

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



TESIS

**EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, TÉRMICAS Y
REOLOGICAS DE MIEL DE ABEJA (*Apis mellifera L.*) PRODUCIDAS EN TRES
DIFERENTES PISOS ALTITUDINALES EN LA PROVINCIA DE LA
CONVENCIÓN**

PRESENTADO POR:

Br. HANSI ORTEGA VALER

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ASESORA:

Ing. HILKA MARIELA CARRIÓN SÁNCHEZ

CUSCO-PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Hilka Mariela Carrión Sánchez
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: **EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS,**
..... **TÉRMICAS Y REOLÓGICAS DE MIEL DE ABEJA (*Apis mellifera L.*) PRODUCIDA EN TRES**
..... **DIFERENTES PISOS ALTITUDINALES EN LA PROVINCIA DE LA CONVENCIÓN**

Presentado por: Hansi Ortega Valer DNI N° 70867481
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero en Industrias Alimentarias

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por⁰²..... veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de⁹.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, **23** de **diciembre** de 20.....²⁵.....

Firma

HILKA MARIELA CARRIÓN SÁNCHEZ

Post firma.....

Nro. de DNI..... 40237367

ORCID del Asesor..... 0000 - 002 - 3009 - 6029

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:542907214

TESIS HANSI ORTEGA FINAL 3.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:542907214

Fecha de entrega

23 dic 2025, 10:20 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

23 dic 2025, 4:40 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS HANSI ORTEGA FINAL 3.docx

Tamaño del archivo

3.2 MB

80 páginas

16.750 palabras

91.683 caracteres

9% Similitud general

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




Filtrado desde el informe

- Bibliografía

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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.

AGRADECIMIENTO

“Quiero agradecer principalmente a mi madre por todo el esfuerzo y dedicación que ha puesto en mí, por sus ganas de salir adelante y sacar adelante a sus hijos ya que gracias a ello hoy soy quien soy. Gracias, mamá, hasta el cielo.”

“A mi hermano Pedro, quiero expresar mi más grande agradecimiento porque gracias a tu apoyo incondicional pude salir adelante, porque más que un hermano fuiste y eres un padre para mí. Gracias por todo tu apoyo incondicional y constante en mi formación académica y en mi vida en general. Por mostrarme lo bueno de tener un hermano presente en cada aspecto de mi vida.”

“Me gustaría reconocer y agradecer a mis docentes y asesores de este trabajo de investigación, quienes me ayudaron con el desarrollo del mismo, por su orientación y tiempo dedicado durante cada etapa de esta tesis.”

“y un agradecimiento especial a todas las personas que me brindaron su apoyo y consejo en momentos difíciles de mi vida y mi carrera.”

DEDICATORIA

“En memoria de mi madre Sabina Valer, te dedico madre este trabajo esperando que desde donde estes te sientas orgullosa de mis logros.”

“Este trabajo se lo dedico a mi hermano Pedro por haber sido siempre el pilar que me sostuvo desde que tengo uso de razón, por haber sido la figura paterna que necesité y haberme enseñado todo lo que un padre le puede enseñar a un hijo y porque eres para mí un ejemplo a seguir.”

“En memoria de mi hermano Juan Carlos quien también siempre dio todo de su parte por sacarnos adelante como familia, le dedico este trabajo hasta el cielo porque, aunque no esté físicamente conmigo aun siento su presencia y su guía.”

“Dedicado también a todos mis amigos y compañeros de universidad con quienes compartí gratos momentos de la vida universitaria e intercambiamos muchas ideas para nuestro progreso como profesionales en pro del desarrollo de la sociedad.”

Índice General

RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Situación problemática	2
1.2. Formulación del problema.....	3
1.2.1. Problema General.....	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	7
2.1. Marco conceptual	7
2.1.1. Miel	7
2.1.2. Propiedades fisicoquímicas.....	8
2.1.3. Propiedades térmicas	10
2.1.4. Propiedades reológicas.....	11
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	19
3.1 Hipótesis general.....	19
3.2 Hipótesis específicas.....	19
3.3. Identificación de variables e indicadores.....	19
3.4. Operacionalización de variables	22
IV. METODOLOGÍA.....	24
4.1. Ámbito de estudio	24
4.1.1 Ubicación Política	24
4.1.2 Ubicación Geográfica.....	24
4.1.3. Población y muestra	24
4.2. Tipo de investigación	25
4.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
Técnicas de análisis e interpretación de la información	32
5.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas	33
5.2. Determinación de las propiedades térmicas de la miel de abeja.....	38

CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS	62
ANEXOS	65
ANEXO 1. Registro fotográfico	65

Índice de Tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables	22
Tabla 2 Materiales para la determinación de propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja	29
Tabla 3 Toma de muestras de materia prima	31
Tabla 4 Metodología para determinación de las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja	31
Tabla 5 Propiedades fisicoquímicas de la miel de abeja procedente de diferentes pisos altitudinales de la provincia de La Convención.....	33
Tabla 6 Propiedades térmicas de la miel de abeja.....	38
Tabla 7 Parámetros para relacionar la ecuación de tipo Arrhenius.....	52
Tabla 8 Resultados del porcentaje de error(MA%E) para las tres mieles	52
Tabla 9 Propiedades reológicas ajustados al modelo de la Ley de Newton	54
Tabla 10 Propiedades reológicas ajustadas al modelo de la Ley de Potencia.	55
Tabla 11 Propiedades reológicas ajustados al modelo Herschel - Bulkley.....	57

Índice de figuras

Figura 1. Comparación de la acidez de la miel en tres altitudes.-----	34
Figura 2. Comparación del contenido de sólidos solubles (°Brix) de la miel en tres altitudes. -----	35
Figura 3. Comparación del contenido de hidroximetilfurfural (HMF) de la miel en tres altitudes. -----	36
Figura 4. Comparación del contenido de cenizas de la miel en tres altitudes. -----	36
Figura 5. Comparación del contenido de agua de la miel en tres altitudes. -----	37
Figura 6. Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura -Putucusi-----	39
Figura 7. Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura -Albasuyoc-----	40
Figura 8. Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura - Esperanza-----	41
Figura 9. Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura – comparación -----	43
Figura 10. Esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel a 10 °C, 20 °C y 30 °C -----	45
Figura 11. Ajuste del esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel (LEY DE NEWTON)-----	46
Figura 12. Ajuste del esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel (LEY DE HERSCHEL-BULKLEY) -----	46
Figura 13. Figura 13. Esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel (LEY DE POTENCIA) -----	47
Figura 14. Viscosidad vs Tasa de corte de miel a 10 °C -----	48
Figura 15. Viscosidad vs Tasa de corte de miel a 20 °C -----	49
Figura 16. Viscosidad vs Tasa de corte de miel a 30 °C -----	49
Figura 17. Ajuste de datos al modelo de Newton -----	53

RESUMEN

La miel de abeja (*Apis mellifera* L.) presenta propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas influenciadas por factores ambientales como la altitud, temperatura y flora. El objetivo de este estudio fue evaluar dichas propiedades en mieles producidas a tres altitudes de la provincia de La Convención (Cusco): Putucusi (835 m s. n. m.), Albasuyoc (1213 m s. n. m.) y Esperanza (1808 m s. n. m.).

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas: acidez, sólidos solubles, hidroximetilfurfural (HMF), humedad y cenizas mediante métodos normalizados (NTP 209.171–176). Las propiedades térmicas se evaluaron por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), y las propiedades reológicas mediante reometría rotacional a 10, 20 y 30 °C, ajustando los datos a modelos matemáticos.

Los resultados mostraron mayor acidez en Albasuyoc (47 ± 2.00 meq/kg) y menor en Esperanza (17 ± 2.00 meq/kg). Los sólidos solubles variaron entre 76.24 y 80.30 °Brix, mientras que el HMF presentó valores bajos (0.32–0.47 mg/g). El contenido de humedad fue mayor en Esperanza (22.07 %) y las tres muestras presentaron 0.01 % de cenizas. La entalpía de fusión fue mayor en Albasuyoc (286.27 J/g), evidenciando la influencia de la altitud en el comportamiento térmico. Reológicamente, las mieles se comportaron como fluidos pseudoplásticos, con disminución de la viscosidad al aumentar la temperatura y el contenido de agua. Los modelos reológicos mostraron un buen ajuste ($\text{MAPE} < 5 \%$).

Se concluye que la altitud influye significativamente en las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel, siendo un factor clave en su caracterización y manejo apícola.

Palabras clave: Altitud, Análisis fisicoquímico, Modelos matemáticos, Reología

ABSTRACT

Bee honey (*Apis mellifera L.*) exhibits physicochemical, thermal, and rheological properties that are influenced by factors such as altitude, temperature, floral diversity, and harvesting practices. This study aimed to evaluate these properties in honey samples collected from three different altitudinal levels in the province of La Convención (Cusco, Peru): Putucusi (835 m.a.s.l.), Albasuyoc (1213 m.a.s.l.), and Esperanza (1808 m.a.s.l.).

The physicochemical parameters assessed included acidity (meq/kg), soluble solids (°Brix), hydroxymethylfurfural (HMF), and ash content (%), following standardized methods (NTP 209.171, 174, 175, and 176). Thermal properties such as fusion enthalpy and phase transition temperatures were measured using Differential Scanning Calorimetry (DSC). Rheological properties, including shear stress and viscosity, were analyzed with a rotational rheometer at 10, 20, and 30 °C, and fitted to mathematical models (Newton, Power Law, and Herschel-Bulkley).

Results showed that acidity was highest in Albasuyoc (47 ± 2.00 meq/kg) and lowest in Esperanza (17 ± 2.00 meq/kg). Soluble solids ranged from 76.24 to 80.30 °Brix, while HMF content was low, between 0.32 and 0.47 mg/g. A negative value in Putucusi (-0.12 mg/g) was likely due to being below the detection limit. Moisture content ranged from 17.87% to 22.07%, with the highest value found in Esperanza. All samples had an ash content of 0.01%.

Regarding thermal behavior, fusion enthalpy increased with altitude, being highest in Albasuyoc (286.27 J/g), followed by Esperanza (204.55 J/g) and Putucusi (87.96 J/g), indicating an influence of environmental conditions on heat transfer properties.

Rheological tests confirmed that honey behaves as a pseudoplastic fluid, with viscosity decreasing as temperature increases. Samples with higher moisture content showed lower viscosity and shear stress. The experimental data fit well with the proposed rheological models, with mean absolute percentage errors (MAPE) under 5%.

In conclusion, the physicochemical, thermal, and rheological properties of bee honey are closely related to the altitude of production, underlining the importance of geographic location in beekeeping practices and product characterization.

Keywords: Altitude, Physicochemical analysis, Mathematical models, Rheology

INTRODUCCIÓN

La miel de abeja (*Apis mellifera L.*) es una matriz alimentaria compleja compuesta principalmente de azúcares con bajos niveles de agua y concentraciones de compuestos bioactivos, su composición química está influenciada por las fuentes florales, el clima, el proceso de cosecha, lo que, a su vez, genera variaciones en su contenido de azúcar, composición y propiedades físicas (Castro, 2018).

Además, otros factores como la altitud y la temperatura influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel, determinando así su calidad tanto para la industria apícola como para la satisfacción del consumidor. Sin embargo, existen limitados datos específicos y revisión de literatura que aborde cómo la altitud influye en las propiedades de la miel, especialmente en regiones como La Convención.

El valle de La Convención se caracteriza por la presencia de variados microclimas, y una gran variedad de flora y fauna por lo que, la miel de abeja en esta provincia puede tener diferencias significativas en sus características como: composición química, textura, sabor, propiedades térmicas y reológicas, lo que es crucial conocer y comprender para establecer estándares de calidad en su producción, en los que, tanto la ubicación de colmenas como la gestión de los apiarios podrían generar mejoras en la eficiencia y en la calidad de producción, como aporte a ello, este estudio tuvo como objetivo general evaluar las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de miel de abeja (*Apis mellifera L.*) producida a tres altitudes diferentes (835, 1808, y 1213 m.s.n.m.) en la provincia de La Convención, Cusco.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática

La calidad y autenticidad de la miel de abeja son de suma importancia tanto para la industria apícola como para la satisfacción del consumidor; además, son fundamentales para comprender su calidad y origen, por lo que, desde el momento de la cosecha hasta el envasado final, se requiere un conocimiento detallado de estas propiedades para garantizar la excelencia del producto y su vida útil (Warui *et al.*, 2019).

Por otro lado, la altitud ejerce un impacto significativo en las propiedades de la miel debido a diversos factores relacionados. En primer lugar, la variabilidad en la flora apícola disponible a diferentes altitudes conlleva a una diversidad en la composición química del néctar recogido por las abejas, lo que se refleja directamente en la miel producida. Además, las condiciones climáticas y la temperatura están estrechamente relacionadas con la altitud, lo que impacta la evaporación del agua en la miel, su contenido de humedad y su velocidad de cristalización (Ahamed *et al.*, 2020).

Sin embargo, a pesar de la importancia de estas propiedades, existe una falta de datos específicos y una limitada revisión de literatura que aborde cómo la altitud influye en las propiedades de la miel, especialmente en regiones como La Convención. Esta limitación de información crea un vacío en el entendimiento de cómo las variaciones altitudinales impactan en la miel y sus propiedades.

El valle de La Convención presenta una marcada variabilidad de microclimas que caracterizan la región. En ese sentido, esta diversidad climática del sector puede influir en la obtención de la miel de abeja y generar diferencias significativas en las propiedades de la miel, incluyendo sus características fisicoquímicas, térmicas y reológicas. Como resultado, la estandarización del producto final se convierte en un desafío importante, especialmente

teniendo en cuenta las distintas altitudes en las que se encuentran los distritos de Quellouno y Echarati.

La escasez de estándares regionales y la dificultad para predecir las variaciones en las propiedades de la miel en función de la altitud y el microclima representan un desafío importante para los productores locales y la industria apícola en general. Además, los escasos datos científicos y de investigación específica sobre cómo estas variaciones afectan las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel en la región de la Convención requieren ser analizadas.

Por lo que, en el contexto de esta investigación, se buscó determinar si las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel varían según la zona de producción a diferentes altitudes. Esto es crucial para el establecimiento de parámetros de calidad en la producción de miel de abeja y para potenciar la industria apícola en el valle de La Convención en donde podría ser posible incluir procesos como la pasteurización, el enfriamiento y el filtrado de la miel. Además, es necesario contar con información precisa por lo que este estudio es crucial para establecer las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja en el Valle de la Convención.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es la influencia de la altitud en las características fisicoquímicas, térmicas y reológicas de miel de abeja (*Apis mellifera L.*) producida en la provincia de La Convención?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cómo varían las propiedades fisicoquímicas como contenido de agua, acidez, sólidos solubles (°Brix), Hidroximetilfurfural (HMF), cenizas de la miel de abeja dependiendo de la altitud?

¿Cómo varían las propiedades térmicas como entalpías de fusión, y temperaturas de cambios de fase en altitudes de 835, 1213, y 1808 m.s.n.m. de la de la miel de abeja?

¿Cómo se ajustan las propiedades reológicas como el esfuerzo de corte (Pa) y la viscosidad (Pa.s) de la miel de abeja procedente de diferentes altitudes (835, 1808, y 1213 m.s.n.m.) a distintos modelos matemáticos?

1.3. Justificación

Este estudio se desarrolló para comprender cómo la altitud afecta las propiedades de la miel de abeja, dado que la provincia de La Convención presenta una topografía diversa y variabilidad climática debido a su ubicación geográfica, lo cual puede influir en la composición química, textura y sabor de la miel y de las características térmicas y reológicas, lo que es fundamental para garantizar su calidad y competitividad en la industria apícola y alimentaria local, considerando la importancia de la industria apícola en La Convención y en el contexto global, donde la miel de abeja es un producto valioso, el establecimiento de la relación entre los diferentes pisos altitudinales y las propiedades fisicoquímicas y reológicas de la miel, es esencial para garantizar su calidad y competitividad en el mercado.

Con relación a los beneficios de esta investigación, se considera que la misma, proporciona información valiosa para los apicultores y la industria apícola en la provincia de La Convención, dado que, comprender cómo las propiedades de la miel varían con la altitud permitirá a los apicultores tomar decisiones informadas sobre la ubicación de sus colmenas y la gestión de sus apiarios, lo que podría llevar a una producción más eficiente y a la obtención de miel de mayor calidad. Esto beneficiará a los productores al mejorar sus prácticas y productos, aumentando así su competitividad en el mercado.

En términos de salud pública, esta investigación también es relevante, dado que, la miel de abeja es apreciada por sus beneficios para la salud, y su calidad y composición son factores determinantes en su idoneidad para usos específicos, como en la medicina natural y la

industria alimentaria saludable. Por lo que, conocer cómo las propiedades fisicoquímicas de la miel pueden variar con la altitud es esencial para garantizar su calidad en estos contextos y como consecuencia, lograría impactar positivamente en la salud de los consumidores.

Por otro lado, los resultados de esta investigación pueden sentar las bases para futuras investigaciones en la misma área y pueden tener aplicaciones más amplias en otros contextos geográficos similares. Además, al proporcionar información científica precisa y detallada, esta investigación puede ayudar a desmitificar conceptos erróneos o creencias populares sobre la miel y su relación con la altitud.

La evaluación y comprensión de las complejas interacciones que influyen en las propiedades de la miel con relación con la altitud a través de la aplicación de metodologías experimentales y técnicas analíticas especializadas que permiten el manejo de gran cantidad de datos útiles en el campo de la apicultura y la ciencia de alimentos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de miel de abeja (*Apis mellifera L.*) producida en tres diferentes pisos altitudinales de la provincia de La Convención

1.4.2. Objetivos específicos

-) Determinar las propiedades fisicoquímicas (contenido de agua, acidez y sólidos solubles (°Brix), Hidroximetilfurfural (HMF) y cenizas) de la miel de abeja producida en altitudes de 835, 1213, y 1808 m.s.n.m.
-) Determinar las propiedades térmicas (entalpías de fusión, y temperaturas de cambios de fase) de la miel de abeja producida en altitudes de 835, 1213, y 1808 m.s.n.m.

