como el Método de Elementos Finitos permite una caracterización más precisa de los fenómenos de transferencia de masa en geometrías más complejas; por ejemplo, el modelado de la difusión de humedad en patatas en formas poliédricas ha demostrado una mayor robustez al considerar tanto la transferencia de momento como de masa (Silva Júnior et al., 2023). Otros estudios destacan la importancia del uso de modelos alternativos, como el modelo de Fuerza Motriz Lineal, que ofrece aproximaciones que pueden ser más representativas en la estimación del cinetismo de la absorción de humedad durante el secado (Dutta et al., 2008). Así, la diversidad de enfoques y la continua evolución de los modelos resaltan la necesidad de investigación adicional para resolver discrepancias y optimizar el diseño y la operación de procesos de secado en la industria alimentaria.

Además, los modelos matemáticos de transferencia de humedad desde el alimento al medio circundante durante el secado dependen de dos parámetros que son función, entre otras, de las características estructurales y geométricas del alimento: el coeficiente de difusividad efectiva (D_{eff}), parámetro que refiere a la velocidad en la que el agua se difunde desde el interior del grano de café hacia la superficie y el coeficiente convectivo de transferencia de masa (h_m), parámetro que hace referencia a la velocidad en la que el agua se transfiere desde la superficie del grano hacia el aire circundante (Coradi et al., 2021). Según Tripathy y Kumar, (2009) el principal reto en la actualidad es obtener valores precisos de D_{eff} y h_m , pudiéndose constatar en general que la mayoría de los investigadores utilizan los datos publicados disponibles de D_{eff} y h_m debido a la escasez de información relevante sobre los mismos (Tripathy y Kumar, 2008). La bibliografía indica que los métodos numéricos como los métodos de diferencias finitas y elementos

finitos se han empleado normalmente en la resolución de modelos matemáticos complejos que consideran simultáneamente los fenómenos de transferencia de calor y masa, mientras que lo más habitual es que para problemas más sencillos, que consideran distintas simplificaciones, se empleen modelos analíticos para la determinación de estos parámetros (Tripathy y Kumar, 2009). Así, para una determinada geometría (lámina infinita, cilindro infinito, esfera) la determinación experimental de los coeficientes D_{eff} y h_m se considera un sistema difusivo sencillo cuya solución analítica es bien conocida. Para el caso del secado de café, el problema de difusión monodimensional se asume como una esfera de radio L , la solución analítica de la ley de Fick se puede expresar en términos de una serie infinita de magnitudes adimensionales. El incremento de la temperatura durante el proceso de secado del café (*Coffea arabica* var. *Catimor*) produce un aumento significativo en D_{eff} y h_m , debido a una mayor energía térmica disponible que favorece el movimiento de la humedad interna hacia la superficie y su posterior eliminación al medio ambiente.

Dentro de la problemática que se suscita en el área, se ha reportado que existe un nivel de conocimiento bajo relacionado con el uso de modelos matemáticos presentes en los procesos productivos en las empresas de alimentos los cuales se vinculan con procesos alimentarios específicos teniendo en cuenta la complejidad de las matrices alimentarias (Djekic et al., 2019), no obstante, se evidencia una brecha entre las habilidades matemáticas que requiere el ingeniero de industrias alimentarias, vinculadas fundamentalmente a las actividades de modelamiento, interpretación y comunicación con un lenguaje preciso de las operaciones inmersas en un proceso productivo (Brito-Vallina et al., 2011). La falta de modelos matemáticos precisos para estimar experimentalmente los D_{eff} y h_m que se requieren en la cinética de secado (segunda ley de Fick) (Arranz Saiz et al., 2011), específicamente para el secado de café, limita la eficiencia y calidad del

proceso. Esta falta de precisión conlleva a no poder predecir tiempos de secado óptimos mediante modelamiento y minimizar pérdidas económicas para los productores debido a la afectación en la calidad del producto final, lo que a su vez impactaría en la competitividad del mercado cafetero de la región.

Dentro de las investigaciones que abordan el tema de estudio tenemos a:

Arranz et al. (2011) determinaron de forma experimental los coeficientes D_{eff} y h_m , basándose en la consideración de un sistema sencillo difuso (Ley de Fick) monodimensional en una lámina infinita de grosor $2l$ controlando el medio externo a temperatura y humedad constantes. Como resultados obtuvieron un ajuste directo para los parámetros de $D_{eff} = 4.76 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ y $h_m = 2.74 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ y concluyeron estableciendo un procedimiento matemático eficaz para el cálculo de los coeficientes D_{eff} y h_m realizando un ajuste por mínimos cuadrados a la aproximación lineal de la solución analítica.

Giraldo-Zuniga et al. (2010) obtuvieron experimentalmente la cinética del secado de la pulpa de cupuaçu en forma de rodajas con un espesor de 0.5 cm, utilizando un secador de bandejas por el método de secado en estufa a temperaturas de 50, 60 y 70 °C y a la velocidad del aire de secado de 1.5 m/s. Los resultados que obtuvieron muestran que el producto se secó desde 86.3% hasta un 20% de humedad en 9.2, 8.1 y 7.3 h para las temperaturas de 50, 60 y 70 °C respectivamente; ajustando las curvas experimentales del secado al modelo difusional de Fick para una lámina infinita y al modelo de Page Peach, los coeficientes de difusión para el modelo de Fick fueron 1.171×10^{-7} , 1.273×10^{-7} y $1.561 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para 50, 60 y 70 °C respectivamente. Concluyeron que temperaturas menores conllevaron a tiempos prolongados de secado.

Vargas y Abarca (2018) determinaron un modelo matemático de calentamiento de los granos de café durante el proceso de torrefacción, utilizando un tostador convencional a

una temperatura de 280 °C con granos de 400, 600, 800 y 1000 g y humedad de 8.73%. Las constantes del modelo que obtuvieron por regresión no lineal para cada masa fueron $R^2 > 88\%$. Concluyeron que el modelo se ajustó adecuadamente para los datos de calentamiento de la masa de granos de café durante la torrefacción y efectivamente aproxima la temperatura final de los granos.

Ocampo (2013) desarrolló un modelo para predecir el tiempo de secado de la pulpa de mango (*Mangifera indica*), construyó un secador y realizó pruebas de secado a temperaturas de 55, 60 y 65 °C con una velocidad de aire constante de 2.0 m/s y una humedad relativa controlada de 50%, simplificando la ecuación clásica de Fick para establecer la cinética de secado. Los resultados que obtuvo fueron realizando un ajuste de los coeficientes de correlación mediante el modelo de GAB y concluyó en que la desadsorción de la pulpa de mango se ajusta a la ecuación de GAB y el secado de la pulpa puede modelarse con el modelo de Crank (1975), usando solo los primeros términos de la sumatoria y del desarrollo en serie.

Reyes et al. (2019) resolvieron numéricamente el secado de café pergamino (*Coffea arabica* var. *Castillo*) basado en balances macroscópicos de energía, empleando las leyes de Fourier y Fick bajo condiciones convectivas acordes a la geometría del grano. La simulación tridimensional mostró alta concordancia entre las predicciones y los valores experimentales de temperatura y humedad, concluyendo que la optimización del proceso mejora la relación entre los parámetros de secado y la calidad del producto.

Virgen-Navarro et al. (2016) compararon dos enfoques para estimar el D_{eff} durante el tostado, un modelo de parámetros ajustables y un modelo difuso tipo Mamdani basados en la segunda Ley de Fick. El modelo de parámetros ajustables se calibró con datos experimentales obtenidos durante el tostado en un lecho fuente a tres temperaturas diferentes 275, 300 y 325 °C. Asimismo, el modelo Mamdani utilizó la lógica difusa para

manejar la incertidumbre y no linealidades del proceso. Los resultados mostraron que el modelo Mamdani presentó una precisión superior ($R^2 > 0.999$ y $SEE < 0.001$) y concluyeron que el modelo difuso tipo Mamdani es más preciso.

Torres-Valenzuela et al. (2019) evaluaron las condiciones de secado de cáscara de café y su efecto sobre propiedades fisicoquímicas. Realizaron cinéticas de secado hasta 420 minutos, a 40, 50 y 60 °C; donde los datos experimentales se ajustaron con 4 modelos cinéticos de capa delgada. También evaluaron el contenido de cafeína y ácido clorogénico y los parámetros de color en la cáscara húmeda y seca. Obtuvieron una reducción del contenido de agua hasta el 13.5%. Concluyeron que el modelo de Page fue el más adecuado para representar el secado a las tres temperaturas evaluadas.

El objetivo general del estudio consistió en estimar experimentalmente los coeficientes de D_{eff} y h_m en el secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor a diferentes temperaturas. Asimismo los objetivos específicos fueron determinar los parámetros (humedad crítica (M_c) y humedad de equilibrio (M_{eq})) y las curvas de la cinética de secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor a 40, 50, 60 y 70 °C, desarrollar el algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el secado de café usando el software especializado MATLAB, calcular los D_{eff} y h_m a 40, 50, 60 y 70 °C en el secado de café y predecir los D_{eff} y h_m para diferentes temperaturas en el secado de café mediante el cálculo de la energía de activación (E_a) y los factores pre exponenciales (D_0 y h_0) con el modelo de Arrhenius.

La presente investigación parte de la hipótesis de que el incremento de la temperatura durante el proceso de secado del café (*Coffea arabica*) var. Catimor produce un aumento significativo en los coeficientes D_{eff} y h_m , debido a una mayor energía térmica disponible que favorece el movimiento de la humedad interna hacia la superficie y su posterior eliminación al medio ambiente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en el laboratorio de Fisiología y Biotecnología Vegetal (FISIOBVEG) perteneciente al Instituto de Investigación para el desarrollo sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (UNTRM), Chachapoyas, Amazonas. Perú. Los frutos de café se transportaron con geles refrigerantes en cajas de Tecnopor totalmente herméticos hasta el análisis correspondiente.

2.2. Población, Muestra y Muestreo

2.2.1. Población

Producción de café de la provincia de Jaén variedad Catimor de la cosecha 2025, de la finca ubicada en el sector la Meseta (lat: -5. 311938°, long: -78. 8877384° y H: 1513.0 m) del caserío El Cruce, distrito de Jaén.

2.2.2. Muestra

12 kg de café variedad Catimor de la cosecha 2025, seleccionados manualmente para excluir granos defectuosos, fueron obtenidos de la Asociación Golden Coffee del distrito de Jaén, provincia de Jaén, región Cajamarca, Perú.

2.2.3. Muestreo

El muestreo fue no probabilístico, dirigido o intencional por tratarse de una muestra que se selecciona deliberadamente con base en el juicio crítico del investigador.

2.3. Variables

2.3.1. Variables independientes

- Temperaturas de secado: 40, 50, 60 y 70 °C

2.3.2. Variables dependientes

- Porcentaje de humedad (%)
- Humedad de equilibrio (M_{eq}), humedad crítica (M_c)
- Tiempos de secado (h)
- Coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m)

2.4. Métodos, técnicas, procedimientos e instrumentos de recolección de datos

2.4.1. Métodos, técnicas y procedimientos

La investigación se realizó en dos etapas: la primera, consistió en el cálculo del tiempo de secado, M_{eq} , M_c y construcción de las curvas de secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor a cuatro temperaturas (40, 50, 60 y 70 °C) y la segunda, en el desarrollo del algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el secado de café usando el software especializado MATLAB con el cual se calculó los D_{eff} y h_m para las temperaturas de secado del estudio y la predicción para diferentes temperaturas en el secado de café mediante el cálculo de la energía de activación (E_a) y los factores pre exponenciales (D_0 y h_0) con el modelo de Arrhenius.

Etapas 1: Cálculo del tiempo de secado, construcción de las curvas de secado, M_{eq} y M_c de café (*Coffea arabica*) var. Catimor.

- Recolección de las muestras

Los frutos de café se recolectaron de la finca ubicada en el sector la Meseta (lat: -5. 311938°, long: -78. 8877384° y H: 1513.0 m), caserío El Cruce, distrito de Jaén, Provincia Jaén. La cosecha de los cerezos se realizó de forma manual y selectiva (granos maduros), se despulpó, luego se fermentaron en tanques tina de cemento durante 14 h y a continuación se realizó el lavado, después se envasaron en bolsas de polietileno de alta densidad y se trasladaron a los ambientes de la UNTRM.

- Pre tratamiento de las muestras

Se realizó una selección del café en la cual se retiraron los granos con presencia de daños físicos (Anexo 1).

- Tiempos de secado

El proceso de secado se llevó a cabo en un secador por convección automatizado modelo CE 130, marca Gunt, de procedencia alemana, con un canal de secado, soplante, dispositivo de calefacción y balanza incorporados, con una potencia de 33 W y caudal másico de 700 m³/h para el soplante, con rangos de medición de 0 a 100% de humedad del aire, de 0 – 125 °C de temperatura y de 0 – 1.5 m/s de velocidad de flujo. Se secaron 12 kg de café, las muestras se pesaron en una balanza analítica con sensibilidad de 0.1 mg. y se separaron en 3 kg por temperatura (1 kg por repetición), las muestras se distribuyeron en 2 bandejas esparcidas homogéneamente, las cuales se introdujeron en el secador. Se dejó el tiempo correspondiente para que la humedad del grano alcance un 12%, este procedimiento se realizó por triplicado a una velocidad constante de 1.5 m/s para las temperaturas de estudio (40, 50, 60 y 70 °C), se tomó la lectura de la humedad inicial de las

muestras en un determinador de humedad modelo DAB 100-3, marca Kern, de procedencia alemana, se registró la lectura de la diferencia de pesos de las muestras cada 30 min del secador y los tiempos de secado para cada temperatura hasta alcanzar la humedad final establecida (Anexos 1 y 2).

- Cálculo de parámetros cinéticos

a) Construcción de curvas de secado y de velocidad de secado

Las curvas de secado para cada temperatura del estudio se construyeron con los datos calculados para las humedades en base húmeda (ecuaciones 1, 2 y 3) de cada muestra (eje y) versus el tiempo registrado cada 30 min (eje x). Asimismo las curvas de velocidad de secado para cada temperatura se graficaron con los valores de humedad libre (M_l) de cada muestra para el eje x (ecuación 4) versus la razón de velocidad o tasa de secado (T_s) para el eje y (ecuación 5). Se utilizó la librería matplotlib de Python para representar los datos creando gráficos de humedad (% en base húmeda) vs Tiempo (h) con puntos de datos conectados por líneas para visualizar la tendencia del secado (Akpinar, 2006; Simal et al., 2005; Vega Gálvez et al., 2007) (Anexos 3, 4, 5 y 6).

$$M_{bh} = \frac{P_n - M_{ss}}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

$$M_{ss} = P_n - M_a \quad (2)$$

$$M_a = P_n * M_{bhinicial} \quad (3)$$

Donde:

M_{bh} = Humedad en base húmeda en un tiempo determinado (%)

P_n = Peso de muestra en un tiempo determinado (g)

M_{ss} = Masa de sólidos secos en un tiempo determinado (g)

M_a = Masa de agua en un tiempo determinado (g)

$M_{bhinicial}$ = Humedad en base húmeda inicial de la muestra (%)

$$M_l = M_{bh} - M_{eq} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{M_{l2} - M_{l1}}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

Donde:

M_l = Humedad libre (%)

T_s = Tasa de secado (h^{-1})

M_{l1} = Humedad libre en un tiempo determinado (%)

M_{l2} = Humedad libre en un tiempo subsiguiente (%)

t_1 = Tiempo de secado determinado (h)

t_2 = Tiempo de secado subsiguiente (h)

b) Cálculo de humedad de equilibrio (M_{eq})

Para calcular la M_{eq} de las muestras de café secas a 40, 50, 60 y 70 °C, para un rango de humedades relativas entre 0 y 100% (Rossi y Roa, 1980), se usó la ecuación 6 aplicado en café pergamino (Parra-Coronado et al., 2008).

$$M_{eq} = (P_1 * MR + P_2 * MR^2 + P_3 * MR^3) \exp[(Q_1 * MR + Q_2 * MR^2 + Q_3 * MR^3) * T] \quad (6)$$

Donde:

M_{eq} = Humedad de equilibrio en base seca (%)

MR = Humedad relativa del aire en la cámara de secado, decimal

T = Temperatura del aire (°C)

P_1 = 61.030848

Q_1 = -0.03049

P_2 = -108.37141

Q_2 = 0.070114

$$P_3 = 74.461059$$

$$Q_3 = -0.035177$$

P y Q son los coeficientes encontrados del modelo.

c) Cálculo de humedad crítica (M_c)

Para el secado de café a las cuatro temperaturas de estudio, la M_c se calculó en base a la estimación y gráfica de la tasa de secado (Parra-Coronado et al., 2008), siendo la diferencia entre valores consecutivos de humedad en función del tiempo. Se identificó el punto en el que la tasa de secado cambia abruptamente, indicando el final del período de tasa constante y el inicio del período de secado decreciente y se tomó la humedad en ese punto como la M_c (Anexos 3, 4, 5 y 6).

