

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Biosistemas

**Análisis de la expansión volumétrica del café (*Coffea arabica*)
durante el proceso de torrefacción en granos con diferente
tratamiento térmico, variedad y tipo de beneficiado**

Trabajo Final de Graduación presentado como requisito para optar por el
grado de licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

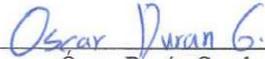
Oscar Eduardo Durán Gamboa

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2024

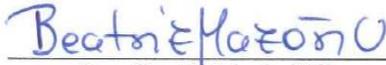
Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



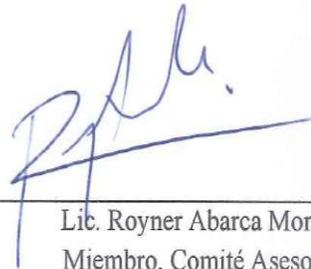
Oscar Durán Gamboa
Postulante



D. Sc. Guillermo Vargas Elías
Director, Comité Asesor



Dra. Beatriz Mazón Villegas
Miembro, Comité Asesor



Lic. Royner Abarca Mora
Miembro, Comité Asesor



Dra. Alejandra Rojas González
Directora, tribunal examinador



Dra. Kattia Solís Ramírez
Miembro, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A mi abuela Emerida.

A mis padres, Melania y Jorge.

A mi hermana Melissa.

A mi novia Victoria.

Por su apoyo y amor incondicional, por ser mi motivación y por siempre creer en mí.

Agradecimientos

Al profesor Guillermo Vargas, por todo el apoyo y guía durante la realización de este trabajo. Además, por enseñarme el maravilloso mundo del café.

A los miembros del comité asesor, Beatriz y Royner, por todas las observaciones, aporte de conocimientos y tiempo invertido, para desarrollar este trabajo de la mejor manera.

A la familia Solano Muñoz: Jorge, Marcia, Juan Carlos y Victoria, por recibirme en su casa y tratarme como uno más, y brindarme todo el apoyo durante mis estudios.

A mis amigos y colegas del laboratorio por el apoyo brindado.

Índice general

Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1. Antecedentes	4
3.2. Marco conceptual	6
3.2.1. Generalidades.....	6
3.2.2. Variedades de café arábica.....	6
3.2.3. Procesos de beneficiado en café.	7
3.2.4. Parámetros de calidad en café.....	8
3.2.5. Torrefacción de granos de café.....	9
3.2.6. Cambios en las propiedades físicas durante la torrefacción.	12
3.2.6.1. Pérdidas de masa.....	12
3.2.6.2. Color.	12
3.2.6.3. Contenido de humedad.	13
3.2.6.4. Actividad de agua.	13
3.2.6.5. Densidad aparente.....	13
3.2.6.6. Expansión volumétrica.....	14
4. METODOLOGÍA	16
4.1. Caracterización de la materia prima.....	16
4.2. Preparación de las muestras	16

4.3.	Proceso de torrefacción de café.....	17
4.3.1.	Medición de la temperatura durante la torrefacción.	18
4.4.	Ajuste de los perfiles de la temperatura interna del tostador	19
4.5.	Ajuste de la cinética de expansión volumétrica aparente.....	19
4.6.	Determinación de las propiedades físicas del café.....	20
4.6.1.	Contenido de humedad.	20
4.6.2.	Densidad aparente.	21
4.6.3.	Contenido de materia seca y pérdida de masa.	22
4.6.4.	Expansión volumétrica aparente.	22
4.6.5.	Medición de color.	22
4.6.6.	Actividad de agua.	23
4.7.	Análisis estadístico.....	24
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
5.1.	Cinética de la expansión volumétrica del grano de café	25
5.1.1.	Condiciones de torrefacción en café Catuaí.....	25
5.1.2.	Perfiles de temperatura interna del tostador.....	26
5.1.3.	Propiedades físicas.....	29
5.2.	Efecto de la variedad del grano en la expansión volumétrica aparente.....	44
5.2.1.	Condiciones de tueste en café de las variedades Geisha y Catuaí.	44
5.2.2.	Café de la variedad Geisha.	45
5.2.3.	Café de la variedad Catuaí.	47
5.2.4.	Efecto de la variedad de café en el perfil de temperatura del tostador.	49
5.2.5.	Propiedades físicas según la variedad de café.	51
5.3.	Efecto del tipo de beneficiado en la expansión volumétrica aparente	60
5.3.1.	Condiciones de torrefacción según el tipo de beneficiado.....	60
5.3.2.	Análisis de café procedente de un beneficiado húmedo (café lavado).....	61
5.3.3.	Análisis de café procedente de un beneficiado semiseco (café miel).....	63

5.3.4.	Análisis de café procedente de un beneficiado seco (café natural)	66
5.3.5.	Efecto del proceso de beneficiado perfil de temperatura del tostador	69
5.3.6.	Propiedades físicas del café según el tipo de beneficiado.	70
6.	CONCLUSIONES	77
7.	RECOMENDACIONES	78
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	APÉNDICES.....	85

Índice de Figuras

Figura 1. Variedades de café <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i> en grano oro y tostado.....	7
Figura 2. Muestras de granos de café según el proceso de beneficiado.	8
Figura 3. Coloración de los granos de café según diferentes niveles de tueste.	12
Figura 4. Expansión volumétrica versus tiempo para granos de café de diferente origen (modificada de Illy y Viani 2005).....	15
Figura 5. Equipo de torrefacción y toma de datos para todas las muestras de café.....	17
Figura 6. Escáner y termopares para la medición de la temperatura interna del tostador.	19
Figura 7. Horno de convección (A), Balanza semianalítica para la medición de la masa (B). ...	21
Figura 8. Equipo para la medición de la densidad aparente por el método de caída libre.....	21
Figura 9. Balanza granataria para la medición de la masa.....	22
Figura 10. Molino eléctrico casero (A). Colorímetro espectrofotómetro digital de mano (B)....	23
Figura 11. Equipo para medición de actividad de agua.	23
Figura 12. Ajustes del perfil de la temperatura interna del tostador durante la torrefacción de granos de café de la variedad <i>Catuaí</i>	26
Figura 13. Comportamiento de los residuos para los ajustes del perfil de temperatura interna del tostador con los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023).	27
Figura 14. Ajuste del perfil de temperatura interna del tostador con el modelo de Barrantes (2022). 28	
Figura 15. Mediciones de la luminosidad (L^*) versus el tiempo durante la torrefacción de café de la variedad <i>Catuaí</i>	31
Figura 16. Cambios de color durante el proceso de torrefacción en café de la variedad <i>Catuaí</i> . 32	
Figura 17. Contenido de humedad versus tiempo durante la torrefacción en café <i>Catuaí</i>	33
Figura 18. Actividad de agua versus tiempo en la torrefacción en café de la variedad <i>Catuaí</i> . ..	34
Figura 19. Pérdida de masa seca versus tiempo durante la torrefacción en café de la variedad <i>Catuaí</i> . 35	
Figura 20. Pérdida de masa total versus tiempo durante la torrefacción en café de la variedad <i>Catuaí</i> . 36	
Figura 21. Densidad aparente versus tiempo en la torrefacción en café de la variedad <i>Catuaí</i> . .	37

Figura 22. Expansión volumétrica aparente versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i>	38
Figura 23. Cinética de expansión volumétrica aparente durante el tueste de café de la variedad <i>Catuaí</i> . 40	
Figura 24. Modelo propuesto y de Vargas (2014) para describir la cinética de expansión volumétrica del café.	41
Figura 25. Análisis de los residuos para el modelo propuesto y de Vargas (2014).	42
Figura 26. Resultados del análisis de valores observados versus predichos para modelo propuesto y de Vargas (2014).	43
Figura 27. Ajustes del perfil de temperatura del tostador para café de la variedad <i>Geisha</i>	45
Figura 28. Resultados del análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café de la variedad <i>Geisha</i>	46
Figura 29. Ajustes del perfil de temperatura del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i>	47
Figura 30. Análisis de los residuos del ajuste de modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en granos de café de la variedad <i>Catuaí</i>	49
Figura 31. Perfil de temperatura interna del tostador para las variedades <i>Geisha</i> y <i>Catuaí</i> utilizando el modelo de Barrantes (2022).	50
Figura 32. Luminosidad versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i> . 53	
Figura 33. Contenido de humedad versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i>	54
Figura 34. Actividad de agua versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i>	55
Figura 35. Pérdida de masa seca versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i>	56
Figura 36. Pérdida de masa total versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i>	57
Figura 37. Densidad aparente versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i>	58
Figura 38. Expansión volumétrica aparente versus temperatura interna del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> y <i>Geisha</i>	59

Figura 39. Ajustes del perfil de temperatura del tostador en granos de café <i>Catuai</i> procedentes de un beneficiado húmedo.	61
Figura 40. Análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café procedente de un proceso de beneficiado húmedo.....	63
Figura 41. Ajustes del perfil de temperatura del tostador en granos de café <i>Catuai</i> procedentes de un beneficiado semiseco.	64
Figura 42. Análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café procedente de un proceso de beneficiado semiseco.....	66
Figura 43. Ajustes del perfil de temperatura del tostador en granos de café procedentes de un beneficiado seco.....	67
Figura 44. Análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café procedente de un proceso de beneficiado seco.	68
Figura 45. Ajuste del perfil de temperatura del tostador con el modelo de Barrantes (2022) para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco.	70
Figura 46. Expansión volumétrica aparente durante la torrefacción para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco.	76
Figura A.1. Diagrama del diseño experimental.	87
Figura A.2. Metodología utilizada para desarrollo del primer objetivo.	88
Figura A.3. Metodología utilizada para desarrollo del segundo objetivo.....	88
Figura A.4. Metodología utilizada para desarrollo del tercer objetivo.	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación del nivel de tueste según la pérdida de masa seca (Clarke y Macrae 1989).	11
Tabla 2. Condiciones de torrefacción en café <i>Catuaí</i> .	25
Tabla 3. Coeficientes de la ecuación y los parámetros estadísticos de los modelos para describir el perfil de temperatura interna del tostador de la variedad de café <i>Catuaí</i> .	27
Tabla 4. Valores promedio de las propiedades físicas en café de la variedad <i>Catuaí</i> antes y después del tueste.	30
Tabla 5. Análisis de la correlación de Pearson para las propiedades físicas del café de la variedad <i>Catuaí</i> .	39
Tabla 6. Coeficientes del modelo propuesto y de Vargas (2014) para la cinética de expansión volumétrica aparente del café de la variedad <i>Catuaí</i> .	42
Tabla 7. Condiciones de tueste para el café de las variedades <i>Geisha</i> y <i>Catuaí</i> .	44
Tabla 8. Coeficientes de la ecuación y los parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café de la variedad <i>Geisha</i> .	46
Tabla 9. Coeficientes y parámetros estadísticos de los modelos usados para describir el perfil de temperatura del tostador para café de la variedad <i>Catuaí</i> .	48
Tabla 10. Coeficientes obtenidos de la ecuación a partir del perfil de temperatura del tostador para ambas variedades de café utilizando el modelo de Barrantes (2022).	50
Tabla 11. Propiedades físicas de las variedades de café <i>Geisha</i> y <i>Catuaí</i> .	52
Tabla 12. Condiciones para torrefacción de café realizado para cada tipo de beneficiado.	60
Tabla 13. Coeficientes y parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café procedente de un proceso de beneficiado húmedo.	62
Tabla 14. Coeficientes y parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café procedente de un proceso de beneficiado semiseco.	65
Tabla 15. Coeficientes y parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café procedente de un beneficiado seco.	68
Tabla 16. Coeficientes de la ecuación de Barrantes (2022) para el perfil de temperatura del tostador para cada tipo de beneficiado.	69

Tabla 17. Parámetros CIE L*a*b para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco. 71	
Tabla 18. Contenido de humedad en grano entero para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco..... 72	72
Tabla 19. Actividad de agua para café procedente de un proceso de beneficiado húmedo, seco y semiseco. 73	
Tabla 20. Pérdidas de masa durante la torrefacción para café procedente de un proceso de beneficiado húmedo, seco y semiseco. 74	74
Tabla 21. Densidad aparente para café procedente de beneficiado húmedo, seco y semiseco. ... 75	75
Tabla A.1. Equipos de laboratorio utilizados..... 86	86
Tabla A.2. Contenidos de humedad por variedad antes y después del secado. 86	86
Tabla A.3. Contenidos de humedad por proceso de beneficiado antes y después del secado. 86	86

1. INTRODUCCIÓN

Según los datos del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) existen 26 000 familias productoras de café en Costa Rica para el año 2023. Este año la producción aumentó 14,4% con respecto a la cosecha 2021-2022, para un total de 1 908 938 fanegas (1 fanega: 400 L) con corte al mes de abril (ICAFFE 2023). En un estudio realizado por UNIMER, el 84 % de los costarricenses consumen café, situando al país en el segundo lugar de consumo per cápita después de Brasil (Gómez 2018).

La influencia del proceso de torrefacción en la calidad sensorial del café es un factor diferenciador en el mercado de los cafés de especialidad. El conocimiento y el control de los parámetros de entrada al tostador genera un impacto en el producto final, el café tostado. El modelo de los perfiles de temperatura durante la torrefacción permiten satisfacer los requerimientos específicos del cliente final y ayuda a mantener la calidad del producto (Münchow et al. 2020), logrando la estandarización y repetitividad del proceso.

Durante la torrefacción se libera dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, generando pérdidas de masa y expansión de los granos durante el proceso (Vargas 2014), estos cambios afectan directamente la densidad del café. El cambio de densidad aparente es un indicador del nivel de tueste (Abarca 2017). Esto es una propiedad física valiosa para tostadores y consumidores de café, y corresponde a un indicador de las características de calidad y uniformidad (Bustos-Vanegas et al. 2018).

Conocer los valores de expansión aparente para diferentes procesos de beneficiado y variedades de café sería de gran utilidad para los comerciantes y tostadores del país. Esta información es relevante para el diseño de los empaques de café tostado en grano entero, para garantizar un sistema adecuado que favorezca las condiciones de distribución, almacenamiento; además de ayudar a preservar la vida útil del producto.

La información disponible sobre el efecto de la variedad del grano de café sobre los cambios físicos ocurridos durante el proceso de torrefacción es escasa. Los estudios realizados se enfocan en las características químicas y organolépticas, como el caso de Bolka y Emire (2020), donde para tres variedades de café arábica, investigaron el efecto del tipo de tostador en la calidad de taza y compuestos bioactivos. También Santamaría et al. (2023) utilizaron café *Geisha* con tres diferentes

niveles de tueste, y por medio de una nariz electrónica, realizaron análisis sensoriales y de cromatografía. Se han realizado investigaciones (Abarca 2017; Barrantes 2022; Tadesse et al. 2016; Vargas 2014) sobre el efecto de la temperatura del tostador en el cambio de las propiedades físicas del grano y se determinó que es uno de los factores más determinantes al tostar café.

Por lo general, la determinación del nivel de tueste basado en color es realizada por un maestro tostador que lo determina de manera cualitativa, o con equipos como espectrómetros y colorímetros, que pueden resultar costosos y solo miden en una pequeña área del grano (Leme et al. 2019). A nivel comercial se utilizan softwares que grafican en tiempo real los perfiles de tueste del café, en los cuales el operador puede manipular parámetros como la temperatura final y tiempos de torrefacción (Schenker y Rothgeb 2017) . En los últimos años se buscan nuevas formas o métodos complementarios para la medición de este fenómeno (Bustos-Vanegas et al. 2018). La expansión volumétrica aparente es un método sencillo que podría utilizarse como alternativa o complemento de las formas de determinación de tueste actualmente utilizadas.

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de la temperatura de torrefacción, la variedad y tipo de beneficiado del café, en la expansión volumétrica aparente de los granos y las demás propiedades físicas asociadas al proceso de torrefacción. La presente investigación aporta información novedosa sobre la variedad *Catuaí*, que corresponde a una de las cuatro variedades comerciales principales en Costa Rica (Vignola et al. 2018) y la variedad *Geisha*, que a partir del 2017 comenzó a ganar popularidad al destacarse y obtener los primeros lugares y puntajes más altos en la competencia de cafés finos “Taza de la excelencia” (CATIE 2020). Con esta información se podrían fabricar empaques para café tostado en grano personalizados para cada café y mejorar los modelos existentes que describen o predicen el tueste. Además, implementar el diseño y construcción de equipos tostadores más precisos, que se adecuen a las condiciones y características del café costarricense.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar la relación entre la expansión volumétrica aparente del café (*Coffea arabica*) y el tratamiento térmico, la variedad del grano y el tipo de beneficiado, durante el proceso de torrefacción.

2.2. Objetivos Específicos

- I. Ajustar un modelo cinético de la expansión volumétrica del grano para la determinación del efecto de la temperatura del tostador.
- II. Determinar el efecto de la variedad del grano en la expansión volumétrica durante el proceso de tueste para los granos de café de las variedades *Geisha* y *Catuaí* rojo.
- III. Establecer el efecto del tipo de beneficiado del café sobre la expansión volumétrica de los granos tostados para la variedad *Catuaí* rojo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

El estudio realizado por Fiore et al. (2006) en Italia, se basó en el cambio de las propiedades físicas de los granos de café arábica y robusta durante la torrefacción a 3, 6, 8 y 9 minutos, y describieron el tueste en tres etapas. La primera, donde el grano pierde agua en forma de vapor, perdiendo alrededor de 70% de su humedad inicial, una segunda etapa, donde ocurre el proceso de pirólisis, en la cual comienza a liberarse CO₂ y otros compuestos volátiles. Ambos fenómenos contribuyen a la expansión del grano y finalizan cuando el grano pierde la elasticidad y se producen grietas. En la tercera etapa, los granos presentan pérdidas de masa significativas y disminuye la capacidad de retención de gases internos como el CO₂.

Vargas-Elías (2011) evaluó las propiedades físicas y de calidad en diferentes condiciones de torrefacción (255, 284, 305 y 355 °C) en café arábica, utilizando un tostador de gas. Determinó el efecto de la temperatura en el tiempo y expansión de los granos; a mayor temperatura se alcanzaron mayores expansiones y viceversa. Además, estableció una relación entre el consumo de materia seca y la expansión volumétrica del grano durante la torrefacción; a mayor consumo de materia seca, mayor expansión.