-) Determinar las propiedades reológicas como el esfuerzo de corte (Pa) y la viscosidad (Pa.s) de la miel de abeja producida en altitudes de 835, 1213, y 1808 m.s.n.m.
-) Ajustar a los modelos matemáticos de la ley de Newton, ley de Potencias y Ley de Herschel Buckley a las temperaturas de 10, 20 y 30 °C. y calcular la energía de activación (Ea) con la constante de los modelos matemáticos (K)

II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Miel

La miel (*Apis mellifera*) es una sustancia alimentaria compleja que las abejas producen a partir del néctar recogido de las plantas (miel de néctar o de flor), o de las excreciones de insectos chupadores de plantas o de secreciones de las partes vivas de las plantas (miel de melaza), que posteriormente las abejas procesan y mezclan con sus propias sustancias determinadas. La miel es principalmente una solución sobresaturada de azúcares (principalmente fructosa, glucosa y algo de sacarosa) con bajo contenido de agua y pequeñas concentraciones de compuestos bioactivos, como ácidos fenólicos, flavonoides y otros compuestos polifenólicos, carotenoides, ácidos orgánicos, aminoácidos, péptidos, proteínas, enzimas, lípidos, ceras, compuestos aromáticos, vitaminas, minerales y granos de polen (Ahmad & Nanda, 2019).

La amplia variación en la composición química de las mieles, que depende de las fuentes florales, el clima, el proceso de cosecha, las condiciones de almacenamiento y el envejecimiento, contribuye a la gran diversidad de color, aroma, sabor y viscosidad de las mieles. La alta osmolaridad de la miel, debido a su alto contenido de azúcar, combinada con su baja actividad de agua (por debajo de 0.60), suele estar asociada con una alta viscosidad. Junto con el pH ácido de la miel (pH 3.2–4.5), estas propiedades se han relacionado con la actividad antimicrobiana no específica de la miel (Puscion *et al.*, 2020).

La composición de la miel de abeja tiene una fuerte influencia del néctar utilizado por las abejas para producirla, y este néctar puede variar en su contenido de azúcar, siendo preferidas las fuentes de néctar con mayor contenido de azúcar cuando el agua es escasa. Cuando el suministro de néctar es limitado, las abejas pueden recolectar nutrientes de otras fuentes, como el rocío producido por insectos más pequeños como los áfidos, lo que da como

resultado una miel con características específicas, como la presencia de melezitosa. Además, la miel contiene aminoácidos, que pueden encontrarse en concentraciones de alrededor del 0,5%, ya sea en forma libre o como parte de proteínas. Estos aminoácidos incluyen prolina, arginina, ácido glutámico, cisteína y ácido aspártico. Es importante destacar que la adulteración de la miel puede tener un impacto significativo en su composición, especialmente en lo que respecta a su contenido de azúcar y propiedades físicas, resultando en una disminución de la fructosa y la glucosa; así como, un leve descenso de la temperatura de transición vítrea de la miel adulterada (Tafere, 2021).

La miel de abeja está formada por los monosacáridos glucosa y fructosa (85% de su composición), disacáridos (gentibiosa, isomaltosa, maltosa, maltulosa, nigerosa, palatinosa, sacarosa y turalosa), trisacáridos (centosa, eriosa; isomaltotriosa, isopanosa, laminaritriosa, maltotriosa, melezitosa y panosa) y azúcares complejos (isomaltopentosa y isomaltotetraosa); además, de las enzimas que son propias de las abejas, se tienen cerca de 20 proteínas no enzimáticas, 21 aminoácidos libres (destacando la prolina, que representa el 50% del total); y también en su composición hay antioxidantes y minerales importantes como el potasio, seguido del sodio, calcio y magnesio; y en menor proporción hierro, manganeso, cobre, cloro, fósforo, azufre y sílice (Ruth Del Cid, 2024).

2.1.2. Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas generales de la miel dependen del contenido de agua, Brix, conductividad eléctrica, acidez libre, pH y parámetros principales como la composición de azúcar y contenido de 5-hidroximetilfurfural (HMF), que son componentes esenciales que deciden la calidad de la miel. Varios estudios han demostrado que los parámetros fisicoquímicos de la miel se ven afectados por el origen botánico, el origen floral, el origen geográfico, las condiciones climáticas durante la cosecha, el sistema de producción, la madurez de la miel, las condiciones de procesamiento y almacenamiento (Warui *et al.*, 2019).

Uno de los factores críticos que determinan la estabilidad y vida útil de la miel de abeja es el contenido de humedad. Cuanto menor sea el contenido de agua, más estable y resistente será la miel a la fermentación y al deterioro causado por microorganismos. Además, el contenido de agua proporciona información valiosa sobre el origen botánico y geográfico, las condiciones climáticas durante la cosecha, la posible adulteración y los escenarios de procesamiento y almacenamiento. Se recomienda almacenar la miel a temperaturas de 10-16 °C en recipientes herméticamente cerrados y cuya humedad relativa sea inferior al 65% para evitar la absorción de humedad del entorno (Akgün *et al.*, 2021).

La acidez en la miel se refiere a la presencia de ácidos orgánicos en este producto apícola. Estos ácidos influyen en los sabores, olores y colores de la miel, contribuyendo a su perfil sensorial único. Además, la acidez desempeña un importante rol para la preservación de la miel, ayudando a prevenir la proliferación de microorganismos y, por lo tanto, contribuyendo a su vida útil prolongada. Los niveles de acidez también son regulados con el fin de garantizar tanto la calidad como la seguridad de la miel (Akgün *et al.*, 2021).

El contenido de hidroximetilfurfural (HMF) es un parámetro importante que se utiliza en procesos de evaluación de la calidad y frescura de la miel. Es un compuesto químico que se forma en la miel como resultado de la degradación de azúcares, especialmente la fructosa, durante el almacenamiento y el calentamiento. La cantidad de HMF en la miel puede aumentar con el tiempo y a temperaturas elevadas, lo que puede indicar un procesamiento inadecuado o un almacenamiento prolongado. Para determinar el contenido de HMF de manera cuantitativa, se utiliza una técnica analítica llamada cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Esta técnica facilita la medición con precisión de la concentración de HMF en la miel y determinar si está dentro de los límites permitidos por las regulaciones alimentarias. Los niveles de HMF son importantes porque valores excesivamente altos pueden

indicar un almacenamiento o procesamiento inadecuado de la miel, lo que podría afectar su calidad y seguridad (Chirsanova *et al.*, 2021).

En un estudio de la calidad de la miel se evalúa la diferencia que aporta el origen botánico, floral y geográfico, tanto en mieles florales como multiflorales, por la caracterización fisicoquímica y bioquímica para identificar los parámetros discriminantes utilizando, entre otros, el método multivariado, como factores influyentes sobre las propiedades físico-químicas de la miel también se tiene: altitud, clima, polen, la temporada de cosecha, néctar, las secreciones utilizadas por las abejas, la temporada de floración, la composición química de la miel, especie de abeja, condición de almacenamiento, el tiempo de maduración, las condiciones biofísicas de la región, la edad de los peines, el tipo de ecosistema (agrícolas y naturales), el procesamiento de la miel, la temperatura, edad de la abeja, origen del alimento de las abejas melíferas y la mega biodiversidad (Barrera, 2023).

2.1.3. Propiedades térmicas

El conocimiento relacionado con las propiedades térmicas de alimentos como la miel, promueve la comprensión de las relaciones teóricas y empíricas al desarrollar u operar procesos térmicos para el manejo o la fabricación de productos alimentarios. Dichas propiedades, pueden ser caracterizadas a través de la exploración calorimétrica diferencial (DSC), misma que, suele ser utilizada para el estudio de los comportamientos térmicos de la miel auténtica y detectar los efectos del contenido de humedad y el perfil de azúcar en las temperaturas de puntos de fusión. La temperatura a la cual ocurre la transición vítrea es uno de los aspectos críticos en la evaluación de la consistencia y estabilidad de la miel. Algunos estudios preliminares han investigado los parámetros térmicos de la miel, como la temperatura conocida como transición vítrea (T_g) (Dekeba *et al.*, 2021).

En un estudio realizado por Visquert (2015), se encontró que a 45 °C durante un tiempo no mayor a 72 horas la miel mantiene sus propiedades intrínsecas (pH y Aw). Al someter la miel a temperaturas de 45 – 55 y 55 – 60 °C por 35 minutos provocan cambios en humedad, pH, Aw, color y que los panelistas percibieron cambios en la apariencia, dulzura y sabor de la miel (González, 2021)

2.1.4. Propiedades reológicas

El estudio de las propiedades de flujo y deformación de una sustancia cuando se le aplica una fuerza es conocido como reología. Se centra en las propiedades de flujo de los compuestos individuales de los alimentos, que pueden tener mecanismos de respuesta reológica complejos, en el flujo de la matriz alimentaria compuesta y en el efecto del procesamiento en la estructura y propiedades del alimento. Es un parámetro importante para controlar el diseño del proceso y preservar la vida útil de la miel en industrias como la alimentaria, donde se utiliza como un ingrediente para la preparación de otros alimentos cuya base es la miel (Ahmad & Nanda, 2019).

La clasificación reológica engloba la cuantificación de interrelaciones funcionales del esfuerzo de corte, la capacidad de deformación y características reológicas resultantes, como elasticidad, viscosidad o viscoelasticidad. Las medidas reológicas generalmente se realizan aplicando una pequeña fuerza (esfuerzo) y midiendo la deformación de la muestra (deformación), o aplicando una cantidad fija de movimiento (deformación) y midiendo el esfuerzo desarrollado en la muestra (Silva *et al.*, 2020).

La correlación entre la deformación y el esfuerzo cortante se utilizan para representar los datos reológicos de los sistemas alimentarios a través de varios modelos matemáticos. También se pueden establecer modelos funcionales que tengan en cuenta la influencia de variables de estado, como, por ejemplo, la temperatura y la estructura o composición de los alimentos. La mayoría de las mieles son fluidos newtonianos caracterizados por una

viscosidad constante (η) a una temperatura fija, que se puede describir mediante la ley de Newton para el flujo ($T = \frac{u}{a} A$) que muestra una relación lineal existente entre el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) (Nayik *et al.*, 2019).

Algunas mieles, como la miel de brezo, la miel de manuka procedente de Nueva Zelanda, la miel de karvi de la India, la miel nigeriana, la miel de trigo sarraceno, la miel de trébol blanco y varias mieles de eucalipto, exhiben un comportamiento de tipo no newtoniano. Esto significa que su característica viscosa presenta variaciones con relación a la velocidad de corte a temperatura constante, sin embargo, fluidos como los denominados newtonianos, conservan de manera constante su viscosidad. Además, en algunas de estas mieles se observa un fenómeno tixotrópico, en el cual la viscosidad disminuye con el tiempo a una velocidad de corte y temperatura constantes. Este comportamiento no newtoniano se asocia a menudo con la presencia de componentes coloidales, como azúcares y proteínas de alto peso molecular, y es responsable de la propiedad tixotrópica típicamente observada en estas mieles (Faustino & Pinheiro, 2021).

Los modelos teóricos para describir la viscosidad de los fluidos incluyen modelos como, por ejemplo: Ley de Potencias (Ostwald-de Waele) con la fórmula ($\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$), para fluidos de tipo no newtonianos, modelo Herschel-Bulkley que considera el esfuerzo de cedencia, el modelo de Casson para fluidos plásticos y el modelo de Arrhenius, usado para describir cómo la viscosidad varía con la temperatura. Estos modelos son herramientas útiles en la comprensión y predicción del comportamiento de la viscosidad en diferentes condiciones y tipos de fluidos.

La viscosidad de la miel se ve afectada tanto por la composición como por la temperatura. Es decir, cuando la temperatura se eleva, disminuye la viscosidad y la fuerza intermolecular. Por lo tanto, la viscosidad de la miel generalmente se reduce con la temperatura debido a una menor fricción molecular y fuerzas hidrodinámicas reducidas.

Existen varios modelos teóricos para describir la relación entre temperatura y viscosidad en la miel, como el modelo de William-Landel-Ferry (WLF), el modelo de Vogel-Taumann-Fulcher (VTF) (Faustino & Pinheiro, 2021).

Estos modelos ayudan a comprender cómo varía la viscosidad de la miel con la temperatura y pueden depender de factores como la concentración de azúcar y el contenido de agua en la miel. También se ha observado que la viscosidad de la miel baja cuando el contenido de agua incrementa, ya que el agua opera a manera de plastificante. Además, la composición química de la miel, incluida la presencia de proteínas, polisacáridos y otros materiales coloidales, puede influir en su comportamiento reológico (Orczykowska *et al.*, 2021).

Además, los aspectos reológicos de la miel son de gran importancia en cuanto al control de calidad del producto final, la eficiencia de crecimiento y la conexión de la tecnología moderna en todas las etapas de producción, como el transporte por tuberías, la centrifugación, la filtración y el calentamiento. La viscosidad de la miel es un parámetro reológico predominante en el procesamiento de la miel y está influenciada por aspectos como: temperatura, contenido de agua y la presencia de cristalización, contenido de azúcar, granos de polen, burbujas de aire y pequeñas partículas. La cristalización y la viscosidad tienen un efecto en las propiedades sensoriales de la miel y, por lo tanto, en la aceptabilidad de los consumidores (Dekeba *et al.*, 2021).

Las propiedades reológicas de la miel son relevantes para los consumidores, los apicultores, los procesadores y los manipuladores de miel, ya que los parámetros reológicos proporcionan información útil que permite el desarrollar productos nuevos, optimizar procesos industriales, modelos matemáticos y el control de la calidad, autenticidad de las mieles.

Modelos matemáticos

Ley de la viscosidad de Newton

Una condición indispensable para este modelo y todos los que se establecen para medir la viscosidad, es trabajar con velocidades de flujo dentro del régimen laminar. El efecto viscoso únicamente es cuantificable en régimen laminar. En régimen turbulento, el rozamiento viscoso queda enmascarado por la fricción entre los torbellinos de fluido. El esfuerzo cortante aplicado y el gradiente de cizalladura están relacionados entre sí y la relación funcional entre ambas magnitudes es lo que caracteriza en un fluido, su comportamiento reológico

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

σ : esfuerzo cortante (Pa.s)

μ : viscosidad (Pa.s)

$\dot{\gamma}$: tasa de corte (adimensional)

Ley de Potencia

Para materiales pseudoplasticos y dilatantes las curvas se ajustan bien a un modelo sencillo donde ambos parámetros están relacionados. En este modelo, la constante de proporcionalidad **K** es denominada como el índice de Consistencia del Fluido y se expresa en (Pa.s), y el exponente **n** es el llamado Índice de Comportamiento, es (adimensional). En función del valor experimental que adquiera el exponente, se puede establecer el comportamiento reológico, teniendo así las siguientes determinaciones:

Cuando un fluido es de tipo Newtoniano, $n=1$

Cuando un fluido es de tipo Pseudoplástico, $n<1$

Cuando un fluido es de tipo Dilatante, $n>1$

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Modelo de Herschel-Bulkley

Es un modelo que describe todos los posibles comportamientos reológicos anteriormente mencionados. Si se conoce el esfuerzo umbral, se puede ajustar la ecuación de manera similar que a la ley de la potencia restando a los valores del esfuerzo de corte menos el valor del esfuerzo umbral, es decir, se puede determinar el valor luego de medir el esfuerzo de corte a una velocidad de cizalladura baja, y haber obtenido una lectura estable, bajando a cero el gradiente de velocidad y comprobando la lectura de esfuerzo obtenida tras un período de estabilización. Si el fluido es un plástico, esta lectura no bajará a cero, sino que se quedará en un valor que corresponde al esfuerzo umbral.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

Donde:

τ : Esfuerzo de corte (Pa)

τ_0 : Esfuerzo inicial

K: índice de consistencia (Pa.s)

n: índice de comportamiento (Adimensional)

$\dot{\gamma}$: velocidad de corte (s^{-1})

2.2. Antecedentes investigativos

En la investigación de Inga (2022), cuyo objetivo fue analizar las propiedades de la miel de abeja (*Apis mellifera L.*) tanto físicas como químicas y además, las propiedades reológicas en las siguientes localidades: Alto Mayo, Bajo Mayo y Bajo Huallaga. Se realizaron análisis físicos y químicos, como el pH, actividad de agua, humedad, densidad, sólidos solubles y contenido de azúcares. Además, se llevaron a cabo pruebas reológicas utilizando varios modelos matemáticos, incluyendo Herschel-Bulkley, Ley de la Potencia, Casson y Newton. Los resultados del estudio revelaron que las muestras de miel de las diferentes zonas presentaron variaciones en sus propiedades físicas y químicas, como el pH,

la humedad, la densidad y el contenido de azúcares. Además, se encontraron diferencias en la viscosidad de la miel a diferentes temperaturas que iban entre los 20 °C y presentaron diferencias entre ($P < 0.05$) y zonas ecológicas.