Etapla 2: Desarrollo del algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el cálculo y predicción de los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m).

a) Determinación experimental de los coeficientes D_{eff} y h_m

Para la determinación experimental de los coeficientes D_{eff} y h_m se consideró la difusión monodimensional en una esfera, con lo cual se asumió que el grano de café se asemeja a esta geometría (Chaparro et al., 2019; Virgen-Navarro et al. 2016).

Para una esfera homogénea de radio L centrada en el origen de coordenadas $x=0$, es decir definida en el intervalo $-L < x < +L$, inmersa en un medio externo controlado a temperatura y humedad constantes, cuya distribución inicial de humedad es uniforme e igual a M_0 . La ecuación de difusión que se aplicó se definió (Cengel y Ghajar, 2020; Tripathy y Kumar, 2008):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (7)$$

con la condición inicial

$$M(x, t = 0) = M_0 \quad (8)$$

y condiciones de contorno

$$D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} = 0, \text{ y} \quad (9)$$

Ecuación de transferencia de masa en estado no estacionario para una esfera
(Cengel y Ghajar, 2020)

$$\frac{M(x,t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2 * [\sin(\mu_n) - \mu_n * \cos(\mu_n)]}{\mu_n - \sin(\mu_n) * \cos(\mu_n)} * \frac{\sin\left(\mu_n * \frac{x}{L}\right)}{\mu_n * \frac{x}{L}} * \exp\left(-\mu_n^2 * \frac{D_{eff} * t}{L^2}\right) \right] \quad (10)$$

Donde μ_n son las raíces positivas, en orden creciente, de la ecuación, $M(x,t)$ es la humedad en un tiempo y posición específica, M_{eq} la humedad de equilibrio y M_0 la humedad inicial.

$$1 - \frac{\mu_n}{\tan \mu_n} = \frac{h_m L}{D_{eff}} \quad (11)$$

Siendo Bi_m el número de Biot de transferencia de masa

$$Bi_m = \frac{h_m L}{D_{eff}} \quad (12)$$

Donde:

h_m = Coeficiente de transferencia de masa (m/s)

L = Longitud característica (m)

D_{eff} = Coeficiente de difusión efectiva m^2/s

Se aplicó la propiedad de convergencia monótona para la ecuación 10, realizamos un ajuste por mínimos cuadrados de los datos del experimento de secado, humedades y tiempos al primer término de la serie infinita (Arranz et al. 2011). Tomando logaritmos obtenemos:

$$\log \left[\frac{M_{(x,t)} - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right] = \log \left[\frac{2 * [\sin(\mu_1) - \mu_1 * \cos(\mu_1)]}{\mu_1 - \sin(\mu_1) * \cos(\mu_1)} * \frac{\sin\left(\mu_1 * \frac{x}{L}\right)}{\mu_1 * \frac{x}{L}} \right] - \mu_1^2 * \frac{D_{eff} * t}{L^2} \quad (13)$$

De este modo, se ajustaron los datos experimentales a una recta $y = a * t + b$, donde:

$$y = \log \left[\frac{M_{(x,t)} - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right] \quad (14)$$

Del valor que se obtuvo del origen o intercepto “ b ”, se calculó la raíz μ_1 aplicando un método numérico, conforme a la ecuación 15:

$$b = \log \left[\frac{2 * [\sin(\mu_1) - \mu_1 * \cos(\mu_1)]}{\mu_1 - \sin(\mu_1) * \cos(\mu_1)} * \frac{\sin\left(\mu_1 * \frac{x}{L}\right)}{\mu_1 * \frac{x}{L}} \right] \quad (15)$$

Se empleó el método de la bisección del software MATLAB-2024b (Forsythe, 1977).

b) Desarrollo del algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick

El algoritmo de solución se desarrolló definiendo la ecuación 10 en la cual se encontraron la raíz de la ecuación, después se implementó la función en MATLAB como una función en un archivo separado (para ecuaciones complejas), se aplicó el método de la bisección para encontrar la raíz proporcionando un valor inicial o un intervalo donde la función cambia de signo y por último se interpretó el resultado donde el valor devuelto por el método de la bisección fue el punto donde $f(x) = 0$ con una precisión numérica aceptable (Anexo 11).

Con la raíz calculada μ_1 , el radio L y la pendiente “ a ” del ajuste, se calculó el coeficiente de difusividad D_{eff} según:

$$a = \mu_1^2 * \frac{D_{eff}}{L^2} \quad (16)$$

Para finalizar se obtendrá el coeficiente de transferencia de masa h_m , calculando el módulo de Bi_m con la raíz μ_1 , conforme a la ecuación (17):

$$1 - \frac{\mu_1}{\tan \mu_1} = Bi_m \quad (17a)$$

$$Bi_m = \frac{h_m L}{D_{eff}} \quad (17b)$$

c) Predicción de los coeficientes D_{eff} y h_m a diferentes temperaturas.

La predicción de los coeficientes D_{eff} y h_m a diferentes temperaturas se calcularon con las ecuaciones (18) y (19), considerando un comportamiento tipo Arrhenius respecto a la temperatura (Bottazzi et al., 2012; Heyd et al.,

2007; Mohapatra y Rao, 2005), donde se linealizó en base al modelo de Arrhenius los coeficientes con las temperaturas respectivas del estudio (Anexos 12 y 13), según detalle:

$$D_{eff} = D_0 * \exp \left[\frac{-E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \quad (18a)$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln \left[D_0 * \exp \left[\frac{-E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \right] \quad (18b)$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \left[\frac{E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \quad (18c)$$

Donde:

D_{eff} = Coeficiente de difusión efectiva a la temperatura T_A

D_0 = Factor pre exponencial de difusividad

E_a = energía de activación (cal/mol), energía mínima por encima de la cual se lleva a cabo la difusión del agua en la partícula (Hii et al., 2009).

T_A = Temperatura (°C)

R = Constante universal de los gases (1,986 cal/mol*K).

$$h_m = h_0 * \exp \left[\frac{E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \quad (19a)$$

$$\ln(h_m) = \ln \left[h_0 * \exp \left[\frac{E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \right] \quad (19b)$$

$$\ln(h_m) = \ln(h_0) + \left[\frac{E_a}{R(T_A + 273.15)} \right] \quad (19c)$$

Donde,

h_m = Coeficiente convectivo a la temperatura T_A

h_0 = Factor pre exponencial convectivo

El valor de la energía de activación E_a y de los factores pre exponenciales D_0 y h_0 se obtuvieron a partir de las pendientes e intercepto de las gráficas de las líneas rectas construidas respectivamente a partir de $\ln(D_{eff})$ con $(1/(T_A + 273.15))$ y $\ln(h_m)$ con $(1/(T_A + 273.15))$. Con el valor obtenido de la E_a y de los factores pre exponenciales, se predijo los valores de los coeficientes D_{eff} y h_m a diferentes temperaturas de secado de café.

2.4.2. Diseño experimental

La investigación tuvo un diseño experimental, según la Tabla 1, que corresponde a un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA), con cuatro tratamientos que fueron representados con cada temperatura de secado asignado (40, 50, 60 y 70 °C), este proceso se realizó por triplicado para cada temperatura, obteniendo un total de 12 unidades experimentales.

Tabla 1

Diseño Completamente Aleatorizado (DCA)

Tratamientos	Repeticiones	Humedad crítica (M_c)	Humedad de equilibrio (M_{eq})	Coeficientes D_{eff} y h_m
A ₁ (40 °C)	A _{1.1}	$M_{c1.1}$	$M_{eq1.1}$	$D_{eff1.1}$ y $h_{m1.1}$
	A _{1.2}	$M_{c1.2}$	$M_{eq1.2}$	$D_{eff1.2}$ y $h_{m1.2}$
	A _{1.3}	$M_{c1.3}$	$M_{eq1.3}$	$D_{eff1.3}$ y $h_{m1.3}$
A ₂ (50 °C)	A _{2.1}	$M_{c2.1}$	$M_{eq2.1}$	$D_{eff2.1}$ y $h_{m2.1}$
	A _{2.2}	$M_{c2.2}$	$M_{eq2.2}$	$D_{eff2.2}$ y $h_{m2.2}$
	A _{2.3}	$M_{c2.3}$	$M_{eq2.3}$	$D_{eff2.3}$ y $h_{m2.3}$

A ₃ (60 °C)	A _{3.1}	$M_{c3.1}$	$M_{eq3.1}$	$D_{eff3.1}$ y $h_{m3.1}$
	A _{3.2}	$M_{c3.2}$	$M_{eq3.2}$	$D_{eff3.2}$ y $h_{m3.2}$
	A _{3.3}	$M_{c3.3}$	$M_{eq3.3}$	$D_{eff3.3}$ y $h_{m3.3}$
A ₄ (70 °C)	A _{4.1}	$M_{c4.1}$	$M_{eq4.1}$	$D_{eff4.1}$ y $h_{m4.1}$
	A _{4.2}	$M_{c4.2}$	$M_{eq4.2}$	$D_{eff4.2}$ y $h_{m4.2}$
	A _{4.3}	$M_{c4.3}$	$M_{eq4.3}$	$D_{eff4.3}$ y $h_{m4.3}$

Nota. A: Temperatura de secado (A₁=40 °C, A₂= 50 °C, A₃=60 °C, A₄=70 °C)

2.5. Análisis de datos

Los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como medias $\pm$ desviaciones estándar. La significancia de las diferencias se comprobaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software Python; se procesó la estadística descriptiva como gráficos de cajas y bigotes, además se sometió a un test de Tukey para determinar si existe diferencia significativa entre la media con un nivel de significancia de 95% para cada factor. Los datos que se obtuvieron del secado para cada tratamiento, fueron registrados y procesados en una hoja de cálculo Excel (Programa Microsoft Excel 365). Los modelos matemáticos fueron evaluados con los estadísticos de ajuste y error R^2 (coeficiente de determinación) y RMSE (Error Cuadrático Medio) (Giraldo-Zuniga et al. 2010). Asimismo la cinética de secado fue ajustada al modelo tipo Arrhenius linealizado en base al modelo de difusión de masa de la segunda ley de Fick en estado no estacionario para una esfera, para el cálculo de los coeficientes D_{eff} y h_m a diferentes temperaturas, para lo cual también se utilizaron los estadísticos R^2 y RMSE.

III. RESULTADOS

3.1. Tiempo de secado del café (*Coffea arabica*) var. Catimor

En la Tabla 2 se muestra los resultados del tiempo requerido para la disminución de humedad en el secado de café a las temperaturas de estudio, evidenciando que a mayor temperatura se tiene un menor tiempo de secado (Anexos 3, 4, 5 y 6).

Tabla 2

Tiempos de secado de café (Coffea arabica) var. Catimor a las temperaturas de estudio

Temperatura	% Humedad inicial (base húmeda)	% Humedad final (base húmeda)	Tiempo de secado (h)
40 °C	57.52 ± 0.00	11.30 ± 1.44	26.5 ± 1.23
50 °C	57.52 ± 0.00	11.67 ± 2.50	17.5 ± 2.45
60 °C	57.52 ± 0.00	11.49 ± 2.85	17.5 ± 2.78
70 °C	57.52 ± 0.00	11.49 ± 1.71	13.5 ± 1.85

Nota: Media ± desviación estándar para tres repeticiones.

3.1.1. Curvas de secado y cálculo de parámetros cinéticos

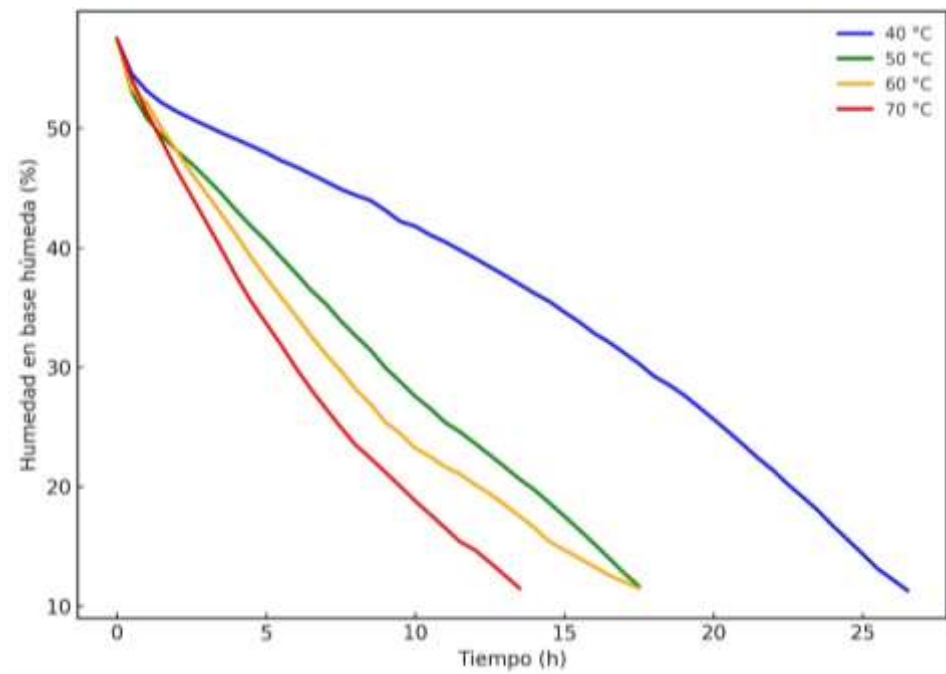
a) Curvas de secado

La figura 1 representa la evolución del contenido de humedad del café variedad Catimor durante el proceso de secado las temperaturas del estudio (Anexos 3, 4, 5 y 6). Cada línea conecta los valores experimentales de humedad medidos a intervalos regulares de tiempo. Las curvas muestran un comportamiento típico de un proceso de cinética de secado convectivo controlado por difusión interna, caracterizado por una rápida disminución inicial de humedad (fase de velocidad constante corta) seguida por una etapa de reducción más lenta (fase de velocidad

decreciente prolongada). El efecto de la temperatura es exponencial, acelera significativamente el proceso de transferencia de masa, reduciendo el tiempo necesario para alcanzar la humedad requerida (<12%).