En otra investigación de Vargas (2014) sobre la cinética de la expansión volumétrica y pérdida de masa en granos de café durante el proceso de torrefacción, determinó que la tasa de expansión de los granos no es constante y se puede dividir en dos etapas. La primera denominada etapa de secado, donde la temperatura del tostador determina la pérdida de masa y ocurre una lenta tasa de expansión, con valores entre 1 y 4 % min⁻¹, donde a mayor temperatura la expansión será mayor y la pérdida de masa será menor. La segunda etapa denominada de tostado, la expansión se comporta de forma lineal con la pérdida de masa y la tasa de expansión es mayor, con valores entre 7,3 y 13,8 % min⁻¹. Además, se propuso un modelo basado en la cinética de las reacciones químicas que describe adecuadamente la expansión volumétrica, para ambos procesos.

En un estudio de Tadesse et al. (2016) se investigó el impacto del proceso de beneficiado húmedo y seco, así como la temperatura de torrefacción (190, 210 y 230 °C) en las características físicas y de calidad de café del Sur de Etiopía. Los resultados mostraron que el café procesado en húmedo

presenta mayor volumen y pérdida de masa al final del tueste. Al aumentar la temperatura hubo aumentos significativos en la pérdida de masa, el cambio en el volumen y la calidad. Además, el proceso húmedo presentó mayor calidad sensorial.

La investigación realizada por Abarca (2017) en Costa Rica en granos de café variedad *Caturra* y *Catuái*, determinó el efecto de la masa, el nivel de tueste y la temperatura interna del tostador en la expansión aparente del grano utilizando un tostador de gas. Además, propuso un modelo matemático que describe la expansión para diferentes masas de granos en función del tiempo, masa inicial y temperatura de la pared, estableciendo que a menor masa inicial y mayor grado de tueste, la expansión volumétrica es mayor.

Los autores Bustos-Vanegas et al. (2018) evaluaron la variación de las propiedades físicas en café arábica bajo condiciones isotérmicas de tueste, a 200, 220, 240, 260 y 280 °C. El volumen, el área superficial y la densidad se evaluaron cada 20 s. La expansión volumétrica es isotrópica arriba de los 220 °C. El volumen del grano puede aumentar hasta 1,8 veces el tamaño inicial con el aumento de la temperatura. Los modelos empíricos fueron adaptados para representar la variación del área, el volumen y la densidad real.

La investigación realizada por Barrantes (2022) en Costa Rica, evaluó el efecto del tipo de beneficiado en el proceso de torrefacción de café. Evaluó tres niveles de tueste comercial 220, 225 y 230 °C, utilizando un tostador de gas y una masa de las muestras de 600 g. Durante esta investigación se determinó la pérdida de masa, expansión volumétrica, densidad aparente y el contenido de humedad del grano para los tres niveles de tueste. Propuso una ecuación que se adecua al perfil de tueste para el café proveniente de los tres procesos y también determinó que los cambios físicos ocurridos durante el tueste se correlacionan de mejor manera con la variable de temperatura que con el tiempo.

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Generalidades.

De acuerdo con Illy y Viani (2005), la mayoría del café comercial se divide en dos especies, arábica y robusta. Ambas especies pertenecen al género *Coffea*, y tienen sus raíces en África. Se cree que los primeros contactos de Latinoamérica con esta planta se dieron alrededor de 1715. Para el año 2000, aproximadamente el 60% del café del mundo se producía en Latinoamérica, con Brasil, Colombia, México y Guatemala como principales productores en volumen de la región. La fruta generada por la planta de café se conoce normalmente como cereza, y se compone de tres partes principales: la cascara, el mucilago y las semillas. Por lo general, cada cereza contiene dos semillas. Estas tienen forma de plano convexo con un lado aplanado, y están envueltas por una capa delgada llamada película plateada y una parte fibrosa llamada pergamino.

3.2.2. Variedades de café arábica.

Existen dos especies principales comerciales de café, conocidas comúnmente como arábica y robusta (Krishnan 2014). Las variedades de la especie arábica con mayor valor comercial sembradas en Costa Rica son *Caturra*, *Catuái*, *Hibrido 51* y *Venecia*. Estas variedades cuentan con una buena producción y calidad (Vignola et al. 2018).

La variedad *Catuái*, es un café enano, desarrollado en Brasil en la década de 1950 y se encuentra ampliamente distribuido en ese país y Centro América. Se deriva de las variedades *Caturra* amarillo y *Mundo Novo*. Esta variedad es susceptible a enfermedades y pestes (Wintgens 2004).

La variedad *Gesha* o *Geisha*, es originaria de Etiopía, y comenzó a utilizarse en la década de 1930. Al principio no fue muy popular, pero luego los productores notaron que los frutos producidos por esta variedad eran más largos con forma elíptica, y que tenían un sabor único, por lo que los precios aumentaron y se popularizó (Krishnan 2014).

Figura 1. Variedades de café *Catuai* y *Geisha* en grano oro y tostado.



3.2.3. Procesos de beneficiado en café.

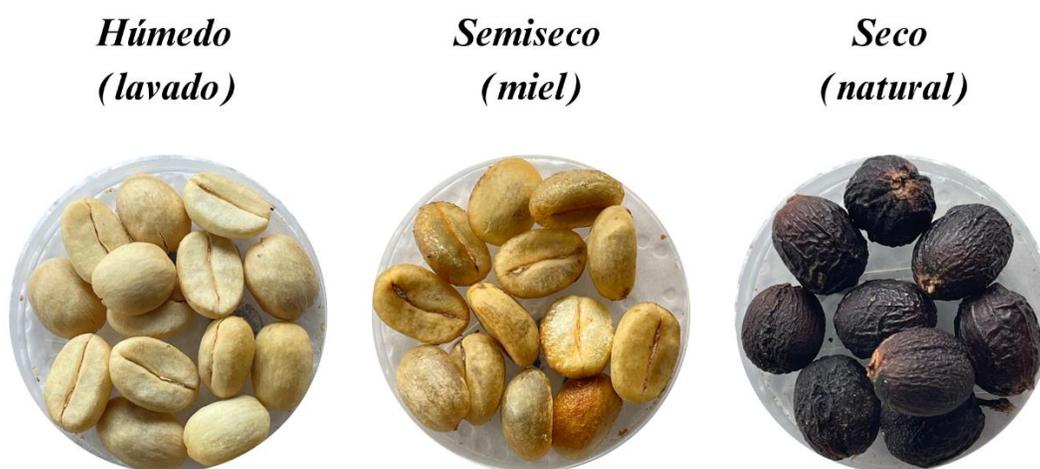
Al cosechar el fruto de café el contenido de humedad es de ~65% b.h. (Wintgens 2004), luego del proceso de beneficiado, el café por lo general se lleva entre un 10 a 12 % b.h. (Stefan Schenker y Rothgeb 2017; Wintgens 2004). Existen tres formas de procesar la fruta del café, proceso seco o natural, semiseco o miel y húmedo o lavado.

Para el proceso húmedo (*lavado*) se utilizan solo los granos maduros. La pulpa es removida y posteriormente se lleva a cabo el proceso de fermentación, en este el grano sin pulpa reposa por un periodo de 12 a 36 horas, para luego ser lavado y retirar cualquier resto de mucílago (Illy y Viani 2005). La idea detrás de la fermentación es lograr la hidrólisis del mucílago para que sea más sencillo de retirar (Clarke y Macrae 1989).

El proceso semiseco (*miel*), es el intermedio entre el proceso seco y el húmedo, aquí se despulpa el café, pero no se remueve el mucílago, por lo que el grano es secado con pergamino y mucílago (Wintgens 2004). Para este proceso no es requerida la fermentación, y si es realizado de manera correcta, la calidad del café con proceso semiseco ha demostrado ser muy buena, produciendo cafés más dulces y con más cuerpo que los de proceso húmedo (Illy y Viani 2005). En el proceso

seco (*natural*), se utilizan los granos cosechados enteros, secados al sol o en secadores mecánicos. Este tipo de café, si es procesado correctamente produce granos con buen cuerpo y aroma (Illy y Viani 2005).

Figura 2. Muestras de granos de café según el proceso de beneficiado.



3.2.4. Parámetros de calidad en café.

Según Puerta Q. (2006) la actividad de agua mide el agua disponible para ser aprovechada por microorganismos que podrían deteriorar un producto, como hongos y mohos, capaces de generar Ocratoxina A. Según Martínez (2021) el rango óptimo de actividad de agua para almacenar café verde está entre 0,45 y 0,55, siendo 0,5 el valor más estable, ayudando a mantener la calidad del café por hasta 18 meses.

La calidad depende de factores físicos y organolépticos. Entre los factores físicos más importantes están la forma, el tamaño, el color, la uniformidad y la densidad. La forma del grano debe ser plana, convexa o chata. Los granos clasificados por tamaño tienen un valor superior ya que generarán tuestes uniformes (Alfaro 2015). La expansión volumétrica de los granos de café se ve afectada por diferentes factores; entre ellos, el nivel de tueste, la densidad aparente, el contenido de materia seca y la porosidad, con impacto en la calidad del café producido (Diaferia 2019). La expansión volumétrica, el aumento en la porosidad interna y la formación de los microporos en la pared celular, facilitan la liberación de los gases y aceites atrapados dentro del grano de café. Esto

favorece la entrada de oxígeno, causando la oxidación del grano (Schenker et al. 2000), generando daños en el sabor y la calidad del grano.

En cuanto al color, el café oro deberá tener tonos azulados o verdes como indicativo de alta calidad, y amarillos o pardos de baja calidad. Además, los granos deben ser uniformes, sin daños ni manchas (Alfaro 2015). De manera muy general el tueste de café se puede separar en claro, medio y oscuro, cada uno con características físicas y organolépticas distintas (Clarke y Macrae 1989). La duración del tueste para catación según los estándares de la Asociación de Café Especialidad de América (SCA 2003), se encuentran entre los 8 y 12 minutos.

3.2.5. Torrefacción de granos de café.

Según Poisson et al. (2017), para lograr diferentes características en el café es preciso un control del tiempo y la temperatura. Se pueden alcanzar los mismos niveles de tueste utilizando diferentes combinaciones de tiempo y temperatura. Tiempos cortos de tueste a alta temperatura, generan resultados muy diferentes al contrastarlo, con tiempos largos a bajas temperaturas. Esto genera diferentes perfiles de sabor. Las altas temperaturas se asocian a una mayor extracción de aceites hacia la superficie del grano.

Schenker y Rothgeb (2017) señalan que para realizar el tueste de café se requieren temperaturas del grano alrededor de los 190 °C; luego la temperatura va aumentando de manera controlada hasta alcanzar 250 °C. Además, debido a las dificultades al momento de medir la temperatura del grano, los equipos tostadores cuentan con diferentes formas de medir este parámetro, que normalmente es una combinación entre la temperatura del grano y del aire caliente dentro del tostador, generando condiciones particulares para cada tostador. Abarca (2017), utilizó un equipo tostador con cilindro rotativo, y definió tres temperaturas en su interior, donde la primera corresponde a la pared interna, la segunda a la masa de granos, y la tercera a la temperatura en contacto con el aire caliente, para la cual utilizó un termopar.

La torrefacción corresponde a uno de los procesos fundamentales en la transformación del grano de café. Este es el responsable del sabor y aroma. Durante este proceso el grano cambia de color y se hace frágil. Una vez dentro del tostador, el grano experimenta alta presión interna gracias al

aumento de temperatura, convirtiendo las paredes del grano en elásticas, lo que permite que el grano se expanda y aumente el volumen (Baggenstoss et al. 2008).

En el tostador de cilindro rotatorio, el calor es transferido de dos formas principales: por convección y conducción (Schenker y Rothgeb 2017). La llama calienta la pared del cilindro rotatorio, y a su vez se calienta el aire dentro del tostador. La transferencia de energía se da tanto por contacto con el aire caliente y con la pared del cilindro.

Según Vargas (2014), el proceso de tueste se divide en dos etapas. La primera corresponde a la etapa de secado que es independiente de la temperatura del proceso. Esta ocurre desde que el grano ingresa hasta que llega a ~ 185 °C. Luego continúa la segunda etapa, llamada torrefacción o tostado. En esta, a menores temperaturas del tostador, mayor es el tiempo de tostado, la pérdida de masa y la expansión aparente del grano.

La investigación de Abarca (2017) determinó que con una temperatura inicial interna del tostador de ~ 280 °C, se logran niveles de tueste comercial, desde claro hasta oscuro, en un lapso de 7,68 y 9,92 min respectivamente. Además, Porras et al. (2019), concluyeron que para generar diferentes niveles de tueste, es necesario una variación mínima de 5 °C en la temperatura interna del tostador al final del proceso. Por último, Barrantes (2022) indicó que una diferencia de 4 °C en la temperatura de salida fue suficiente para observar estas diferencias. Estas tres investigaciones se realizaron con el mismo equipo tostador utilizado en el presente estudio.

Según Clarke y Macrae (1989), el grado de tueste al que se lleven los granos de café determina las características físicas y químicas, esto se ve reflejado en el color, sabor, pérdida de masa seca y composición química del grano luego del proceso. Estos tuestes se pueden resumir en claros, medios y oscuros. Esta clasificación se realiza principalmente de dos maneras, mediante el color del grano, o de manera más precisa a través de la pérdida de masa seca.

Tabla 1. Clasificación del nivel de tueste según la pérdida de masa seca (Clarke y Macrae 1989).

Nivel de tueste	Pérdida de masa seca (% b.s.)
Claro	1-5
Medio	5-8
Oscuro	8-12
Muy oscuro	>12

La transferencia de calor del tostador al grano se da por convección, radiación y conducción, sin embargo, la convección es el método más favorable ya que logra niveles de tueste más homogéneos. En los tostadores horizontales predomina la transferencia de calor por conducción, haciendo el proceso más lento (Baggenstoss et al. 2008).

Schenker et al. (2000), indico que, durante la torrefacción, el grano sufre una serie de cambios, donde la pared pasa de un estado denominado vítreo (*glassy state*), a un estado más elástico durante la pérdida de agua, a un estado vítreo de nuevo. La combinación de fuerzas internas de expansión con un estado elástico de la pared, son los responsables de expandir el grano, donde los granos tostados obtenidos de la máxima temperatura presentaron la máxima expansión y el mayor tamaño de los poros internos (Schenker et al. 2000). A medida que aumenta el tiempo de tueste, se aumenta la expansión volumétrica del grano (Vargas 2014). Además, se presenta un aumento de la porosidad y conectividad de las cavidades internas del grano, esto permite que el tamaño del grano aumente, tenga una vida útil más corta y sea más fácil de romper y moler (Anastácio et al. 2023).

Al final del tueste se quiere detener la reacción exotérmica para cortar el proceso de tueste, por lo general se aplica aire forzado y este proceso se ve favorecido por las características físicas del grano. Los granos con mayor expansión y porosidad favorecen el proceso de enfriamiento. Una mayor expansión y porosidad de los granos genera un aumento del área superficial, lo que aumenta la eficiencia del proceso de enfriamiento, reduciendo los tiempos y evitando el sobretueste del grano (Bustos-Vanegas et al. 2018).

3.2.6. Cambios en las propiedades físicas durante la torrefacción.

3.2.6.1. Pérdidas de masa.

La pérdida de masa es específica para cada lote de café, y puede ser un indicador del grado de tueste, siempre y cuando las condiciones iniciales del grano oro se mantengan iguales para cada tueste realizado, ya que cambios en la humedad y calidad del grano podría afectar las pérdidas entre diferentes lotes de café (Schenker y Rothgeb 2017). La pérdida de masa seca es un indicador del nivel de tueste, estando entre 1 y 5 % para tuestes claros, de 5 a 8 % para tueste medios y de 8 a 12 % para tuestes oscuros (Clarke y Macrae 1989).

3.2.6.2. Color.

Este es el cambio más notorio durante la torrefacción, donde los granos van desde un café claro hasta un café muy oscuro. La uniformidad en el color de los granos es una característica deseada (Clarke y Macrae 1989). Los cambios en la coloración de los granos de café durante el tueste son provocados por una serie de cambios y reacciones químicas complejas que se dan durante este proceso, entre ellas la reacción de Maillard, que produce melanoidinas que van generando que el grano se oscurezca a medida que aumenta el grado de tueste (Illy y Viani 2005).

Figura 3. Coloración de los granos de café según diferentes niveles de tueste.



3.2.6.3.Contenido de humedad.

Según Schenker y Rothgeb (2017), el proceso de torrefacción consiste en una serie de reacciones endotérmicas y exotérmicas, por lo general en las primeras etapas del tueste, cuando ocurre la deshidratación, y para esto el grano absorbe calor del ambiente. Después de esto el grano comienza una serie de reacciones y comienza un proceso exotérmico, donde se libera calor al ambiente. El contenido de humedad durante el tueste puede pasar de 10 a 12 % b.h. para grano verde, de 2 a 3 % b.h. para tuestes medios u oscuros (Illy y Viani 2005). Schouten et al. (2021), compararon los contenidos de humedad entre café arábica y robusta, y observaron que a partir de tuestes medios oscuros, no existen diferencias significativas en el contenido de humedad final.

3.2.6.4.Actividad de agua.

Al almacenar café es imprescindible controlar la temperatura, la humedad relativa, el contenido de humedad y la actividad de agua de los granos. Según Clarke y Macrae (1989), para un adecuado almacenamiento del café oro se recomienda mantener valores de actividad de agua menores a 0,65, valores superiores a este generan un ambiente propicio para el crecimiento de hongos.

Durante el proceso de torrefacción, el grano se deshidrata, en consecuencia, el contenido de humedad desciende, y la actividad de agua o agua disponible, también disminuye (Illy y Viani 2005). Estos dos parámetros son de vital importancia en las reacciones cinéticas responsables de generar cambios físicos y sensoriales en los granos (Schenker y Rothgeb 2017).

3.2.6.5.Densidad aparente.

La densidad aparente es una relación entre la masa y el volumen. Con la pérdida de materia orgánica y contenido de humedad durante el tueste, se producen cambios en la estructura de los granos, se da expansión y esto genera una caída en la densidad del café (Schenker y Rothgeb 2017). Durante el tueste la densidad puede llegar a reducirse hasta a la mitad. Los valores de densidad aparente para el café tostado pueden rondar entre 270 y 370 kg m⁻³, según el grado de tueste o el origen del café (Clarke y Macrae 1989).