Conjuntamente, se tiene el estudio de Asoiro *et al.* (2021) en el cual, se evaluaron los efectos de la ubicación floral en las propiedades fisicoquímicas y térmicas de muestras de miel de abeja de la zona senatorial de Enugu North. Para las propiedades fisicoquímicas, se utilizó un diseño completamente al azar (CRD) de $14 \times 5 \times 10$, lo que resultó en un total de 700 observaciones. Esto incluyó 14 propiedades fisicoquímicas como respuestas, 5 niveles de ubicación floral como tratamiento y 10 repeticiones. Dentro de los principales resultados del estudio se encontró que la ubicación floral tenía efectos significativos en propiedades como viscosidad, conductividad eléctrica, contenido de azúcar, acidez libre, contenido de cenizas, contenido de humedad, densidad, pH, color, conductividad y difusividad térmicas. Sin embargo, no hubo efectos significativos en la relación fructosa/glucosa (F/G) y la capacidad de calor específico. La viscosidad de la miel disminuyó a medida que aumentaba la temperatura, con muestras de Igbo-Eze South siendo más viscosas que las de otras ubicaciones florales. Se observó que la miel tenía un alto contenido de fructosa seguido de glucosa y una cantidad mínima de sacarosa. Todas las muestras fueron generalmente ácidas y de alta calidad, con algunas de ellas clasificadas como miel extra blanca y otras como miel blanca. Para las propiedades térmicas, los investigadores utilizaron un diseño completamente al azar de $3 \times 5 \times 10$, lo que resultó en un total de 150 observaciones. Se evaluaron tres propiedades térmicas como respuestas, cinco niveles de ubicación floral como tratamiento y 10 repeticiones. Los valores de conductividad térmica y difusividad térmica variaron entre las ubicaciones florales, con Igbo-Eze North, Udenu, Igbo-Eze South, Igbo-Etiti y Nsukka mostrando diferentes valores para estas propiedades. Se concluye que la ubicación floral influye directamente en las propiedades fisicoquímicas y térmicas de la miel de abeja, y que

tanto los factores botánicos como las condiciones ambientales determinan su comportamiento reológico y térmico.

En el estudio de Bouhala *et al.* (2020) cuyo objetivo fue comparar las propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y antibacterianas de mieles costeras y de montaña de la región de Jijel (Argelia) y determinar la correlación entre altitud y parámetros de calidad, la metodología se recolectaron muestras de miel costera y de montaña de diferentes regiones en Jijel (Argelia) para evaluar sus propiedades fisicoquímicas, contenido de humedad, conductividad eléctrica, contenido de cenizas, pH, acidez, contenido de proteínas, parámetros de color, contenido de antioxidantes, actividad de eliminación de radicales, poder reductor y actividad antibacteriana. El objetivo era revelar las diferencias entre las mieles costeras y de montaña y determinar la correlación entre la altitud y diferentes parámetros. Los resultados indican que las mieles de Jijel son oscuras y presentan propiedades fisicoquímicas aceptables, además de un buen potencial bioactivo. *Escherichia coli* fue sensible a las mieles de Jijel, mientras que *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* fueron más resistentes. Las mieles costeras tuvieron valores significativamente más altos en pH, conductividad eléctrica, contenido de cenizas, intensidad de color, contenido de hidroximetilfurfural (HMF) y poder reductor que las muestras de montaña ($p < 0.05$), mientras que la acidez total fue más alta en las mieles de montaña ($p < 0.05$). La altitud se correlacionó negativamente de manera significativa con el contenido de HMF, la conductividad eléctrica, el contenido de cenizas y el pH, con coeficientes de correlación de -0.510, -0.405, -0.360 y -0.355, respectivamente. Se concluye que la altitud y la procedencia geográfica influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y antibacterianas de las mieles de Jijel, y que la altitud actúa como un factor determinante en su caracterización.

Así mismo, se tiene el estudio de Quino (2019) titulado “*Determinación de la capacidad antioxidante y caracterización físico – química de mieles de diferentes regiones de*

Bolivia”, el cual tuvo como objetivo, centrarse en el análisis de muestras de miel de abeja, la metodología aplicada incluyó la recolección de 45 muestras procedentes de seis eco-regiones (Bosque Seco Interandino, Bosque Boliviano-Tucumano, Chaco, Prepuna, Yungas y Bosque Amazónico Sub-andino. El objetivo principal de este estudio fue evaluar la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles totales y llevar a cabo un análisis fisicoquímico y de frescura de estas muestras. La capacidad antioxidante se determinó utilizando los métodos ABTS, ORAC y FRAP, mientras que la composición de fenoles totales se evaluó mediante el método denominado Folin Ciocalteu. La caracterización de las propiedades fisicoquímicas incluyó la medición de parámetros como el pH, la actividad de agua, la conductividad eléctrica, el color, las cenizas, la humedad y los sólidos insolubles. Además, se evaluaron la acidez, la actividad de diastasa y el hidroximetilfurfural (HMF) para la determinación de la frescura de la miel. Los resultados revelaron que la capacidad antioxidante de las mieles analizadas se encuentra dentro de los rangos típicos informados en la región. La mayoría de las muestras cumplen con las normativas establecidas, aunque se identificaron algunas excepciones en parámetros como cenizas, conductividad eléctrica, humedad, acidez, actividad de diastasa y HMF en ciertas localidades, Se concluye que las mieles bolivianas presentan una capacidad antioxidante adecuada y comparable con otras regiones, aunque sus características fisicoquímicas y de frescura varían según la procedencia geográfica, lo cual refleja la influencia de las condiciones ambientales y florísticas en la calidad de la miel

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis general

-) La miel de abeja producida en los tres diferentes pisos altitudinales en la provincia de La Convención mostrará variaciones significativas en sus propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas a causa de las condiciones ambientales y la flora en cada altitud.

3.2 Hipótesis específicas

-) La miel de abeja producida a mayores altitudes tendrá niveles de acidez ligeramente superiores y un mayor contenido de sólidos solubles (°Brix) e Hidroximetilfurfural (HMF) en comparación con la miel producida a altitudes más bajas debido a condiciones climáticas que favorecen una menor humedad en la miel.
-) A la variación de la altitud, las propiedades térmicas (Entalpías de fusión, transición vítrea y temperaturas de cambios de fase) de la miel podrían ser diferentes.
-) A altitudes más elevadas, el esfuerzo de corte necesario para deformar la miel aumentará, mientras que la viscosidad de la miel disminuirá a medida que aumenta la altitud
-) Las propiedades reológicas de la miel a diferentes altitudes podrían ajustarse únicamente a modelos matemáticos específicos.

3.3. Identificación de variables e indicadores

Variable Independiente

-) Pisos altitudinales: 835, 1213 y 1808 m.s.n.m.

Variables dependientes

Propiedades Físicoquímicas:

-) **Acidez:** La acidez se refiere a la concentración de ácidos presentes en la miel y se determina potenciométricamente. Puede influir en el sabor y la estabilidad de la miel.
-) **Sólidos Solubles (°Brix):** Los sólidos solubles representan la concentración de compuestos solubles en la miel, principalmente azúcares como la fructosa y la glucosa. Se mide en °Brix y se relaciona con el contenido de azúcares.
-) **Hidroximetilfurfural (HMF):** El HMF es conocido como un compuesto que se forma en la miel como resultado de un calentamiento excesivo o un almacenamiento prolongado. Su concentración puede ser una indicación de la frescura de la miel.
-) **Cenizas:** El contenido de cenizas en la miel se refiere a la cantidad de minerales inorgánicos que quedan después de que el agua y otros componentes volátiles se han evaporado. Las cenizas pueden provenir de fuentes naturales, como el polen y minerales del suelo.

Propiedades Térmicas:

-) **Entalpía de Fusión:** Cuantifica la energía que se debe proveer a una sustancia para que cambie de estado de sólido a líquido a una temperatura y presión constante. En el caso de la miel, se refiere a la cantidad de energía requerida para que la miel pase del estado sólido (cristalizado) al estado líquido a una temperatura determinada.
-) **Temperaturas de Cambios de Fase:** Son las temperaturas específicas a las cuales una sustancia cambia de estado y en el contexto de la miel, se refiere a las temperaturas a las que ocurren los procesos de solidificación (cristalización) y fusión.

Propiedades Reológicas:

-) **Viscosidad:** Es una propiedad reológica que representa la resistencia de la miel al flujo. Se mide en función de la temperatura y el esfuerzo de corte y puede indicar la fluidez de la miel.
-) **Esfuerzo de Corte:** Se refiere a la fuerza aplicada para que la miel fluya o se deforme. Está relacionado con la viscosidad y describe cómo la miel responde a una fuerza externa.
-) **Comportamiento Reológico:** Se refiere a cómo la miel se comporta bajo diferentes condiciones de temperatura y esfuerzo de corte. Puede ser newtoniano, pseudoplástico o dilatante, dependiendo de su composición y temperatura.
-) **Energía de activación:** Se refiere a la cantidad mínima de energía que una molécula o un sistema necesita para iniciar una reacción química. Es el "umbral" energético que las moléculas deben superar para que se produzca la reacción, es decir, la energía necesaria para que los reactivos puedan transformarse en otros productos.

3.4. Operacionalización de variables

La operacionalización de variables del presente estudio se detalla en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

Dependientes	Tipo de variable	Variable	Definición Operacional	Indicadores	Dimensiones	Técnicas/Instrumentos
		Acidez	Concentración de ácidos presentes en la miel.	Valor numérico (meq/kg de ácido)	Química	Potenciómetro
		Sólidos Solubles (° Brix)	Concentración de compuestos solubles en la miel, principalmente azúcares.	Valor numérico (° Brix)	Química	Refractómetro
		Hidroximetilfurfural (HMF)	Concentración de HMF en la miel.	Valor numérico	Química	Espectrómetro
		Cenizas	Cantidad de minerales inorgánicos presentes en la miel.	Valor numérico (%)	Química	Incineración y pesaje
		Energía de Activación	Energía mínima requerida para iniciar una reacción química interna	Valor Numérico	química	Cálculo matemático
		Entalpía de Fusión	Energía requerida para la fusión de la miel a una temperatura constante.	Valor numérico (J/g)	Física	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)
		Temperaturas de Cambios de Fase	Temperaturas a las que ocurren los procesos de solidificación y fusión de la miel.	Valor numérico (° C)	Física	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)
		Viscosidad	Resistencia al flujo de la miel.	Valor numérico (Pa.s)	Reológica	Reómetro rotacional
		Esfuerzo de Corte	Fuerza aplicada para que la miel fluya o se deforme.	Valor numérico (Pa)	Reológica	Reómetro rotacional

	Propiedades Reológicas	Comportamiento de la miel bajo diferentes condiciones de temperatura y esfuerzo de corte	Newtoniano, Pseudoplástico, Dilatante	Reológica	Reómetro rotacional
Independiente	Altitud	Altitud a la que se produjo la miel	Valor numérico (Altitudes)	Metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)	GPS o referencias topográficas

IV. METODOLOGÍA

4.1. Ámbito de estudio

El ámbito de estudio de esta investigación fue en la provincia La Convención, ubicada en la región del Cusco, Perú. La provincia de La Convención es conocida por su diversidad geográfica y climática debido a su ubicación en la vertiente oriental de los Andes, lo que la convierte en un lugar adecuado para la producción de miel de abeja.

4.1.1 Ubicación Política

La provincia La Convención forma parte de la región del Cusco y se encuentra dentro del territorio peruano.

4.1.2 Ubicación Geográfica

Las altitudes en la provincia de La Convención varían desde aproximadamente 400 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) hasta alrededor de 3.000 m.s.n.m. en diferentes áreas y distritos.

Los tres sectores específicos de interés en esta investigación son:

-) Putucusi: Ubicado a una altura promedio de 835 m.s.n.m.
-) Albasuyoc: Situado a una altitud promedio de 1213 m.s.n.m.
-) Esperanza: Con una altitud promedio de 1808 m.s.n.m.

Esta variación en las altitudes, además de las condiciones climáticas y la biodiversidad de flora en cada área, contribuye a la diversidad en la producción de miel de abeja en términos de sabor, olor, color, aroma y otras características, lo que justifica la importancia de este estudio para comprender cómo estas variables están influenciadas por la altitud.

4.1.3. Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por las mieles de abeja (*Apis mellifera L.*) producidas en la provincia de La Convención. Para efectos de la investigación, se seleccionaron tres pisos altitudinales (bajo, medio y alto), considerando que las condiciones

altitudinales, climáticas y florísticas de cada uno de ellos pueden influir significativamente en las propiedades de la miel.

El tipo de muestreo empleado fue no probabilístico, intencional, ya que la selección de los pisos altitudinales se realizó en función de criterios técnicos de representatividad productiva y viabilidad del estudio, permitiendo abarcar la variabilidad altitudinal de la zona sin dispersar excesivamente los recursos.

Se recolectó 1 muestra de 500 g de miel de abeja del lugar de producción de cada piso altitudinal, los cuales fueron Putucusi, Albasuyoc y Esperanza ubicados a 835, 1213 y 1808 m.s.n.m, respectivamente, en provincia de La Convención.

4.2. Tipo de investigación

El tipo de esta investigación se clasifica como descriptiva porque una vez se recopilaron datos y una muestra de miel de diferentes altitudes, se realizaron análisis detallados para describir y cuantificar las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel en función de la altitud. Esto implicó la recopilación de datos precisos y la descripción de la miel con relación a sus propiedades y comportamiento en cada una de las altitudes estudiadas.

En la investigación descriptiva se detallan los resultados de cada una de las muestras tomadas dándole las características y diferencias de cada una con la finalidad de tener una comparativa de las mismas, utilizando métodos para su estudio.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1. Propiedades fisicoquímicas

Contenido de agua

Tabla especificada sobre el contenido de agua de la miel de abeja NTP 209 171 1999 (revisada el 2019).

Se determinó el índice de refracción de la muestra de ensayo utilizando un refractómetro de marca ANTON PAAR modelo Abbemat 3200 a temperatura constante, próxima a 20 °C. Convertir la lectura en contenido de humedad (por ciento m/m), utilizando la tabla que se indica en la NTP antes indicada. Si la determinación se hace a una temperatura que no sea 20 °C, convertir la lectura para 20 °C, utilizando las correcciones de temperatura que se indican.

Temperaturas superiores a 20 °C: Añadir 0,00023 por cada °C

Temperaturas inferiores a 20 °C: Restar 0,00023 por cada °C.

Grados Brix

Para la determinación de °Brix y Sólidos Solubles: Se utilizó un refractómetro marca ANTON PAAR, modelo Abbemat 3200 con la finalidad de realizar la medición de la concentración de sólidos solubles en la miel y se registró el valor en grados Brix (° Brix), se siguió el procedimiento detallado en NTP 209.171.1999 (revisada el 2019). Se basa en el método refractométrico de Chataway (1932), revisado por Wedmore (1955). Determinar el índice de refracción de la muestra de ensayo utilizando un refractómetro a temperatura constante, próxima a 20 °C.

Hidroximetilfurfural (HMF)

Para la determinación de Hidroximetilfurfural (HMF) se utilizó un espectrómetro marca THERMOSCIENTIFICS modelo GENESYS 180, además se utilizaron materiales y

reactivos específicos, los cuales están detallados en la tabla 2. Se extrajo HMF de la miel de abeja para posteriormente, utilizando el método espectrofotométrico se cuantificó la concentración de HMF en la miel, se siguió el procedimiento detallado en NTP 209.176.1999 (revisada el 2019), donde se selecciona la longitud de onda que pasa por la muestra y mide la cantidad de luz.

Acidez

Para la determinación de la Acidez: Se disolvieron 10 g de miel en 75 mL de agua destilada, posteriormente se tituló con solución de Hidróxido de Sodio 0.1 N con indicador fenolftaleína. El procedimiento se realizó de acuerdo con la NTP 209.174.1999 (Revisada el 2019) finalmente se calculó el porcentaje de acidez de cada muestra. Los materiales y reactivos usados para determinar la acidez se especifican en la tabla 2

Cenizas

Para la determinación de Cenizas: Se pesó en una balanza analítica de marca METTLER TOLEDO modelo MS204S se calentó la muestra en una estufa marca MEMMET modelo 30-1060 para evitar que la muestra forme espuma y rebalse del crisol, posteriormente se incineró las muestras de miel de abeja en una mufla marca HOBERSAL modelo HD330 hasta que quede solo ceniza. Luego, se pesó la ceniza resultante y se registró la masa. Finalmente, se calculó el porcentaje de cenizas en la miel.

4.3.2. Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de la miel de abeja fueron realizadas mediante Calorímetro de Barrido Diferencial (DSC), TA-Instruments, modelo DSC2500, USA con auto muestreador. El gas de purga utilizado fue nitrógeno (99,99 % de pureza a 50 ml/min). Encendido el equipo, se puso en ON el enfriador. Se determinó la masa, mediante balanza analítica de 5 dígitos marca RADWAG (Modelo AS 82/220.X2 PLUS, Polonia), de una charola con su respectiva tapa y se puso en la celda de referencia n° 9. Se determinó la masa

de otra charola con su tapa y se anotó. Luego se adicionó entre 10 a 15 mg de miel de abeja en la charola anotando su masa exacta, se procedió a sellar con la herramienta de sellado y se colocó en una celda diferente al de la referencia. Se editó la configuración de la prueba en rampas de calentamiento, a razón de 20 °C/min. hasta alcanzar 220 °C, se mantiene la temperatura constante por 3 minutos, seguidamente enfriamiento a razón de 10°C/min hasta -60 °C y se mantuvo la temperatura constante durante 3 minutos, posteriormente otra rampa de calentamiento a razón de 20°C/min hasta llegar a 220 °C. El DSC posee un brazo automático que toma las charolas, las coloca en la celda y procede a la corrida. Terminada la prueba, recoge la muestra y coloca la siguiente. Terminada la prueba se calculó las propiedades térmicas mediante el software TRIOS v5.6.0.75. Se selecciona la curva de cambio de estado y se selecciona analizar. Luego el software reporta las propiedades térmicas.

4.3.3. Propiedades reológicas

Se utilizó un Reómetro modular marca ANTON PAAR modelo MCR-702e, Austria. En la geometría Placa - Placa de 50 mm se colocó una muestra de miel en las temperaturas de 10, 20 y 30 °C, tasa de corte de 1 a 100 1/s obteniendo el esfuerzo de corte (Pa) y la viscosidad (Pa.s). Cada miel fue analizada en triplicata. Los datos fueron analizados mediante el Software REOCOMPASS V1.30.999.

Para el ajuste de los datos experimentales de esfuerzo de corte (τ) en función de la tasa de corte ($\dot{\gamma}$) a los modelos reológicos matemáticos (Newton, Ley de la Potencia y Herschel-Bulkley), se utilizó la herramienta Solver de Microsoft Excel, bajo un enfoque de regresión no lineal por mínimos cuadrados.