Figura 1

Curvas de secado del café (Coffea arabica) var. Catimor a las temperaturas de estudio



b) Cálculo de parámetros cinéticos

Humedad de equilibrio (M_{eq})

En la tabla 3 se muestra las M_{eq} calculadas con la ecuación 1 y los valores asumidos para el estudio (humedad final requerida para el secado de café a nivel industrial). Las M_{eq} calculadas disminuyeron conforme aumentó la temperatura y la humedad relativa (MR) mostró similar

comportamiento; estos valores fueron menores que las M_{eq} asumidas para las cuatro temperaturas experimentales (Anexos 3, 4, 5 y 6).

Tabla 3

*Estimación de la humedad de equilibrio (M_{eq}) en el secado de café (*Coffea arabica*) var. Catimor a las temperaturas de estudio*

Temperatura	MR (%)*	M_{eq} (%) Ecuación (6)	M_{eq} (%) Asumida
40°C	37 ± 5.35	10.03 ± 1.23	11.30 ± 1.05
50°C	28 ± 7.38	8.45 ± 1.05	11.67 ± 1.80
60°C	19 ± 9.25	6.64 ± 2.30	11.49 ± 2.04
70°C	10 ± 7.37	4.31 ± 1.75	11.49 ± 1.39

Nota: Media $\pm$ desviación estándar para tres repeticiones. *Lectura de la humedad relativa interna en el secador. MR : Humedad Relativa. M_{eq} : Humedad de equilibrio.

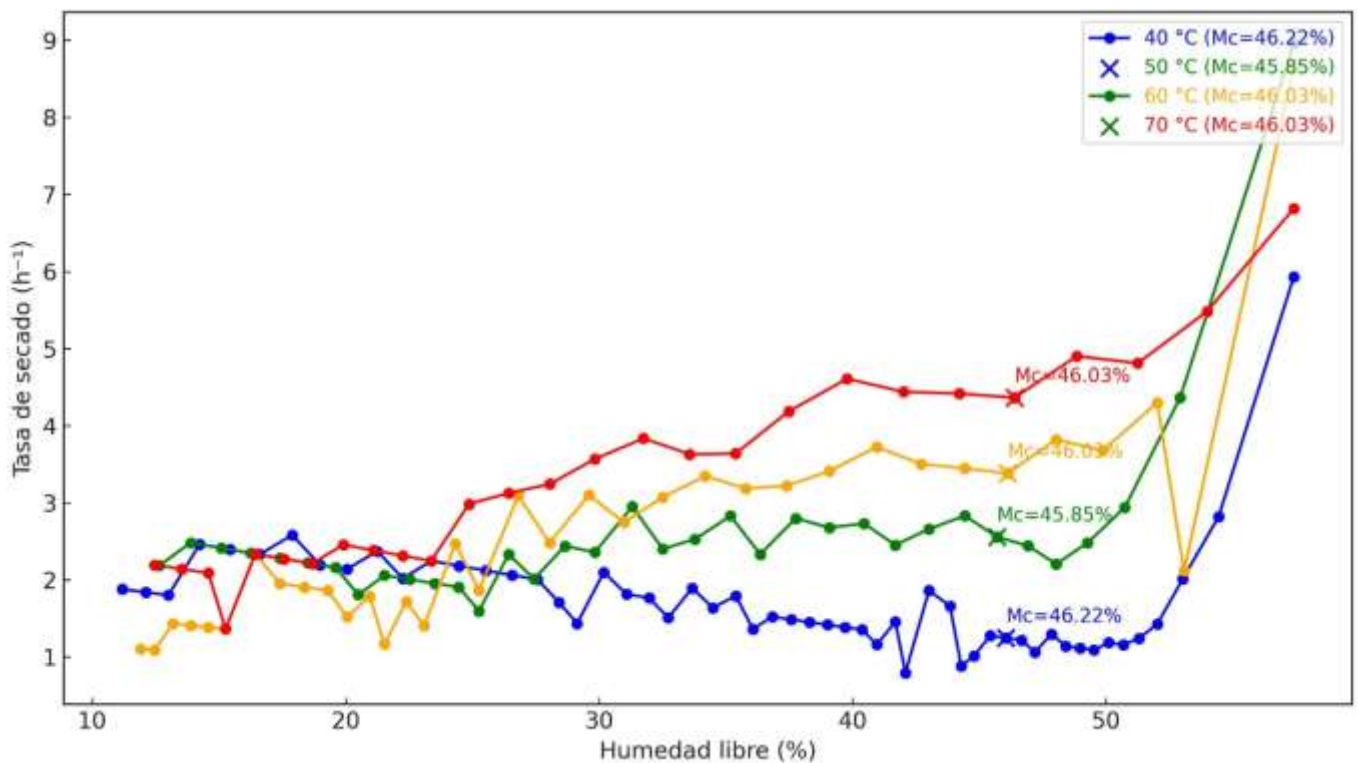
Humedad crítica (M_c)

El cálculo de las M_c para cada temperatura de secado se realizó mediante la construcción de curvas de velocidad de secado en base a las tasas de secado equidistantes frente a la humedad libre ($M_{bh} - M_{eq}$) considerando las M_{eq} asumidas (tabla 3). En la figura 2 se observa las curvas de velocidad de secado que describen cómo varía la tasa de pérdida de humedad del café en función de la humedad libre, que indica la cantidad de agua disponible para ser evaporada por encima de la M_{eq} (Anexos 3, 4, 5 y 6). En todos los casos se observa una tendencia típica de un secado en dos fases, la fase de velocidad constante que se presentó solo al inicio del proceso, con una alta tasa de secado. Este punto coincidió con la humedad crítica para todas las temperaturas y la fase de velocidad decreciente mostrando que después del punto crítico la tasa disminuye

gradualmente, indicando una transición hacia el secado por difusión interna. La caída en la velocidad es más pronunciada a medida que el contenido de humedad disminuye y el agua está más fuertemente ligada al interior del grano. La M_{eq} (pico de tasa) está en torno a 46% para las cuatro temperaturas medidas.

Figura 2

Curva de velocidad de secado del café (Coffea arabica) var. Catimor a diferentes temperaturas



3.2. Algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el cálculo y predicción de los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m).

El algoritmo para la solución de la segunda ley de Fick para calcular y predecir los coeficientes D_{eff} y h_m consta de 5 componentes (Anexos 7, 8, 9, 10, 11 y 12):

1. Inicio: registro de humedades del café obtenidos a lo largo del tiempo para cada temperatura experimental en una hoja Excel.
2. Lectura de datos: lectura de datos de la humedad del café en el software Matlab.
3. Procesamiento: se construyen las funciones de regresión lineal para cada temperatura a escala logarítmica, una vez determinados los parámetros a y b de las funciones de regresión lineal, se calculan los parámetros μ de las cuatro temperaturas, usando el método de bisección con 50 iteraciones en el intervalo $[2, 3]$ y error absoluto $8.88178419700125 \times 10^{-16}$. Con las raíces μ encontradas se determina Bi_m y la D_{eff} encontrando las raíces de ecuaciones no lineales definidas en las ecuaciones (15) y (16) respectivamente. Para el cálculo de ambos parámetros se usó el método de bisección con 45 iteraciones en el intervalo $[0, 1]$ y error $8.88178419700125 \times 10^{-16}$. En particular, para el término D_{eff} se considera $L = 0.0003968$ m, Finalmente, el h_m se determina en función de los términos anteriormente calculados, asociadas entre sí mediante la ecuación (17) (Anexo 11).

4. Toma de decisiones: los valores calculados para μ , D_{eff} , Bi_m y h_m se verifican si se encuentran en el rango establecido para el secado de alimentos.
5. Salida de resultados: los resultados se muestran en tablas de doble entrada y gráficas de dispersión.

a) Determinación de funciones de regresiones lineales

El registro de estas funciones $f(t) = at + b$ y su respectivo error cuadrático medio (ECM) se describen en la Tabla 4, donde los coeficientes **a** y **b** son determinados respectivamente (ecuaciones (15) y (16)) (Anexos 7, 8, 9 y 10). Note que **b** es una aproximación de la ecuación (16) en el sentido de que la distancia adimensional desde el centro en una esfera es equivalente a uno, es decir $x/L \simeq 1$.

Tabla 4

Funciones de regresión lineal asociadas

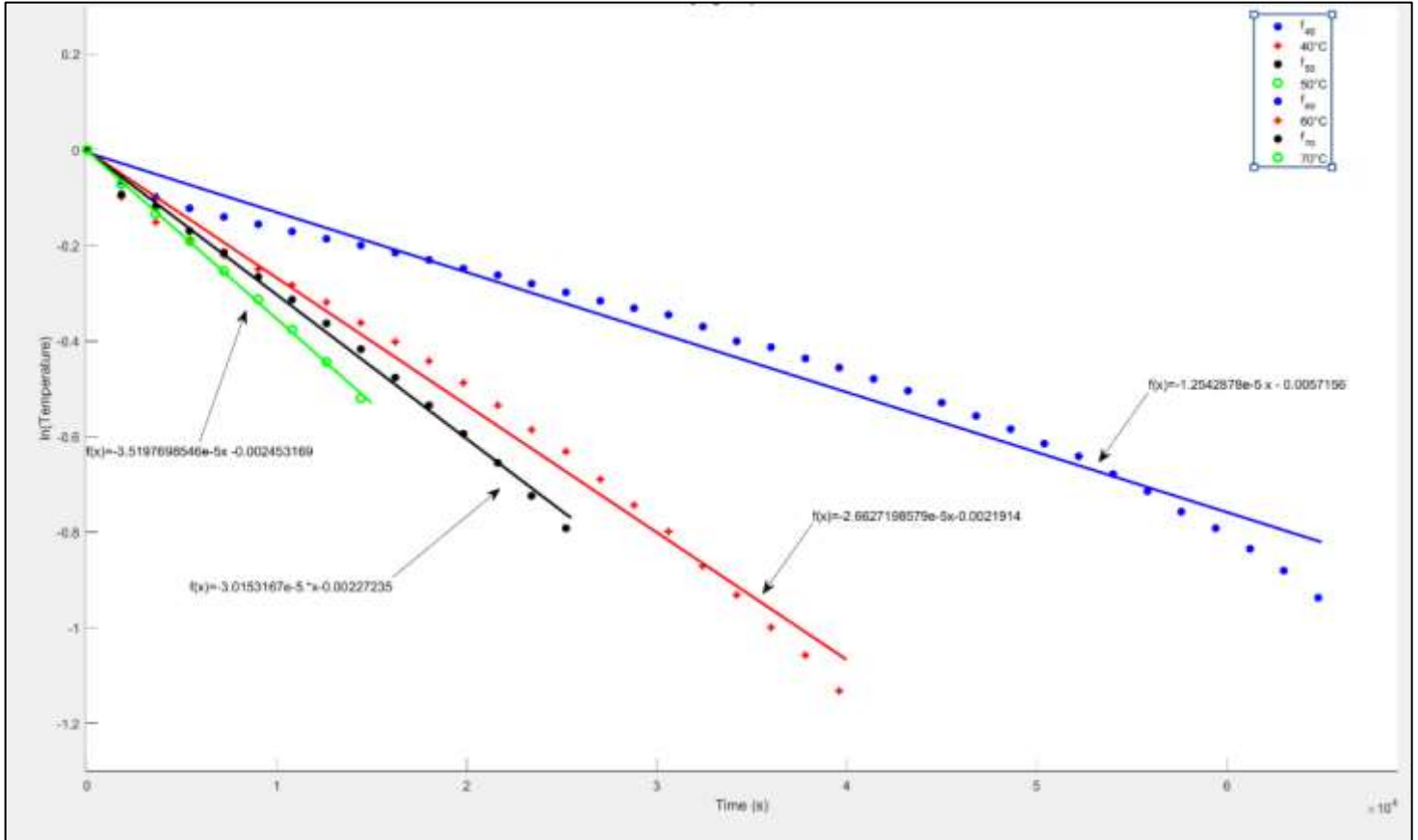
Temperatura (°C)	Función de regresión lineal $f(t) = at + b$		ECM
	$a * 10^{-5}$	b	
40	-1.2542877	-0.0057156	0.0408967
50	-2.6671986	-0.0021914	0.0360596
60	-3.0153167	-0.0022724	0.0164622
70	-3.5197699	-0.0024532	0.0056355

Nota: ECM: Error Cuadrático Medio. a: Pendiente de la función lineal. b: Intercepto de la función lineal

En la figura 3, se muestra los registros de las temperaturas experimentales obtenidas para el secado del café a escala logarítmica (usando la ecuación (13)) y las funciones de regresión lineal descritas en la Tabla 4 (Anexos 7, 8, 9 y 10).

Figura 3

Funciones de regresión lineal



Nota: Curvas de las regresiones lineales de arreglos logarítmicos vs el tiempo (s). Azul (40 °C), Rojo (50 °C), Negro (60 °C). Verde (70 °C)

b) Determinación de los coeficientes D_{eff} y h_m ,

Una vez determinados los coeficientes a y b de las funciones de regresión lineal (Tabla 4), se calcularon los parámetros μ de las cuatro temperaturas, usando el método de bisección con 50 iteraciones en el intervalo [2, 3] y error absoluto $8.88178419700125 \times 10^{-16}$ definiendo la función de la ecuación (15).

Con la raíz μ_1 encontrada en la función de la ecuación (15), se procedió a determinar D_{eff} y Bi_m encontrando las raíces de ecuaciones no lineales definidas en las ecuaciones (16) y (17a), respectivamente. Para el cálculo de ambos parámetros se usó el método de bisección con 45 iteraciones en el intervalo [0, 1]

y error $8.88178419700125 \times 10^{-16}$. Para D_{eff} se consideró $L = 0.0003968\text{m}$, Finalmente, el coeficiente de transferencia de masa h_m , se determinó en función de los términos anteriormente calculados, asociadas entre sí mediante la ecuación (17b) (Anexos 11 y 15).

En la Tabla 5, se muestran los parámetros y coeficientes calculados de μ_1 , Bi_m , D_{eff} y h_m para las cuatro temperaturas registrados del secado. Para la D_{eff} A 60°C se observa un valor atípicamente alto, muy superior a las demás temperaturas, para 70°C , el valor disminuye, muestra una caída en la tendencia, lo que puede hacer referencia al abuso del sometimiento de calor y por ende generar reacciones de interferencia en el proceso difusivo. En el caso de h_m los valores incrementan fuertemente de 40 a 50°C y luego entre 60 y 70°C , se estabiliza indicando que el aumento de temperatura no mejora sustancialmente la transferencia convectiva una vez alcanzado cierto umbral. El secado a 40°C es menos eficiente (h_m bajo, D_{eff} inconsistente) y entre 50 y 70°C , la transferencia es más eficiente y estable.