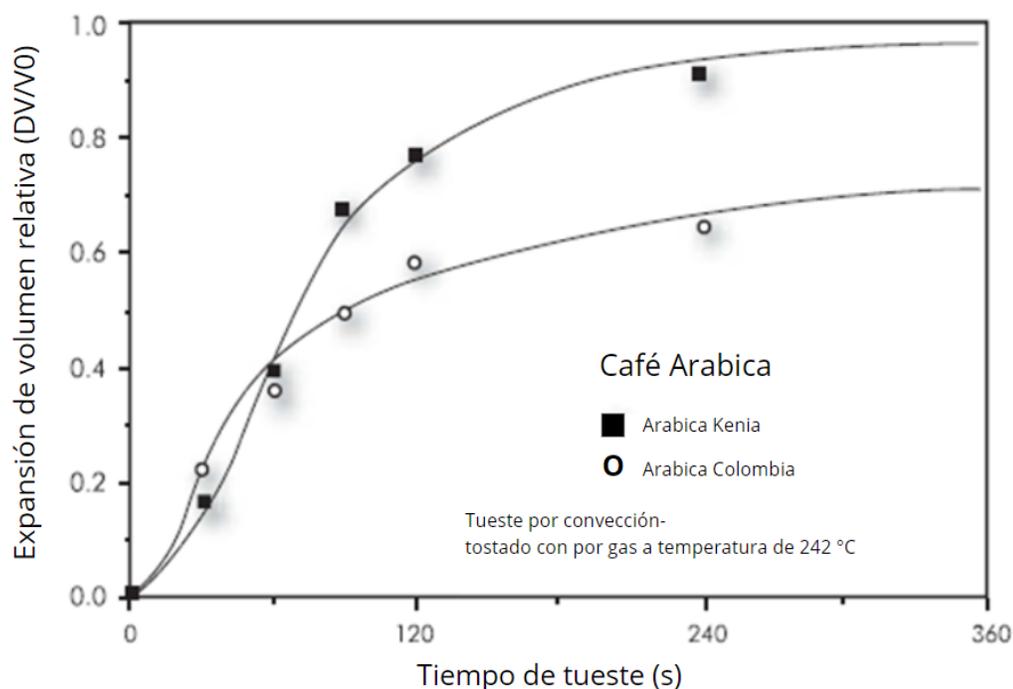
3.2.6.6.Expansión volumétrica.

La expansión del grano es el resultado de una serie de reacciones químicas complejas que ocurren principalmente debido a la temperatura y la humedad, causando cambios en la estructura interna del grano, generando que los polisacáridos que se encuentran en la pared del grano, se encuentren en estado vídrioso o huloso (Schenker y Rothgeb 2017).

Jokanović et al. (2012) estudiaron la fuerza requerida para fracturar el grano de café durante la torrefacción. La fuerza requerida para romper la pared del grano disminuye si el tiempo aumenta. A medida que el contenido de humedad disminuye, el grano se vuelve más frágil y quebradizo, pasando de un estado huloso a uno vídrioso. Cuando se liberan los gases acumulados dentro del grano por exceso de presión interna, se da el fenómeno conocido como "primer crack" , dando paso a reacciones exotérmicas de pirolisis y polimerización (Tsiafítsa et al. 2022). La presión liberada durante el primer crack, podría cambiar las reacciones y equilibrio químico dentro del grano (Gloess et al. 2014).

Según Schenker y Rothgeb (2017) el grano de café presenta reacciones endotérmicas y exotérmicas dependiendo de la etapa de tueste en que se encuentre. Según Illy y Viani (2005), al inicio del tueste, el coeficiente de transferencia de calor de los granos es mayor, debido al agua dentro del grano, conforme se desarrolla el tueste, esta agua se pierde, causando espacios internos con aire y porosidad dentro del grano, lo que genera que el coeficiente de transferencia de calor disminuya a lo largo del tueste.

Figura 4. Expansión volumétrica versus tiempo para granos de café de diferente origen (modificada de Illy y Viani 2005).



El aumento de la temperatura del grano desde el exterior hasta el interior durante la torrefacción genera el comienzo de las reacciones endotérmicas y posteriormente exotérmicas que generan la expansión volumétrica (Illy y Viani 2005). Conforme avanza el nivel de tueste, se da un aumento de la pérdida de masa y la porosidad del grano. Durante el tueste, se escapan gases que generan un aumento de la presión interna del grano y un aumento de la porosidad, lo que causa la expansión del grano (Schenker y Rothgeb 2017). Según Ganju et al. (2024), la estructura y cantidad de microporos en el café están influenciados por el tipo de secado y la variedad del grano.

4. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta tesis se realizó en las instalaciones del laboratorio de procesamiento de granos ubicado en el Centro de Investigación en Granos y Semillas (CIGRAS), y el laboratorio de poscosecha y empaque de la Universidad de Costa Rica (UCR). La lista de equipos utilizados se muestra en la Tabla A.1 en la sección de apéndices.

4.1. Caracterización de la materia prima

La realización de este estudio necesito un total de 39,6 kg de café oro. Se utilizó 27 kg de café oro variedad *Catuái* rojo con tipo de beneficiado semiseco, almacenado con un contenido de humedad 10,02 % b.h. y una actividad del agua 0,53, de la cosecha 2022-2023, proveniente de la finca “Café Los Cuarteles” ubicada en San Pablo de León Cortés, San José, Costa Rica, a 1750-1800 m s.n.m. Además, 7,2 kg de café oro de la variedad *Geisha* con proceso de beneficiado semiseco, almacenado con un contenido de humedad 11,17 % b.h. y actividad de agua de 0,54, de la cosecha 2022-2023, provenientes de la finca “Terciopelo” en San Jerónimo de Tarrazú, San José, Costa Rica, ubicada a 1500 m s.n.m. Por último, se utilizaron 5,4 kg de café oro de la variedad *Catuái* rojo que corresponde al producto final de procesos de beneficiado seco, semiseco y húmedo, almacenados con un contenido de humedad de 11,74, 10,53 y 10,41 % b.h., y actividades de agua de 0,55, 0,54 y 0,57 respectivamente, de la finca “Terciopelo”. Todos los cafés utilizados se encontraban almacenados en bolsas de polietileno (PE) protegidas y en un lugar seco.

4.2. Preparación de las muestras

El proceso de secado se realizó en un horno de convección forzada a 35 °C hasta alcanzar un contenido de humedad uniforme de aproximadamente 10 % b.h. El contenido de humedad antes y después del proceso de secado para todas las muestras de café oro de cada una de las variedades (ver Tabla A.2) y procesos de beneficiado (ver Tabla A.3) incluidos en este estudio se muestran en la sección de apéndices al final del documento. Este secado se realizó para homogenizar el contenido de humedad de todas las muestras y poder realizar una comparación entre ellas.

El contenido de humedad final se calculó utilizando la ecuación 1, donde; X_f : humedad final (% b.h.), X_i : humedad inicial (% b.h.), m_i : masa inicial (kg) y m_f : masa final (kg).

$$X_f = 100 - \frac{m_i}{m_f} (100 - X_i) \quad [1]$$

4.3. Proceso de torrefacción de café

Un tostador de gas convencional marca BENDIG modelo ECO-2000 (ver Figura 5) se utilizó para tostar la totalidad de los granos de café oro necesarios para la realización de esta investigación. Este equipo tiene una forma cilíndrica y una velocidad de giro de 60 rpm, con una capacidad máxima de 2 kg. La entrada es abierta para realizar la carga y descarga de granos. El calentamiento se realizó por una llama fuerte y constante, alimentada con un cilindro de Gas Licuado de Petróleo (GLP) de uso doméstico, cuya válvula se encontraba abierta al máximo. Una vez finalizado el proceso, el café se descargó y se colocó en una bandeja metálica con la que cuenta el mismo equipo, que enfría los granos con un sistema de aire forzado.

Figura 5. Equipo de torrefacción y toma de datos para todas las muestras de café.



El proceso de torrefacción consistió en un calentamiento del tostador hasta alcanzar una temperatura interna de 280 °C. Luego, se introdujo una muestra de 600 g de café y se retiró cuando

se alcanzó el tiempo o temperatura requerida según el experimento que se estaba llevando a cabo. Los granos recolectados luego del proceso se enfriaron con aire forzado a temperatura ambiente para cortar la torrefacción. Finalmente, se dejó que el tostador alcanzara nuevamente 280 °C antes de introducir la siguiente muestra.

Un proceso de torrefacción de café se realizó a 11 temperaturas internas del tostador en función del tiempo del café dentro del equipo. Los datos de temperatura interna se recolectaron considerando diferencias de un minuto (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 min) entre cada tueste para evaluar el efecto de la temperatura interna del tostador en la expansión volumétrica y así obtener el ajuste de un modelo cinético de la expansión volumétrica del grano. La masa de café usada en cada tueste corresponde a 600 g y el tueste se realizó por triplicado, para un total de 19,8 kg de café oro (ver Figura A.2).

El tueste de dos variedades de café se realizó en granos con un contenido de humedad homogéneo para comparar la expansión volumétrica aparente entre ambas y así obtener el efecto de la variedad del grano en esta propiedad física. La primera variedad correspondió a café *Catuái* rojo y la segunda a café *Geisha*, ambas con proceso de beneficiado semiseco. En total, se realizaron cuatro tuestes hasta alcanzar una temperatura interna del tostador de 215, 220, 225 y 230 °C. La muestra usada para cada tueste correspondió a 600 g y se realizó el tueste por triplicado, para un total de 14,4 kg de café oro; 7,2 kg por variedad (ver Figura A.3).

Se realizó la torrefacción de café *Catuái* proveniente de tres procesos de beneficiado distintos; Seco, semiseco y húmedo. Este ensayo permitió obtener datos de la expansión volumétrica aparente del grano para los tres procesos y posteriormente comparar entre estos. El proceso terminó al alcanzar una temperatura interna del tostador de 225 °C por muestra. La masa de la muestra para cada proceso de tueste correspondió a 600 g y se realizó por triplicado, para un total de 5,4 kg de café oro; 1,8 kg por cada proceso (ver Figura A.4).

4.3.1. Medición de la temperatura durante la torrefacción.

El monitoreo y registro de temperatura interna se hizo por medio de un escáner marca Cole-Parmer Instrument, modelo EW-92000-00 (ver Figura 6), con una precisión de $\pm 0,1\%$, que cuenta con termocuplas tipo *k*, una de las cuales se encuentra ubicada dentro del tostador, en la parte superior

y central, que registra la temperatura interna del aire, la que determina el momento de extracción del grano. Este equipo está conectado a una computadora de escritorio equipada con Windows XP, en esta los datos fueron almacenados y descargados, mediante el software ScanLink, versión 2.0.

Figura 6. Escáner y termopares para la medición de la temperatura interna del tostador.



4.4. Ajuste de los perfiles de la temperatura interna del tostador

Los perfiles de la temperatura interna del tostador descritos para todos los granos tostados en esta investigación se ajustaron utilizando los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023), representados por las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente. Estos tres modelos fueron generados utilizando el mismo equipo tostador utilizado en la presente investigación.

$$T = a \cdot e^{-k \cdot t} + b \cdot t + c \quad [2]$$

$$T = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t + c \quad [3]$$

$$T = a * e^{-k \cdot t} + b \cdot t^2 + c - t \quad [4]$$

Donde; T: es la temperatura en el interior del tostador en contacto con el aire (°C), t: es el tiempo efectivo del proceso de torrefacción (min) y a, k, n, b y c: son los coeficientes determinados por regresión no lineal.

4.5. Ajuste de la cinética de expansión volumétrica aparente

La cinemática de la expansión volumétrica aparente durante el tueste se ajustó con el modelo propuesto por Vargas (2014). Este modelo divide el proceso en dos etapas; secado y tostado. En

cada etapa se ajusta la cinemática utilizando la ecuación 5, pero con parámetros distintos para cada fase.

$$V_a = k_0 * \exp\left(\frac{E_a}{R_g * (T + 273,15)}\right) * t + c \quad [5]$$

Donde; T: es la temperatura de la pared del tostador (°C), k_0 : es un factor preexponencial (min^{-1}), t: es el tiempo del proceso de torrefacción (min), R_g : constante de gases ($8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); E_a : Energía de activación (J mol^{-1}) y c: intercepto (%).

4.6.Determinación de las propiedades físicas del café

Las propiedades físicas como la densidad aparente, actividad de agua, el color y contenido de humedad, fueron medidas a los diferentes lotes de café oro antes (control) y después del proceso de tueste. Además, se calculó las pérdidas de masa total y seca, y la expansión volumétrica aparente.

4.6.1.Contenido de humedad.

El método del Ministerio de Agricultura Brasileño (MAPA) se aplicó según lo describen Mendonça, Franca, y Oliveira (2007). Este consiste en colocar una muestra de 5 g de café en grano dentro de un horno de convección forzada (Figura 7.A) a $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas. La masa se determinó en una balanza semianalítica marca Optika (Figura 7.B) con una precisión de 0,001 g.

El contenido de humedad final se calculó utilizando la ecuación 6, donde; X: contenido de humedad (%b.h.), m_i : masa inicial (kg) y m_f : masa final (kg).

$$X = 100 * \left(\frac{m_i - m_f}{m_i}\right) \quad [6]$$

Figura 7. Horno de convección (A), Balanza semianalítica para la medición de la masa (B).



A)

B)

4.6.2. Densidad aparente.

La densidad aparente se determinó con el método descrito por el Instituto de Normas Técnicas del país (INTECO) en su norma INTE/ISO 6669:2011, descrito por Alfaro (2015). Este establece el procedimiento para determinar la densidad aparente del café, por el método de caída libre sobre un contenedor cilíndrico de volumen y masa conocida (Figura 8). La densidad aparente se calcula con la ecuación 7, donde; ρ_a : densidad aparente (kg m^{-3}); m : masa total (kg) y V : volumen del recipiente (m^3).

$$\rho_a = 100 * \left(\frac{m}{V}\right) \quad [7]$$

Figura 8. Equipo para la medición de la densidad aparente por el método de caída libre.



4.6.3. Contenido de materia seca y pérdida de masa.

La medición de masas se realizó con una balanza granataria marca BOECO modelo BPS 51 plus (Figura 9), con precisión $\pm 0,01$ g. El contenido de materia seca se determinó con la ecuación 8, donde: m_s : es la materia seca (g); m_i : masa inicial (g) y X: es el contenido de humedad (% b.h.).

$$m_s = m_i * \left(1 - \frac{X}{100}\right) \quad [8]$$

Figura 9. Balanza granataria para la medición de la masa.



4.6.4. Expansión volumétrica aparente.

El cálculo de la expansión volumétrica aparente se hizo con base en la ecuación 9 utilizada por Abarca (2017), donde; ΔEv = cambio de expansión volumétrica aparente (%), ρ_i = densidad aparente inicial (kg m^{-3}), ρ_f = densidad aparente final (kg m^{-3}), m_i = masa inicial (kg) y m_f = masa final (kg).

$$\Delta Ev = 100 * \left(\frac{\rho_i * m_f}{\rho_f * m_i} - 1 \right) \quad [9]$$

4.6.5. Medición de color.

La medición de color de los granos de café tostados se realizó siguiendo la metodología utilizada por Pramudita et al. (2017). Primero, los granos se molieron utilizando un molino casero (Figura

10.A). Luego se utilizó un espectrofotómetro digital de mano marca Konica Minolta (Figura 10.B), modelo CR-20, para realizar la medición. Los resultados se presentan con base en los parámetros L^* , a^* y b^* según el Modelo CIELAB.

Figura 10. Molino eléctrico casero (A). Colorímetro espectrofotómetro digital de mano (B).



A)

B)

4.6.6. Actividad de agua.

La actividad de agua se midió con un equipo de precisión AQUALAB 4TE (Figura 11). Las mediciones se hicieron siguiendo las recomendaciones del fabricante del equipo METER Group. Primero, se molieron los granos de café. Luego estos se depositaron en los frascos de muestra y se colocaron a temperatura ambiente dentro del equipo para su medición.

Figura 11. Equipo para medición de actividad de agua.



4.7. Análisis estadístico

Se realizaron tres réplicas, con cinco mediciones para cada una de las propiedades físicas evaluadas, por cada nivel o tiempo de tueste, según corresponda, para un total de 15 datos por nivel o tiempo de tueste. Los resultados fueron reportados como el promedio \pm la desviación estándar. En la Figura A.1 de la sección de aprendices se muestra un diagrama del diseño experimental.

El comportamiento normal de los datos se comprobó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Basado en los resultados de este estudio, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) o Kruskal-Wallis, para analizar las diferencias entre tres o más grupos y pruebas t de Student para determinar diferencias entre dos grupos. Estas pruebas estadísticas se realizaron utilizando el programa InfoStat v.2020. Todas las pruebas estadísticas utilizaron un nivel de significancia (p) de 0,05.

Se realizaron pruebas de correlación de Pearson para determinar si existe una relación entre las diferentes propiedades físicas y la expansión volumétrica del grano durante la torrefacción. El ajuste de los modelos utilizados para describir los diferentes procesos estudiados fue escogido basado en coeficientes de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y el error estándar de estimación (ESS), así como de un análisis de los residuos, utilizando el programa Sigmaplot v.15.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Cinética de la expansión volumétrica del grano de café

5.1.1. Condiciones de torrefacción en café *Catuái*.

La Tabla 2 presenta el tiempo y la temperatura de entrada y salida del tostador. El promedio de la temperatura de entrada al tostador fue de $280,7 \pm 0,4$ °C para el café de la variedad *Catuái*, y no presento diferencias significativas ($p > 0,05$), garantizando así condiciones homogéneas de entrada al proceso para todos los procesos de torrefacción.

Tabla 2. Condiciones de torrefacción en café *Catuái*.