En cada modelo, se implementó la correspondiente ecuación matemática dentro de la hoja de cálculo, empleando celdas que representaban las variables independientes ($\dot{\gamma}$) y celdas de salida que calculaban los valores predichos de esfuerzo de corte (τ) según los parámetros a estimar. A continuación, se definió una celda adicional que calculaba la suma del cuadrado de

los errores (SSE) como función objetivo, es decir, la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores experimentales observados de τ y los valores calculados por el modelo.

Los parámetros de cada modelo (por ejemplo, viscosidad η en el modelo Newtoniano; K y n en el modelo de la Potencia; τ_0 , K y n en el modelo Herschel-Bulkley) se ingresaron como celdas variables, con valores iniciales razonables y restricciones lógicas (valores mayores o iguales a cero).

Solver fue configurado para minimizar la celda objetivo (SSE) modificando automáticamente los parámetros del modelo mediante el método de optimización no lineal por búsqueda iterativa, utilizando la opción “GRG no lineal” (Generalized Reduced Gradient). Este proceso se repitió para cada modelo y para cada una de las tres temperaturas de análisis (10 °C, 20 °C y 30 °C), con datos promedio obtenidos de tres réplicas experimentales por muestra.

La calidad del ajuste fue evaluada a través del coeficiente de determinación (R^2), complementado con la inspección gráfica de las curvas ajustadas frente a los datos experimentales, así como el análisis visual de los residuos. En todos los casos se seleccionó el modelo que mostró el menor error cuadrático, el mejor comportamiento estadístico de los residuos, y la mayor coherencia física de los parámetros ajustados.

Tabla 2

Materiales para la determinación de propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja

Propiedad	Materiales y reactivos
Solidos Solubles (° Brix)	- Refractómetro automático (abbemat 3200)
	- Cuchara de laboratorio
Acidez	- Bureta de 25 mL
	- Soporte universal
	- Pinza para bureta
	- Vaso precipitado de 250 mL.
	- Pipeta volumétrica de 10 mL.
	- Matraz aforado de 100 mL.
	- Agua destilada

	- Fenolftaleína - Hidróxido de sodio 0.1 N.
Hidroximetilfurfural (HMF)	- Espectrofotómetro de doble haz (UV-Visible) - Bomba de vacío (Chemker 411) - Solución Carrez I - Solución Carrez II - Solución de bisulfito de sodio (NaHSO ₃) 0.20 % - Agua destilada - Vaso precipitado de 250 mL. - Pipeta volumétrica de 10 mL. - Matraz aforado de 50 mL. - Tubos de ensayos - Probeta - Papel filtro - Gradilla de laboratorio
Contenido de agua	- Refractómetro automático (abbemat 3200)
Cenizas	- Capsula de sílice - Balanza Analítica (MS204S) - Estufa MEMMET (calentamiento inicial) - Mufla Hobersal HD330 (capacidad hasta 1200 °C)
Entalpía de Fusión	- Calorímetro DSC (TA-Innstruments DSC2500)
Viscosidad	- Reómetro rotacional ANTON PAAR MCR-702e - Geometría placa – placa 50 mm
Esfuerzo de corte	- Reómetro rotacional ANTON PAAR MCR-702e - Geometría placa – placa 50 mm

La materia prima en este estudio es principalmente la miel de abeja producida a diferentes pisos altitudes en los sectores de Putucusi, Albasuyoc y Esperanza de la provincia de La Convención a 835, 1213 y 1808 m.s.n.m. respectivamente, la ubicación es zona 18L, Putucusi: -12.613989° -72.497532°, Albasuyoc: -12.810318° -72.599919°, esperanza: -12.818801° -72.568326° y cada muestra tuvo un peso de 500 gramos. Estas muestras de miel se sometieron a análisis para determinar sus propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas.

Además de la miel de abeja, se utilizaron reactivos químicos específicos para llevar a cabo los análisis, como soluciones para la determinación de la acidez y el HMF. También se utiliza agua destilada en varios procedimientos.

Tabla 3*Toma de muestras de materia prima*

Variables	Altitud media	Distrito	Cantidad
V1	835 m.s.n.m.	Putucusi	1 muestra
V2	1213 m.s.n.m.	Albasuyoc	1 muestra
V3	1808 m.s.n.m.	Esperanza	1 muestra

La metodología utilizada para cada estudio de las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de esta investigación se detalla a continuación:

Tabla 4*Metodología para determinación de las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja*

Propiedad	Técnica o metodología
Sólidos Solubles (° Brix)	- Refractómetro
Acidez	-NTP 209.174. 1999 (revisada 2019) MIEL. -Determinación de la Acidez, -Método potenciométrico
Hidroximetilfurfural (HMF)	-NTP 209.176.1999 (revisada 2019) MIEL. -Determinación de Hidroximetilfurfural. -Método Espectrofotométrico
Contenido de agua	-NTP 209.171.1999 (revisada 2019) MIEL.
Cenizas	-NTP 209.175.1999 (revisada 2019) MIEL.
Entalpía de Fusión	-Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)
Viscosidad	-Reología Rotacional
Esfuerzo de corte	-Reología Rotacional

Técnicas de análisis e interpretación de la información

Luego de la recopilación de datos, se utilizaron técnicas de análisis y de interpretación de la información que permitieron cumplir con los objetivos del presente estudio. Estas técnicas incluyeron:

Representación Gráfica: Se utilizaron gráficos para presentar los resultados de manera efectiva y comprensible.

Interpretación: Los resultados se interpretaron para identificar patrones, tendencias y relaciones significativas entre la altitud y las propiedades de la miel. Se establecieron conclusiones basadas en los hallazgos y se proporcionaron recomendaciones para los apicultores y la industria apícola.

Estas técnicas detalladas anteriormente, permitieron llegar a conclusiones sólidas y contribuyeron al conocimiento sobre cómo la altitud puede influir en las propiedades de la miel de abeja en la provincia de La Convención.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas

En la Tabla 5 detallada a continuación, se resume el resultado correspondiente a la determinación de las propiedades fisicoquímicas de la miel de abeja procedente de diferentes pisos altitudinales de la provincia de La Convención.

Tabla 5

Propiedades fisicoquímicas de la miel de abeja procedente de diferentes pisos altitudinales de la provincia de La Convención

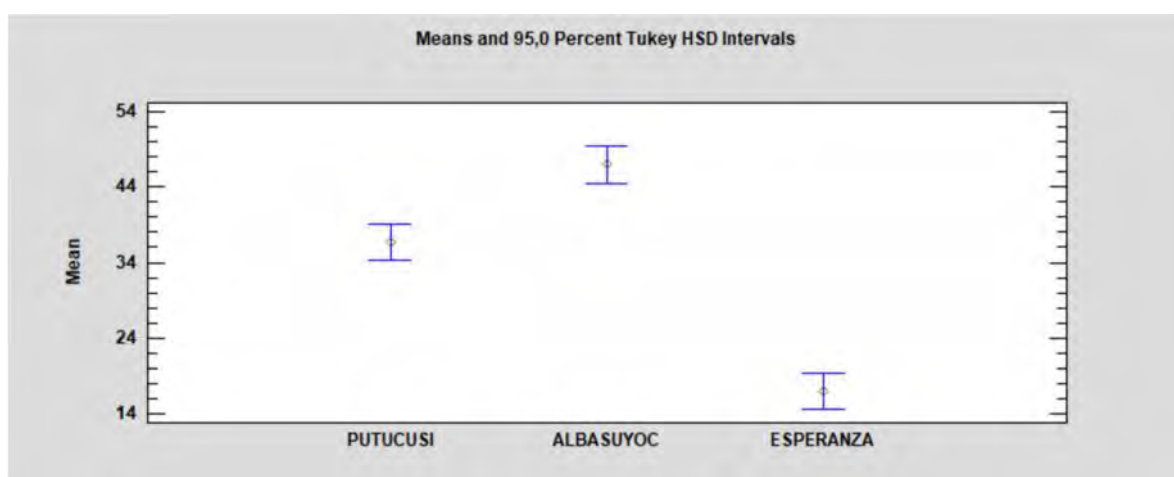
Sector	Acidez total (meq/kg)	Sólidos solubles (° Brix)	HMF (mg/g)	Cenizas (% en masa)	Contenido de agua (%)
Putucusi (835 m.s.n.m.)	36,67±6,53	78,97±0,13	0,12±0,41	0,01±0,00	19,27±0,12
Albasuyoc (1213 m.s.n.m.)	47±2,00	80,30±0,01	0,32±0,007	0,01±0,00	17,87±0,23
Esperanza (1808 m.s.n.m.)	17±2,00	76,24±0,13	0,47±0,13	0,01±0,00	22,07±0,12

Los datos detallados en la tabla 5 indican el comportamiento fisicoquímico de tres muestras de mieles procedentes de tres diferentes pisos altitudinales 835, 1213 y 1808 m.s.n.m. correspondientes a los sectores de Putucusi, Albasuyoc y Esperanza, respectivamente.

La propiedad de acidez total fue medida con base a hidróxido de sodio 0.1 N en (meq/kg) encontrándose que la miel tomada a una altura de 1808 m.s.n.m. presentó una menor acidez con una media de 17±2,00, mientras que, la miel procedente de Albasuyoc ubicada a 1213 m.s.n.m. presentó una mayor acidez, por lo que, de acuerdo con Castón *et.al* (2016), esto puede deberse probablemente a diferencias en el origen floral y las condiciones de producción de las mieles. Putucusi posee montañas, cerros, ríos donde se dan flores en gran

extensión, sobre todo cítricas y silvestres. Albasuyoc posee la misma variedad de flora además de árboles frutales como el mango. Esperanza posee una flora distinta ya que no hay cítricos, se puede encontrar flora silvestre, café, eucalipto entre otras variedades propias de la altitud.

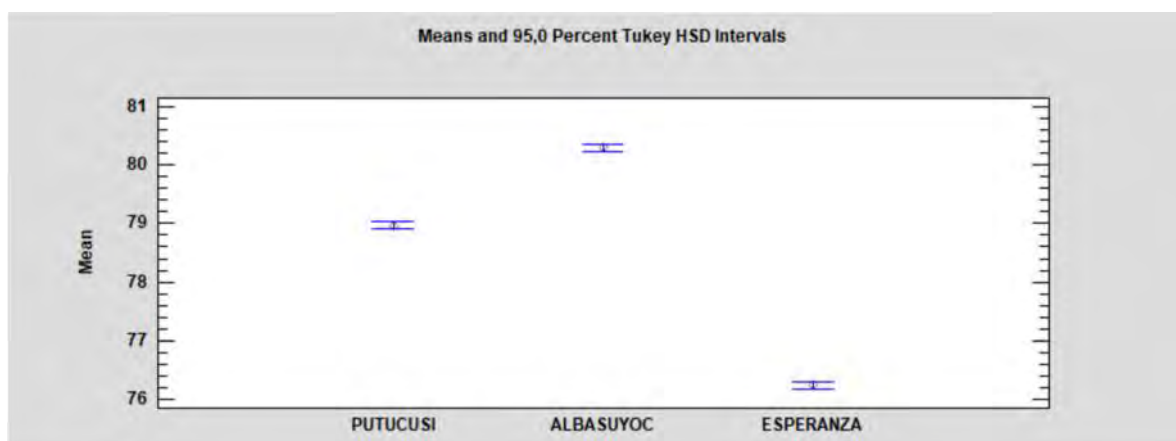
Figura 1. Comparación de la acidez de la miel en tres altitudes.



El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticamente significativas en la acidez entre las tres altitudes evaluadas ($F = 184,35$; $p < 0,05$). La prueba de comparación múltiple de Tukey indicó que las medias difieren significativamente entre todos los pares de altitudes, siendo Esperanza la que presentó la menor acidez (17.0), seguida de Putucusi (36,67) y Albasuyoc con el mayor valor (47,0). Se concluye que la altitud influye de manera significativa en la acidez de la miel.

Los resultados correspondientes a los sólidos solubles representados en °Brix variaron entre 76,24 y 80,30. Valores elevados de °Brix reflejan una mayor concentración de azúcares (principalmente fructosa y glucosa) y, por ende, un menor contenido de humedad, lo que favorece la estabilidad y reduce el riesgo de fermentación durante el almacenamiento.

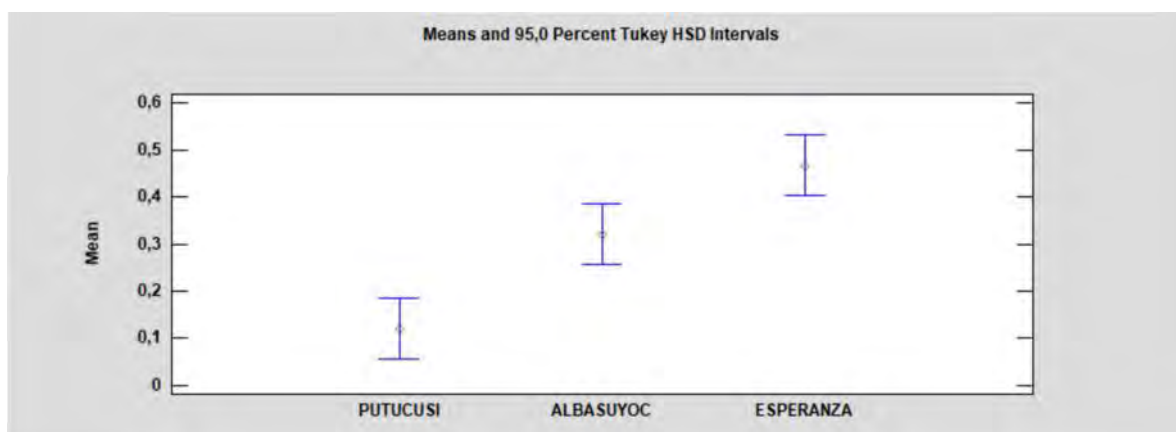
Figura 2. Comparación del contenido de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$) de la miel en tres altitudes.



El ANOVA evidenció diferencias altamente significativas entre los valores de $^{\circ}\text{Brix}$ en las tres altitudes ($F = 4930,98$; $p < 0,05$). La prueba de Tukey reveló diferencias significativas en todos los contrastes, con valores crecientes desde Esperanza (76,23), Putucusi (78,97) y Albasuyoc (80,30). Se concluye que la concentración de sólidos solubles totales de la miel aumenta con la altitud.

Con relación a la presencia de HMF, los valores oscilaron entre 0,12 y 0,47, mostrando una relación directamente proporcional a la altitud, es decir, fueron mayores a mayor altitud (1808 m.s.n.m.) y menores a una baja altitud (835 m.s.n.m.), El 5-hidroximetilfurfural (HMF) es un compuesto que se forma por la deshidratación de azúcares reductores, principalmente fructosa, en condiciones de acidez y calor, en este estudio, el hecho de que la miel de altitud alta presentara mayores niveles de HMF sugiere que, más allá de la temperatura ambiental propia de la zona, influyeron factores como el tiempo de almacenamiento, la exposición a calor durante el transporte y posibles diferencias en acidez y composición floral. Esto evidencia que el HMF no depende únicamente de la altitud, sino de un conjunto de variables postcosecha y fisicoquímicas que interactúan en la formación de este compuesto.

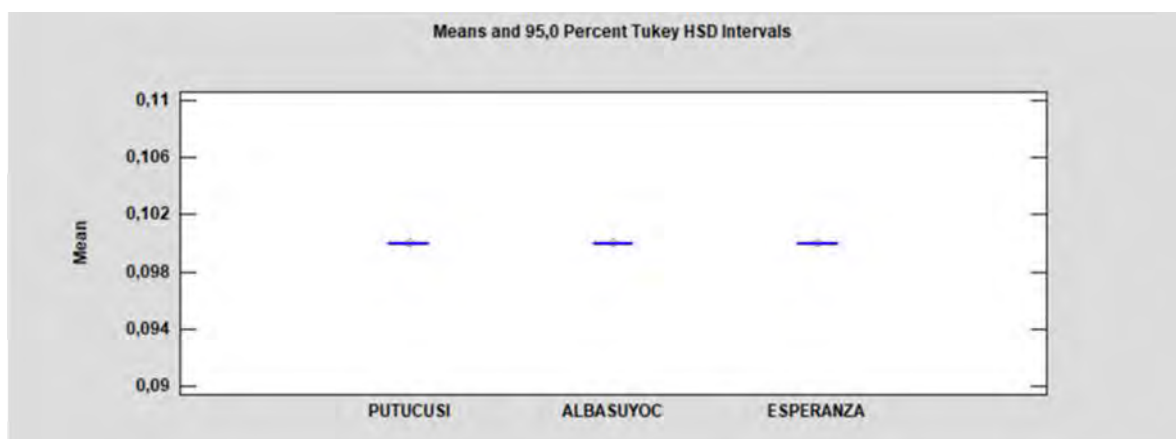
Figura 3. Comparación del contenido de hidroximetilfurfural (HMF) de la miel en tres altitudes.



Los resultados del ANOVA mostraron diferencias significativas en el contenido de HMF entre las tres altitudes ($F = 34,35$; $p < 0,05$). La prueba de Tukey confirmó diferencias significativas en los contrastes, observándose los valores más bajos en Putucusi (0,12), intermedios en Albasuyoc (0,32) y los más elevados en Esperanza (0,47). Se concluye que el contenido de HMF varía con la altitud, siendo mayor en la miel procedente de zonas más bajas.

Con relación al porcentaje de ceniza, los tres pisos altitudinales tuvieron un valor de 0,01 %, lo que sugiere que no existe diferencia significativa en cuanto a este parámetro.