Tabla 5

Cálculo de los parámetros μ_1 , Bi_m y coeficientes D_{eff} y h_m

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	μ_1	$D_{eff}(\text{m}^2/\text{s})$	Bi_m	$h_m (\text{m/s})$
40	0.291676 ± 0.054^a	$0.23 \times 10^{-10} \pm 0.81 \times 10^{-10a}$	0.0285 ± 0.042^a	$1.67 \times 10^{-09} \pm 0.24 \times 10^{-09a}$
50	0.181035 ± 0.025^b	$1.28 \times 10^{-10} \pm 1.29 \times 10^{-10b}$	0.0109 ± 0.028^b	$3.53 \times 10^{-09} \pm 0.98 \times 10^{-09b}$
60	0.184338 ± 0.044^b	$1.40 \times 10^{-10} \pm 2.75 \times 10^{-10b}$	0.0114 ± 0.014^b	$3.98 \times 10^{-09} \pm 1.13 \times 10^{-09b}$
70	0.191508 ± 0.028^b	$1.29 \times 10^{-10} \pm 1.73 \times 10^{-10b}$	0.0123 ± 0.055^b	$4.00 \times 10^{-09} \pm 0.72 \times 10^{-09b}$

Nota. Media $\pm$ desviación estándar para tres repeticiones. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$). μ_1 : primera raíz de la ecuación. D_{eff} : Coeficiente de difusividad efectiva. Bi_m : Número de Biot de transferencia de masa. h_m : Coeficiente convectivo de transferencia de masa.

c) Predicción de los coeficientes D_{eff} y h_m

La Tabla 6 presenta los valores de las constantes con los coeficientes de correlación. La energía de activación en la difusión de humedad y transferencia

de masa $E_{a,md}$ y $E_{a,cm}$ se encuentran en el rango de 47.85 y 24.96 kJ/mol respectivamente.

Tabla 6

Regresión lineal y cálculo de los parámetros del modelo de Arrhenius para D_{eff} y h_m

Ec. (18)	Regresión	D_0 (m ² /s)	$E_{a,md}$ (kJ/mol)	R ²
	$y = -5754.8x - 5.6319$	3.58×10^{-3}	47.85	0.6293
Ec. (19)	Regresión	h_0 (m/s)	$E_{a,cm}$ (kJ/mol)	R ²
	$y = -3001.4x - 10.434$	2.94×10^{-5}	24.96	0.7351

Nota: Ec. (18): ecuación (18). Ec. (19): ecuación (19). D_0 : Factor pre exponencial de la difusividad efectiva. h_0 : Factor pre exponencial de convección de masa. $E_{a,md}$: Energía de activación para la difusividad efectiva. $E_{a,cm}$: Energía de activación para la convección de masa. R²: Coeficiente de determinación de la bondad de ajuste.

La Tabla 7 se presenta los valores de predicción de los coeficientes D_{eff} y h_m para distintas temperaturas de secado. D_{eff} incrementa de forma clara y progresiva con la temperatura, el crecimiento es casi exponencial, lo esperado por la dependencia de Arrhenius en los procesos de transporte de humedad y también aumenta con la temperatura, siguiendo un comportamiento casi lineal, a baja temperatura (25-35 °C) los valores son apreciadamente bajos, valores que se triplican desde 55 °C (Anexos 13 y 14).

Tabla 7

Predicción de los coeficientes D_{eff} y h_m a diferentes temperaturas de secado

Temperatura (°C)	D_{eff} (m ² /s)	h_m (m/s)
25	$1.499 \times 10^{-11} \pm 0.932 \times 10^{-11a}$	$1.25521 \times 10^{-09} \pm 0.072 \times 10^{-09a}$
30	$2.060 \times 10^{-11} \pm 0.751 \times 10^{-11b}$	$1.48168 \times 10^{-09} \pm 0.291 \times 10^{-09b}$
35	$2.802 \times 10^{-11} \pm 0.085 \times 10^{-11c}$	$1.73962 \times 10^{-09} \pm 0.810 \times 10^{-09c}$
45	$5.037 \times 10^{-11} \pm 0.122 \times 10^{-11d}$	$2.36204 \times 10^{-09} \pm 0.053 \times 10^{-09d}$
55	$8.737 \times 10^{-11} \pm 0.564 \times 10^{-11e}$	$3.14794 \times 10^{-09} \pm 0.991 \times 10^{-09e}$
65	$1.467 \times 10^{-10} \pm 0.094 \times 10^{-10f}$	$4.12470 \times 10^{-09} \pm 0.075 \times 10^{-09f}$

Nota. Media $\pm$ desviación estándar para tres repeticiones Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

IV. DISCUSIÓN

La cinética de secado es un proceso complejo que depende de varios factores, incluyendo la temperatura, la MR , la velocidad del aire y las propiedades del material que se está secando. Los resultados obtenidos de la estimación de los coeficientes D_{eff} y h_m en el secado del café (*Coffea arabica*) var. Catimor a diferentes temperaturas muestran tendencias coherentes con lo que se ha documentado en la literatura. De manera general, al aumentar la temperatura de secado, se observa que el tiempo requerido para alcanzar un nivel deseado de humedad se reduce, evidenciando así la relación inversa entre la temperatura y el tiempo de secado (Phitakwinai et al., 2019). En este contexto, diversos estudios corroboran que temperaturas más altas facilitan una mayor velocidad de vapor de agua, lo cual reduce el tiempo necesario para alcanzar la M_c y la M_{eq} durante el proceso de secado (Amaral et al., 2018; Phitakwinai et al., 2019). En el secado por convección, una temperatura alta del aire de secado transfiere calor al producto, lo que resulta en una temperatura más alta del mismo. Luego, el agua dentro del producto se mueve por difusión y se evapora en el aire de secado. No obstante, los resultados obtenidos muestran una clara tendencia a la disminución del tiempo de secado con el incremento de la temperatura, lo cual es consistente con el principio fundamental de la cinética de secado, donde una mayor temperatura incrementa la presión de vapor de agua en el producto, acelerando la migración de humedad tanto interna como hacia el aire circundante (Mujumdar, 2006), sin embargo, se observa una desviación significativa de esta tendencia entre los tratamientos a 50 y 60 °C, donde los tiempos de secado fueron idénticos (17.5 ± 2.45 h y 17.5 ± 2.78 h, respectivamente). Considerando la desviación estándar reportada, no existe una

diferencia estadísticamente significativa entre estos dos valores. Este fenómeno puede explicarse por la interacción de factores clave como la transición del período de secado constante al período de secado decreciente donde a 50 °C, el proceso de secado ha tenido un período de velocidad constante más prolongado (Doymaz, 2004). Durante esta fase, la superficie del grano permanece saturada, y la velocidad de secado está dominada principalmente por la transferencia de calor y masa desde la superficie hacia el aire, siendo muy sensible a la temperatura. Al aumentar a 60 °C, este período constante se acorta significativamente debido a la mayor energía térmica disponible. No obstante, una vez que la superficie se seca, el proceso entra en el período de velocidad decreciente, donde la velocidad de secado deja de depender principalmente de las condiciones externas y pasa a estar controlada por la difusión interna de la humedad. Por ende la ventaja cinética proporcionada por el incremento de temperatura de 50 a 60 °C parece ser compensada por un cambio en el mecanismo controlante del proceso. Mientras que a 50 °C el secado podría estar más influenciado por las condiciones externas, a 60 °C el mecanismo controlante se desplaza hacia la difusión interna, posiblemente dificultada por un incipiente endurecimiento de la superficie (Antunes et al., 2025). Esta transición en el mecanismo de control explica la no linealidad en la reducción del tiempo de secado entre estos dos tratamientos y a 70 °C, es probable que el gradiente de temperatura y presión de vapor sea lo suficientemente alto como para superar, al menos parcialmente, esta barrera de resistencia interna, permitiendo una reducción significativa del tiempo hasta las 13.5 h.

Por otra parte, al calcular la M_{eq} observamos que esta disminución conforme aumentó la temperatura y, curiosamente, los valores obtenidos fueron menores que

los establecidos para todas las condiciones experimentales. Esta reducción en la M_{eq} también se ha reportado en investigaciones donde se evidencian cambios significativos en la capacidad de retención de humedad en condiciones de temperatura y humedad relativa cambiantes (Santos et al., 2020). Las condiciones de temperatura afectan la capacidad de los granos de café para alcanzar niveles de humedad óptimos, resaltando la importancia de las condiciones del secado en la determinación de la calidad final del producto (Coelho et al., 2024). No obstante, con respecto al comportamiento de la MR durante el proceso de secado no es constante a medida que aumenta la temperatura: esta disminuye, ya que el aire caliente puede contener más vapor de agua que el aire frío en cambio a medida que disminuye la temperatura la MR aumenta, ya que el aire frío puede contener menos vapor de agua que el aire caliente, por ende esta puede variar dependiendo de la cantidad de agua que se evapora del material y la velocidad del aire.

La M_c fue analizada mediante la construcción de curvas de velocidad de secado, las cuales mostraron una relación notable entre la tasa de secado y la humedad libre. Aquí se identificó una fase de velocidad constante al inicio, seguida por una fase decreciente que es típica de muchos procesos de secado convectivo, validando el enfoque observado por otros autores en estudios relacionados (Cwиковá et al., 2022). Estas transiciones demuestran cómo la retención de agua en los granos influye en la difusión interna y la transferencia de masa, donde a contenidos más bajos de humedad la disminución de la tasa de secado es más notoria (Santos et al., 2020).

Los coeficientes D_{eff} y h_m calculados en función de las distintas temperaturas revelan una tendencia de mejora en la transferencia de masa a medida que se

incrementa el calor aplicado, lo que puede ser ventajoso en aplicaciones comerciales (Coelho et al., 2024). Los resultados reflejan la posibilidad de modelar estas variables para diferentes condiciones de secado, como también lo han sugerido otras investigaciones, indicando que estas variables son fundamentales para optimizar la calidad del café (Siagian et al., 2017). No obstante, los valores reportados en el estudio para la D_{eff} en un rango de 10^{-11} y 10^{-10} m²/s concuerdan con los resultados mostrados por Amaral et al., (2018), donde al secar café con baja humedad relativa, el aumento de la temperatura provocó un aumento del D_{eff} , que osciló entre $1,908$ y $3,721 \times 10^{-11}$ m²/s, así como de la velocidad de secado. Asimismo los resultados se asemejan a lo reportado por (Phitakwinai et al., 2019), que calcularon para la D_{eff} valores que oscilaron entre 7.7554×10^{-10} y 1.4525×10^{-9} m²/s. Estos valores se encuentran dentro del rango de difusividades (10^{-11} m²/s– 10^{-9} m²/s) para diferentes cultivos utilizando varios métodos de secado (Ocampo 2013; Siagian et al., 2024; Tripathy y Kumar, 2009), como la difusividad de humedad del café que varía de 7.17×10^{-10} a 10.00×10^{-10} m²/s para temperaturas del aire de secado que varían de 40 a 60 °C (Reyes et al. 2019; Torres-Valenzuela et al. 2019; Vargas y Abarca, 2018; Virgen-Navarro et al. 2016). No obstante, el modelamiento matemático de los coeficientes D_{eff} y h_m están ligados a la forma geométrica del alimento, normalmente un sólido regular, la investigación coincide en los valores de estos coeficientes con autores que analizaron diferentes geometrías, indicando que los valores podrían ser indistintos de las geometrías, por ejemplo Arranz et al. (2011) determinaron de forma experimental los coeficientes D_{eff} y h_m , para una lámina infinita exhibiendo valores de $D_{eff} = 4.76 \times 10^{-11}$ m²/s y $h_m = 2.74 \times 10^{-7}$ m/s, Giraldo-Zuniga et al. (2010) en el secado de la pulpa de cupuaçu en forma de rodajas a temperaturas de 50, 60 y 70 °C y a la velocidad del aire de

secado de 1.5 m/s obtuvieron valores para los coeficientes de difusión de 1.171×10^{-7} , 1.273×10^{-7} y $1.561 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Al aplicar un ajuste tipo Arrhenius para predecir D_{eff} y h_m , la E_a calculada se encontró acorde con los rangos reportados en estudios previos, donde se resalta que la temperatura juega un papel crucial en la activación de la difusividad y transferencia de masa (Barreira et al., 2012). En el análisis del secado de café, otros autores han observado que la difusividad efectiva de la humedad en el café varía con la temperatura (Amaral et al., 2018), lo que se alinea con los valores de activación que se reporta en el estudio. No obstante, Los resultados del ajuste al modelo de Arrhenius para D_{eff} y h_m muestran coeficientes de determinación moderados ($R^2 = 0.6293$ y $R^2 = 0.7351$, respectivamente), lo que indica una desviación del comportamiento arrheniano ideal. Esta desviación puede atribuirse a varios factores fisicoquímicos inherentes al proceso de secado del café. La transición en el mecanismo controlante predominante explica en parte esta desviación. A temperaturas más bajas (40-50°C), el proceso probablemente está controlado por la transferencia de masa externa (convección), mientras que a temperaturas más elevadas (60-70°C), el control se desplaza hacia la transferencia de masa interna (difusión). El modelo de Arrhenius, al aplicarse sobre todo el rango de temperaturas, intenta ajustar una única tendencia lineal a un sistema donde el fenómeno físico dominante no es constante, resultando en la dispersión observada. Asimismo el modelo de Arrhenius supone un mecanismo único y constante para todo el rango de temperaturas, lo que representa una simplificación para sistemas biológicos heterogéneos como el café. La energía de activación calculada ($E_{a,md} = 47.85 \text{ kJ/mol}$ para D_{eff} y $E_{a,cm} = 24.96 \text{ kJ/mol}$ para h_m) debe interpretarse como un

valor aparente que integra múltiples fenómenos simultáneos. Por lo tanto los coeficientes de determinación moderados no invalidan los resultados, sino que reflejan adecuadamente la complejidad del proceso de secado del café. La desviación del comportamiento arrheniano ideal evidencia la presencia de múltiples mecanismos acoplados que interactúan de manera no lineal con la temperatura. Futuros trabajos podrían explorar modelos cinéticos más sofisticados que incorporen explícitamente los cambios estructurales y las transformaciones fisicoquímicas para una representación más precisa del proceso.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se determinó los parámetros de humedad crítica (M_c) y humedad de equilibrio (M_{eq}) y se construyeron las curvas de secado del café a 40, 50, 60 y 70 °C, se observó que la M_{eq} calculada disminuyó en función del incremento de la temperatura, no obstante se estableció en un rango de 11.30 a 11.67%, la M_c exhibió valores entre 45.85 y 46.22% y las curvas de cinética de secado revelaron una clara transición entre dos fases: una fase inicial de secado rápido seguida de una fase lenta decreciente.

Se desarrolló el algoritmo de solución de la segunda ley de Fick para el secado de café con el software especializado MATLAB, el cual demostró ser un enfoque eficaz para resolver la difusión de humedad en los granos de café durante el proceso de secado. Este algoritmo permitió analizar la variación de humedad a través del tiempo y en diferentes condiciones de temperatura, brindando resultados que respaldan las teorías previas sobre la dinámica del secado del café. La precisión de los resultados obtenidos sugiere que el algoritmo puede ser una herramienta valiosa no solo para la investigación académica sino también para aplicaciones industriales que buscan incrementar la eficiencia en los procesos de secado.

Se calcularon los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m) a 40, 50, 60 y 70 °C, estos mostraron tendencias congruentes con lo que se ha expuesto en la literatura existente, donde se presenta una relación directa con la temperatura para ambos parámetros. A medida que la temperatura aumenta, hay un incremento en la difusividad y la transferencia de masa, lo que sustenta la eficiencia del proceso de secado. Estos resultados son relevantes para la industria del café, ya que

proporcionan información cuantitativa que puede ser utilizada para mejorar los métodos de procesamiento, garantizar la calidad y ajustar los tiempos de secado.