Muestra	Tiempo de Torrefacción (min)	Temperatura (°C)	
		Entrada	Salida
		M 1	$1,1 \pm 0,1$
M 2	$2,1 \pm 0,1$	$280,5 \pm 0,2^a$	$201,5 \pm 0,2$
M 3	$3,0 \pm 0,1$	$280,5 \pm 0,6^a$	$196,9 \pm 0,2$
M 4	$4,0 \pm 0,1$	$280,8 \pm 0,5^a$	$199,5 \pm 0,1$
M 5	$5,0 \pm 0,1$	$280,8 \pm 0,3^a$	$203,9 \pm 0,5$
M 6	$6,0 \pm 0,1$	$280,7 \pm 0,5^a$	$209,9 \pm 0,4$
M 7	$7,0 \pm 0,1$	$280,8 \pm 0,2^a$	$217,3 \pm 0,4$
M 8	$8,0 \pm 0,1$	$281,3 \pm 0,3^a$	$225,4 \pm 0,2$
M 9	$9,0 \pm 0,1$	$280,5 \pm 0,6^a$	$232,2 \pm 0,3$
M 10	$10,0 \pm 0,1$	$280,4 \pm 0,1^a$	$241,7 \pm 0,3$
M 11	$11,0 \pm 0,1$	$280,8 \pm 0,2^a$	$253,1 \pm 0,5$

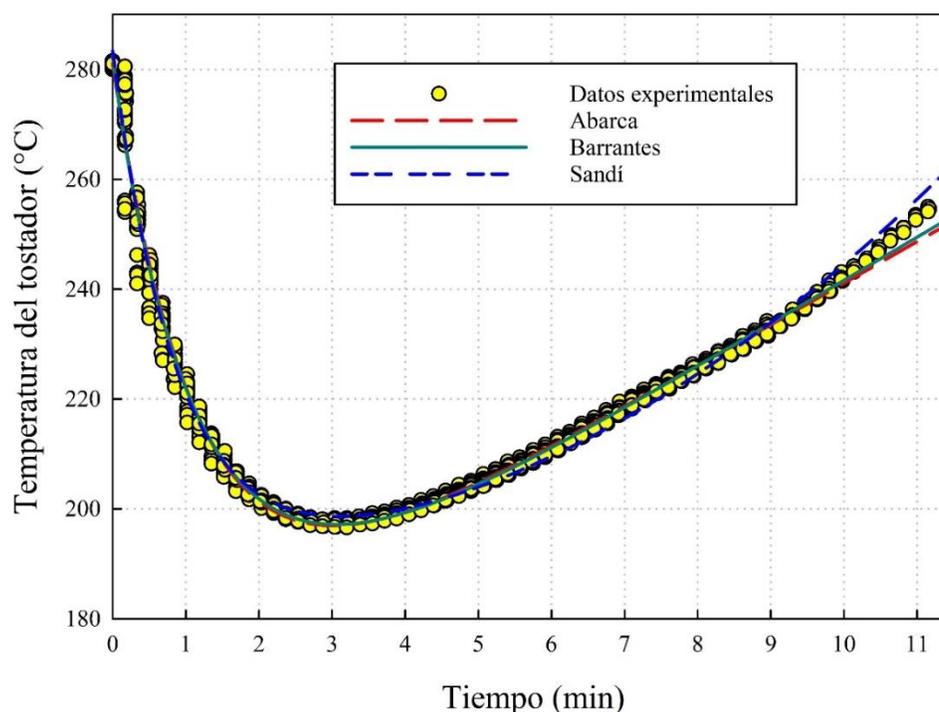
Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

El tiempo de tueste máximo correspondió a 11 minutos. Este se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la Specialty Coffe Association, la duración recomendada es de 8 a 12 minutos, esto con la intención de mantener la calidad y los atributos que caracterizan al café (SCA 2003).

5.1.2. Perfiles de temperatura interna del tostador.

La Figura 12 presenta todos los puntos de temperatura interna registrados durante 11 minutos de tueste, con sus respectivas repeticiones. Además, presenta los ajustes de tres modelos para describir la temperatura interna del tostador creado por los autores Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023).

Figura 12. Ajustes del perfil de la temperatura interna del tostador durante la torrefacción de granos de café de la variedad *Catuaí*.



Los coeficientes obtenidos por medio de una regresión no lineal para cada uno de los modelos utilizados se muestran en la Tabla 3. Además, se observa que los tres modelos presentan valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0,99 y los errores estándar de estimación (ESS) menores a 2,14 %, por lo que se considera que los tres modelos permiten describir el perfil de temperatura interna del tostador de manera adecuada. Esto responde a que los tres ajustes habían sido generados utilizando el mismo tostador que el presente estudio.

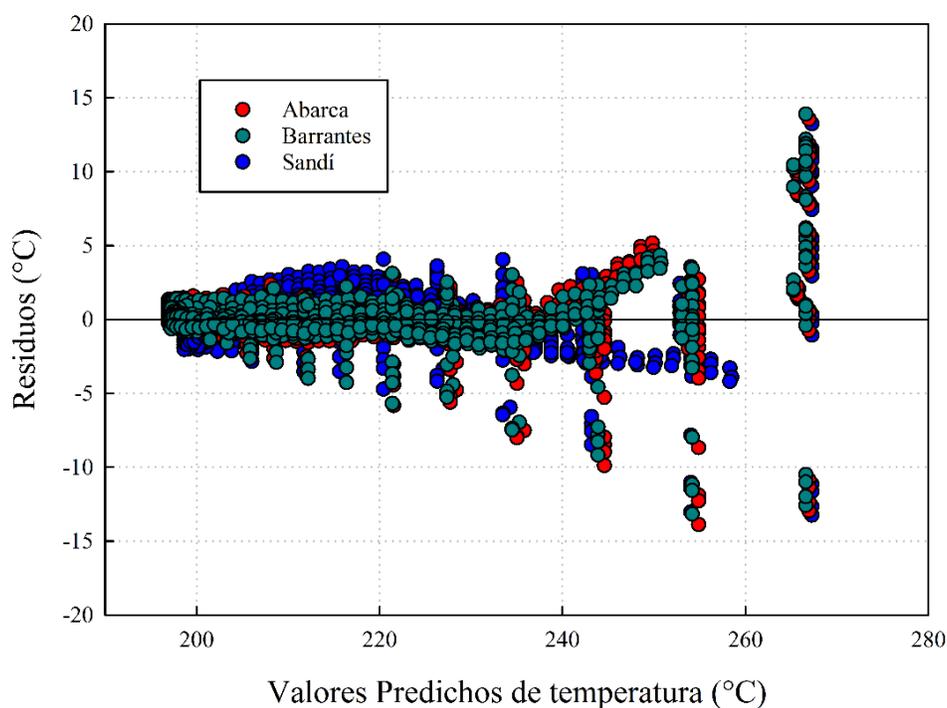
Tabla 3. Coeficientes de la ecuación y los parámetros estadísticos de los modelos para describir el perfil de temperatura interna del tostador de la variedad de café *Catuái*.

Modelo	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	C (°C)	k (min ⁻¹)	d (°C min ⁻²)	n (adim)	R ² (dec)	R ² _{adj} (dec)	ESS (%)
Abarca (2017)	115,768	7,580	165,302	0,855	-	-	0,991	0,991	1,968
Barrantes (2022)	119,729	7,888	162,674	0,846	-	1,046	0,991	0,991	1,928
Sandí (2023)	89,882	-	193,448	1,170	0,611	-	0,989	0,989	2,137

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para un $p < 0,0001$ en la determinación de los coeficientes.

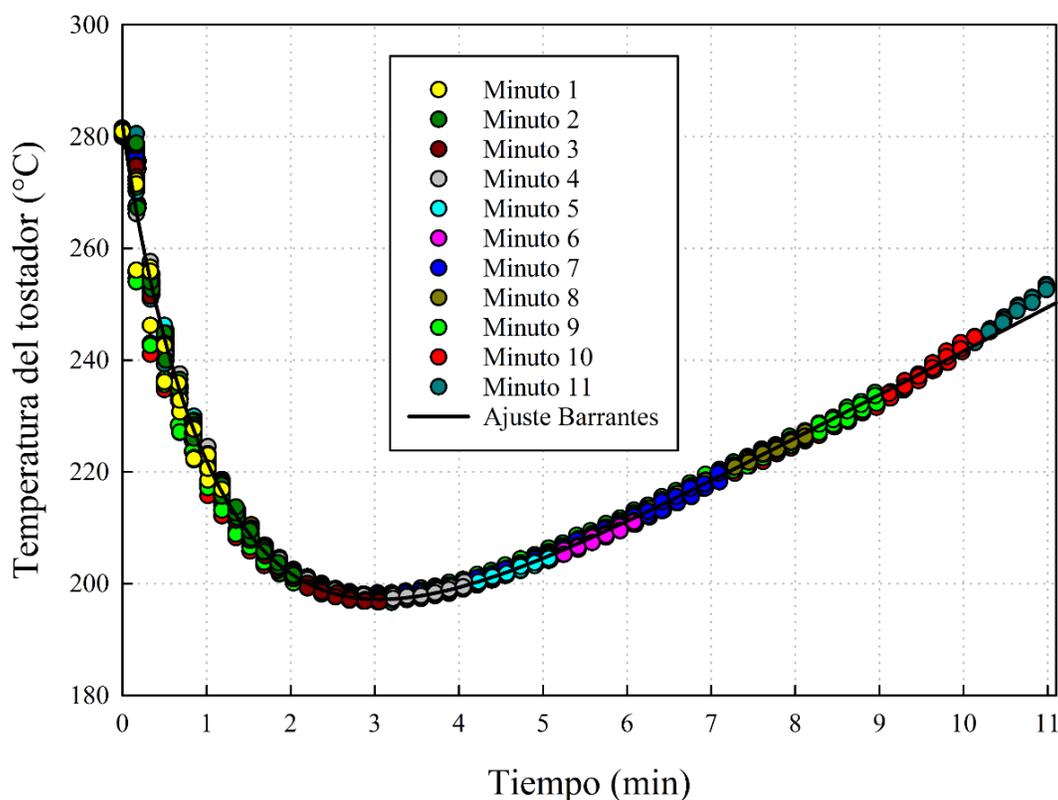
El valor de b representa la tasa de calentamiento lineal registrada en las etapas avanzadas de tueste en los modelos de Abarca (2017) y Barrantes (2022). Además, la suma de los coeficientes de a y b evaluados en el tiempo 0, representan la temperatura interna inicial del tostador para los modelos, con valores de 281,1 para Abarca, 282,4 para Barrantes y 283,3 °C para Sandí. Estos valores ajustados, son similares a la temperatura interna inicial real a la que se realizaron los tuestes, que corresponde a $280,7 \pm 0,4$ °C. La Figura 13 muestra una tendencia aleatoria en el análisis de residuos realizado para los tres modelos.

Figura 13. Comportamiento de los residuos para los ajustes del perfil de temperatura interna del tostador con los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023).



En la mayor densidad de datos el valor residual se encuentra en el rango de los ± 5 °C. Este resultado concuerda con los altos valores observados del coeficiente de determinación y los menores errores de estimación de la Tabla 3. Si bien los tres modelos podrían representar de manera adecuada el perfil de temperatura interna del tostador, el modelo de Barrantes presenta los valores residuales más cercanos a cero para la mayoría de los puntos. Además, el mismo modelo presenta el menor error de estimación $\sim 1,93$ %, por lo que se escogió este modelo para representar el perfil de temperatura interna, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Ajuste del perfil de temperatura interna del tostador con el modelo de Barrantes (2022).



En el estudio desarrollado por Abarca (2017), se determinó que la masa de la muestra y la temperatura interna inicial del tostador son los factores principales que afectan el perfil de tueste del café. Esto es consecuente con lo observado en la Figura 14, al mantener estos valores constantes para todos los tuestes realizados, se observa una tendencia muy similar en el perfil de temperatura interna, donde los puntos se desplazan sobre la misma curva en función del tiempo de torrefacción.

5.1.3. Propiedades físicas.

La Tabla 4 muestra una tendencia general decreciente en los valores del contenido de humedad, la actividad de agua, densidad aparente y el parámetro de color L^* , conforme aumenta el tiempo de torrefacción y aumenta la temperatura interna del tostador. Por el contrario, se observa un incremento en la expansión volumétrica aparente, así como la pérdida de masa seca y total, con el aumento en el tiempo de torrefacción. Los parámetros de color, a^* y b^* , no presentan una tendencia clara durante el tueste, por lo que no se consideran para el análisis.

Tabla 4. Valores promedio de las propiedades físicas en café de la variedad *Catuai* antes y después del tueste.

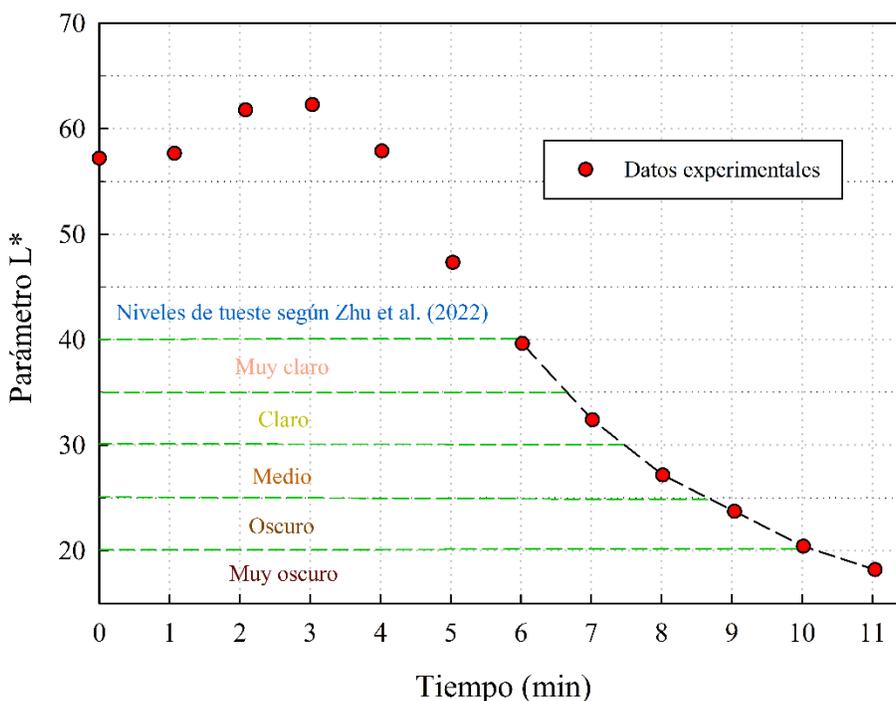
Muestra	Contenido humedad (%) [‡]	Actividad de agua ^{**}	Pérdida de masa total (%) [‡]	Pérdida masa seca (%) [‡]	Expansión volumétrica aparente (%) [‡]	Densidad aparente (kg m ⁻³) [‡]	Color ^{**}		
							L*	a*	b*
M 0	9,84 ± 0,11	0,5334 ± 0,0044	-	-	-	716,27 ± 2,38	57,2 ± 1,9	3,6 ± 1,5	17,2 ± 1,7
M 1	9,37 ± 0,09	0,5351 ± 0,0052	0,60 ± 0,03	0,09 ± 0,07	0,38 ± 0,05 ^a	709,30 ± 1,97	57,7 ± 1,1	4,5 ± 0,5	17,9 ± 0,6
M 2	8,45 ± 0,07	0,5629 ± 0,0017	1,63 ± 0,02	0,12 ± 0,07	6,12 ± 0,22 ^b	660,62 ± 13,00	61,8 ± 2,0	3,7 ± 0,3	16,2 ± 0,4
M 3	7,36 ± 0,12	0,5360 ± 0,0009	2,81 ± 0,03	0,14 ± 0,12	10,92 ± 0,17 ^c	627,60 ± 3,03	62,3 ± 1,6	6,0 ± 0,2	20,3 ± 0,6
M 4	6,49 ± 0,10	0,4997 ± 0,0056	4,28 ± 0,09	0,72 ± 0,03	12,62 ± 0,30 ^d	608,42 ± 13,40	57,9 ± 0,8	11,2 ± 0,7	26,2 ± 0,8
M 5	5,64 ± 0,08	0,4761 ± 0,0112	5,62 ± 0,10	1,22 ± 0,11	16,04 ± 0,37 ^e	582,57 ± 2,73	47,3 ± 1,2	14,1 ± 0,3	26,1 ± 0,7
M 6	4,68 ± 0,13	0,4279 ± 0,0144	7,34 ± 0,03	2,00 ± 0,10	21,02 ± 0,27 ^f	548,44 ± 3,76	39,6 ± 0,8	14,3 ± 0,3	23,7 ± 0,9
M 7	3,81 ± 0,08	0,3869 ± 0,0113	9,49 ± 0,14	3,44 ± 0,15	37,55 ± 1,18 ^g	471,34 ± 4,09	32,4 ± 0,6	13,2 ± 0,3	18,6 ± 0,7
M 8	2,23 ± 0,11	0,2763 ± 0,0175	12,45 ± 0,13	5,06 ± 0,05	54,47 ± 0,80 ^h	405,97 ± 15,47	27,1 ± 0,4	10,7 ± 0,8	12,5 ± 1,3
M 9	1,59 ± 0,07	0,2035 ± 0,0056	14,27 ± 0,04	6,43 ± 0,06	63,40 ± 0,49 ⁱ	375,79 ± 1,54	23,7 ± 0,3	8,1 ± 0,5	8,1 ± 0,7
M 10	1,46 ± 0,06	0,1841 ± 0,0156	16,90 ± 0,24	9,17 ± 0,24	76,76 ± 1,97 ^j	336,80 ± 4,07	20,4 ± 0,4	5,9 ± 0,7	5,3 ± 1,0
M 11	1,06 ± 0,04	0,1417 ± 0,0035	22,24 ± 0,22	14,66 ± 0,21	91,65 ± 0,17 ^k	290,62 ± 1,12	18,2 ± 0,5	3,0 ± 0,2	2,4 ± 0,2

Nota: M 0: café oro. Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

[‡] Medición en café grano entero. ^{**} Medición en café molido.

En la Figura 15 se observa la variación de la luminosidad durante el proceso de torrefacción, donde el grano de café se oscurece, generando una disminución del parámetro L^* . Lo observado concuerda con lo registrado en investigaciones previas en café (Hamzalıoğlu y Gökmen 2020; Jokanović et al. 2012; Porrás-Zúñiga et al. 2019; Schouten et al. 2021), con el aumento del tiempo y nivel de tueste.

Figura 15. Mediciones de la luminosidad (L^*) versus el tiempo durante la torrefacción de café de la variedad *Catuái*.



En las etapas iniciales del proceso de torrefacción, a medida que la temperatura interna aumenta, los granos experimentan una decoloración durante el secado, como lo señalan Illy y Viani (2005). Este fenómeno se observa en este estudio desde el inicio del tostado hasta los 3 minutos de tueste.

En un estudio realizado por Zhu et al. (2022), se establecieron rangos para diferentes tipos de tueste de café basados en el parámetro L^* . Estos rangos fueron definidos de la siguiente manera: 35-40 tueste muy claro, 30-35 tueste claro, 25-30 tueste medio, 20-25 oscuro, y 18-16 muy oscuro. En la presente investigación estos valores corresponden a los minutos 6, 7, 8, 9-10 y 11, respectivamente, como se muestra en la Figura 15.