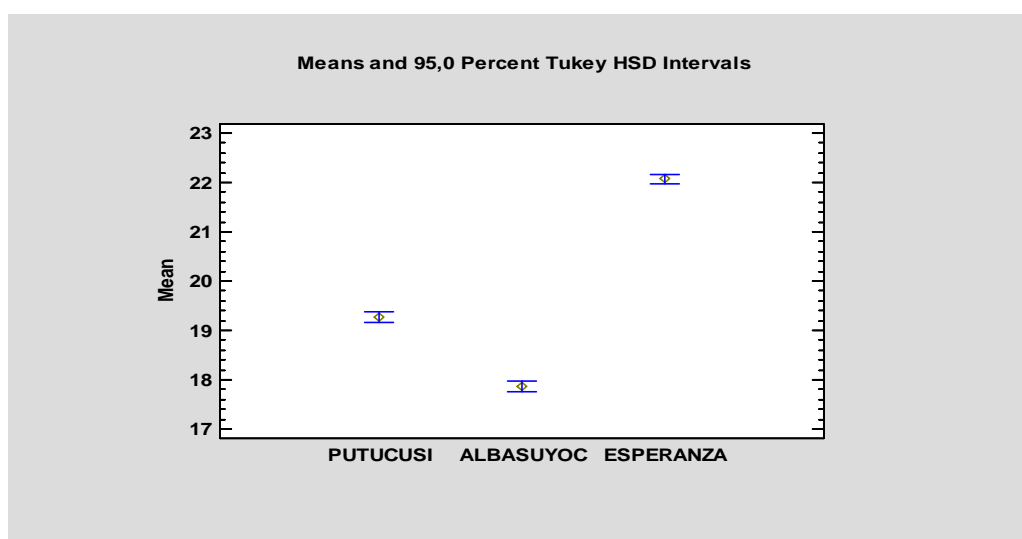
Figura 4. Comparación del contenido de cenizas de la miel en tres altitudes.



El análisis de varianza para el contenido de cenizas no mostró diferencias significativas entre las altitudes evaluadas ($F = 0,00$; $p = 1,000$). Se concluye que el contenido de cenizas en la miel es independiente de la altitud de procedencia.

Adicionalmente, el porcentaje de humedad en las tres muestras fue entre el 19 al 22% lo cual puede considerarse variable dependiendo de la altitud del sector, esto debido a que, según lo menciona López (2014), generalmente, cuando la miel es cosechada en países con clima cálido, su contenido de humedad suele tener valores inferiores a 18%, luego de la recolección, las mieles más estables tienen porcentajes de humedad inferiores por debajo del 20%, esto puede atribuirse a que las condiciones ambientales únicas presentes en las regiones de mayor elevación, como menor temperatura y mayor radiación solar, afectan los procesos de maduración y composición de la miel. El contenido de agua del sector Esperanza, da un resultado de 22,07% lo que da a entender que la temperatura si influye en la calidad de la miel de abeja mientras que el que menor contenido de agua fue el sector de Albasuyoc con el 17,87%.

Figura 5. Comparación del contenido de agua de la miel en tres altitudes.



El ANOVA determinó diferencias altamente significativas en el contenido de agua de la miel entre las altitudes ($F = 2132,64$; $p < 0,05$). La prueba de Tukey mostró que Albasuyoc registró el valor más bajo (17,87), seguido de Putucusi (19,27) y Esperanza con el valor más alto (22,07), encontrándose diferencias significativas en todos los contrastes. Se concluye que la altitud influye en el contenido de humedad de la miel, con valores más altos en zonas bajas.

Estos resultados destacan que la variabilidad en las propiedades fisicoquímicas de la miel de abeja de diferentes altitudes puede verse influenciadas por las características ambientales y florales únicas presentes en cada región. Por lo tanto, en concordancia a lo mencionado por Campo & Hincapié (2023), la determinación de estas propiedades fisicoquímicas en función de la altitud son un factor clave que influye en la composición y calidad de la miel.

5.2. Determinación de las propiedades térmicas de la miel de abeja

Los resultados obtenidos con relación a propiedades térmicas de las muestras de miel de abeja a diferentes temperaturas se detallan en la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6

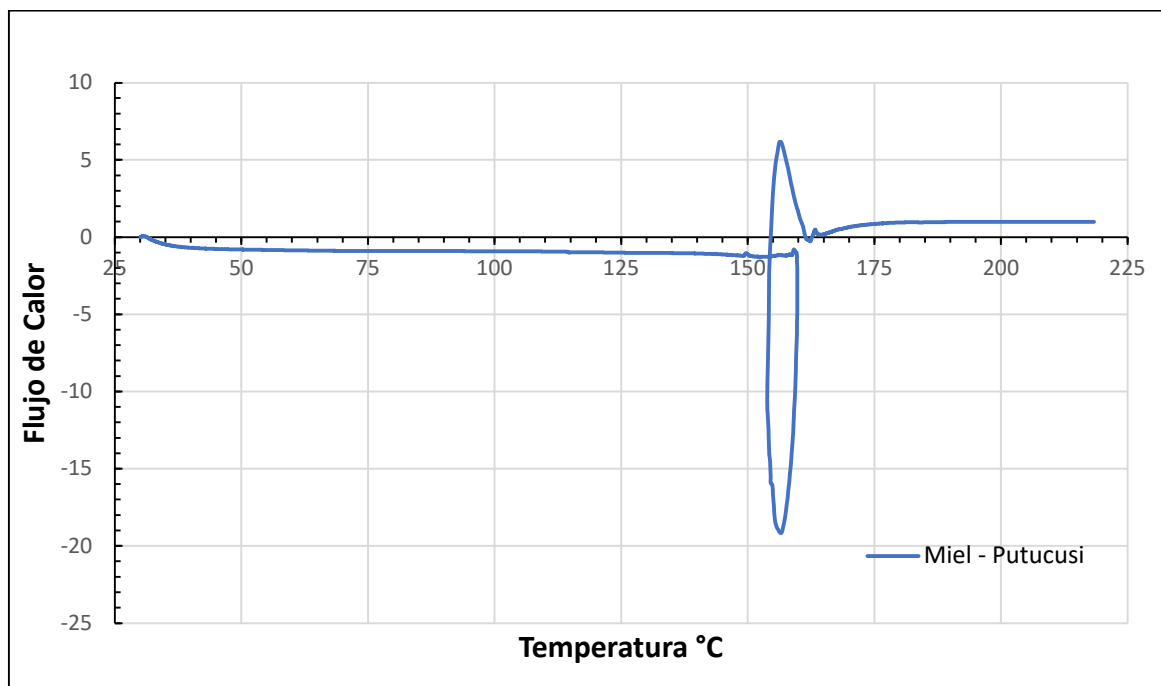
Propiedades térmicas de la miel de abeja

Propiedad térmica	Putucusi 835 m.s.n.m	Albasuyoc 1213 m.s.n.m	Esperanza 1808 m.s.n.m
Entalpía de Fusión (J/g)	87.96	286.27	204.55
Temperatura de inicio (°C)	99.98	109.73	111.85
Temperatura Pico (° C)	156.31	130.37	125.57

Los resultados mostrados en la Tabla 6 revelaron que, la entalpía de fusión de la miel a una altitud de 835 m.s.n.m. fue menor en comparación con las altitudes superiores correspondientes a los sectores de Albasuyoc y Esperanza a 1213 y 1808 m.s.n.m. respectivamente. Adicionalmente, las temperaturas a las que ocurrieron los cambios de fase también fueron diferentes en las tres altitudes de estudio. Los datos obtenidos pueden atribuirse a lo mencionado por Ruiz (2014) quien hace mención de que algunos parámetros térmicos de la miel de abeja silvestre varían en función de la temperatura, lo que sugiere que las condiciones ambientales, como la altitud, pueden afectar la transferencia de calor en este producto apícola. Además, los datos obtenidos en el presente estudio pueden verse relacionados con factores como los citados por Tingo (2013) quien refiere que la estabilidad

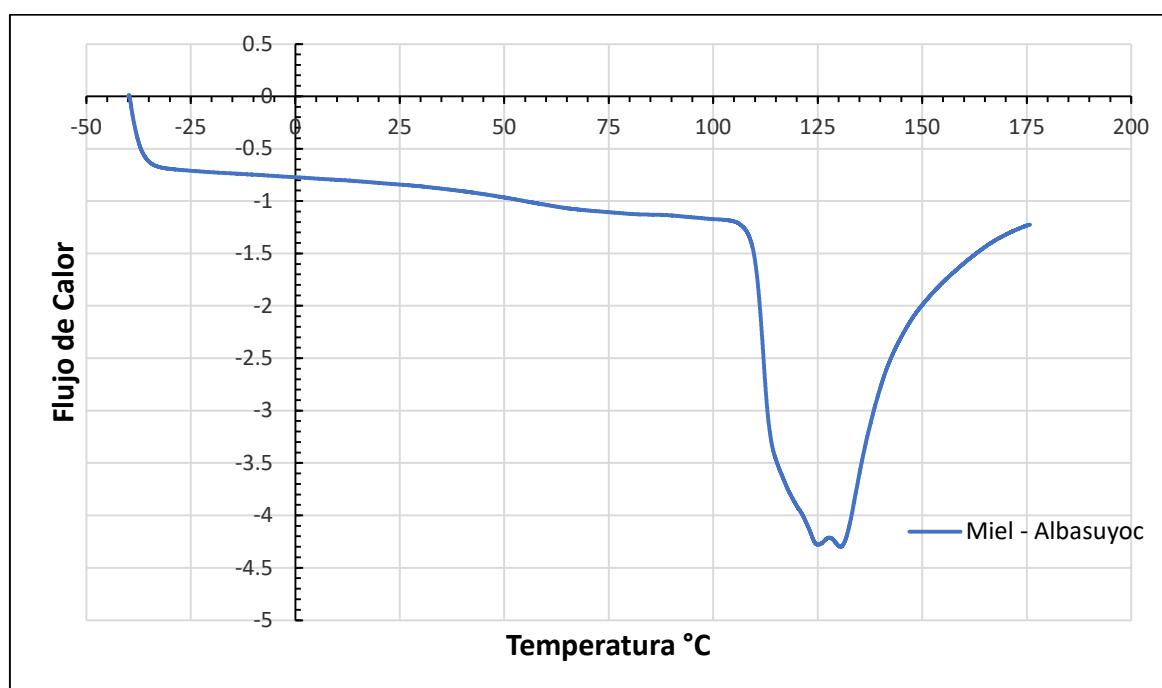
durante el almacenamiento y el procesamiento térmico de la miel está relacionada con propiedades como la conductividad térmica, las cuales también pueden ser influenciadas por la altitud y otros factores geográficos.

Figura 6. *Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura -Putucusi*



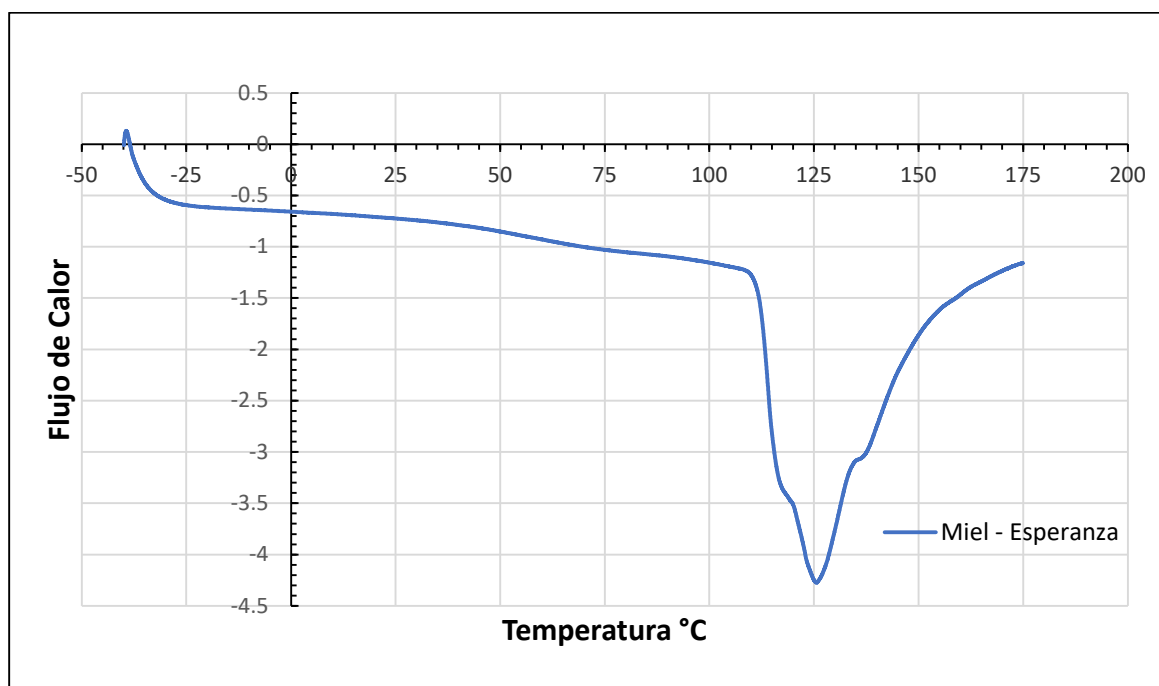
En la figura correspondiente al sector Putucusi, se observa un claro pico endotérmico entre 150 y 165 °C, con un valor pico alrededor de los 156 °C, el cual correspondería al proceso de fusión de la miel. La magnitud reducida del área bajo la curva (87.96 J/g) indica una baja entalpía de fusión en comparación con las muestras de altitudes mayores, lo que podría deberse a una menor estructuración interna del producto. Esto podría estar relacionado con una composición menos concentrada de azúcares o con la influencia de temperaturas ambientales más altas en zonas de menor altitud.

Figura 7. Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura -Albasuyoc



En el análisis térmico de la miel del sector Albasuyoc se observó un amplio pico endotérmico entre 100 y 175 °C, correspondiente a la fusión de los azúcares principales. Este evento fue más definido y con mayor área bajo la curva en comparación con Putucusi, indicando una mayor entalpía de fusión (286.27 J/g). Esta mayor demanda energética puede estar relacionada con una composición más concentrada de sólidos solubles presentes en la muestra, menor contenido de agua y un mayor grado de estructuración interna del producto, estas características podrían estar influenciadas por la altitud intermedia de la zona.

Figura 8. *Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura - Esperanza*



La curva DSC de la muestra de Esperanza mostró un evento endotérmico amplio entre 110 y 160 °C, con un pico principal cercano a los 135–140 °C. La entalpía de fusión fue de 204.55 J/g, superior a la muestra de Putucusi pero menor que la de Albasuyoc. Este comportamiento sugiere que, aunque la altitud es un factor relevante, la estructura térmica de la miel también depende del contenido de agua y la composición específica de azúcares. La mayor humedad observada en esta muestra podría justificar la menor demanda energética para su fusión.

Finalmente, según las Figuras 6, 7 y 8, el inicio de los cambios del flujo de calor o de los cambios de estado ocurren dos etapas principales. La primera inicia a los 25 °C (Figura 1) aproximadamente, pues se observa el descenso de la curva. Esta necesidad de calor es para fusionar los cristales de azúcares hasta los 75 °C aproximadamente. Luego se observa una segunda curva después de los 100 °C completándose a los 175 °C. En esta segunda curva se requiere de mayor energía pues es el estado de evaporación del agua y de los azúcares. Se sabe que los solutos en una solución influyen en la temperatura de ebullición o cambio de

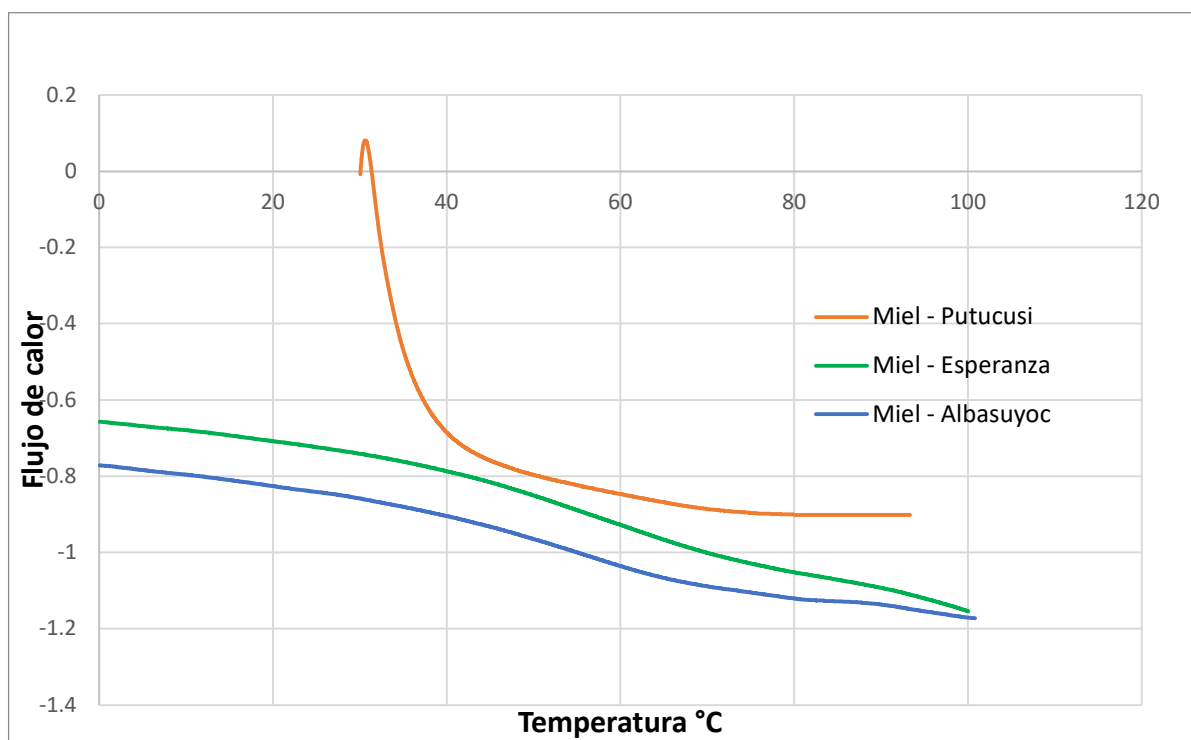
estado del agua. Por ello, el agua de las mieles junto con la fusión de los azúcares cambia de estado a temperaturas superiores a 100 °C.