Se predijo los coeficientes D_{eff} y h_m mediante el modelo de Arrhenius a distintas temperaturas que no se habían evaluado directamente, utilizando los valores de energía de activación (E_a) y factores preexponenciales calculados. Las E_a obtenidas para el proceso de difusión de humedad y transferencia de masa se sitúan en rangos que se alinean con los reportados en estudios anteriores. Esta segmentación no permite solo estimar propiedades del café en condiciones específicas, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones que deseen explorar otros parámetros que afecten la calidad del café en diferentes condiciones de secado.

Recomendaciones

A estudiantes con afinidad a la línea de investigación se sugiere realizar estudios que evalúen el impacto de variables adicionales como la humedad relativa y la velocidad del aire en el secado del café. Investigaciones previas han demostrado que la interacción entre estos parámetros y la temperatura puede influir significativamente en las propiedades del proceso de secado. Tal análisis permitirá afinar los modelos predictivos de D_{eff} y h_m para situaciones de secado más controladas y efectivas.

A investigadores del área se recomienda la incorporación de métodos de modelado avanzados, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), para simular el proceso de secado a nivel de molecular. Tal enfoque ha mostrado ser efectivo para optimizar diseños de secado y mejorar la uniformidad en la pérdida de humedad a través de diferentes granos. Esto puede llevar a una mejor comprensión de los mecanismos de transferencia de masa en el secado de café.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias y profesionales afines, es crucial llevar a cabo estudios que comparen diferentes variedades

de café y su comportamiento durante el proceso de secado, dado que se ha evidenciado que las características estructurales y químicas pueden afectar la cinética de secado y la calidad final del producto.

A los empresarios de la industria cafetera, promover investigaciones similares a nivel de producción *in situ* para validar las propuestas técnicas y del modelamiento que se deriven de estos estudios, con lo cual se pueda ayudar a los productores a seleccionar las mejores prácticas de secado para cada tipo de grano.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Akpinar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of food engineering*, 73(1), 75-84.
- Alves, G. E., Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Siqueira, V. C., Cirillo, M. Â., & Pinto, A. C. F. (2017). Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39(2), 225-233.
- Amaral, R., Andrade, E. T. de, Gomes, F. C., Borém, F. M., Lemos, I. A., & Dias, C. de A. (2018). *Simulation of coffee fruit drying using computational fluid dynamics*.
- Antunes, P., Dias, S., Gonçalves, D., Orvalho, T., Evangelista, M. B., Pino-Hernández, E., & Alves, M. (2025). Impact of Different Dehydration Methods on Drying Efficiency, Nutritional and Physico-Chemical Quality of Strawberries Slices (*Fragaria ananassa*). *Processes*, 13(7), 2065.
- Arranz Saiz, F. J., Correa Hernando, E. C., Jiménez Ariza, H. T., Diezma Iglesias, B., Garcia-Herrero, J., Robla Villalba, J. I., & Barreiro Elorza, P. (2011). Empleo de metodos numericos para el ajuste de los coeficientes de difusividad (D) y convectivo de transferencia de masa (hm) en el secado de alimentos. *Actas del VI Congreso Iberico de AgroIngenieria | VI Congreso Iberico de AgroIngenieria | 05/09/2011 - 07/09/2011 | Évora, Portugal*. VI Congreso Iberico de AgroIngenieria, Évora, Portugal. <http://www.ageng2011.uevora.pt/>
- Barreira, E., Delgado, J. M., Ramos, N. M. M., & de Freitas, V. P. (2012). Drying Kinetics of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). *Defect and Diffusion Forum*, 326, 662-667. <https://www.scientific.net/DDF.326-328.662>

- Bottazzi, D., Farina, S., Milani, M., & Montorsi, L. (2012). A numerical approach for the analysis of the coffee roasting process. *Journal of Food Engineering*, 112(3), 243-252.
- Brito-Vallina, M. L., Alemán-Romero, I., Fraga-Guerra, E., Para-García, J. L., & Tapia, R. I. A. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129-139.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill. <http://repositoriokoha.uner.edu.ar/fing/pdf/6215.pdf>
- Chaparro, J. R., Baron, R. D., Gamboa-Santos, J., Arballo, R., & Campañone, L. (2019). Modelado matemático del secado con aire y microondas de Café Pergamino. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 7-15.
- Coelho, E. G., Bertarini, P. L., Gomes, M. S., Amaral, L. R., Zotarelli, M. F., Santos, L. D., & Santana, R. C. (2024). Physicochemical and Sensory properties of arabica coffee beans of Arara cv. Dried using different methods. *Foods*, 13(5), 642.
- Coradi, P. C., Martens, S., Rodrigues, H. E., Leal, A. F., Costa, D. R. da, Saath, R., & Borém, F. M. (2021). Development and validation of a heated drying air diffusion system to optimize rotary dryers and final coffee quality. *PloS one*, 16(6), e0251312.
- Corazon-Guivin, M. A., Romero-Cachique, G., Del Aguila, K. M., Padilla-Domínguez, A., Hernández-Amasifuen, A. D., Cerna-Mendoza, A., Coyne, D., & Oehl, F. (2023). *Rhizoglopus variabile* and *Nanoglopus plukenetiae*, native to Peru, promote coffee growth in Western Amazonia. *Microorganisms*, 11(12), 2883.
- Cwiková, O., Komprda, T., Šottníková, V., Svoboda, Z., Simonová, J., Slováček, J., & Juuzl, M. (2022). Effects of different processing methods of coffee arabica on

- colour, acrylamide, caffeine, chlorogenic acid, and polyphenol content. *Foods*, *11*(20), 3295.
- Datta, Ashim. K., & Rattray, J. (2009). *Food process modelling: Vol. IV. Food Engineering*. EOLSS Publishers Co., Ltd., Oxford, United Kingdom, p. 40-61.
- David Hernández-Amasifuen, A., Rivadeneyra-Chisquipama, L., Padilla-Dominguez, A., Paredes-Espinosa, R., Carlos Guerrero-Abad, J., Torres-Flores, E., Luis Peláez-Rivera, J., Marcelo Carvajal-Vallejos, F., Lida Gutiérrez-Reynoso, D., & Anderson Corazon-Guivin, M. (2023). Massive production of *Hemileia vastatrix* uredospores for inoculation of coffee seedlings. *Scientia Agropecuaria*, *14*(2). <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.023>.
- Djekic, I., Mujčinović, A., Nikolić, A., Jambrak, A. R., Papademas, P., Feyissa, A. H., Kansou, K., Thomopoulos, R., Briesen, H., Kavallieratos, N. G., Athanassiou, C. G., Silva, C. L. M., Sirbu, A., Moisescu, A. M., Tomasevic, I., Brodnjak, U. V., Charalambides, M., & Tonda, A. (2019). Cross-European initial survey on the use of mathematical models in food industry. *Journal of Food Engineering*, *261*, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.06.007>
- Doymaz, İ. (2004). Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots. *Biosystems Engineering*, *89*(3), 281-287.
- Dutta, A., Chanda, A., & Chakraborty, R. (2008). A Linear Driving Force (LDF) Approximation of Moisture Diffusion Kinetics in White Rice. *International Journal of Food Engineering*, *4*(8). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1439>
- Fito, P., LeMaguer, M., Betoret, N., & Fito, P. J. (2007). Advanced food process engineering to model real foods and processes: The “SAFES” methodology.

- Journal of Food Engineering*, 83(2), 173-185.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.017>
- Forsythe, G. E. (1977). *Computer methods for mathematical computations*. Prentice-hall.
<https://works.swarthmore.edu/alum-books/1955/>
- García-Alvarado, M. A., Pacheco-Aguirre, F. M., & Ruiz-López, I. I. (2014). Analytical solution of simultaneous heat and mass transfer equations during food drying. *Journal of Food Engineering*, 142, 39-45.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.001>
- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A. F., Silva, P. F., Valdes-Serra, J. C., & Pavlak, M. C. de M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Food Science and Technology*, 30, 179-182.
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000100027>
- Guine, R. P. F., Brito, M. F. S., & Ribeiro, J. R. P. (2017). Evaluation of Mass Transfer Properties in Convective Drying of Kiwi and Eggplant. *International Journal of Food Engineering*, 13(7), 20160257. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0257>
- Hashim, N., Onwude, D., & Rahaman, E. (2014). A Preliminary Study: Kinetic Model of Drying Process of Pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a Convective Hot Air Dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 345-352.
<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.048>
- Henao Arismendy, J. (2016). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56186>
- Heyd, B., Broyart, B., Hernandez, J. A., Valdovinos-Tijerino, B., & Trystram, G. (2007). Physical Model of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Coffee Roaster.

Drying Technology, 25(7-8), 1243-1248.
<https://doi.org/10.1080/07373930701438683>

Hii, C. L., Law, C. L., & Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of food engineering*, 90(2), 191-198.

Jezeer, R. E., Santos, M. J., Verweij, P. A., Boot, R. G., & Clough, Y. (2019). Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield. *Ecosystem services*, 40, 101033.

Le, C. T. M., Okane, I., Ono, Y., Tsuda, Y., & Yamaoka, Y. (2022). Incidence of coffee leaf rust in Vietnam, possible original sources and subsequent pathways of migration. *Frontiers in plant science*, 13, 872877.

Mohapatra, D., & Rao, P. S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of food engineering*, 66(4), 513-518.

Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Darvishi, H. (2016). Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15(2), 179-187.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.11.003>

Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying*. CRC press.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420017618/handbook-industrial-drying-arun-mujumdar>

Núñez Vega, A.-M., Sturm, B., & Hofacker, W. (2016). Simulation of the convective drying process with automatic control of surface temperature. *Journal of Food Engineering*, 170, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.033>

Ocampo, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista EIA*, 3(5), Article Número 5 p. 119-128. ISSN 1794-1237.

- Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (2008a). SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 415-427. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400013>
- Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (2008b). SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 415-427. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400013>
- Peralta, J. M., Meza, B. E. del V., & Zorrilla, S. (2021). Modelado matemático y simulación de procesos de la industria de alimentos. En *Desarrollo sostenible en el centro norte de la provincia de Santa Fe*. Universidad Nacional del Litoral. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/137540>
- Petkova, I. (2006). Shifting regimes of governance in the coffee market: From secular crisis to a new equilibrium? *Review of International Political Economy*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09692290600625587>
- Phitakwinai, S., Thepa, S., & Nilnont, W. (2019). Thin-layer drying of parchment *Arabica* coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science & Nutrition*, 7(9), 2921-2931. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1144>
- Ponder, A., Krakówko, K., Kruk, M., Kuliński, S., Magoń, R., Ziółkowski, D., Jariene, E., & Hallmann, E. (2025). Organic and Conventional Coffee Beans, Infusions, and Grounds as a Rich Sources of Phenolic Compounds in Coffees from Different Origins. *Molecules*, 30(6), 1290.
- Prada, Á., Vela, C. P., Bardález, G., Saavedra, J., Prada, Á., Vela, C. P., Bardález, G., & Saavedra, J. (2019). Efectividad de un Proceso de Secado de Café usando Secadores Solares con Sistema de Flujo de Aire Continuo Impulsado por Energía

- Fotovoltaica, en la Región San Martín, Perú. *Información tecnológica*, 30(6), 85-92. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600085>
- Ramallo, L. A., & Albani, O. A. (2007). Water diffusion coefficient and modeling of water uptake in packaged yerba mate. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31(4), 406-419. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2007.00137.x>
- Reyes Chaparro, J., Durán Barón, R., Gamboa-Santos, J., Arballo, R., & Campañone, L. (2019). Modelado matemático del secado con aire y microondas de Café Pergamino. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 7-15.
- Ribeiro, M. A. A. (2025). Comparison of analytical and numerical simulations of cowpea (*Vigna unguiculata*) grain drying using Fick's law and the finite element method. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 23(02), 001-015.
- Rossi, S. J., & Roa, G. (1980). *Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural*. <https://www.sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-AGRO%3A2567/Description>
- Ruiz-López, I. I., Ruiz-Espinosa, H., Herman-Lara, E., & Zárate-Castillo, G. (2011). Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averrhoa carambola* L.) in sugar solutions. *Journal of Food Engineering*, 104(2), 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.013>
- Sandeep, K. P., & Irudayaraj, J. (2001). Introduction to modeling and numerical simulation. En *Food Processing Operations Modeling* (pp. 35-44). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203908105-6/introduction-modeling-numerical-simulation-sandeep-joseph-irudayaraj>
- Santos, S. G. F. dos, Silva, D. P. da, Sarti, J. K., Almeida, V. G., & Rodovalho, R. S. (2020). Adsorption isotherms and isosteric heat in Coffea arabica beans. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 50, e58128.

- Siagian, P., Napitupulu, F. H., Ambarita, H., Sihombing, H. V., & Siagian, H. (2024). Comparative analysis of coffee drying on quality with variations in dryers made solar collectors. *AIP Conference Proceedings*, 3048(1), 020042. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3048/1/020042/3280820>
- Siagian, P., Setyawan, E. Y., Gultom, T., Napitupulu, F. H., & Ambarita, H. (2017). A field survey on coffee beans drying methods of Indonesian small holder farmers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 237(1), 012037. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/237/1/012037/meta>
- Silva Júnior, M. A. V., Leite, M. A., & Dacanal, G. C. (2023). Modelling of convective drying of potatoes polyhedrons. *International Journal of Food Engineering*, 19(12), 605-617. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2023-0016>
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of food engineering*, 66(3), 323-328.
- Torres-Valenzuela, L. S., Martínez, K. G., Serna-Jimenez, J. A., Hernández, M. C., Torres-Valenzuela, L. S., Martínez, K. G., Serna-Jimenez, J. A., & Hernández, M. C. (2019). Secado de Pulpa de Café: Condiciones de Proceso, Modelación Matemática y Efecto sobre Propiedades Fisicoquímicas. *Información tecnológica*, 30(2), 189-200. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000200189>
- Tripathy, P. P., & Kumar, S. (2008). Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying. *Energy Conversion and Management*, 49(11), 2941-2948.
- Tripathy, P. P., & Kumar, S. (2009). Neural network approach for food temperature prediction during solar drying. *International journal of thermal sciences*, 48(7), 1452-1459.

- Trystram, G. (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 269-277. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.001>
- Vargas Elías, G. A., & Abarca Mora, R. (2018). Nuevo modelo de calentamiento de los granos de café durante el tostado. *Memoria XIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, XIII CLIA 2018, San José, Costa Rica del 4 al 7 de junio*. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/76902>
- Vega Gálvez, A., Tello Ireland, C., & Lemus Mondaca, R. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*Gracilaria Chilensis*). *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 15(1), 55-64.
- Virgen-Navarro, L., Herrera-López, E. J., Espinosa-Andrews, H., Guatemala-Morales, G. M., Corona-González, R. I., & Arriola-Guevara, E. (2016). Estimación del coeficiente de difusividad durante el tostado de café en un lecho fuente utilizando un modelo difuso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 513-524.

DEDICATORIA

A Dios, por prestarme la vida y regalarme momentos maravillosos, a mis padres José Hilmer Fernández Suárez y María Loyola Rosillo Pícón por su apoyo incondicional y guía emocional en todo momento, a ustedes con mucho amor.

A mis sobrinos Fránces Naim, María José y a mi hermano Frank, por ser fuente de mi inspiración y motivo para seguir mejorando día a día.

LUIDEM FERNÁNDEZ ROSILLO

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Jaén por cobijarme en sus aulas durante los años de estudios realizados, así como a los docentes que me brindaron sus conocimientos y apoyo, durante mi formación profesional.

Al laboratorio de Fisiología y Biotecnología Vegetal (FISIOBVEG) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (UNTRM), Chachapoyas, Amazonas. Perú.