La tendencia del color al inicio indica un blanqueamiento de los granos, seguido de una caída en la luminosidad durante el proceso de torrefacción. Los resultados de la Figura 15 coinciden con los hallazgos de Jekanović et al. (2012), quienes observaron un patrón similar en dos variedades de café arábica. Todos los niveles de tueste versus el tiempo se pueden apreciar de manera cualitativa en la Figura 16.

Figura 16. Cambios de color durante el proceso de torrefacción en café de la variedad *Catuai*.



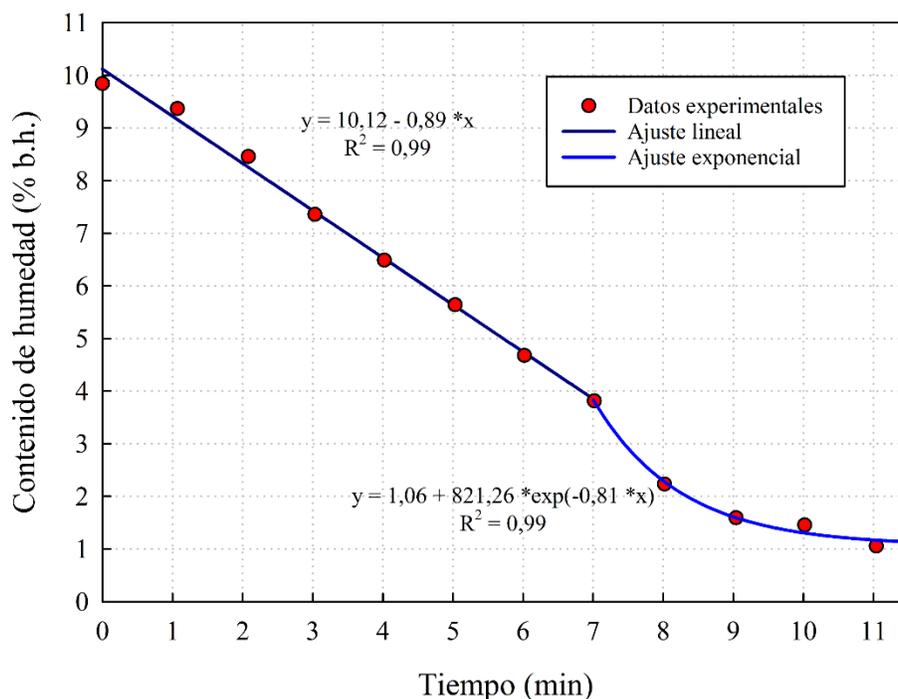
El estudio de Schouten et al. (2021) en café tipo arábica muestra que para un tueste medio, medio oscuro y oscuro, se registraron valores de 28,2, 23,3 y 20,4, respectivamente, en el parámetro L^* . Estos valores son similares a los obtenidos en la presente investigación para los valores de tiempo correspondientes a 8, 9 y 10, respectivamente.

En los primeros 7 minutos de tueste, la reducción en el contenido de humedad sigue una tendencia lineal decreciente con una tasa de $-0,89 \text{ \% min}^{-1}$. Sin embargo, a partir del minuto 7, la tendencia cambia (Figura 17). Estos resultados concuerdan con lo determinado en investigaciones previas (Abarca 2017; Barrantes 2022; Vargas 2014; Yusibani et al. 2023; Zhu et al. 2022) que

evidenciaron que un aumento en el tiempo y nivel de tueste tiene como consecuencia una disminución en el contenido de humedad.

Además, estos resultados coinciden con lo observado por Zhu et al. (2022); que obtuvo que el contenido de humedad desciende más rápido durante los primeros minutos del tueste y posteriormente, se estabiliza. Con base en estos resultados se podría utilizar una aproximación exponencial para describir lo observado según se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Contenido de humedad versus tiempo durante la torrefacción en café *Catuaí*.

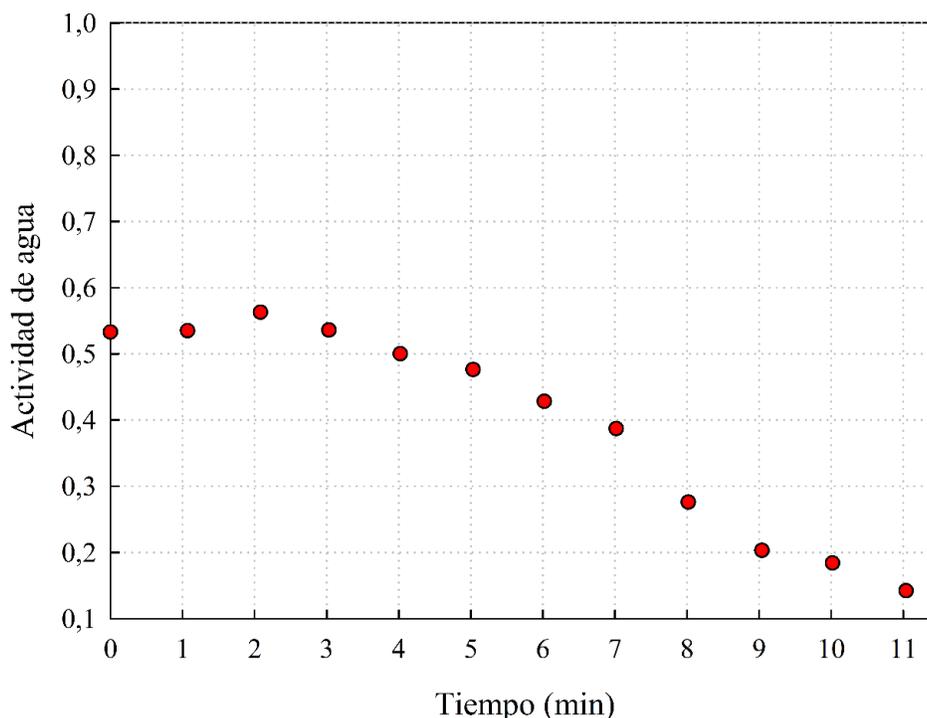


Según Illy y Viani (2005), la mayor parte de la pérdida de masa en la torrefacción corresponde a agua y solo un poco a la liberación de compuestos volátiles y dióxido de carbono. Además, existe agua ligada (*bound water*) en el grano de café, que no se evapora durante el tueste, por lo que el contenido de humedad se estabiliza en aproximadamente 1% b.h. Según los resultados del presente estudio, este fenómeno se puede observar cuando se alcanza un tiempo de ~11 minutos. La velocidad para alcanzar la estabilización está relacionada con la temperatura de torrefacción, donde a mayor temperatura, es menor el tiempo necesario (Zhu et al. 2022). Este fenómeno también fue descrito por Yusibani et al. (2023) para café arábica a tres temperaturas y tiempos desde los 5 a 45

minutos de tueste. El contenido de humedad final alcanzado fue de ~1% b.h. para todos los escenarios de estudio.

En la Figura 18 se observa como la actividad de agua inicial para el café oro corresponde a 0,5334. Este valor es adecuado para evitar el desarrollo de hongos durante el almacenamiento (Puerta Q. 2006). A partir de ahí comienza a descender con el avance del tiempo y nivel tueste, hasta alcanzar un valor final de $0,1417 \pm 0,0035$ en 11 minutos.

Figura 18. Actividad de agua versus tiempo en la torrefacción en café de la variedad *Catuái*.

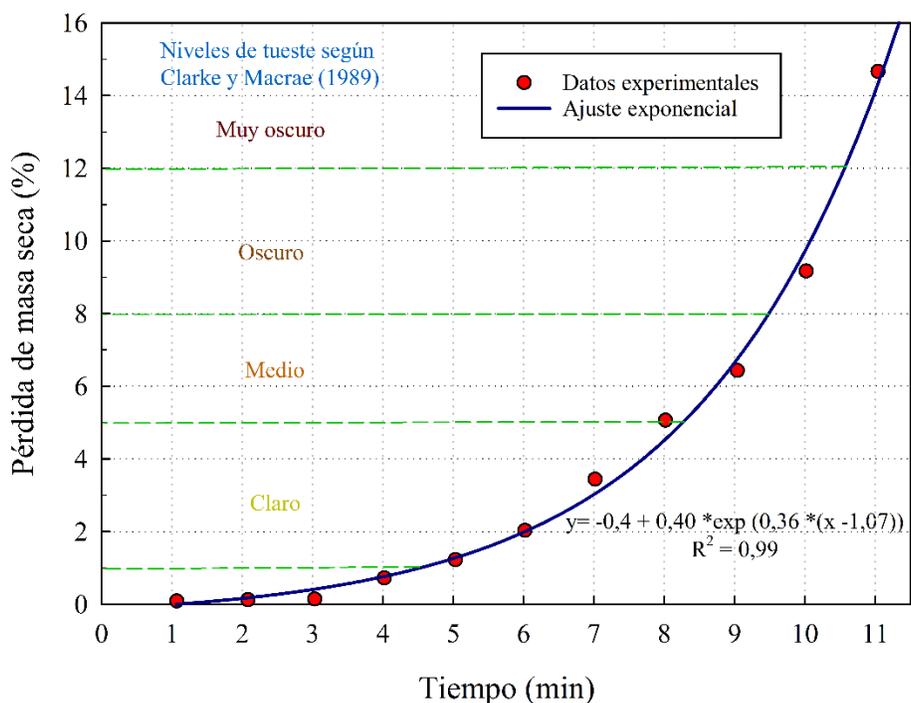


Con el avance del tueste y el aumento de la temperatura interna del tostador, se da una pérdida del contenido humedad en los granos y a su vez una disminución de la actividad del agua. Esto permite prolongar la vida útil del café tostado, al no permitir la proliferación de microorganismos (Illy y Viani 2005). Esta tendencia también fue observada por Odžaković et al. (2019) y Schouten et al. (2021).

La Figura 19 muestra la pérdida de masa seca que ocurre durante el proceso de tueste. La tendencia observada se puede describir mediante una función exponencial. Según los valores reportados por Clarke y Macrae (1989), para niveles de tueste basados en la pérdida de masa seca; de los 5 a los

7 minutos se asocian con un tueste claro, de los 8 a los 9 minutos se asocian a un tueste medio. Finalmente, a los 10 minutos se obtiene un tueste oscuro y a los 11 minutos un tueste muy oscuro.

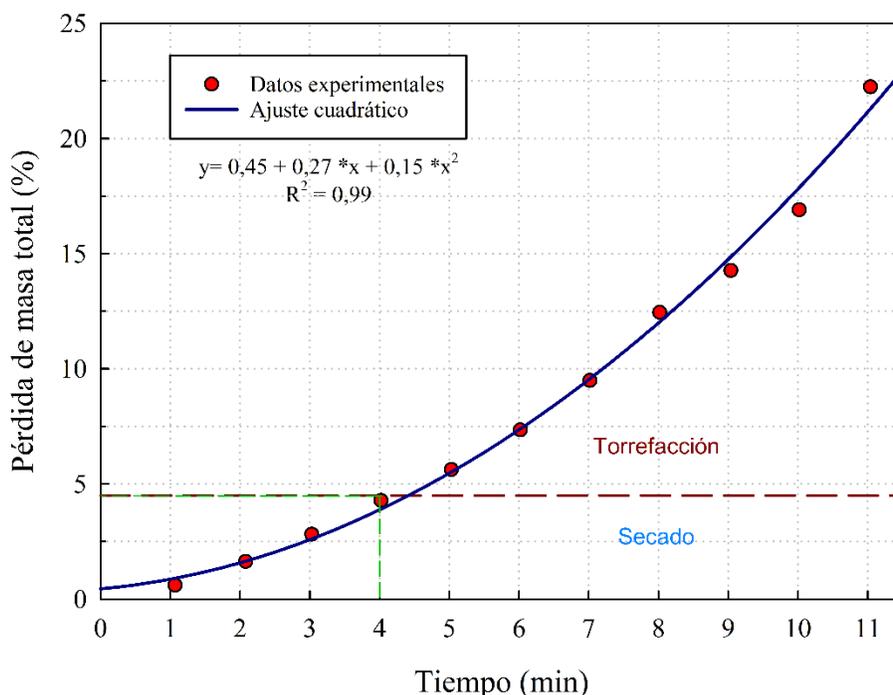
Figura 19. Pérdida de masa seca versus tiempo durante la torrefacción en café de la variedad *Catuaí*.



Como se observa en la Figura 19, la pérdida de masa seca durante los primeros 3 minutos del tueste es muy baja, y a partir del minuto 4, empieza a aumentar, indicando el inicio de las reacciones de torrefacción. Esto es consecuente con lo descrito por Schenker y Rothgeb (2017), los cuales indican que durante los primeros minutos se da la deshidratación; y que la transformación de la materia orgánica en compuestos volátiles ocurre hasta etapas más avanzadas del tueste.

La Figura 20 muestra la pérdida de masa total durante el proceso de torrefacción. La tendencia creciente se puede describir mediante una función cuadrática. Esto concuerda con lo determinado en investigaciones previas (Abarca 2017; Barrantes 2022; Vargas 2014; Schouten et al.2021; Zhu et al. 2022) que demuestran que la pérdida de masa aumenta según el nivel de tueste y el tiempo.

Figura 20. Pérdida de masa total versus tiempo durante la torrefacción en café de la variedad *Catuái*.

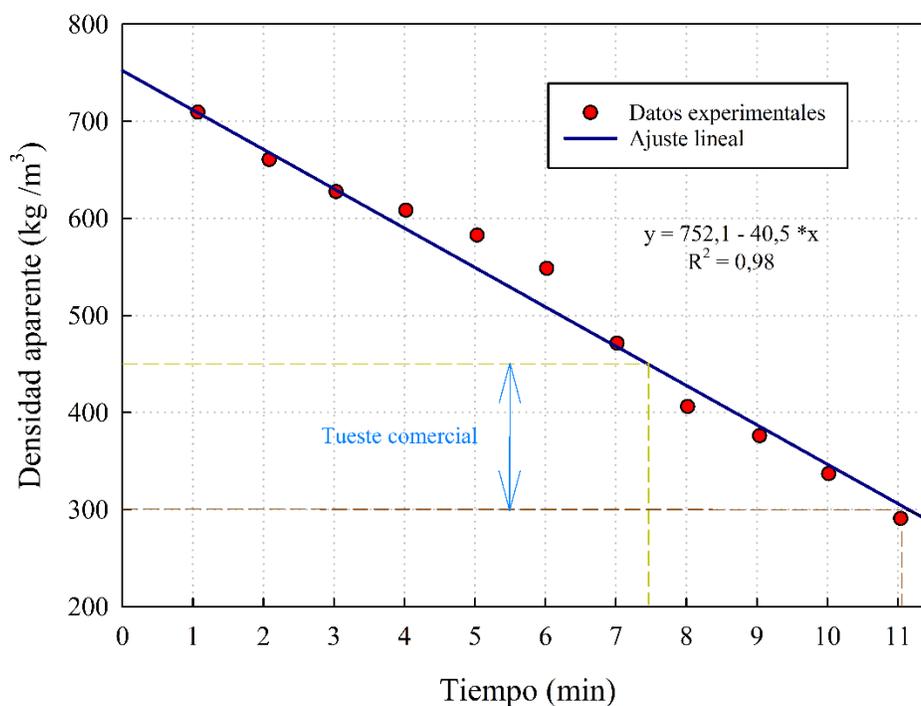


Según Vargas (2014) la pérdida de masa durante la torrefacción se puede dividir en dos etapas. La primera es el secado, donde la pérdida de masa total encuentra por debajo del 4,5 %, el resto se conoce como la etapa de torrefacción, donde se da la transformación de la materia seca de los granos de café. La Figura 20 muestra que la pérdida de masa total de 4,5 % se da a en el minuto 4, y en la Figura 19 se observa que, para este mismo tiempo, se da el inicio de la transformación de materia seca. Esto es consistente con lo planteado por el autor, y permite determinar el momento donde se da la transición de una etapa a otra.

Vargas-Elías (2011) determinó que la tasa de pérdida de masa se ve afectada por la temperatura del tostador, estableciendo que; a mayor temperatura, mayor será la tasa de pérdida de masa total. Además, determino los valores específicos para las pérdidas de masa total asociadas a niveles de tueste, los cuales corresponden a 15,85% para un tueste medio-claro, 17,02 % para un tueste medio, 18,74% para un tueste moderadamente oscuro y 20,58 para un tueste oscuro. Estos valores se presentan entre los 9 (tueste medio claro) y 11 (tueste oscuro) minutos para el presente estudio.

En la Figura 21, se observa una reducción en la densidad aparente con el avance de la torrefacción. Esta se podría aproximar de manera general como una tendencia lineal decreciente con una tasa aproximada de $-40,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ min}^{-1}$. La disminución de la densidad con el aumento en la temperatura y nivel de tueste, fue observado también en otras investigaciones previas (Abarca 2017; Barrantes 2022; Nakilcioğlu-Taş y Ötleş 2019; Odžaković et al. 2019).

Figura 21. Densidad aparente versus tiempo en la torrefacción en café de la variedad *Catuai*.

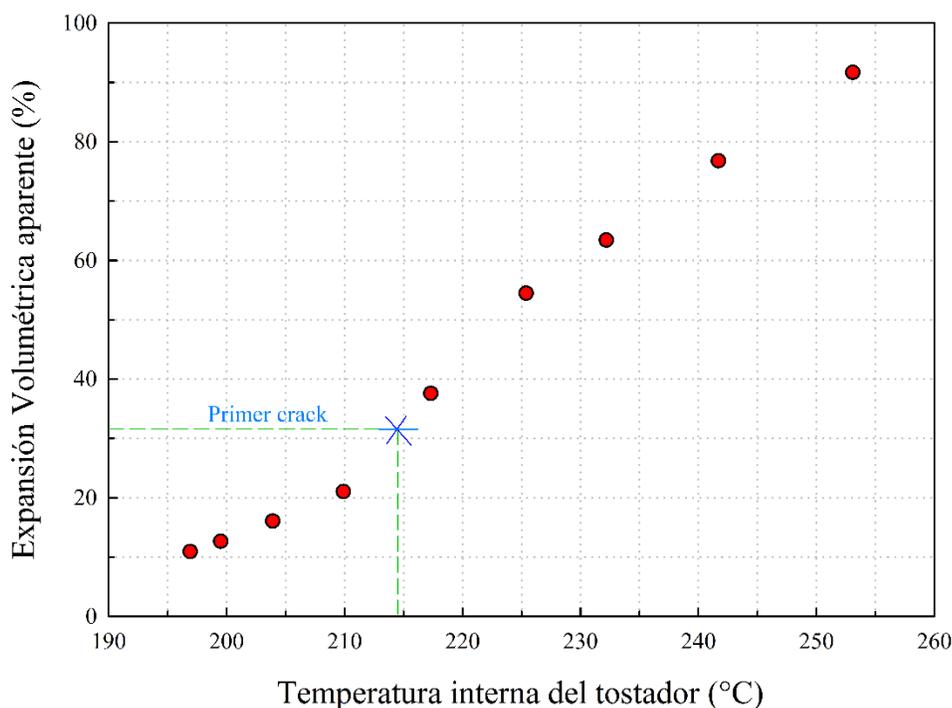


En cafés grano oro, los valores iniciales de densidad aparente van desde 550 hasta 700 kg m^{-3} , y durante la torrefacción la densidad tiende a reducirse aproximadamente a la mitad, hasta llegar a 300-450 kg m^{-3} , dependiendo del nivel de tueste (Illy y Viani 2005). La presente investigación obtuvo al inicio valores de $716,27 \pm 2,38 \text{ kg m}^{-3}$ y al final del proceso de torrefacción de 11 minutos, un valor de $290,62 \pm 1,12, \text{ kg m}^{-3}$.