Según Amoros (2011), En el análisis térmico el resultado de la curva de flujo calórico vs temperatura las muestras pueden tener reacciones exotérmicas que se muestran de forma negativa o positiva dependiendo del instrumento que se use. El área de la curva que esta debajo hace referencia a la entalpia de transición.

La miel de abeja es un líquido subenfriado, cuyo proceso industrial se realiza para eliminar los “vidrios” que se encuentran en la misma. Esto se da por la disminución de la cantidad del agua. La miel fresca se considera heterogénea pues contiene vidrios y fase líquida, la misma que su actividad con el agua es mayor en medida de su sistema. A medida que la miel sufre un tratamiento térmico, el contenido de agua va reduciendo. Esto se da porque el tratamiento térmico de la miel causa el desvanecimiento de los vidrios y la homogenización de la muestra se traduce en una menor cantidad de agua del sistema (Ripoll Seguer, 2012).

En las figuras 1,2 y 3 se puede apreciar el comportamiento que tiene la miel de abeja en las diferentes altitudes y cómo influye la temperatura para llegar a su punto de fusión, donde se observan dos picos endotérmicos, el del sector Albasuyoc y Esperanza los cuales toman valores de los picos antes de cero. Según Tan (2012), el pico principal es el que tiene la temperatura más alta. Así tenemos que la entalpia de fusión de Albasuyoc es de 286.27 y del sector Esperanza es de 204.55 y del sector de Putucusi 87.96, teniendo en cuenta que la miel de Putucusi tuvo una menor entalpia de fusión.

Figura 9. *Efecto de comportamiento de Flujo de calor vs Temperatura – comparación*



En la Figura 9 se observa cómo cambia la estructura interna de la miel en la primera etapa de la curva térmica. A medida que la temperatura aumenta, los cristales presentes — principalmente de glucosa, fructosa y agua estructurada— comienzan a disolverse progresivamente, lo que sugiere un aumento en la fluidez del sistema. Este comportamiento indica que las propiedades térmicas de la miel están estrechamente relacionadas con sus propiedades reológicas. En condiciones de baja temperatura, se evidencia una mayor presencia de cristales, lo cual se asocia con una mayor viscosidad, mientras que a medida que estos se funden o se integran a la fase amorfa, la viscosidad disminuye.

Este fenómeno observado en este estudio concuerda con lo mencionado por Roos y Karel (1991). Quienes destacaron que la Temperatura de transición vítrea (T_g) en alimentos ricos en azúcares depende no solo del contenido de sólidos sino también de la interacción entre los azúcares y el agua, que actúa como plastificante. En ese sentido, cuando la miel se encuentra por debajo de su T_g , se comporta como un material amorfo rígido con alta viscosidad, debido a la inmovilidad molecular. A medida que se supera dicha temperatura, el

sistema gana movilidad progresivamente, disminuye su viscosidad y pasa a un estado más fluido.

Por otro lado, Shrestha et al. (2013) observaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) que la transición vítrea en mieles comerciales se presenta generalmente entre $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la composición y del contenido de humedad. Esto concuerda con nuestros resultados, donde se evidenció que a temperaturas más bajas la miel contenía mayor proporción de cristales, asociados con un estado físico más rígido y viscoso. A medida que la temperatura aumenta, los cristales se integran a la fase amorfa o se funden, lo que se traduce en una notable reducción en la resistencia al flujo.

Además, White y Doner (1980) ya habían señalado que la cristalización en miel depende fuertemente del equilibrio entre glucosa y agua. En nuestro caso, la presencia de cristales de glucosa a bajas temperaturas coincide con una mayor viscosidad, lo cual refuerza la hipótesis de que el grado de cristalización afecta directamente las propiedades mecánicas del producto.

Ante los resultados anteriormente expuestos, se afirma la hipótesis planteada en el estudio confirmándose que, la entalpía de fusión es diferente significativamente desde 835 m.s.n.m. (Putucusi) hasta 1213 m.s.n.m. (Albasuyoc), alcanzando el valor más alto en esta altitud intermedia (286.27 J/g); sin embargo, a 1808 m.s.n.m. (Esperanza) se observa una disminución a 204.55 J/g . además las temperaturas de cambios de fase también tienen una diferencia en este estudio con respecto a la altitud, lo que influye directamente en el comportamiento reológico de la miel. Esto sugiere que no basta con la altitud sola para explicar este comportamiento térmico: otros factores como la composición floral, condiciones ambientales locales y características del muestreo también podrían jugar un papel relevante.

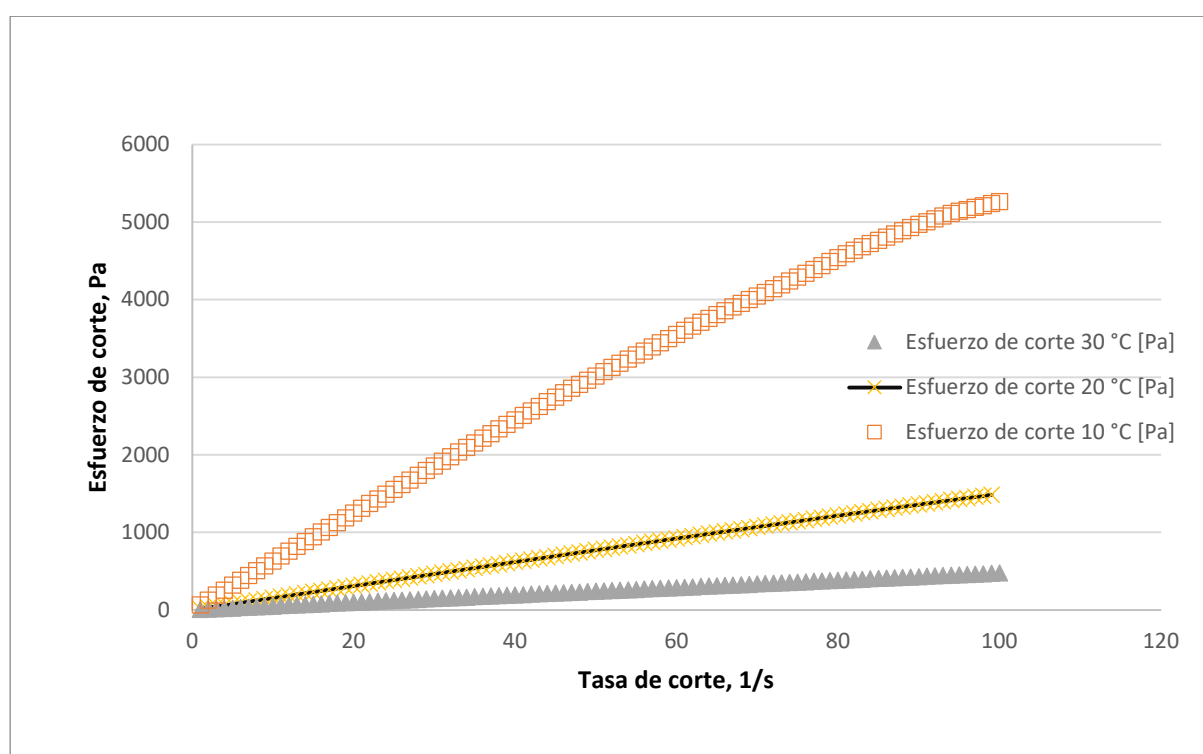
5.3. Determinación de las propiedades reológicas de la miel de abeja

Las propiedades reológicas analizadas fueron: esfuerzo de corte y viscosidad, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Esfuerzo de corte

Los resultados del esfuerzo de corte a partir de las muestras de miel de abeja provenientes de diferentes pisos altitudinales de la provincia La Convención expuestas a distintas temperaturas se muestran en la Figuras 5 a continuación:

Figura 10. *Esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel a 10 °C, 20 °C y 30 °C*



En la Figura 10 se observa la relación entre el esfuerzo de corte (Pa) y la tasa de corte (1/s) para la muestra de miel evaluada a tres temperaturas distintas: 10 °C, 20 °C y 30 °C. Los resultados evidencian un comportamiento característico de fluidos no newtonianos de tipo pseudoplástico, donde el esfuerzo de corte aumenta con la tasa de corte, pero de forma no proporcional.

Figura 11. Ajuste del esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel (LEY DE NEWTON)

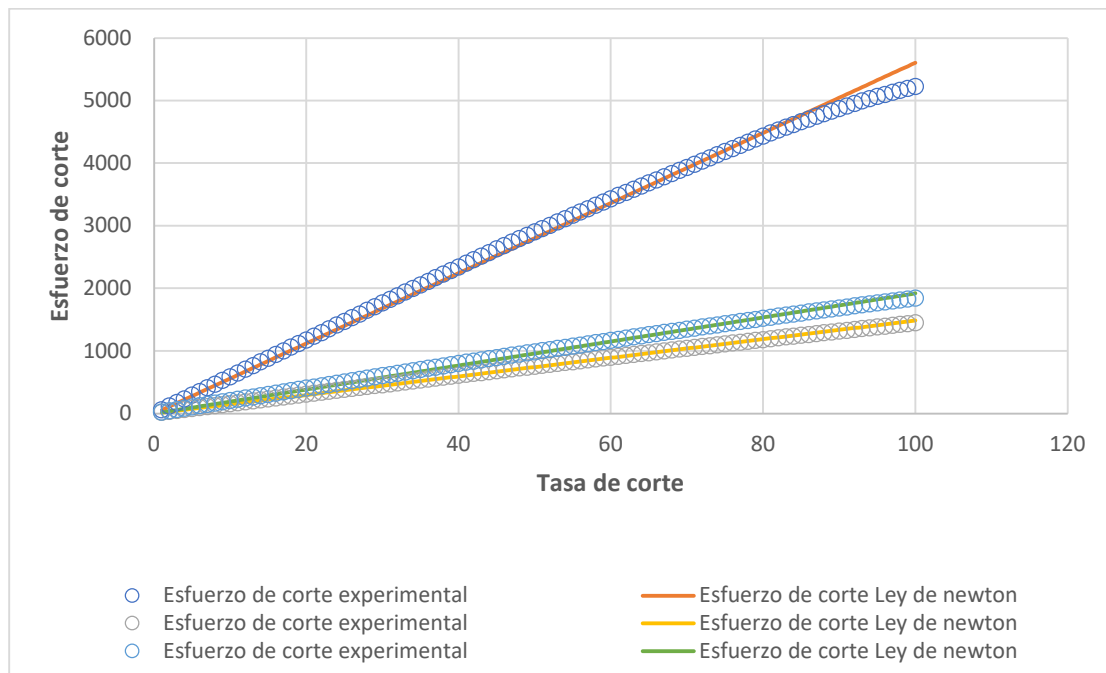


Figura 12. Ajuste del esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel (LEY DE HERSCHEL-BULKLEY)

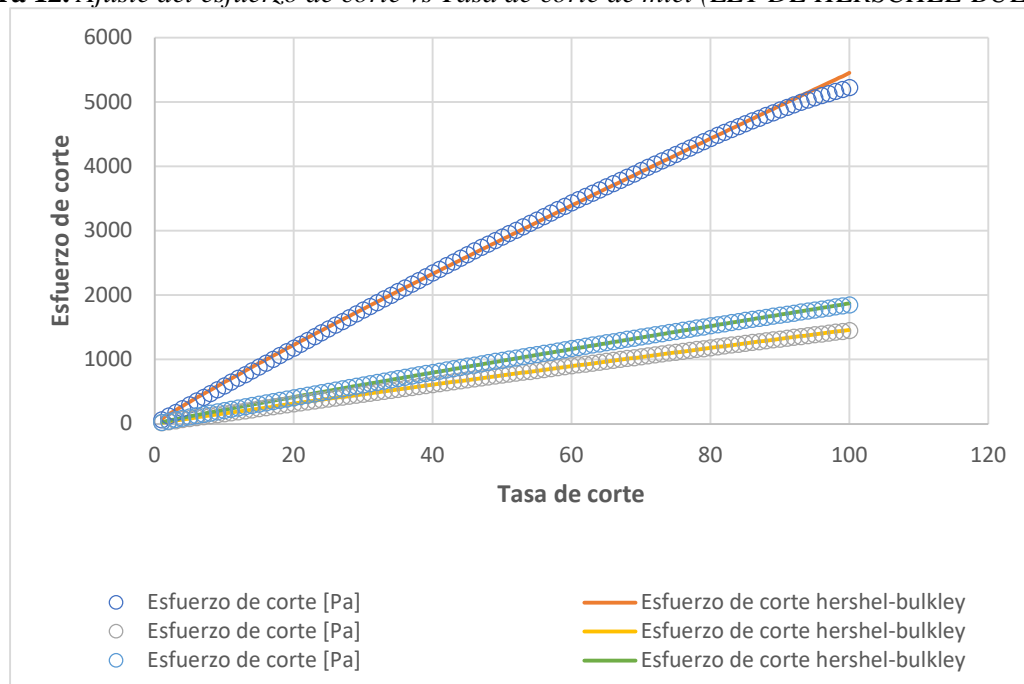
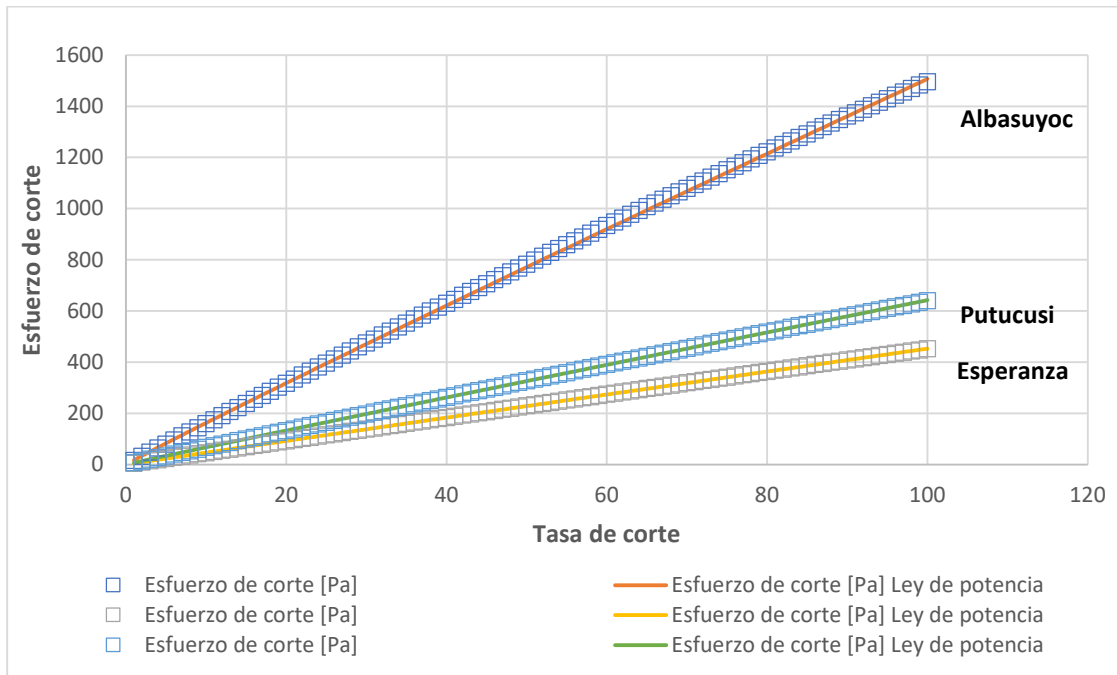


Figura 13. *Figura 13. Esfuerzo de corte vs Tasa de corte de miel (LEY DE POTENCIA)*



El esfuerzo de corte (Pa) Vs la tasa de corte (1/s) de las muestras de miel a diferentes pisos altitudinales (835, 1213 y 1808 m.s.n.m), para tres temperaturas (10, 20 y 30 °C) presentado en las figuras 11 a 13, muestran que el esfuerzo de corte es mayor a medida que la tasa de corte aumenta.

Este comportamiento significa que la viscosidad de la miel debería aumentar a medida que se aplica más esfuerzo de corte (es decir, cuando se aumenta la velocidad de deformación). En otras palabras, la miel podría volverse más espesa o más resistente al flujo con la aplicación de mayores velocidades de corte.

Se puede observar que existe una ligera caída en la curva sobre todo a menores temperaturas, lo que sugiere que a esas temperaturas en el rango de 10° C la miel se comporta como un fluido no newtoniano y a medida que se eleva la temperatura hasta los 30° C el comportamiento reológico se alinea más a un fluido newtoniano.

Este comportamiento puede ser causado por diversos factores, como la composición de la miel, que incluye azúcares como glucosa y fructosa, y la presencia de cristales o

impurezas que pueden influir en cómo la miel responde al esfuerzo de corte. Si la miel contiene partículas o cristales, estos pueden crear una estructura que, al ser sometida a una mayor tasa de corte, genera una mayor resistencia al flujo.