A mis asesores de tesis Dr. Frank Fernández Rosillo y al Dr. Nestor Sánchez Goicochea por haberme guiado, brindando sus aportes y conocimientos para desarrollar de manera satisfactoria este proyecto.

ANEXOS

Anexo 1. Galería de fotos: Proceso de secado

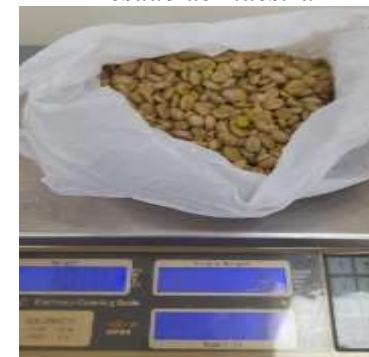
Recepción de materia



Secador automatizado



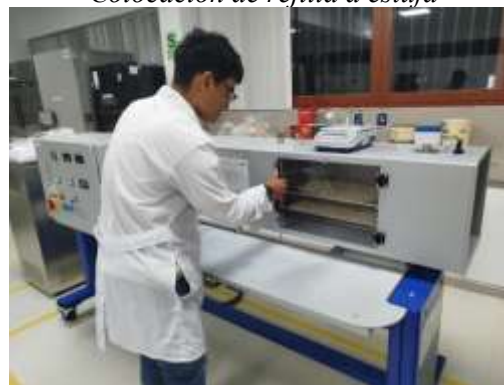
Pesado de muestra



Distribución de muestra en rejillas



Colocación de rejilla a estufa



Secado



Anexo 2. *Galería de fotos: Proceso de medición de porcentaje de humedad*

Adición de muestra



Determinador de de humedad



Monitoreo de humedad



Registro de datos



Anexo 3. Datos de humedades para las temperaturas de secado (40 °C)

40 °C					
Mb _h		0.5752	Masa de agua (Ma)	Peso*Mb _h	572.90
N°	Tiempo	Peso (g)	Masa de sólidos (Mss)	Peso - Ma	423.10
	t(h)		Humedad en base húmeda (Mb _h)	Humedad libre (MI)	Tasa de secado (Ts)
				MI (Mb _h - Meq)	(MI2-MI1)/(t2-t1)
				Humedad libre (%)	Tasa de secado (h ⁻¹)
1	0	996.00	57.5200	57.4070	5.9317
2	0.5	931.00	54.5542	54.4412	2.8183
3	1	903.00	53.1450	53.0320	2.0141
4	1.5	884.00	52.1379	52.0249	1.4287
5	2	871.00	51.4236	51.3106	1.2427
6	2.5	860.00	50.8022	50.6892	1.1576
7	3	850.00	50.2234	50.1104	1.1852
8	3.5	840.00	49.6309	49.5179	1.0910
9	4	831.00	49.0853	48.9723	1.1149
10	4.5	822.00	48.5279	48.4149	1.1396
11	5	813.00	47.9581	47.8451	1.2962
12	5.5	803.00	47.3100	47.1970	1.0604
13	6	795.00	46.7798	46.6668	1.2188
14	6.5	786.00	46.1704	46.0574	1.2470
15	7	777.00	45.5469	45.4339	1.2762
16	7.5	768.00	44.9088	44.7958	1.0135
17	8	761.00	44.4020	44.2890	0.8837
18	8.5	755.00	43.9602	43.8472	1.6571
19	9	744.00	43.1316	43.0186	1.8645
20	9.5	732.00	42.1993	42.0863	0.7951
21	10	727.00	41.8018	41.6888	1.4590
22	10.5	718.00	41.0723	40.9593	1.1603
23	11	711.00	40.4922	40.3792	1.3544
24	11.5	703.00	39.8150	39.7020	1.3856
25	12	695.00	39.1222	39.0092	1.4178
26	12.5	687.00	38.4133	38.3003	1.4512
27	13	679.00	37.6877	37.5747	1.4858
28	13.5	671.00	36.9447	36.8317	1.5217
29	14	663.00	36.1839	36.0709	1.3619
30	14.5	656.00	35.5029	35.3899	1.7944
31	15	647.00	34.6057	34.4927	1.6374
32	15.5	639.00	33.7870	33.6740	1.8918
33	16	630.00	32.8411	32.7281	1.5092
34	16.5	623.00	32.0865	31.9735	1.7669
35	17	615.00	31.2031	31.0901	1.8134
36	17.5	607.00	30.2964	30.1834	2.0981
37	18	598.00	29.2474	29.1344	1.4342
38	18.5	592.00	28.5303	28.4173	1.7104
39	19	585.00	27.6751	27.5621	2.0055
40	19.5	577.00	26.6723	26.5593	2.0619
41	20	569.00	25.6413	25.5283	2.1207
42	20.5	561.00	24.5810	24.4680	2.1821
43	21	553.00	23.4899	23.3769	2.2462
44	21.5	545.00	22.3668	22.2538	2.0202
45	22	538.00	21.3567	21.2437	2.3741
46	22.5	530.00	20.1697	20.0567	2.1369
47	23	523.00	19.1012	18.9882	2.1949
48	23.5	516.00	18.0037	17.8907	2.5826
49	24	508.00	16.7124	16.5994	2.3274
50	24.5	501.00	15.5487	15.4357	2.3934
51	25	494.00	14.3521	14.2391	2.4622
52	25.5	487.00	13.1210	13.0080	1.8025
53	26	482.00	12.2198	12.1068	1.8403
54	26.5	477.00	11.2996	11.1866	1.8792
55	27	472.00	10.3600	10.2470	-0.3795

Anexo 4. Datos de humedades para las temperaturas de secado (50 °C)

50 °C					
Mb _h		0.5752	Masa de agua (Ma)	Peso*Mb _h	572.90
N°	Tiempo	Peso (g)	Masa de sólidos (M _{ss})	Peso - Ma	423.10
	t(h)		Humedad en base húmeda (Mb _h)	Humedad libre (MI)	Tasa de secado (Ts)
				MI (Mb _h - Me _q)	(MI ₂ -MI ₁)/(t ₂ -t ₁)
				Humedad libre (%)	Tasa de secado (h ⁻¹)
1	0	996.00	57.5200	57.4033	8.9580
2	0.5	901.00	53.0410	52.9243	4.3632
3	1	861.00	50.8594	50.7427	2.9390
4	1.5	836.00	49.3899	49.2732	2.4809
5	2	816.00	48.1494	48.0327	2.2064
6	2.5	799.00	47.0462	46.9295	2.4409
7	3	781.00	45.8258	45.7091	2.5561
8	3.5	763.00	44.5477	44.4310	2.8322
9	4	744.00	43.1316	43.0149	2.6596
10	4.5	727.00	41.8018	41.6851	2.4522
11	5	712.00	40.5757	40.4590	2.7322
12	5.5	696.00	39.2097	39.0930	2.6780
13	6	681.00	37.8707	37.7540	2.7986
14	6.5	666.00	36.4714	36.3547	2.3313
15	7	654.00	35.3057	35.1890	2.8304
16	7.5	640.00	33.8905	33.7738	2.5265
17	8	628.00	32.6273	32.5106	2.4023
18	8.5	617.00	31.4261	31.3094	2.9519
19	9	604.00	29.9502	29.8335	2.3586
20	9.5	594.00	28.7709	28.6542	2.4394
21	10	584.00	27.5512	27.4345	2.0125
22	10.5	576.00	26.5450	26.4283	2.3319
23	11	567.00	25.3790	25.2623	1.5962
24	11.5	561.00	24.5810	24.4643	1.9059
25	12	554.00	23.6280	23.5113	1.9547
26	12.5	547.00	22.6507	22.5340	2.0054
27	13	540.00	21.6480	21.5313	2.0580
28	13.5	533.00	20.6190	20.5023	1.8075
29	14	527.00	19.7152	19.5985	2.1615
30	14.5	520.00	18.6345	18.5178	2.2205
31	15	513.00	17.5242	17.4075	2.2819
32	15.5	506.00	16.3832	16.2665	2.3460
33	16	499.00	15.2103	15.0936	2.4127
34	16.5	492.00	14.0039	13.8872	2.4824
35	17	485.00	12.7627	12.6460	2.1855
36	17.5	479.00	11.6700	11.5533	-0.6602

Anexo 5. Datos de humedades para las temperaturas de secado (60 °C)

60 °C					
Mbh		0.5752	Masa de agua (Ma)	Peso*Mbh	572.90
N°	tiempo	Peso (g)	Masa de sólidos (Mss)	Peso - Ma	423.10
	t(h)		Humedad en base húmeda (Mbh)	Humedad libre (MI/)	Tasa de secado (Ts)
				MI (Mbh - Meq)	(MI2-MI1)/(t2-t1)
				Humedad libre (%)	Tasa de secado (h^-1)
1	0	996.00	57.5200	57.4051	8.6464
2	0.5	904.00	53.1968	53.0819	2.1178
3	1	884.00	52.1379	52.0230	4.2997
4	1.5	846.00	49.9881	49.8732	3.6773
5	2	816.00	48.1494	48.0345	3.8213
6	2.5	787.00	46.2388	46.1239	3.3821
7	3	763.00	44.5477	44.4328	3.4470
8	3.5	740.00	42.8242	42.7093	3.5038
9	4	718.00	41.0723	40.9574	3.7253
10	4.5	696.00	39.2097	39.0948	3.4122
11	5	677.00	37.5036	37.3887	3.2195
12	5.5	660.00	35.8938	35.7789	3.1854
13	6	644.00	34.3011	34.1862	3.3477
14	6.5	628.00	32.6273	32.5124	3.0724
15	7	614.00	31.0911	30.9762	2.7472
16	7.5	602.00	29.7175	29.6026	3.1025
17	8	589.00	28.1662	28.0513	2.4813
18	8.5	579.00	26.9256	26.8107	3.0931
19	9	567.00	25.3790	25.2641	1.8655
20	9.5	560.00	24.4463	24.3314	2.4682
21	10	551.00	23.2122	23.0973	1.4064
22	10.5	546.00	22.5090	22.3941	1.7220
23	11	540.00	21.6480	21.5331	1.1694
24	11.5	536.00	21.0633	20.9484	1.7872
25	12	530.00	20.1697	20.0548	1.5206
26	12.5	525.00	19.4094	19.2945	1.8634
27	13	519.00	18.4777	18.3628	1.9070
28	13.5	513.00	17.5242	17.4093	1.9521
29	14	507.00	16.5482	16.4333	2.3367
30	14.5	500.00	15.3798	15.2649	1.3648
31	15	496.00	14.6974	14.5825	1.3870
32	15.5	492.00	14.0039	13.8890	1.4098
33	16	488.00	13.2990	13.1841	1.4331
34	16.5	484.00	12.5825	12.4676	1.0904
35	17	481.00	12.0373	11.9224	1.1041
36	17.5	478.00	11.4852	11.3703	-0.6497

Anexo 6. Datos de humedades para las temperaturas de secado (70 °C)

70 °C					
Mbh		0.5752	Masa de agua (Ma)	Peso*Mbh	572.90
N°	Tiempo	Peso (g)	Masa de sólidos (Mss)	Peso - Ma	423.10
	t(h)		Humedad en base húmeda (Mbh)	Humedad libre (MI)	Tasa de secado (Ts)
				MI (Mbh - Meq)	(MI2-MI1)/(t2-t1)
				Humedad libre (%)	Tasa de secado (h^-1)
1	0	996.00	57.5200	57.4051	6.8189
2	0.5	922.00	54.1105	53.9956	5.4856
3	1	870.00	51.3677	51.2528	4.8104
4	1.5	829.00	48.9625	48.8476	4.9037
5	2	791.00	46.5106	46.3957	4.3636
6	2.5	760.00	44.3288	44.2139	4.4171
7	3	731.00	42.1203	42.0054	4.4396
8	3.5	704.00	39.9005	39.7856	4.6094
9	4	678.00	37.5958	37.4809	4.1857
10	4.5	656.00	35.5029	35.3880	3.6393
11	5	638.00	33.6833	33.5684	3.6309
12	5.5	621.00	31.8678	31.7529	3.8353
13	6	604.00	29.9502	29.8353	3.5679
14	6.5	589.00	28.1662	28.0513	3.2425
15	7	576.00	26.5450	26.4301	3.1257
16	7.5	564.00	24.9821	24.8672	2.9844
17	8	553.00	23.4899	23.3750	2.2462
18	8.5	545.00	22.3668	22.2519	2.3131
19	9	537.00	21.2103	21.0954	2.3831
20	9.5	529.00	20.0188	19.9039	2.4562
21	10	521.00	18.7906	18.6757	2.2119
22	10.5	514.00	17.6847	17.5698	2.2730
23	11	507.00	16.5482	16.4333	2.3367
24	11.5	500.00	15.3798	15.2649	1.3648
25	12	496.00	14.6974	14.5825	2.0890
26	12.5	490.00	13.6529	13.5380	2.1408
27	13	484.00	12.5825	12.4676	2.1946
28	13.5	478.00	11.4852	11.3703	-0.8422

Anexo 7. Arreglo logarítmico de humedades (40 °C)

40 °C									
		Xbh					Meq	10.03	
N°	t (h)	REPETICIÓN			PROM	Xbh	Xbh (%)	DES. EST	$\log \left[\frac{M(x,t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right]$
		R1	R2	R3				DES. EST	
0	0	0.4500	0.4500	0.4500	45.00	0.575	57.520	0.0000	0
0.5	1800	0.2390	0.2290	0.2470	23.83	0.546	54.554	0.0090	-0.06448258
1	3600	0.2250	0.2270	0.2350	22.90	0.531	53.145	0.0053	-0.09664145
1.5	5400	0.2150	0.2240	0.2290	22.27	0.521	52.138	0.0071	-0.12027436
2	7200	0.2080	0.2220	0.2150	21.50	0.514	51.424	0.0070	-0.13738351
2.5	9000	0.2020	0.2150	0.2080	20.83	0.508	50.802	0.0065	-0.1525063
3	10800	0.2000	0.2100	0.2030	20.43	0.502	50.223	0.0051	-0.16680271
3.5	12600	0.1960	0.2040	0.1970	19.90	0.496	49.631	0.0044	-0.18165439
4	14400	0.1900	0.2000	0.1940	19.47	0.491	49.085	0.0050	-0.19552428
4.5	16200	0.1870	0.1950	0.1900	19.07	0.485	48.528	0.0040	-0.20989947
5	18000	0.1850	0.1890	0.1860	18.67	0.480	47.958	0.0021	-0.22480966
5.5	19800	0.1830	0.1830	0.1820	18.27	0.473	47.310	0.0006	-0.24204324
6	21600	0.1810	0.1790	0.1790	17.97	0.468	46.780	0.0012	-0.25636654
6.5	23400	0.1800	0.1770	0.1740	17.70	0.462	46.170	0.0030	-0.27308622
7	25200	0.1780	0.1720	0.1710	17.37	0.455	45.547	0.0038	-0.29048758
7.5	27000	0.1720	0.1680	0.1680	16.93	0.449	44.909	0.0023	-0.30861597
8	28800	0.1630	0.1630	0.1650	16.37	0.444	44.402	0.0012	-0.32325011
8.5	30600	0.1600	0.1600	0.1620	16.07	0.440	43.960	0.0012	-0.33618679
9	32400	0.1580	0.1570	0.1570	15.73	0.431	43.132	0.0006	-0.36090658
9.5	34200	0.1550	0.1520	0.1520	15.30	0.422	42.199	0.0017	-0.3894717
10	36000	0.1530	0.1460	0.1490	14.93	0.418	41.802	0.0035	-0.40190476
10.5	37800	0.1490	0.1410	0.1440	14.47	0.411	41.072	0.0040	-0.42513071
11	39600	0.1460	0.1380	0.1410	14.17	0.405	40.492	0.0040	-0.44399485
11.5	41400	0.1400	0.1350	0.1470	14.07	0.398	39.815	0.0060	-0.46647363
12	43200	0.1370	0.1320	0.1390	13.60	0.391	39.122	0.0036	-0.49000502
12.5	45000	0.1310	0.1280	0.1310	13.00	0.384	38.413	0.0017	-0.51467174
13	46800	0.1260	0.1250	0.1280	12.63	0.377	37.688	0.0015	-0.54056606
13.5	48600	0.1200	0.1220	0.1240	12.20	0.369	36.945	0.0020	-0.56779132