Los investigadores Abarca (2017) y Nakilcioğlu-Taş y Ötleş (2019), atribuyen la reducción de la densidad aparente a una pérdida de masa y un aumento del volumen de los granos que dependen del tiempo y nivel de tueste. La pérdida de masa total y expansión de los granos observada en esta investigación concuerdan con esta afirmación, como se observa en las Figuras 20 y 22, respectivamente.

La expansión volumétrica ha sido estudiada en investigaciones previas (Abarca 2017; Bustos-Vanegas et al. 2018; Barrantes 2022; Jokanović et al. 2012; Schenker y Rothgeb 2017; Vargas 2014), estas concuerdan con lo observado en la presente investigación. La expansión del grano aumenta con el tiempo, la temperatura y el nivel de tueste. En la Figura 22 se observa la expansión volumétrica aparente en el café con el aumento de la temperatura de torrefacción.

Figura 22. Expansión volumétrica aparente versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuái*.



La expansión de los granos de café no es espontánea, sino que se da a lo largo de todo el proceso, debido a la presión que ejercen los gases, principalmente vapor de agua y dióxido de carbono (CO_2) sobre la pared celular (Schenker y Rothgeb 2017). La fragilidad en la pared del grano es consecuencia del aumento en la temperatura y la pérdida de humedad (Jokanović et al. 2012), lo que provoca una explosión que causa liberación de gases y presión interna mediante el fenómeno conocido como *primer crack*. Esto se produjo a una temperatura del tostador promedio de $\sim 214,5$ °C, coincidiendo con ~ 31 % de expansión volumétrica.

En una investigación realizada por Bustos-Vanegas et al. (2018), se realizaron tuestes de 10 minutos en café de la variedad *Catuái* rojo con 12,9 % b.h. de contenido de humedad, a

temperaturas del tostador de 200 a 280 °C, reportando valores de expansión unitaria de 62 a 87 %, respectivamente. Determinaron que se genera una mayor expansión al usar temperaturas de tueste más altas. Los valores de expansión aparente registrados en la presente investigación se aproximan a los 11 minutos de tueste a 280 °C con un valor de expansión aparente de $91,65 \pm 0,17$ %, utilizando café con un contenido de humedad menor.

La Tabla 5 presenta el análisis de correlación de Pearson entre las diferentes propiedades físicas. Los valores deben variar entre -1 y 1, para una correlación negativa y positiva, respectivamente, entre las dos variables analizadas. Se observa que todas las variables presentan una correlación fuerte con valores superiores a $\pm 0,85$.

Tabla 5. Análisis de la correlación de Pearson para las propiedades físicas del café de la variedad *Catuaí*.

	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]
Contenido humedad [A]	1						
Actividad del agua [B]	0,958	1					
Parámetro color L* [C]	0,966	0,967	1				
Pérdida masa total [D]	-0,951	-0,978	-0,946	1			
Densidad aparente [E]	0,983	0,982	0,965	-0,984	1		
Pérdida masa seca [F]	-0,851	-0,932	-0,871	0,972	-0,922	1	
Expansión aparente [G]	-0,942	-0,985	-0,940	0,991	-0,986	0,965	1

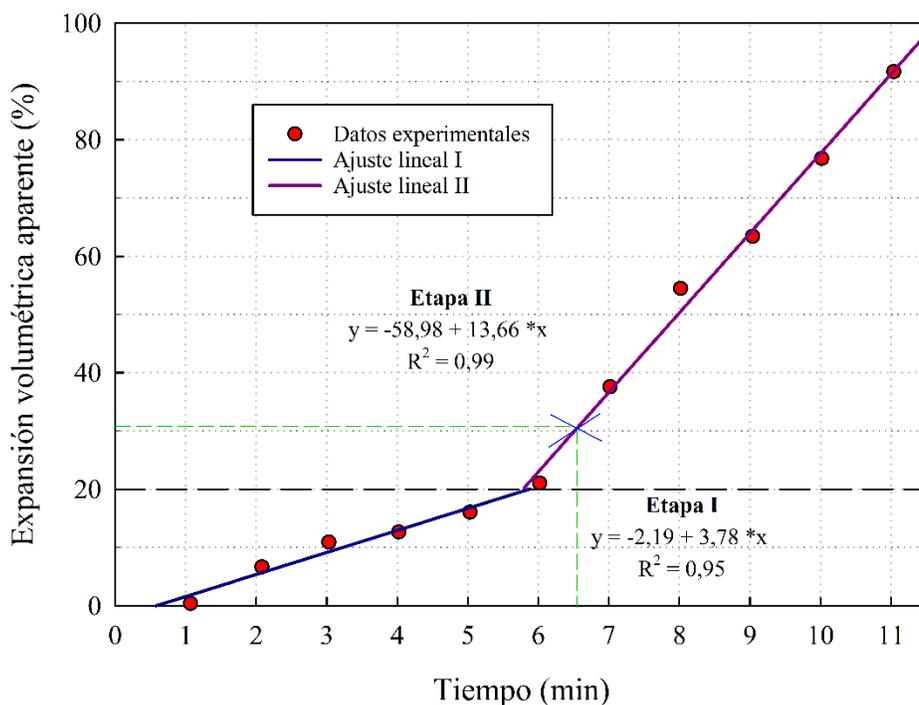
Nota: El tamaño de la muestra n=11. Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue menor a 0,0001.

La expansión volumétrica aparente presenta una correlación negativa con respecto a la actividad de agua, densidad aparente, el contenido de humedad y el parámetro L*. Esto significa que, con la disminución de estos parámetros, la expansión aparente del café aumenta. Además, presenta una correlación positiva con las pérdidas de masa seca y total, ya que, al aumentar las pérdidas de masa, el grano se expande.

La investigación de Bustos-Vanegas et al. (2018), indicó que la expansión de los granos de café es dependiente de la temperatura de torrefacción, esta temperatura va aumentando con el tiempo, y para temperaturas bajas, la expansión era más predominante únicamente en uno de sus ejes, pero a temperaturas altas, la expansión es uniforme en todas direcciones. Este cambio de una expansión

en un solo eje a una isotrópica en todas direcciones aumenta la tasa de expansión del grano, y es consecuente con lo observado a partir del minuto 6 en la Figura 23. Como consecuencia de esta expansión, el grano no soporta la presión y se produce el *primer crack* en ~ 6,5 minutos.

Figura 23. Cinética de expansión volumétrica aparente durante el tueste de café de la variedad *Catuái*.



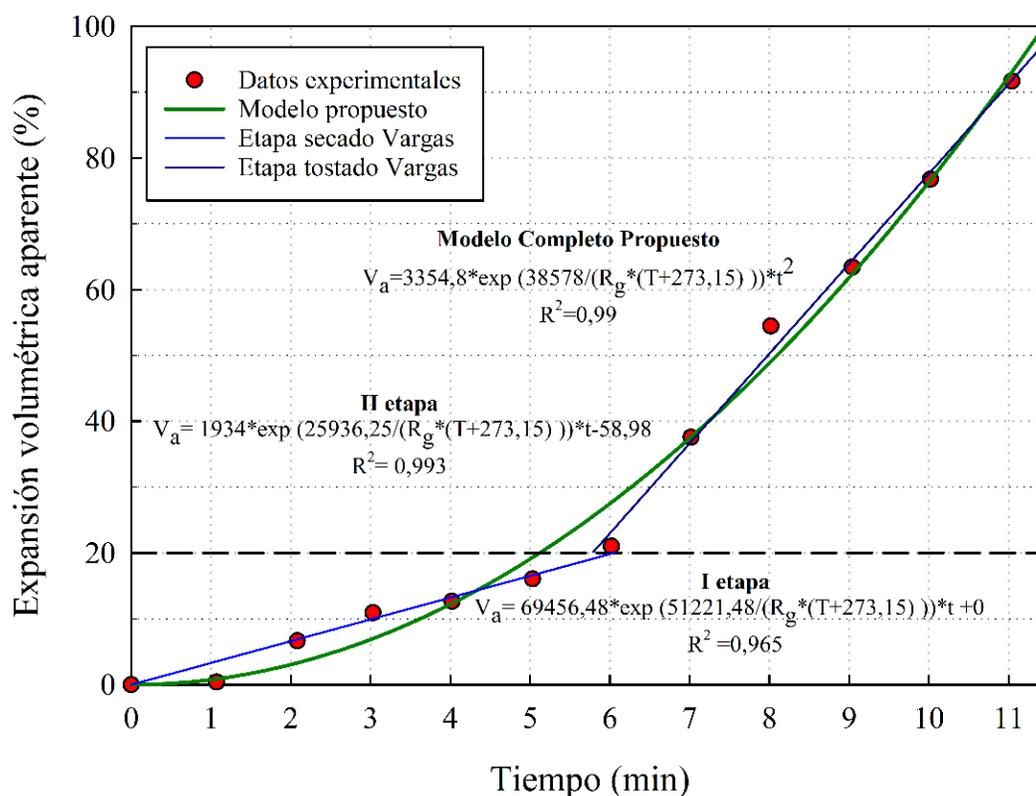
Como se observa en la Figura 23, se realizó un ajuste lineal de los datos de expansión volumétrica dividiendo el proceso en dos etapas con tasas lineales. Se obtuvo tasas de expansión de 3,78 % min^{-1} para la primera etapa, y de 13,66 % min^{-1} , para la segunda. Estos resultados coinciden con la clasificación de Vargas (2014), donde se determinó que al alcanzar el 20 % de expansión volumétrica, las condiciones cambiaban, y que la tasa de expansión lineal durante la etapa I, denominada secado, es más baja que la tasa de expansión durante la etapa II, denominada tostado, con valores de 1,2 hasta 4 % min^{-1} y 7,3 hasta 13,8 % min^{-1} , respectivamente. Estas tasas dependen de la temperatura del tostador donde a temperaturas más altas, la tasa aumenta.

Para describir la cinética de la expansión volumétrica en el café se ajustaron dos modelos matemáticos propuestos por Vargas (2014), uno para cada etapa del proceso. Además, basado en estos modelos, se propuso un nuevo modelo polinomial que permite describir el proceso de manera completa y continua, representado por la ecuación 10.

$$V_a = a * \exp\left(\frac{38578}{R_g * (T_i + 273,15)}\right) * t^2 \quad [10]$$

Donde; T_i : es la temperatura de la interna del tostador ($^{\circ}\text{C}$), a : factor preexponencial (min^{-2}), t : es el tiempo del proceso de torrefacción (min), R_g : constante de gases ($8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$). El coeficiente a está determinado por regresión no lineal. El modelo propuesto en esta investigación, así como los modelos de Vargas (2014), se presentan en la Figura 24.

Figura 24. Modelo propuesto y de Vargas (2014) para describir la cinética de expansión volumétrica del café.



En la Tabla 6 se pueden observar los coeficientes y los parámetros estadísticos utilizados y calculados para cada uno de los modelos que están representados en la Figura 24. El modelo propuesto utilizó un valor promedio de energía de activación entre las dos etapas descritas por Vargas (2014), correspondiente a $38\,578 \text{ J mol}^{-1}$.

Tabla 6. Coeficientes del modelo propuesto y de Vargas (2014) para la cinética de expansión volumétrica aparente del café de la variedad *Catuái*.

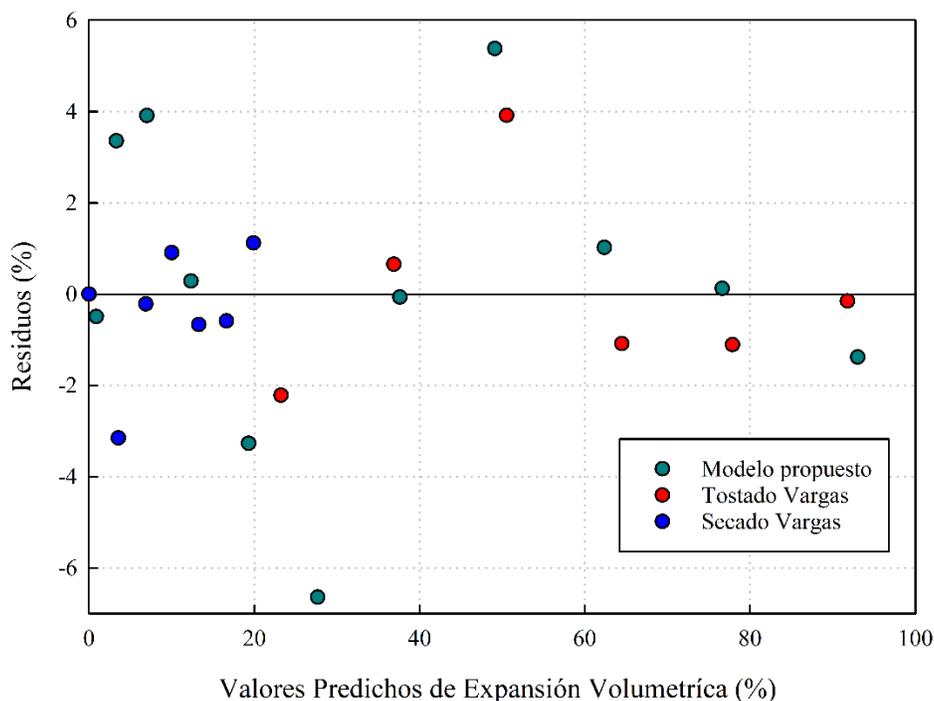
Modelo	K_0 (min^{-1})	a (min^{-2})	c (%)	E_a (J mol^{-1})	T ($^{\circ}\text{C}$)	R^2 (dec)	R^2_{adj} (dec)	ESS (%)
Secado Vargas	69456,48	-	0	51 221,48	345,822	0,965	0,965	1,465
Tostado Vargas	1934,57	-	-58,98	25 936,25	356,608	0,993	0,991	2,404
Propuesto	-	3354,202	-	38 578	280	0,990	0,990	3,213

Nota: dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R^2 : Coeficiente de determinación.

R^2_{adj} : Coeficiente de determinación ajustado.

Los coeficientes de determinación para cada modelo fueron superiores a 0,96 y los errores estándar de estimación se mantuvieron por debajo del 3,22 % en los tres modelos utilizados, indicando así un ajuste preciso de la cinética de la expansión. En la Figura 25 se muestra el análisis de residuos realizado a los tres modelos ajustados.

Figura 25. Análisis de los residuos para el modelo propuesto y de Vargas (2014).

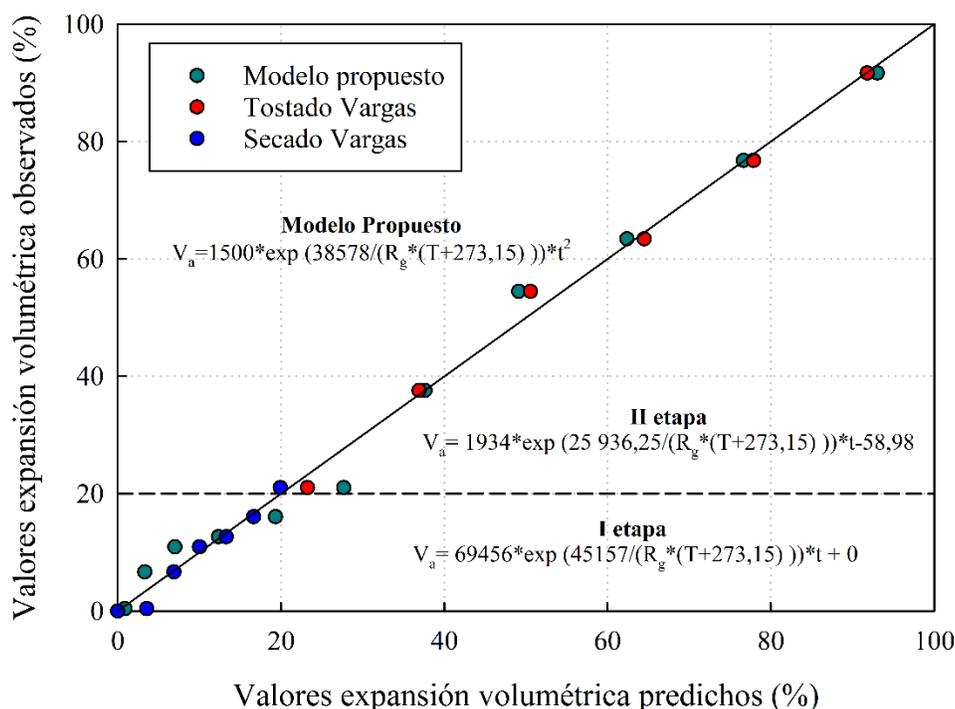


Los tres modelos presentan un ajuste adecuado para la mayoría de los datos y una distribución aleatoria. El error residual es aceptable, con la mayor densidad de valores en el rango de ± 4 %.

Por lo que se determina que tanto el modelo de Vargas (2014), como el propuesto en el presente estudio, son adecuados para representar la expansión volumétrica aparente del café.

En la Figura 26 se muestran los valores predichos versus los observados para los modelos ajustados a la cinética de expansión volumétrica aparente y sus respectivas ecuaciones, donde se aprecia que los tres modelos utilizados generan valores muy cercanos a los observados.

Figura 26. Resultados del análisis de valores observados versus predichos para modelo propuesto y de Vargas (2014).