Viscosidad (mPa.s)

Los resultados del procesamiento de los datos con relación al factor viscosidad a partir de las muestras de miel de abeja procedentes de diferentes pisos altitudinales y temperaturas se presentan en las figuras 9, 10 y 11 a continuación:

Figura 14. *Viscosidad vs Tasa de corte de miel a 10 °C*

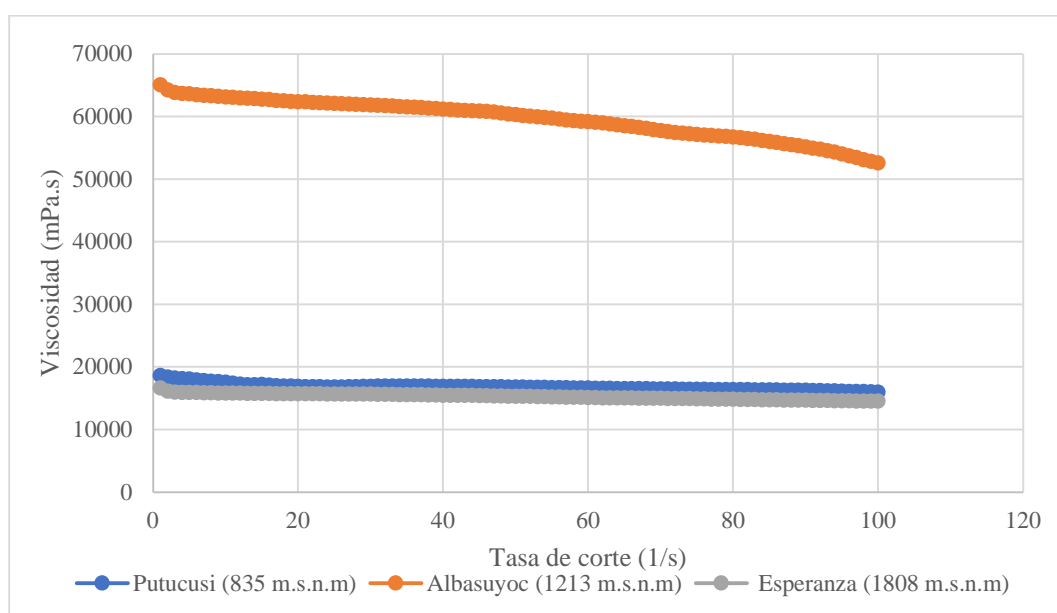


Figura 15. Viscosidad vs Tasa de corte de miel a 20 °C

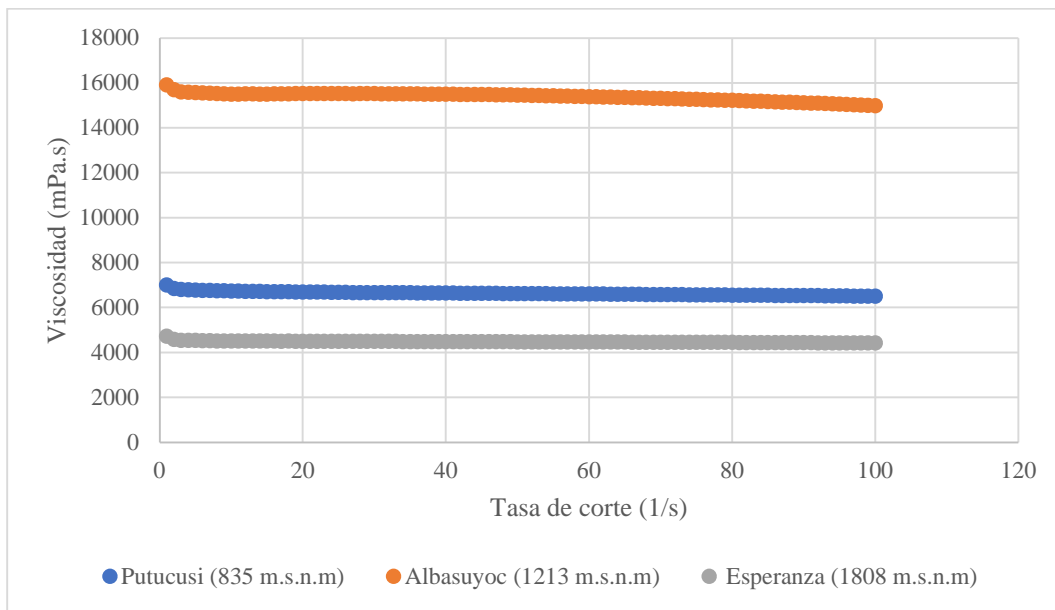
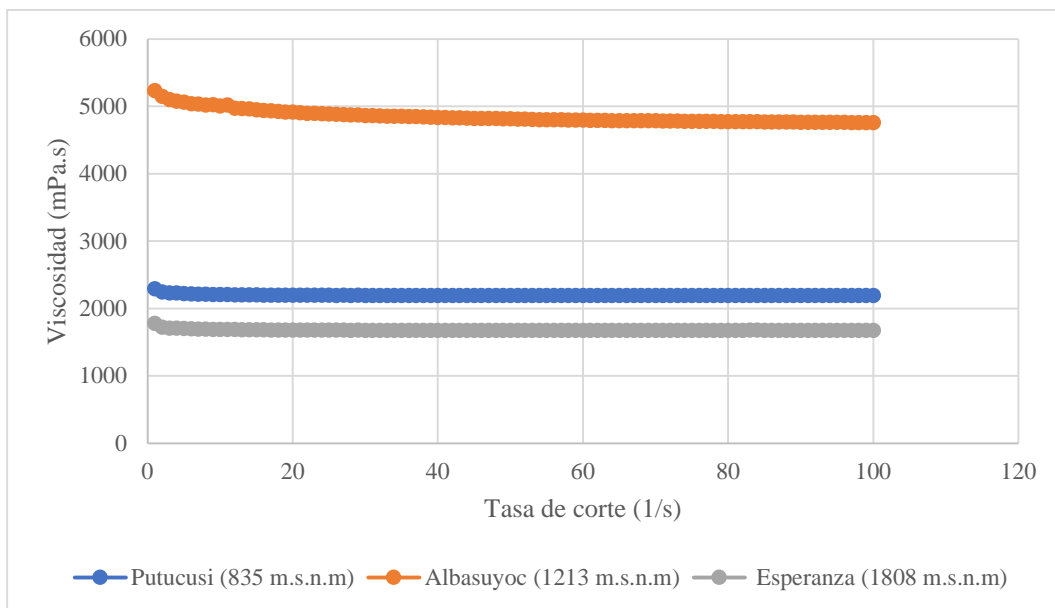


Figura 16. Viscosidad vs Tasa de corte de miel a 30 °C



Las figuras 14, 15 y 16, muestran la relación entre la viscosidad aparente y la tasa de corte. Se observa que la viscosidad de la miel varía según el gradiente de cizalladura. El comportamiento pseudoplástico del fluido se confirma en las gráficas, ya que a medida que aumenta la tasa de corte, la viscosidad disminuye. Aunque esto pueda parecer contradictorio con el esfuerzo de corte, no lo es, ya que la estructura interna de las partículas se reorganiza

con la deformación, facilitando el flujo. Sin embargo, se necesita mayor esfuerzo de corte para mantener el flujo a altas tasas de corte. La mayor disminución de viscosidad se observó en la muestra de Albasuyoc a 1213 m.s.n.m. y 10 °C.

De acuerdo con Velásquez & Goetshchel (2019) estos resultados pueden deberse a que la miel producida a mayor altitud tiende a presentar una mayor viscosidad en comparación con mieles de zonas a menor altitud y lo atribuyen a que las condiciones ambientales únicas presentes en las regiones de mayor elevación, como menor temperatura y mayor radiación solar, ya que afectan los procesos de maduración y cristalización de la miel.

Sin embargo, la miel del sector Esperanza presenta una menor viscosidad con respecto a Albasuyoc a pesar de ser de mayor altitud (1808msnm), esto podría deberse a factores externos como la diferencia de la flora melífera en ambas altitudes, la madurez de la miel e incluso el tiempo de cosecha.

Desde una perspectiva termo-reológica, se observó que en las muestras obtenidas a mayor altitud (1808 m.s.n.m.), se presentó una menor entalpía de fusión, lo que implica una menor energía requerida para alcanzar el estado líquido, favoreciendo una mayor fluidez a temperaturas elevadas.

En términos reológicos, las muestras con mayor contenido de agua, propias de zonas de mayor altitud, mostraron una disminución en la viscosidad aparente y en el esfuerzo de corte, lo cual está en concordancia con el comportamiento típico de sistemas con menor fricción intermolecular

Dicho comportamiento fue descrito en esta investigación con precisión mediante modelos matemáticos no newtonianos, destacando los ajustes al modelo de Ley de Potencia, ley de Newton y Herschel-Bulkley, cuyos parámetros reológicos confirmaron un comportamiento pseudoplástico de las muestras ($n < 1$).

Y de acuerdo con Faustino & Pinheiro (2021) se ha observado que la viscosidad de la miel generalmente disminuye con el aumento de la temperatura debido a una menor fricción molecular y fuerzas hidrodinámicas reducidas. Lo cual tiene concordancia con el análisis térmico y reológico realizado en esta tesis, ya que en ambos se observa la disminución de la viscosidad con respecto a la temperatura.

En conjunto, los resultados mostrados en este estudio con respecto a mieles de los sectores de Albasuyoc, Esperanza y Putucusi, confirman que las propiedades térmicas y reológicas están estrechamente relacionadas, ya que ambas responden a las condiciones fisicoquímicas inducidas por la altitud, tales como el contenido de agua, la concentración de azúcares y la interacción entre moléculas disueltas. Comprender esta interdependencia es esencial para el diseño de procesos térmicos y mecánicos óptimos en la industria alimentaria, tales como el bombeo, la pasteurización o la cristalización controlada de la miel.

Además, se observa en los gráficos correspondientes al análisis térmico que, en el rango de temperaturas de 10, 20 y 30° C existe una ligera caída en la curva lo que sugiere que existe variación en la viscosidad y un aumento del calor específico de las muestras.

Ajuste a modelos matemáticos

Los datos experimentales obtenidos inicialmente, se ajustaron a los modelos de la Ley de Newton, Ley de Potencia y Herschel – Bulkley, el método utilizado para el ajuste a estos 3 modelos matemáticos, se describe en la sección de metodología de esta investigación.

Tabla 7

Parámetros para relacionar la ecuación de tipo Arrhenius

Sector	T (°C)	K	1/T	μ (Pa.s)			Pendiente	R (kJ/mol °K)	E _a		
				L/N	L/P	L/HB			L/N	L/P	L/HB
Putucusi 835 m.s.n.m	10	283	0,00353357	19.19	25.50	18.53	9080,312	0,008	77.007	86.93	86.86
	20	293	0,00341297	6.63	7.12	7.05					
	30	303	0,00330033	2.22	2.23	2.22					
Albasuyoc 1213 m.s.n.m	10	283	0,00353357	56.07	76.88	76.48	10608,566	0,008	88,321	97.38	97.78
	20	293	0,00341297	15.41	17.6	18.30					
	30	303	0,00330033	4.72	5.02	4.93					
Esperanza 1808 m.s.n.m	10	283	0,00353357	14.86	17.92	17.82	9363,358	0,008	77,928	85.97	85.82
	20	293	0,00341297	4.55	4.84	4.84					
	30	303	0,00330033	1.67	1.69	1.61					

R=Constante universal de 0.00831447 J/mol K.

T=Temperatura

K=Temperatura en kelvin

μ =Viscosidad

E_a=Energía de activación

L/N= ley de Newton

L/P= ley de Potencia

L/HB=ley de Herschel Bulkley

En la tabla7, los resultados obtenidos, muestran datos con respecto a la viscosidad y la energía de activación obtenida en cada modelo matemático y en cada temperatura, se puede observar una viscosidad más elevada a una altitud de 1213 m.s.n.m. y 10 °C para la Ley de Potencia en el sector de Albasuyoc y una menor viscosidad en el sector Esperanza a una altitud de 1808 m.s.n.m y 30 °C, en los modelos de ley de potencia y Herschel-Bulkley.

Tabla 8

Resultados del MA%E (PORCENTAJE DE ERROR) para las tres mieles

SECTOR	T °C	MA%E		
		L/N	L/P	L/HB
Putucusi 835 m.s.n.m	10	3.32±0.79	1.92±0.77	2.11±0.64
	20	1.23±0.12	0.5±0.09	0.76±0.40
	30	0.24±0.13	0.14±0.01	0.07±0.01
Albasuyoc 1213 m.s.n.m	10	3.45±2.5	3.26±0.74	3.36±0.71
	20	1.99±0.77	1.76±0.65	1.74±0.55
	30	1.13±0.24	0.12±0.04	0.33±0.40
Esperanza 1808 m.s.n.m	10	2.20±0.62	1.26±0.49	1.37±0.69
	20	0.82±0.15	0.28±0.03	0.30±0.05
	30	0.76±0.49	0.30±0.04	0.27±0.03

También se observa que el porcentaje de error obtenido para cada modelo matemático no supera el 5% por lo que podemos afirmar que los tres modelos utilizados se ajustan muy bien, sin embargo, el que mejor se ajusta podría ser el modelo de Herschel-Bulkley a la temperatura de 30 °C en el sector de Putucusi con un valor de %error de 0.07 ± 0.01 .

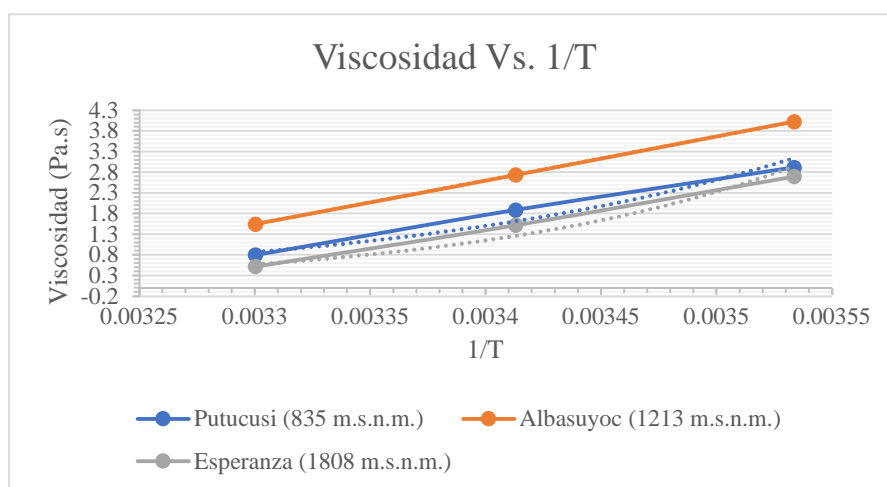
La energía de activación asociada al flujo viscoso de la miel representa la barrera energética que deben superar las moléculas para permitir el movimiento y, por ende, el flujo del producto. Valores elevados de E_a podrían indicar una fuerte dependencia de la viscosidad con la temperatura, mientras que valores bajos reflejarían una miel más fluida y con menor sensibilidad térmica.

En este estudio, la comparación de la E_a entre los diferentes pisos altitudinales permite establecer relaciones entre la composición fisicoquímica de la miel y su comportamiento reológico, aportando criterios adicionales para la caracterización y diferenciación del producto

Ley de Newton

En la figura 12 se observa que el modelo de Newton se ajusta a un comportamiento lineal y de acuerdo a los datos que se presentan en la tabla 8, se puede afirmar que, la variable temperatura si tuvo influencia en la Viscosidad Newtoniana (Pa.s), siendo la miel de Albasuyoc tomada a 1213 m.s.n.m. la que se ajusta mejor al modelo.

Figura 17. Ajuste de datos al modelo de Newton



Para el modelo Newtoniano, cuya ecuación se expresa como $\tau = \eta \dot{\gamma}$, se implementó la fórmula directamente en una hoja de cálculo de Excel, donde la tasa de corte ($\dot{\gamma}$) fue ingresada en una columna y el esfuerzo de corte (τ) calculado en otra columna a partir de un valor inicial de viscosidad (η). El parámetro η se definió como celda variable y se utilizó la herramienta Solver para minimizar la suma de los errores al cuadrado (SSE) entre los valores experimentales de esfuerzo de corte y los predichos por el modelo. Solver se configuró con el método de optimización “GRG No lineal” y la restricción $\eta > 0$. De esta manera, se obtuvo la viscosidad aparente ajustada para cada temperatura (10, 20 y 30 °C). La bondad del ajuste se verificó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y la comparación visual de las curvas experimentales frente a las calculadas.

Tabla 9

Propiedades reológicas ajustados al modelo de la Ley de Newton

Modelo	Sector	Temperatura (° C)	Viscosidad Newtoniana (Pa.s)	R^2
			Promedio/ DS	Promedio
Newton	Putucusi	10	19,19 ± 2,72	0,999
		20	6,63 ± 0,23	1
		30	2,22 ± 0,02	1
	Albasuyoc	10	56,07 ± 2,23	0,997
		20	15,41 ± 0,17	0,999
		30	4,72 ± 0,11	1
	Esperanza	10	14,86 ± 0,22	0,999
		20	4,56 ± 0,10	1
		30	1,68 ± 0,08	1

El comportamiento observado es típico de la miel, que es un fluido viscoso cuya viscosidad disminuye con el aumento de temperatura. Los altos valores de R^2 sugieren que el modelo de viscosidad newtoniana es adecuado para describir estos datos, aunque es importante recordar que la miel, siendo un fluido no newtoniano, puede mostrar comportamientos distintos bajo otras condiciones o con otros métodos de análisis.

Ley de Potencia

Los resultados obtenidos correspondientes al ajuste de los datos al modelo de la Ley de Potencia se detallan en la Tabla 10 a continuación:

Tabla 10

Modelo	Sector	Temp. (° C)	Índice de consistencia (k)	Índice de flujo (n)	R ²
			Promedio	Promedio	Prom.
Ley de Potencia	Putucusi (835 m.s.n.m.)	10	25.5±4.9	0.93	1,00
		20	7.12±0.07	0.97	1,00
		30	2.23±0.02	0.97	1,00
	Albasuyoc (1213 m.s.n.m.)	10	76.88±17.0	0.92	1,00
		20	17.62±1.3	0.96	1,00
		30	5.0±0.13	0.98	1,00
	Esperanza (1808 m.s.n.m.)	10	17.91±1.3	0.95	1,00
		20	4.83±0.12	0.98	1,00
		30	1.69±0.09	1.00	1,00

Propiedades reológicas ajustadas al modelo de la Ley de Potencia.

La constante de proporcionalidad **k** tuvo un valor mínimo de 1.69 a 1808 m.s.n.m. a 30 °C en el sector Esperanza y un valor máximo de 76.88 en el sector Albasuyoc a 10 °C y 1213 m.s.n.m. lo que indica que la miel del sector Esperanza a 30°C puede fluir más fácilmente en comparación con las demás muestras, por otro lado, la muestra que necesitaría mayor esfuerzo para fluir es la tomada a 1213 msnm en el sector de Albasuyoc.