Anexo 8. Arreglo logarítmico de humedades (50 °C)

50 °C									
		REPETICIÓN					Meq	8.45	
N°	t (h)	R1	R2	R3	PROM	Xbh	Xbh (%)	DESV. EST	$og \left[\frac{M(x) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right]$
0	0	0.45	0.45	0.45	45.00	0.575	57.520	0.0000	0
0.5	1800	0.23	0.23	0.23	22.97	0.530	53.041	0.0038	-0.09572032
1	3600	0.22	0.22	0.21	21.73	0.509	50.859	0.0046	-0.14588469
1.5	5400	0.21	0.21	0.21	20.93	0.494	49.390	0.0042	-0.18115166
2	7200	0.20	0.21	0.20	20.23	0.481	48.149	0.0042	-0.21192085
2.5	9000	0.20	0.20	0.20	19.77	0.470	47.046	0.0038	-0.2401046
3	10800	0.19	0.19	0.19	19.03	0.458	45.826	0.0035	-0.27223786
3.5	12600	0.18	0.19	0.18	18.37	0.445	44.548	0.0025	-0.30703206
4	14400	0.18	0.18	0.18	17.80	0.431	43.132	0.0010	-0.34705466
4.5	16200	0.17	0.17	0.17	17.23	0.418	41.802	0.0021	-0.38615435
5	18000	0.17	0.17	0.17	16.70	0.406	40.576	0.0026	-0.42361151
5.5	19800	0.16	0.17	0.16	16.13	0.392	39.210	0.0058	-0.46706755
6	21600	0.15	0.16	0.15	15.67	0.379	37.871	0.0064	-0.51157719
6.5	23400	0.15	0.16	0.15	15.27	0.365	36.471	0.0055	-0.5603109
7	25200	0.15	0.15	0.14	14.83	0.353	35.306	0.0051	-0.60280304
7.5	27000	0.14	0.15	0.14	14.33	0.339	33.891	0.0035	-0.65694233
8	28800	0.14	0.14	0.14	13.87	0.326	32.627	0.0023	-0.70787616
8.5	30600	0.13	0.13	0.13	13.27	0.314	31.426	0.0012	-0.75883724
9	32400	0.12	0.12	0.12	12.30	0.300	29.950	0.0010	-0.82523658

Anexo 9. Arreglo logarítmico de humedades (60 °C)

60 °C									
		REPETICIÓN					Meq	6.64	
N°	t (h)	R1	R2	R3	PROM	Xbh	Xbh (%)	DESV. EST	$\log \left[\frac{M_{(x,t)} - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right]$
0	0	0.45	0.45	0.45	45.00	0.575	57.520	0.0000	0
0.5	1800	0.23	0.23	0.23	22.97	0.532	53.197	0.0038	-0.08879825
1	3600	0.22	0.22	0.21	21.73	0.521	52.138	0.0046	-0.11180552
1.5	5400	0.21	0.21	0.21	20.93	0.500	49.988	0.0042	-0.16021059
2	7200	0.20	0.21	0.20	20.23	0.481	48.149	0.0042	-0.20355388
2.5	9000	0.20	0.20	0.20	19.77	0.462	46.239	0.0038	-0.25067685
3	10800	0.19	0.19	0.19	19.03	0.445	44.548	0.0035	-0.2943211
3.5	12600	0.18	0.19	0.18	18.37	0.428	42.824	0.0025	-0.34085438
4	14400	0.18	0.18	0.18	17.80	0.411	41.072	0.0010	-0.39048328
4.5	16200	0.17	0.17	0.17	17.23	0.392	39.210	0.0021	-0.44609923
5	18000	0.17	0.17	0.17	16.70	0.375	37.504	0.0026	-0.49990518
5.5	19800	0.16	0.17	0.16	16.13	0.359	35.894	0.0058	-0.55347342
6	21600	0.15	0.16	0.15	15.67	0.343	34.301	0.0064	-0.60945762
6.5	23400	0.15	0.16	0.15	15.27	0.326	32.627	0.0055	-0.67188108
7	25200	0.15	0.15	0.14	14.83	0.311	31.091	0.0051	-0.73281563
7.5	27000	0.14	0.15	0.14	14.33	0.297	29.717	0.0035	-0.79063505
8	28800	0.14	0.14	0.14	13.87	0.282	28.166	0.0023	-0.86022199
8.5	30600	0.13	0.13	0.13	13.27	0.269	26.926	0.0012	-0.9195866
9	32400	0.12	0.12	0.12	12.30	0.254	25.379	0.0010	-0.99889202

Anexo 10. Arreglo logarítmico de humedades (70 °C)

70 °C									
							<i>Meq</i>	4.31	
		REPETICIÓN							
N°	t (h)	R1	R2	R3	PROM	Xbh	Xbh (%)	DESV. EST	$\log \left[\frac{M(x,t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right]$
0	0	0.45	0.45	0.45	45.00	0.575	57.520	0.0000	0
0.5	1800	0.23	0.23	0.23	22.97	0.541	54.111	0.0038	-0.06622203
1	3600	0.22	0.22	0.21	21.73	0.514	51.368	0.0046	-0.12287429
1.5	5400	0.21	0.21	0.21	20.93	0.490	48.963	0.0042	-0.17534019
2	7200	0.20	0.21	0.20	20.23	0.465	46.511	0.0042	-0.23181676
2.5	9000	0.20	0.20	0.20	19.77	0.443	44.329	0.0038	-0.28490343
3	10800	0.19	0.19	0.19	19.03	0.421	42.120	0.0035	-0.34167473
3.5	12600	0.18	0.19	0.18	18.37	0.399	39.900	0.0025	-0.4021801
4	14400	0.18	0.18	0.18	17.80	0.376	37.596	0.0010	-0.46913048
4.5	16200	0.17	0.17	0.17	17.23	0.355	35.503	0.0021	-0.53407099
5	18000	0.17	0.17	0.17	16.70	0.337	33.683	0.0026	-0.59418
5.5	19800	0.16	0.17	0.16	16.13	0.319	31.868	0.0058	-0.65798089
6	21600	0.15	0.16	0.15	15.67	0.300	29.950	0.0064	-0.73010935
6.5	23400	0.15	0.16	0.15	15.27	0.282	28.166	0.0055	-0.8022281
7	25200	0.15	0.15	0.14	14.83	0.265	26.545	0.0051	-0.87261031
7.5	27000	0.14	0.15	0.14	14.33	0.250	24.982	0.0035	-0.94549573
8	28800	0.14	0.14	0.14	13.87	0.235	23.490	0.0023	-1.02042322
8.5	30600	0.13	0.13	0.13	13.27	0.224	22.367	0.0012	-1.08076672
9	32400	0.12	0.12	0.12	12.30	0.212	21.210	0.0010	-1.14696491

Anexo 11. Código del algoritmo en MATLAB (Método bisección)

Método de Bisección

```
%Codigo para el Método de Bisección
% Editado por Nestor A. Sánchez Goycochea - 2025
clear; close all; clc
format long
syms x
a=input('Intervalo inferior= ');
b=input('Intervalo superior= ');
iter=input('Ingrese número de iteraciones = ');
fx=input('Ingrese función: fx= ');
fa=subs(fx,a);
fb=subs(fx,b);
%Para comprobar que se cumpla el Teorema de Bolzano
while sign(fa)==sign(fb)
    a=a-0.5;
    b=b+0.5;
    fa=subs(fx,a);
    fb=subs(fx,b);
end
A=zeros(2,7); % matriz donde se almacenan las columnas de la tabla que se
               % quiere mostrar ak | bk | xk |  $\pm f(x_k)$  | error
B1=zeros(2,1);
B2=zeros(2,1);
i=1;
while i<=iter
    A(i,1:2)=[a b];
    xk=0.5*(a+b);
    fxk=subs(fx,xk);
    if fa*fxk<0
        b=xk;
    else
        a=xk;
    end
    A(i,3)=xk; %Nuevo valor de xk
    A(i,4)=sign(fxk);
    EA=abs(xk-0.5*(a+b));
    ER=EA/abs(0.5*(a+b));
    B1(i+1,1)=EA;
    B2(i+1,1)=ER;
    A(i,5)=B1(i,1); % columna del error absoluto
    A(i,6)=B2(i,1); % columna del error relativo
    A(i,7)=i; % conteo de las iteraciones
    i=i+1;
end
%Para graficar la funcion (opcional)
x=A(:,3);
y=subs(fx,x);
hold on
fplot(fx,[A(1,1)-2,A(1,2)+2],'Linewidth',4)
plot(x(1),y(1),'gd','linewidth',5)
plot(x,y,'mo','linewidth',2)
plot(x(end),y(end),'rd','linewidth',5)
title('Método de Bisección')
legend(char(fx),'Dato inicial x0','Valores xk','Solución aproximada xk')
grid on
hold off
%%% Resultados
```

```

A(1,5)="--";
A(1,6)="--";
xk=['La raíz de la f(x) es xk= ' num2str(A(end,3),9)]
Biseccion=array2table(A,'VariableNames',{'ak','bk','xk','signo','EA','ER','iter'})
%
```

```

1 %Codigo para el Método de Bisección
2 % Editado por Nestor A. Sánchez Goycochea - 2025
3 clear; close all; clc
4 format long
5 syms x
6 a=input('Intervalo inferior= ');
7 b=input('Intervalo superior= ');
8 iter=input('Ingrese número de iteraciones = ');
9 fx=input('Ingrese función: fx= ');
10 fa=subs(fx,a);
11 fb=subs(fx,b);
12 %Para comprobar que se cumpla el Teorema de Bolzano
13 while sign(fa)==sign(fb)
14     a=a-0.5;
15     b=b+0.5;
16     fa=subs(fx,a);
17     fb=subs(fx,b);
18 end
19 A=zeros(2,7); % matriz donde se almacenan las columnas de la tabla que se
20 % quiere mostrar ak|bk|xk|if(xk)|error
21 B1=zeros(2,1);
22 B2=zeros(2,1);
23 i=1;
24 while i<=iter
25     A(i,1:2)=[a b];
26     xk=0.5*(a+b);
27     fxk=subs(fx,xk);
28     if fa*fxk<0
29         b=xk;
30     else
31         a=xk;
32     end
33     A(i,3)=xk; %Nuevo valor de xk
34     A(i,4)=sign(fxk);
35     EA=abs(xk-0.5*(a+b));
36     ER=EA/abs(0.5*(a+b));
37     B1(i+1,1)=EA;
38     B2(i+1,1)=ER;
39     A(i,5)=B1(i,1); % columna del error absoluto
40     A(i,6)=B2(i,1); % columna del error relativo
41     A(i,7)=i; % conteo de las iteraciones
42     i=i+1;
43 end
44 %Para graficar la funcion (opcional)
45 x=A(i,3);
46 y=subs(fx,x);
47 hold on
48 fplot(fx,[A(1,1)-2,A(1,2)+2],'linewidth',4)
49 plot(x(1),y(1),'gd','linewidth',5)
50 plot(x,y,'no','linewidth',2)
51 plot(x(end),y(end),'rd','linewidth',5)
52 title('Método de Bisección')
53 legend(char(fx),'Dato inicial a0','Valores xk','Solución aproximada xk')
54 grid on
55 hold off
56 %% Resultados
57 A(1,5)="--";
58 A(1,6)="--";
59 xk=['La raíz de la f(x) es xk= ' num2str(A(end,3),9)]
60 Biseccion=array2table(A,'VariableNames',{'ak','bk','xk','signo','EA','ER','iter'})

```

Método de mínimos cuadrados

%Codigo para el Método de Mínimos Cuadrados - Cuadrático

% Editado por Nestor A. Sánchez Goycochea - 2024

clear; close all; clc

format long

X=input('Ingrese datos para "x"= ');

Y=input('Ingrese datos para "y"= ');

n=length(X);

sigmaX=sum(X);

sigmaX2=sum(X.^2);

sigmaX3=sum(X.^3);

sigmaX4=sum(X.^4);

sigmaY=sum(Y);

```

sigmaXY=sum(X.*Y);
sigmaX2Y=sum((X.^2).*Y);
M=[sigmaX4 sigmaX3 sigmaX2; sigmaX3 sigmaX2 sigmaX; sigmaX2 sigmaX n];
m=[sigmaX2Y; sigmaXY; sigmaY];
sol=M\m;
A=sol(1);
B=sol(2);
C=sol(3);
xk=min(X)-4:0.01:max(X)+4;
f=A.*(xk.^2)+B.*xk+C;
Err=((A.*(X.^2)+B.*X+C)-Y).^2;
E=sqrt(sum(Err)/n);
%%%% Matriz para Tabla de Datos
MC=zeros(n+1,9);
MC(1:n,1)=X;
MC(1:n,2)=Y;
MC(1:n,3)=X.^2;
MC(1:n,4)=X.^3;
MC(1:n,5)=X.^4;
MC(1:n,6)=X.*Y;
MC(1:n,7)=(X.^2).*Y;
MC(1:n,8)=A.*X.^2+B.*X+C;
MC(1:n,9)=Err;
MC(n+1,:)=[sigmaX sigmaY sigmaX2 sigmaX3 sigmaX4 sigmaXY sigmaX2Y sum(A.*X.^2+B.*X+C) sum(Err)];
%%%% Graficas
hold on
plot(xk,f,'b','linewidth',4)
scatter(X,Y,'linewidth',3)
title('Método de Mínimos Cuadrados - Cuadrático')
legend('f=Ax^2+Bx+C','(x,y)')
grid on
hold off
disp(['El error cuadrático medio es= ' num2str(E,11)])
disp(['La función cuadrática es f(x) = ', num2str(A,11), ' x^2 + ', num2str(B,11), ' x + ', num2str(C,11)])
Min_Cuad=array2table(MC,'VariableNames',{'X','Y','X^2','X^3','X^4','XY','X^2Y','f(X)','(f(X)-Y)^2'})