El modelo propuesto logra describir todo el proceso de expansión utilizando una única ecuación, con valores de coeficiente de determinación superiores a 0,99. Además, este modelo logra una alta precisión utilizando un menor número de variables en comparación con los otros modelos evaluados, lo que lo convierte en una herramienta robusta y eficiente para describir la cinética de la expansión volumétrica aparente durante la torrefacción.

5.2.Efecto de la variedad del grano en la expansión volumétrica aparente

5.2.1.Condiciones de tueste en café de las variedades Geisha y Catuai.

El promedio de la temperatura de entrada al tostador fue $280,5 \pm 0,3$ °C para café *Geisha* y $280,8 \pm 0,4$ °C para café *Catuai*, garantizando así condiciones homogéneas de entrada al proceso de tueste para ambas variedades. En la Tabla 7 se encuentra la información de las temperaturas de entrada.

Tabla 7. Condiciones de tueste para el café de las variedades *Geisha* y *Catuai*.

Muestra	Temperatura (°C)		Tiempo Tueste (min)
	Entrada	Salida	
<i>Variedad Catuai</i>			
T 215	$281,1 \pm 1,0^a$	$215,3 \pm 0,4^b$	$6,5 \pm 0,1^a$
T 220	$281,0 \pm 0,1^a$	$220,7 \pm 0,3^c$	$7,1 \pm 0,1^c$
T 225	$280,4 \pm 0,6^a$	$225,7 \pm 0,4^d$	$7,8 \pm 0,1^e$
T 230	$280,5 \pm 0,6^a$	$230,2 \pm 1,0^e$	$8,4 \pm 0,1^g$
<i>Variedad Geisha</i>			
T 215	$280,7 \pm 0,6^a$	$215,3 \pm 0,8^b$	$6,8 \pm 0,1^b$
T 220	$280,4 \pm 0,4^a$	$220,5 \pm 0,8^c$	$7,4 \pm 0,1^d$
T 225	$280,0 \pm 0,3^a$	$225,7 \pm 0,3^d$	$7,9 \pm 0,1^f$
T 230	$280,7 \pm 0,5^a$	$230,3 \pm 0,9^e$	$8,3 \pm 0,2^h$

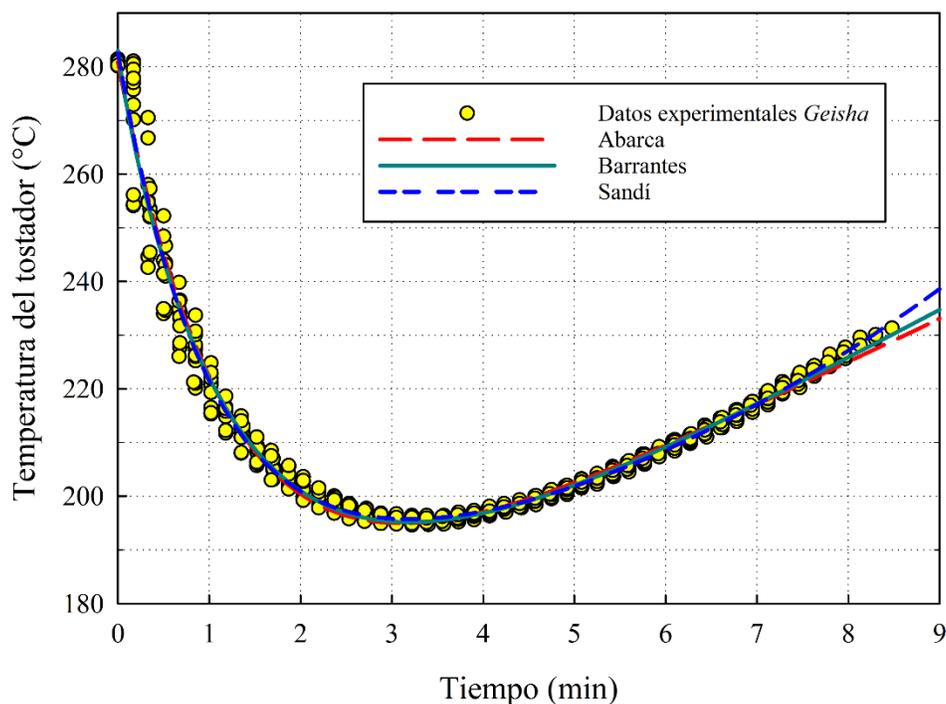
Nota: Valores con letra diferente en la misma columna y tratamiento de tueste presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

Los resultados de la Tabla 7 indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) en las temperaturas de entrada y salida del tostador para los diferentes niveles de tueste en ambas variedades. Los tiempos para alcanzar cada una de las temperaturas de tueste presento diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades. Según la SCA, solo los tuestes de 225 y 230 °C estarían dentro del tiempo recomendado para café de especialidad, cuyo rango se encuentra entre 8 y 12 minutos (SCA 2003).

5.2.2. Café de la variedad Geisha.

Los valores de temperatura interna del tostador generados para los cuatro tuestes realizados en café de la variedad *Geisha* correspondientes a 215, 220, 225 y 230 °C, con sus respectivas repeticiones se muestran en la Figura 27. A estos puntos se ajustaron tres modelos, Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) para describir la temperatura del tostador conforme avanza el tueste.

Figura 27. Ajustes del perfil de temperatura del tostador para café de la variedad *Geisha*.



Los tres modelos ajustados al proceso muestran una tendencia similar, con leves diferencias a partir del minuto 8. La caída observada en la temperatura del tostador en las etapas iniciales de la torrefacción, se deben a la transferencia de calor ocurrida entre el tostador precalentado y la masa de granos a temperatura ambiente (Schenker y Rothgeb 2017). Conforme avanza el tueste, y el grano pierde agua, el gradiente de temperatura en el tostador se estabiliza, mientras que en los granos de café, se pasa de una etapa endotérmica a otra exotérmica (Illy y Viani 2005).

Según Barrantes (2022), el café de la variedad *Catuái*, con un contenido de humedad de 10,95 y 11,03 % b.h., reportó valores de la tasa de calentamiento (b) entre 7,21 y 7,49 °C min⁻¹ con la ecuación de Barrantes y entre 6,42 y 6,53 °C min⁻¹, con la ecuación de Abarca. La Tabla 8 muestra

que la variedad *Geisha* presentó tasas de calentamiento que van de 8,2 a 9,2 °C min⁻¹. A la fecha, no se han encontrado registros en investigaciones previas sobre la tasa de calentamiento durante el tueste del café de la variedad *Geisha*.

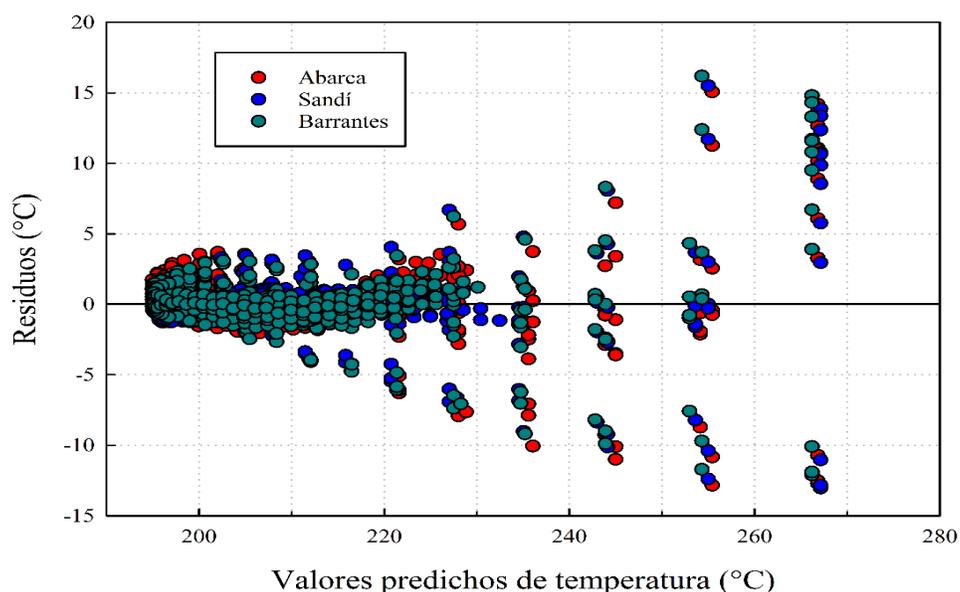
Tabla 8. Coeficientes de la ecuación y los parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café de la variedad *Geisha*.

Modelo	a (adim)	b (°C min ⁻¹)	c (°C)	k (min ⁻¹)	d (°C min ⁻²)	n (adim)	R² (dec)	R²_{adj} (dec)	ESS (%)
Abarca (2017)	121,583	8,198	159,225	0,796	-	-	0,980	0,980	2,688
Barrantes (2022)	131,897	9,252	151,044	0,759	-	0,917	0,981	0,981	2,625
Sandí (2023)	94,629	-	187,824	1,027	0,738	-	0,982	0,982	2,547

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para $p < 0,0001$ en la determinación de los coeficientes.

Los valores reportados en la Tabla 8 obtenidos mediante una regresión no lineal, muestran coeficientes de determinación muy altos, con valores promedio mayores a 0,98, para los tres modelos ajustados. Además, el error estándar de estimación es menor a 2,7 %, lo que determina un ajuste adecuado de los tres modelos para describir la temperatura del tostador durante el tueste. En la Figura 28, se muestra el análisis de residuos realizado para cada uno de los modelos.

Figura 28. Resultados del análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café de la variedad *Geisha*.

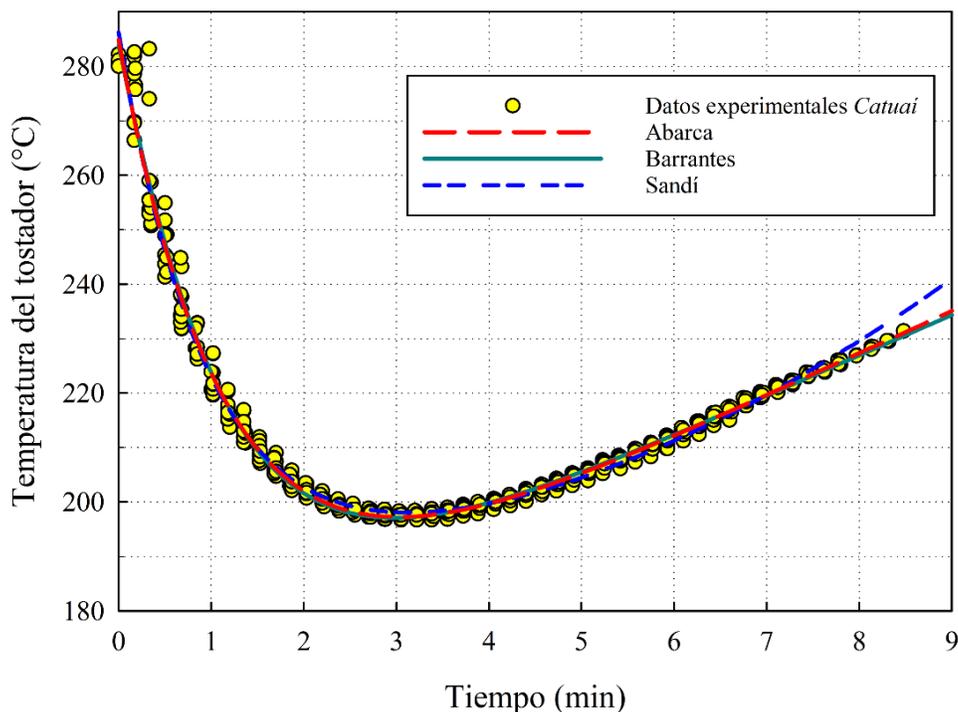


Se observa una tendencia similar en los residuos para los tres modelos de estudio. La mayor densidad de puntos se mantiene entre ± 5 °C de error residual, lo que indica un ajuste adecuado, como indicaban previamente los valores de coeficientes de determinación y error estándar de estimación de la Tabla 8. Los valores más altos de error se reportan entre los 240 y 280 °C. Estos corresponden a los primeros segundos del tueste una vez ingresan los granos fríos al tostador cuando se da un choque térmico.

5.2.3. Café de la variedad *Catuái*.

En la Figura 29 se muestran los valores de temperatura interna del tostador generados para los cuatro tuestes realizados en café de la variedad *Catuái* correspondientes a 215, 220, 225 y 230 °C, con sus respectivas repeticiones. Además, los ajustes de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) para describir la temperatura del tostador.

Figura 29. Ajustes del perfil de temperatura del tostador para café de la variedad *Catuái*.



De la Figura 29 se observa que las curvas resultantes del ajuste de los tres modelos se traslapan durante los primeros 8 minutos aproximadamente. Los modelos representan la caída de

temperatura durante los primeros 3 minutos, correspondiente al intercambio de temperatura entre los granos y el tostador (Schenker y Rothgeb 2017).

En la Tabla 9, la tasa de calentamiento (b) reportada según los modelos de Abarca y Barrantes es de 7,87 y 7,48 °C min⁻¹, respectivamente. La investigación de Barrantes (2022), para un café de la variedad *Catuaí* con beneficiado semiseco con un contenido de humedad de 11,03 ± 0,07 % b.h. y utilizando estos mismos modelos, reportó valores de b de 7,49 °C min⁻¹ con la ecuación de Abarca y 6,53 °C min⁻¹ con la de Barrantes. Las diferencias observadas entre ambas investigaciones pueden estar asociados a la diferencia en el contenido de humedad.

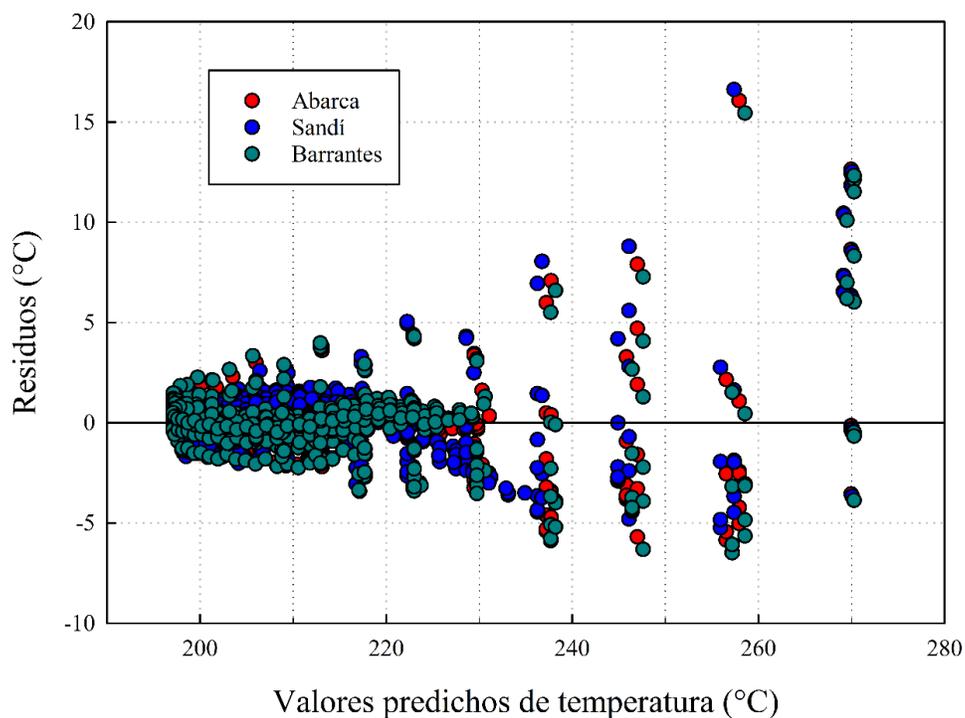
Tabla 9. Coeficientes y parámetros estadísticos de los modelos usados para describir el perfil de temperatura del tostador para café de la variedad *Catuaí*.

Modelo	a (adim)	b (°C min ⁻¹)	c (adim)	k (min ⁻¹)	d (°C min ⁻²)	n (adim)	R ² (dec)	R ² _{adj} (dec)	ESS (%)
Abarca (2017)	120,684	7,876	164,185	0,851	-	-	0,985	0,985	2,335
Barrantes (2022)	116,796	7,484	166,977	0,863	-	1,046	0,986	0,985	2,315
Sandí (2023)	95,491	-	0,010	1,079	0,732	-	0,984	0,984	2,454

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para $p < 0,0001$ en la determinación de los coeficientes.

Para los tres modelos ajustados, los coeficientes de determinación fueron superiores a 0,98 y los errores estándar de estimación menores a 2,5 %. Esto representa un adecuado ajuste de los datos que describen la temperatura interna del tostador durante el proceso de tostado. El análisis de residuos para cada modelo se observa en la Figura 30.

Figura 30. Análisis de los residuos del ajuste de modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en granos de café de la variedad *Catuái*.



La Figura 30 muestra que la mayor densidad de datos se encuentra entre 190 y 230 °C, el error residual varía en ± 5 °C. En el intervalo entre 240 y 280 °C, hay una menor densidad de datos y el error residual aumenta, ya que estas temperaturas corresponden a los primeros segundos del tueste, donde se da el choque térmico entre la temperatura ambiente del grano y el tostador precalentado.

5.2.4. Efecto de la variedad de café en el perfil de temperatura del tostador.

Para describir el proceso de torrefacción y comparar los perfiles de temperatura interna del tostador para las dos variedades estudiadas se utilizó el modelo propuesto por Barrantes (2022). Este modelo presentó valores del coeficiente de determinación de superiores a 0,98 y errores de estimación menores a 2,62 %, para las variedades de café *Catuái* y *Geisha*.