El Índice de comportamiento **n** fue menor a 1213 m.s.n.m. y 10 °C y mayor a 1808m.s.n.m. a 30 °C con un valor de 0,92 y 1.00 respectivamente. En función de este valor experimental, se logró establecer un comportamiento reológico distinto en todas las muestras encontrando que a 1808 m.s.n.m. y 30° C la miel de abeja se ajusta a las características de un fluido Newtoniano ($n=1$) y, a la misma altitud a 10 y 20 °C la miel cumple con las características de un fluido de tipo pseudoplástico, es decir, la miel se volvió más fluida cuando se sometió a mayores esfuerzos de cizalla. mientras que, las muestras de miel tomadas

a altitudes más bajas como 835 m.s.n.m. y 1213 m.s.n.m. responden todas también a fluidos de tipo pseudoplastico, es decir, la miel se volvió más espesa y viscosa cuando fue sometida a mayores velocidades de corte. Estas diferencias reológicas pueden deberse a que como lo menciona Rodríguez (2017), tanto las variaciones en la composición como en estructura de la miel, se relacionan con las condiciones ambientales de la región y que a mayores altitudes presentan una mayor pureza y una estructura más homogénea, en contraste con las mieles de menor altitud mismas que podrían tener una mayor concentración de sólidos o partículas dispersas, lo que les confirió un comportamiento pseudoplastico.

En el caso del modelo de la Potencia, definido como $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$, se introdujo en Excel la ecuación correspondiente, donde K (índice de consistencia) y n (índice de comportamiento de flujo) fueron establecidos como parámetros variables. Para cada dato de tasa de corte, la hoja de cálculo generó un valor de esfuerzo de corte calculado, y se creó una celda que acumulaba la suma de los errores al cuadrado entre los valores experimentales y los teóricos. Con Solver, se ajustaron los parámetros K y n hasta encontrar el mínimo de dicha función objetivo, bajo la restricción de $K > 0$. Este ajuste se realizó de forma independiente para cada temperatura (10, 20 y 30 °C). La calidad del ajuste se evaluó mediante R^2 , observándose el grado de correspondencia entre los valores predichos y experimentales.

Modelo de Herschel-Bulkley

Las propiedades reológicas obtenidas de los tratamientos experimentales ajustadas al modelo de Herschel – Bulkley se resumen en la Tabla 11 presentada a continuación:

Tabla 11

Propiedades reológicas ajustados al modelo Herschel - Bulkley.

Modelo	Sector	Temperatura °C	Índice de consistencia (k)	Índice de flujo (n)	R ²
Herschel - Bulkley	Putucusi (835 m.s.n.m.)	10	18.53±11.07	0.93	0,999
		20	7.05±0.12	0.97	0,999
		30	2.22±0.02	0.99	1
	Albasuyoc (1213 m.s.n.m.)	10	76.48±16.45	0.92	0,998
		20	18.30±1.34	0.95	0,999
		30	4.93±0.11	0.98	0,996
	Esperanza (1808 m.s.n.m.)	10	17.82±1.21	0.95	0,999
		20	4.84±0.13	0.98	1
		30	1.61±0.09	1.0	1

En el ajuste de los datos al modelo Herschel Bulkley, tabla 11, se puede observar que la temperatura si puede influenciar en el Índice de Consistencia (k) en los diferentes pisos altitudinales, siendo la temperatura de 10 °C para el sector de Albasuyoc a 1213 m.s.n.m. la que obtuvo una mayor diferencia, lo que indica que a esta temperatura esta muestra especifica necesitaría un mayor esfuerzo para fluir. En todas las muestras estudiadas, el valor correspondiente al Índice de Flujo (n) tuvieron un valor menor a 1 ($n < 1$), lo que quiere decir que los fluidos presentaron un comportamiento de tipo pseudoplastico, con excepción de la muestra del sector esperanza a 30°C el cual tiene un índice de flujo igual a 1, cabe mencionar que este fenómeno también se vió en el modelo de la ley de potencia, por lo que en este caso se estaría comportando como un fluido newtoniano, es decir que su viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de corte, esto podría estar influenciado por la temperatura a la que se analizó la muestra, por lo que, en concordancia con o mencionado por Vargas (2006), se

puede afirmar que, cuando características como el esfuerzo de corte aumentan, la velocidad de deformación también incrementa debido a que, la velocidad de deformación de la miel de abeja es correlacional con la viscosidad absoluta.

El ajuste al modelo Herschel–Bulkley, expresado como $\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$, se realizó implementando esta ecuación en Excel, considerando como parámetros variables el esfuerzo de cedencia (τ_0), el índice de consistencia (K) y el índice de comportamiento de flujo (n). Se construyó una columna con los valores calculados de esfuerzo de corte y una celda adicional que sumaba los errores al cuadrado (SSE). Solver fue configurado con el método “GRG No lineal” y restricciones de no negatividad ($\tau_0 \geq 0, K > 0$), optimizando la SSE hasta alcanzar el mejor ajuste. Este procedimiento se aplicó a cada temperatura de análisis. La bondad de ajuste se evaluó con R^2 y la inspección de los residuos, lo que permitió verificar si la inclusión del esfuerzo de cedencia mejoraba significativamente la descripción del comportamiento reológico de la miel.

CONCLUSIONES

-) Se concluye que las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja (*Apis mellifera L.*) producida en tres pisos altitudinales de la provincia de La Convención presentan diferencias significativas asociadas a la altitud de procedencia. Las propiedades fisicoquímicas como acidez, °Brix, contenido de HMF y humedad mostraron variaciones estadísticas entre las localidades, mientras que el contenido de cenizas no evidenció diferencias. En cuanto a las propiedades térmicas y reológicas, se verificó que la miel se comporta como un fluido no newtoniano con carácter pseudoplástico, siendo sus parámetros dependientes de la temperatura y del piso altitudinal. Estos resultados demuestran que las condiciones geográficas y ambientales propias de cada altitud influyen en la composición, estabilidad y comportamiento de la miel, lo que confirma la importancia de considerar la altitud como un factor determinante en su caracterización y en la diferenciación de su calidad.
-) La altitud tuvo un efecto significativo en algunas propiedades fisicoquímicas de la miel de abeja. A mayor altitud (1808 m.s.n.m., sector Esperanza) se observó un menor valor de acidez ($17 \pm 2,00$ meq/kg) y un mayor contenido de sólidos solubles (76,24 °Brix), así como un incremento en el contenido de hidroximetilfurfural (HMF) (0,47 mg/g) en comparación con altitudes más bajas. El contenido de cenizas se mantuvo constante (0,01%) en todas las muestras, mientras que el contenido de humedad varió entre 17% y 22%, siendo mayor en mieles de mayor altitud.
-) Las propiedades térmicas, específicamente la entalpía de fusión, no mostraron una relación lineal directa con la altitud. La muestra de altitud intermedia (Albasuyoc) presentó la mayor entalpía de fusión (286.27 J/g), superando tanto a la de menor altitud (Putucusi, 87.96 J/g) como a la de mayor altitud (Esperanza, 204.55 J/g). Esto sugiere que

además de la altitud, intervienen otros factores como la flora disponible, la composición química del néctar y el contenido de agua en la miel.

) Las propiedades reológicas como el esfuerzo de corte y la viscosidad varían con la temperatura, lo que influye en su textura y manipulación. A menor temperatura (10 °C) mayor esfuerzo de corte y mayor viscosidad. El ajuste a los modelos matemáticos mostró que el modelo de Herschel – Bulkley mostró un mejor ajuste, seguido del modelo de Ley de Newton. Las propiedades reológicas evidenciaron que todas las muestras se comportan como fluidos pseudoplásticos, es decir, su viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura y la velocidad de corte. Las mieles con mayor contenido de humedad mostraron menor viscosidad y esfuerzo de corte. Los modelos de Newton, Potencia y Herschel-Bulkley describieron adecuadamente el comportamiento reológico con errores MAPE menores al 5 %

La altitud tiene una influencia significativa pero no exclusiva en las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel de abeja. Las diferencias observadas en los parámetros evaluados evidencian la complejidad del sistema, donde factores como la biodiversidad floral, las condiciones microclimáticas y las prácticas de cosecha también podrían intervenir en la variabilidad del producto final.

RECOMENDACIONES

-) A los apicultores de la provincia de La Convención, se recomienda considerar la altitud como un factor clave en la ubicación de apiarios, ya que esta influye en las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la miel. Establecer colmenas en zonas estratégicas según el tipo de producto que se desea obtener (mayor viscosidad, menor acidez, etc.) podría mejorar la calidad y la diferenciación del producto en el mercado.
-) Se sugiere implementar prácticas estandarizadas de cosecha y postcosecha, especialmente en zonas de mayor altitud, donde el contenido de humedad tiende a ser más alto. Esto ayudará a evitar fermentaciones indeseadas y a mejorar la vida útil del producto.
-) Para la industria alimentaria y comercializadora de miel, se recomienda incorporar parámetros térmicos y reológicos como parte de los criterios de control de calidad, ya que estos pueden ser indicativos de la frescura, pureza y origen geográfico de la miel.
-) A futuros investigadores, se recomienda ampliar el tamaño de muestra y el número de zonas altitudinales para validar y generalizar los hallazgos. Asimismo, incluir variables adicionales como el tipo de flora predominante, la estación de recolección y el tipo de manejo apícola podría contribuir a una comprensión más integral de los factores que afectan las propiedades de la miel.
-) Se recomienda promover investigaciones a nivel regional y nacional que establezcan perfiles físico-químicos y reológicos según altitud y ecosistema, con miras a desarrollar una posible denominación de origen o sello de calidad para las mieles producidas en la provincia de La Convención.

REFERENCIAS

- Ahamed, M., Shat, A., & Ali, M. (2020). Acacia honey from different altitudes: total phenols and flavonoids, laser-induced fluorescence (LIF) spectra, and anticancer activity. *Journal of International Medical Research*, 10(1). Retrieved from <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0300060520943451>
- Ahmad, G., & Nanda, B. D. (2019). Physico-chemical, rheological and sugar profile of different unifloral honeys from Kashmir valley of India. *Arabian Journal of Chemistry*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535215002579?via%3Dihub>
- Akgün, N., Faruk, Ö., & Kelebekli, L. (2021). Physicochemical properties, total phenolic content, and antioxidant activity of chestnut, rhododendron, acacia and multifloral honey. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 3501–3508. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11694-021-00937-3>
- Amoros, M. (2011). Analisis de la viabilidad de Usar Materiales con PCM en Edificacion. (Tesis Maestria), Universidad Politecnica de Catalunya, Catalunya.
- Asoiro, F., Simeon, M., & Azuka, C. (2021). Effect of floral locations on physicochemical and thermal honey bee properties. *CIGR Journal Open access*, 24(1), 261-279.
- Barragán Barrera, H. N. (2020). Efectos de la elevación sobre la alometría sensorial en la abeja de la miel, *Apis mellifera*.
- Barrera, O. I. (2023). *Factores que determinan las propiedades fisicoquímicas de la miel de abejas: Revisión Sistemática de Literatura*. Revista Mutis.
- Bouhala, A., Ouchemoukh, S., Moussi, A., & Beldjoudi, S. (2020). Altitude Effect on the Properties of Honeys from the Region of Jijel (Algeria). *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 70(2), 169–178. Retrieved from <http://journal.pan.olsztyn.pl/pdf-118528-49002?filename=Altitude%20Effect%20on%20the.pdf>
- Campo, O., Hincapié G. (2023). Factores que determinan las propiedades fisicoquímicas de la miel de abejas: Revisión Sistemática de Literatura. *Revista Mutis*, 13(1), 1-28. doi:10.21789/22561498.1851
- Chirsanova, A., Capcanari, T., Boistean, A., & Siminiuc, R. (2021). Physico-Chemical Profile of Four Types of Honey from the South of the Republic of Moldova. *Food and Nutrition Sciences*, 12(9). Retrieved from <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=111783>
- Dekeba, K., Prabhu, V., & Subramania, N. (2021). Rheological and thermal properties of honey produced in Algeria and Ethiopia: a review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF FOOD PROPERTIES*, 24(1), 1117–1131. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10942912.2021.1953525?needAccess=true>

- Faustino, C., & Pinheiro, L. (2021). Analytical Rheology of Honey: A State-of-the-Art Review. *Foods*, 10(8). Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8391245/#B10-foods-10-01709>
- Gómez, A. S. (2021). Modelos reológicos asociados al néctar mix papaya-piña. *Revista Científica Multidisciplinar*, 4370-4387.
- González, D. R. (2021). *Efecto del tratamiento térmico en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de la miel de abeja (Apis mellifera) (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana.*
- Inga, G. (2022). *Efecto de los pisos ecológicos en las propiedades físicas, químicas y reológicas de mieles (Apis mellifera L.), en la región San Martín.* UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN. Retrieved from <https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/4391/1/FIAI%20-%20Gianmarco%20Andr%C3%A9%20Inga%20Julca.pdf>
- López, A. (2014). *Efecto de la humedad de la miel y temperatura de descristalizado en la calidad.* Doctoral dissertation, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Retrieved from <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/4222c063-a213-4e37-ae85-841403184e22/content>
- Nayik, G., Dar, B., & Nanda, V. (2019). Physico-chemical, rheological and sugar profile of different unifloral honeys from Kashmir valley of India. *Arab. J. Chem.*, 12, 3151–3162. doi:10.1016/j.arabjc.2015.08.017
- Orczykowska, M., Olejnik, T., Rosicka, J., Miskiewicz, K., & Kowalska, G. (2021). Use of phenomenological rheology methods to analyze the viscoelastic properties of bee honeys. *J. Food Process. Eng*, 44(e13637). doi:10.1111/jfpe.13637
- Puscion, A., Borawska, M., & Socha, K. (2020). Modern Methods for Assessing the quality of Bee Honey and Botanical Origin Identification. *Foods*, 9. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/8/1028>
- Quino, M. (2019). *Determinación de la capacidad antioxidante y caracterización físico – química de mieles de diferentes regiones de Bolivia.* UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS. Retrieved from <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/32907/TM-357.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ripoll Seguer, E. (2012). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DIELÉCTRICAS DE MIEL DE AZAHAR COMO MÉTODO DE CONTROL DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.
- Ruiz, L. (2013). *Determinación de la difusividad térmica en miel de abeja silvestre en función de la temperatura.* Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú. Retrieved from <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d63e4b9b-a1e2-4e3c-a776-054805d01f61/content>
- Ruth Del Cid, A. &. (2024). Adulteración de la miel de abeja: un riesgo para la sostenibilidad apícola.

- Silva, V. D., Lacerda, W., & Resende, J. (2020). Artificial Neural Network and Regression models to evaluate rheological properties of selected Brazilian Honeys. *J. Apic. Sci.*, 64, 219–228. doi:10.2478/jas-2020-0017
- Tafere, A. (2021). Chemical composition and uses of Honey: A Review. *Journal of Food Science and Nutrition Research*, 4, 194-201. Retrieved from <https://www.fortuneonline.org/articles/chemical-composition-and-uses-of-honey-a-review.html>
- Tan, C. &. (2012). Differential Scanning Calorimetric Analysis of Edible Oils: Comparison of Thermal Properties and Chemical Composition. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 77(2), 143-156.
- Velásquez, D., Goetschel, L. (2019). Determinación de la calidad físico-química de la miel de abeja comercializada en Quito y comparación con la miel artificial. *Enfoque UTE*, 10(2), 52-62. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n2.406>
- Warui, M., Hansted, L., Gikungu, M., Mburu, J., Kironchi, G., & Bosselmann, A. S. (2019). Characterization of Kenyan Honeys Based on Their Physicochemical Properties, Botanical and Geographical Origin. *International Journal of Food Science*.
- Roos, Y. H., & Karel, M. (1991). Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. *Journal of Food Science*, 56(1), 38–43. <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1365-2621.1991.tb07970.x>
- Shrestha, A. K., Kasapis, S., & Adhikari, B. (2013). Glass transition behaviour of sugar-rich foods: A review. *Food Hydrocolloids*, 33(2), 1–14.
- White, J. W., & Doner, L. W. (1980). Honey composition and properties: Beekeeping in the United States. USDA Agricultural Handboo <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb07970.x>

ANEXOS

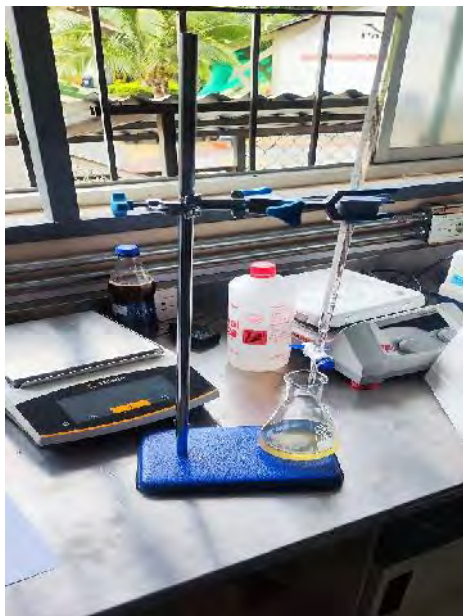
ANEXO 1. Registro fotográfico

- a) **Recolección y almacenamiento de muestras de miel de abeja (*Apis mellifera* L.) tomadas a 835, 1808, y 1213 m.s.n.m. en la provincia de la Convención**



b) Determinación de las propiedades físico-químicas de las muestras de la miel de abeja (*Apis mellifera L.*) recolectada a 835, 1808, y 1213 m.s.n.m.

Determinación de la acidez



Determinación del porcentaje de HMF



Determinación del porcentaje de cenizas



Determinación de ° Brix



- c) Determinación de las propiedades térmicas de las muestras de la miel de abeja (*Apis mellifera* L.) recolectada a 835, 1808, y 1213 m.s.n.m.



- d) Determinación de las propiedades reológicas de las muestras de la miel de abeja (*Apis mellifera* L.) recolectada a 835, 1808, y 1213 m.s.n.m.