```

```

1 %Codigo para el Método de Mínimos Cuadrados - Cuadrático
2 % Editado por Nestor A. Sánchez Boycochoa - 2024
3 clear; close all; clc
4 format long
5 x=input('Ingrese datos para "x"= ');
6 Y=input('Ingrese datos para "y"= ');
7 n=length(X);
8 sigmaX=sum(X);
9 sigmaX2=sum(X.^2);
10 sigmaX3=sum(X.^3);
11 sigmaX4=sum(X.^4);
12 sigmaY=sum(Y);
13 sigmaXY=sum(X.*Y);
14 sigmaX2Y=sum((X.^2).*Y);
15 M=[sigmaX4 sigmaX3 sigmaX2; sigmaX3 sigmaX2 sigmaX; sigmaX2 sigmaX n];
16 m=[sigmaX2Y; sigmaXY; sigmaY];
17 sol=M\m;
18 A=sol(1);
19 B=sol(2);
20 C=sol(3);
21 xk=min(X)-4:0.01:max(X)+4;
22 f=A.*(xk.^2)+B.*xk+C;
23 Err=((A.*(X.^2)+B.*X+C)-Y).^2;
24 E=sqrt(sum(Err)/n);
25 %%% Matriz para Tabla de Datos
26 MC=zeros(n+1,9);
27 MC(1:n,1)=X;
28 MC(1:n,2)=Y;
29 MC(1:n,3)=X.^2;
30 MC(1:n,4)=X.^3;
31 MC(1:n,5)=X.^4;
32 MC(1:n,6)=X.*Y;
33 MC(1:n,7)=(X.^2).*Y;
34 MC(1:n,8)=A.*X.^2+B.*X+C;
35 MC(1:n,9)=Err;
36 MC(n+1,:)=[sigmaX sigmaY sigmaX2 sigmaX3 sigmaX4 sigmaXY sigmaX2Y sum(A.*X.^2+B.*X+C) sum(Err)];

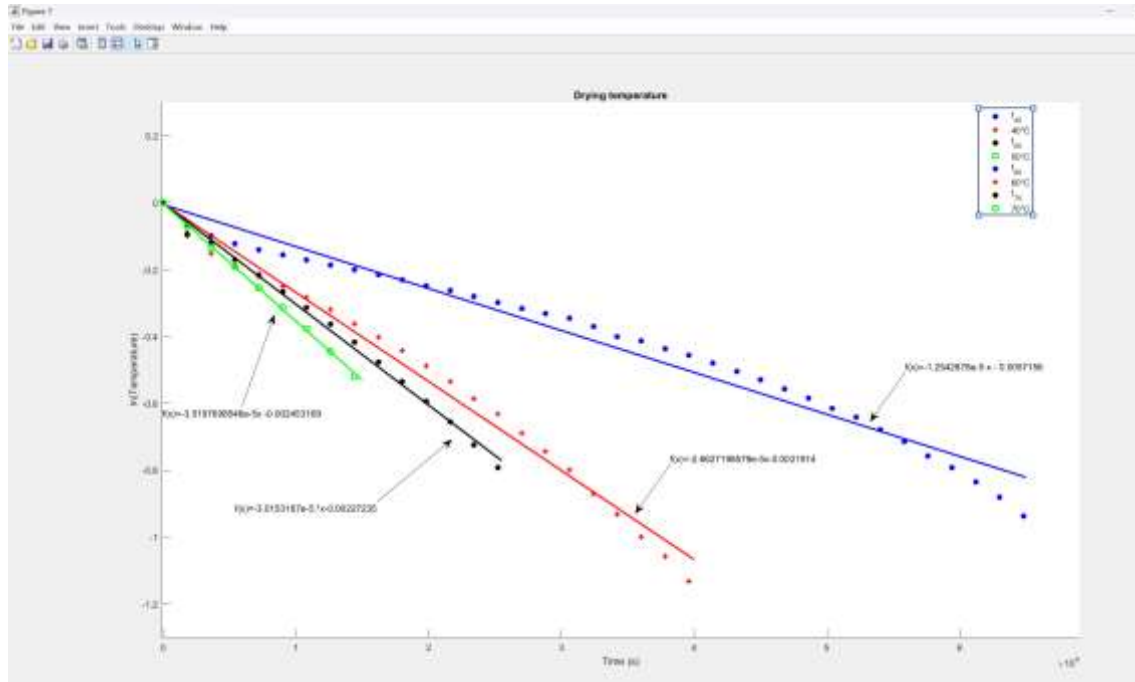
```

```

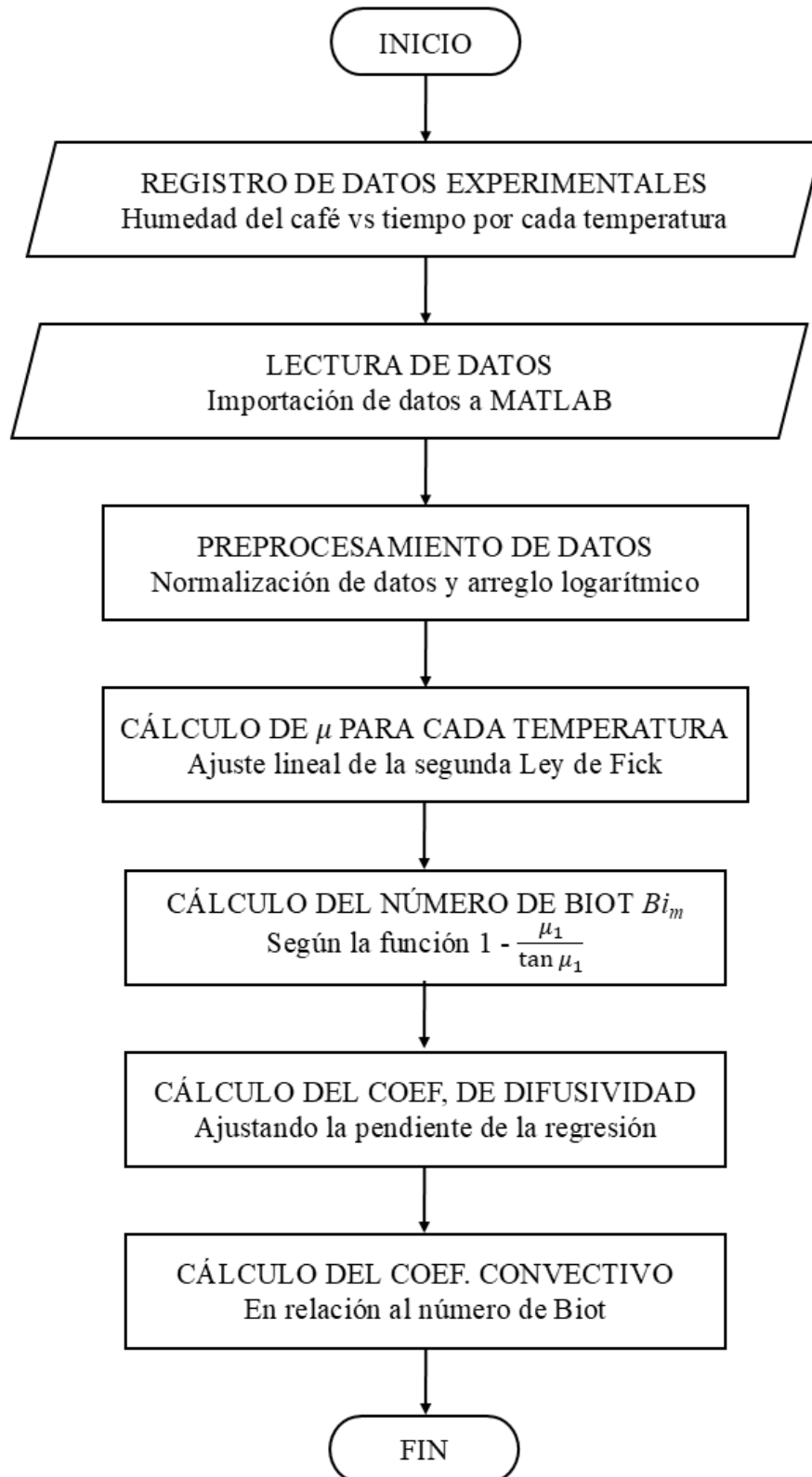
37 %%% Graficas
38 hold on
39 plot(xk,f,'b','linewidth',4)
40 scatter(X,Y,'linewidth',3)
41 title('Método de Mínimos Cuadrados - Cuadrático')
42 legend('f=Ax^2+Bx+C','(x,y)')
43 grid on
44 hold off
45 disp(['El error cuadrático medio es= ', num2str(E,11)])
46 disp(['La función cuadrática es F(x) = ', num2str(A,11), ' x^2 + ', num2str(B,11), ' x + ', num2str(C,11)])
47 Min_Cuad=array2table(MC,'VariableNames',{'X','Y','X^2','X^3','X^4','XY','X^2Y','f(X)','(f(X)-Y)^2'})

```

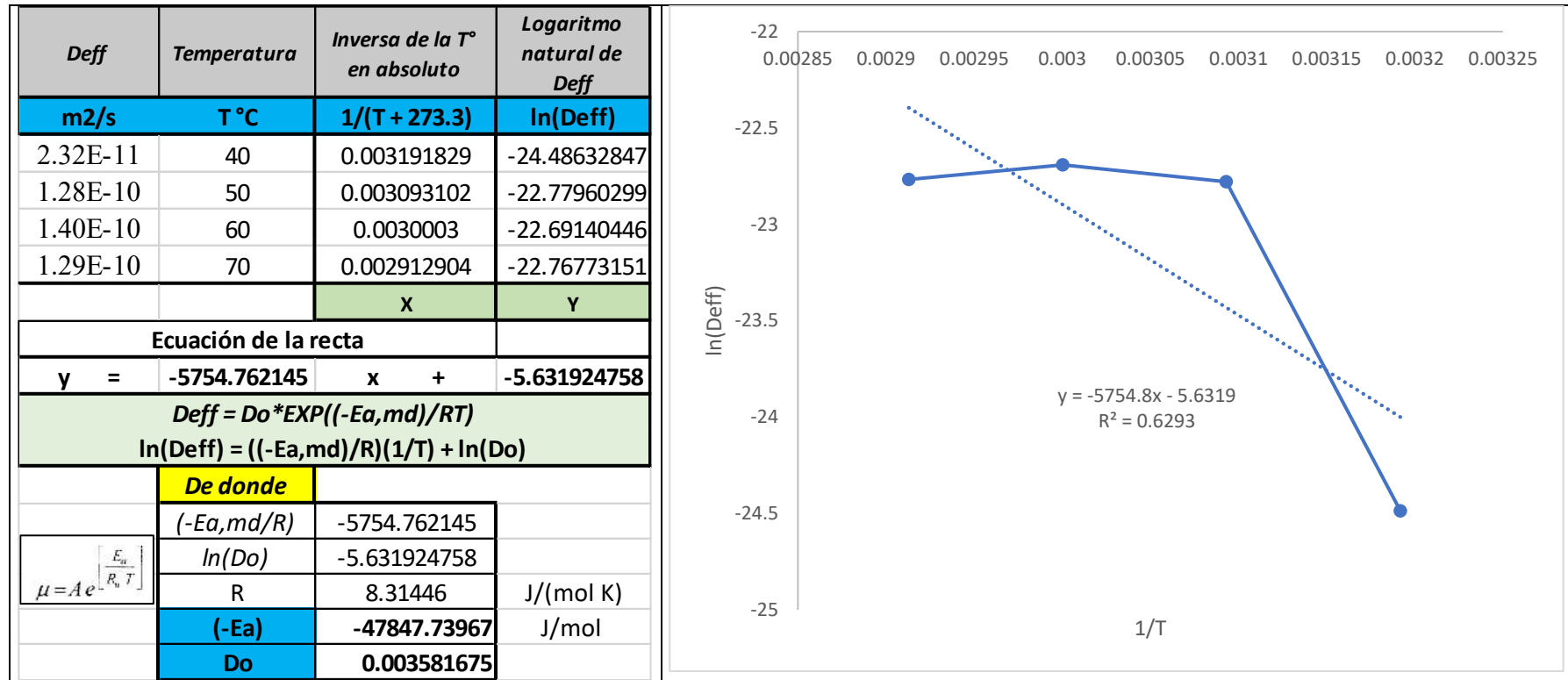
Graficas



Anexo 12. Diagrama de Flujo del algoritmo de solución de la segunda Ley de Fick para el cálculo y predicción de los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) y convectivo de transferencia de masa (h_m)

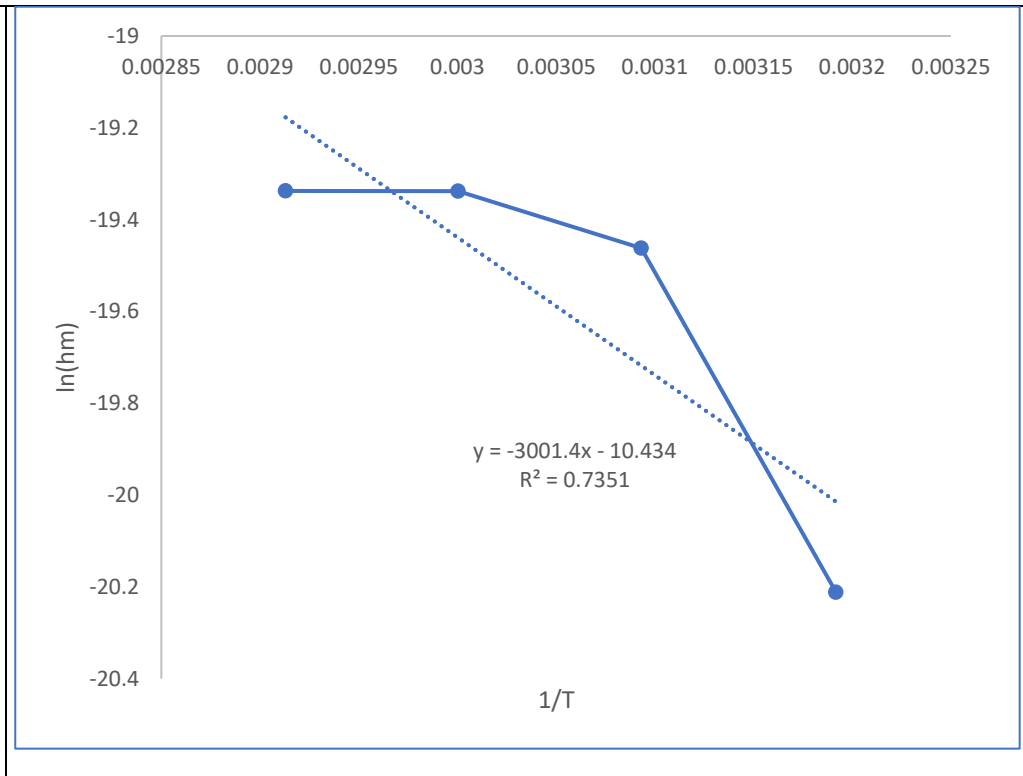


Anexo 13. Regresiones del modelo de Arrhenius para D_{eff}



Anexo 14. Regresiones del modelo de Arrhenius para h_m

h_m	Temperatura	Inversa de la T° en absoluto	Logaritmo natural de h_m
m/s	T °C	$1/(T + 273.3)$	$\ln(h_m)$
1.67E-09	40	0.003191829	-20.21138414
3.53E-09	50	0.003093102	-19.46207473
4.00E-09	60	0.0030003	-19.33763686
4.00E-09	70	0.002912904	-19.33746182
		X	Y
Ecuación de la recta			
y =	-3001.437787	x +	-10.43415319
$h_m = h_o * \text{EXP}((-E_a, \text{cm})/RT)$			
$\ln(h_m) = ((-E_a, \text{cm})/R)(1/T) + \ln(h_o)$			
		De donde	
$\mu = A e^{-\left[\frac{E_a}{R_u T}\right]}$		$(-E_a, \text{cm}/R)$	-3001.437787
		$\ln(h_o)$	-10.43415319
		R	8.31446 J/(mol K)
		$(-E_a)$	-24955.33442 J/mol
		h_o	2.94107E-05



Anexo 15. Estadística descriptiva e inferencial (ANOVA y Tukey) de parámetros cinéticos calculados