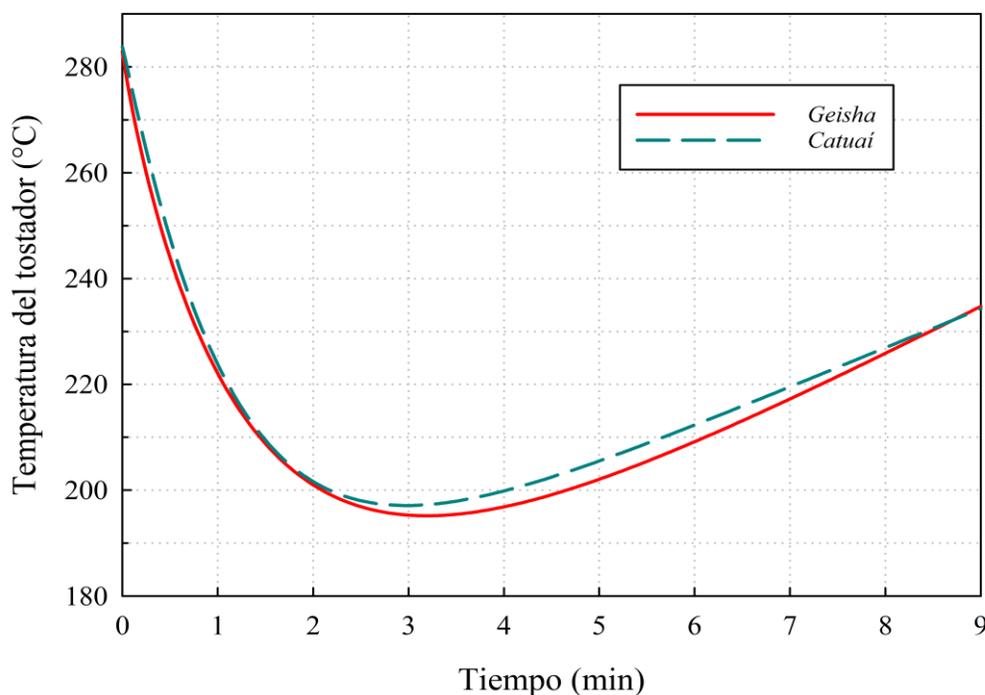
Tabla 10. Coeficientes obtenidos de la ecuación a partir del perfil de temperatura del tostador para ambas variedades de café utilizando el modelo de Barrantes (2022).

Variedad	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	c (°C)	k (min ⁻¹)	n (adim)	R ² (dec)	R ² _{adj} (dec)	ESS (%)
<i>Catuái</i>	116,796	7,484	166,977	0,863	1,046	0,986	0,985	2,315
<i>Geisha</i>	131,897	9,252	151,044	0,759	0,917	0,981	0,981	2,625

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para p<0,0001 en la determinación de los coeficientes.

Al analizar la Tabla 10 se observa que existen diferencias en todos los coeficientes de la ecuación, lo que indica que la variedad puede afectar el perfil de temperatura del tostador. Además, el café *Geisha* tiene una tasa de calentamiento (*b*) más alta que la variedad *Catuái*. Este efecto se puede observar de manera gráfica en la Figura 31.

Figura 31. Perfil de temperatura interna del tostador para las variedades *Geisha* y *Catuái* utilizando el modelo de Barrantes (2022).



La Figura 31 se observa como durante los primeros 2,5 minutos de tueste, los perfiles mantienen una tendencia similar en el enfriamiento del tostador. Sin embargo, después de ese tiempo se observan algunas diferencias. El café *Catuái* alcanza el punto de inflexión en la temperatura antes

que el *Geisha*. Este último presenta una mayor tasa de calentamiento; sin embargo, a los 8 minutos las curvas se intersecan y el final de la torrefacción resulta similar y predecible para ambas variedades.

5.2.5. Propiedades físicas según la variedad de café.

El promedio y la desviación estándar de las propiedades físicas de los granos reportados en la Tabla 11 indican una tendencia decreciente en los valores de actividad de agua, contenido de humedad, color y densidad aparente, conforme aumenta la temperatura de salida del tostador. En contraste, se observa un incremento en la pérdida de masa total, masa seca y expansión volumétrica aparente.

Tabla 11. Propiedades físicas de las variedades de café *Geisha* y *Catuái*.

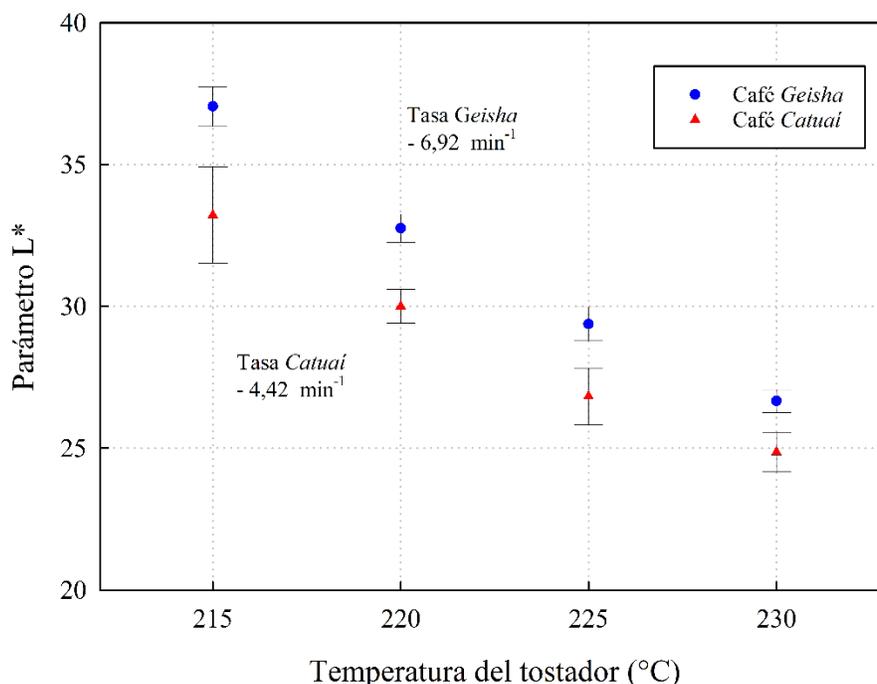
Muestra	Contenido humedad (% b.h.) [‡]	Actividad de agua ^{‡‡}	Pérdida de masa total (%) [‡]	Pérdida masa seca (%) [‡]	Expansión volumétrica aparente (%) [‡]	Densidad aparente (kg m ⁻³) [‡]	Color ^{‡‡}		
							L*	a*	b*
Variedad <i>Geisha</i>									
Oro	9,88 ± 0,08 ^a	0,5459 ± 0,0059 ^a	-	-	-	654,79 ± 1,74 ^a	64,8 ± 1,2 ^a	3,1 ± 0,3 ^a	18,9 ± 0,2 ^a
Tueste 215	3,24 ± 0,09 ^c	0,3016 ± 0,0203 ^c	9,92 ± 0,14 ^a	3,28 ± 0,14 ^a	51,45 ± 0,62 ^a	389,46 ± 2,21 ^c	37,1 ± 0,7 ^c	14,1 ± 0,4 ^b	22,7 ± 1,2 ^c
Tueste 220	2,61 ± 0,13 ^e	0,2849 ± 0,0149 ^e	11,21 ± 0,21 ^c	4,05 ± 0,20 ^b	57,09 ± 0,64 ^c	370,10 ± 2,31 ^e	32,8 ± 0,5 ^e	12,4 ± 0,6 ^d	17,3 ± 1,3 ^e
Tueste 225	1,99 ± 0,13 ^g	0,2443 ± 0,0179 ^g	12,72 ± 0,16 ^e	5,09 ± 0,13 ^c	61,25 ± 0,27 ^e	354,43 ± 1,11 ^g	29,4 ± 0,6 ^g	11,0 ± 0,5 ^e	13,9 ± 0,9 ^g
Tueste 230	1,74 ± 0,09 ⁱ	0,2430 ± 0,0207 ⁱ	13,70 ± 0,27 ^g	5,90 ± 0,23 ^e	62,62 ± 0,93 ^g	347,68 ± 2,68 ⁱ	26,7 ± 0,4 ⁱ	9,9 ± 0,4 ^f	11,8 ± 0,8 ^h
Variedad <i>Catuái</i>									
Oro	10,02 ± 0,10 ^b	0,5260 ± 0,0013 ^b	-	-	-	718,47 ± 1,01 ^b	57,2 ± 1,9 ^b	3,6 ± 1,5 ^a	17,2 ± 1,7 ^b
Tueste 215	4,41 ± 0,16 ^d	0,4341 ± 0,0156 ^d	8,68 ± 0,23 ^b	2,99 ± 0,18 ^a	30,00 ± 0,13 ^b	504,66 ± 1,75 ^d	33,2 ± 1,7 ^d	13,4 ± 0,9 ^c	20,0 ± 2,4 ^d
Tueste 220	3,20 ± 0,14 ^f	0,3650 ± 0,0328 ^f	10,61 ± 0,20 ^d	3,83 ± 0,07 ^b	46,42 ± 0,70 ^d	438,65 ± 2,78 ^f	30,0 ± 0,6 ^f	12,2 ± 0,5 ^d	16,1 ± 1,2 ^f
Tueste 225	2,21 ± 0,10 ^h	0,3223 ± 0,0317 ^h	12,37 ± 0,13 ^f	4,76 ± 0,14 ^d	54,61 ± 0,43 ^f	407,24 ± 1,00 ^h	26,8 ± 1,0 ^h	10,7 ± 1,5 ^e	12,6 ± 2,3 ^g
Tueste 230	1,81 ± 0,10 ⁱ	0,2792 ± 0,0223 ^j	13,64 ± 0,30 ^g	5,75 ± 0,29 ^e	60,77 ± 1,31 ^h	386,32 ± 4,25 ^j	24,9 ± 0,7 ^j	9,5 ± 0,8 ^f	10,2 ± 1,2 ⁱ

Nota: Valores con letra diferente en la misma columna y tratamiento de tueste presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

[‡] Medición en café grano entero. ^{‡‡} Medición en café molido.

Investigaciones previas en diferentes tipos y variedades de café, observaron los cambios de color y el progresivo oscurecimiento de los granos con el aumento del tiempo y nivel de tueste durante la torrefacción (Abarca 2017; Barrantes 2022; Schouten et al. 2021; Vargas-Elías 2011; Zhu et al. 2022). La Figura 32, registra la disminución del parámetro L^* , correspondiente a la luminosidad, para granos de café de dos variedades distintas.

Figura 32. Luminosidad versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuai* y *Geisha*.



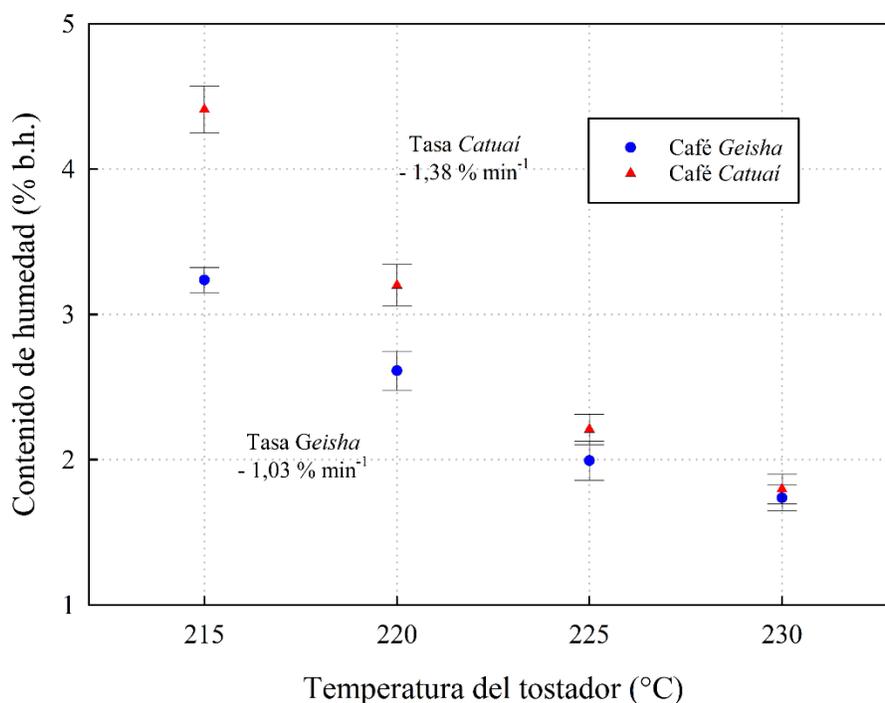
Schenker y Rothgeb (2017), reportan un valor de L^* de 26, para tuestes medios, como dato promedio en cualquier variedad de café. La investigación de Zhu et al. (2022) en café de la especie arábica, establecieron niveles de tueste basados en el parámetro L^* . Según estos rangos, el nivel de tueste para la variedad *Geisha* con una temperatura de salida de 215 °C se clasifica como muy claro, a 220 °C como claro, y para 225 y 230 °C como tuestes medios. Por otra parte, para la variedad *Catuai*, se presentan tuestes claros para 215 y 220 °C, y medios para 225 y 230 °C.

Las condiciones de humedad, masa y proceso de beneficiado fueron las mismas para las dos variedades estudiadas. Se observa una diferencia en las tasas lineales de reducción en L^* . La variedad *Catuai* presenta la menor tasa. De acuerdo con Illy y Viani (2005), el color se ve afectado

por diferentes reacciones químicas que ocurren durante el tueste, como la reacción de Maillard y la caramelización de carbohidratos. El valor de L^* presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades para todas las temperaturas de torrefacción.

La Figura 33 muestra la variación del contenido de humedad (% b.h.) para ambas variedades en estudio. Además, la tendencia es decreciente con el aumento del tiempo y nivel de tueste (Abarca 2017; Barrantes 2022; Schouten et al. 2021, Vargas 2014, Zhou et al. 2022). Se observa que, aunque para los 215 °C existe una diferencia entre ambas variedades en el contenido de humedad, esta diferencia tiende a reducirse a medida que aumenta la temperatura y avanza el tueste, hasta alcanzar un nivel similar a partir de los 225 °C y hasta finalizar el proceso.

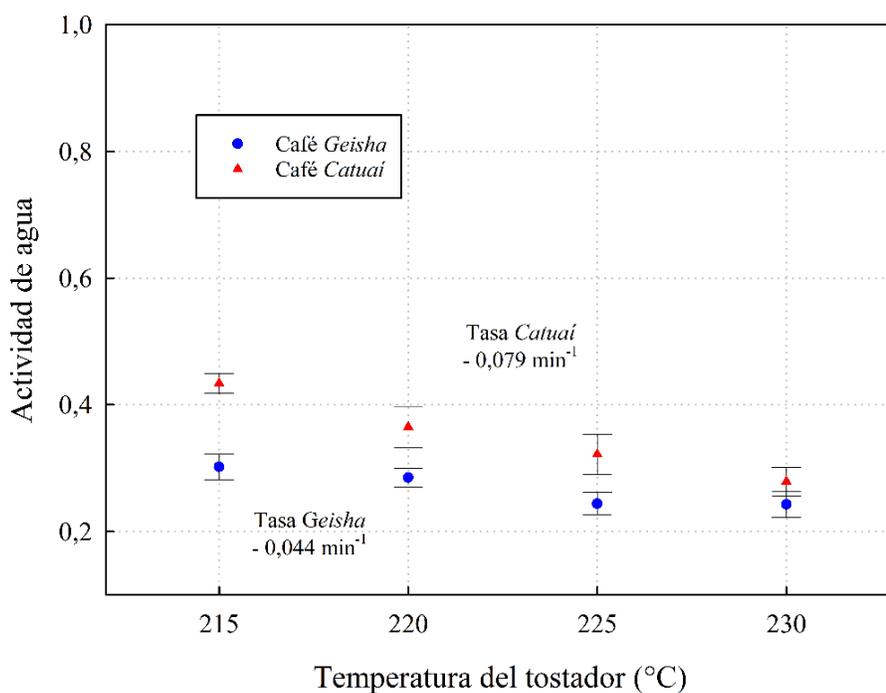
Figura 33. Contenido de humedad versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuai* y *Geisha*.



Se observa como el café *Catuai* ($-1,38 \text{ \% min}^{-1}$) disminuye su contenido de humedad de manera más rápida que la variedad *Geisha* ($-1,03 \text{ \% min}^{-1}$). El contenido de humedad presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades para las temperaturas de 215, 220 y 225 °C. Y no se observan diferencias ($p > 0,05$) para 230 °C.

La Figura 34 presenta la variación en la actividad del agua en granos de dos variedades diferentes, durante el proceso de torrefacción. Esta tendencia decreciente con el aumento del nivel de tueste fue observado anteriormente por Odžaković et al. (2019) y Schouten et al. (2021). Esta variable presenta el mismo comportamiento que el contenido de humedad (Figura 33). Estas dos variables están directamente relacionadas (Illy y Viani 2005).

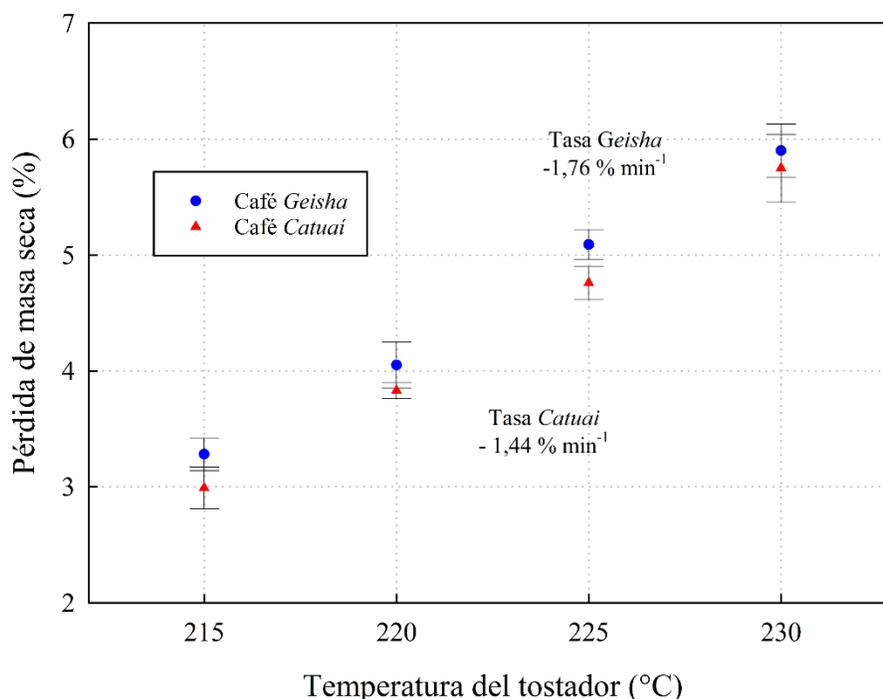
Figura 34. Actividad de agua versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuai* y *Geisha*.



Además, se observa que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades en la actividad de agua para todas las temperaturas de torrefacción. La variedad *Geisha* presenta una tasa de disminución menor que la variedad *Catuai* en la actividad de agua.

La Figura 35 muestra la pérdida de masa seca versus el nivel de tueste. Según lo reportado por Clarke y Macrae (2012), las temperaturas de 215 y 220 °C pertenecen a un tueste claro, y las de 225 y 230 °C corresponden a tueste medio, para ambas variedades.

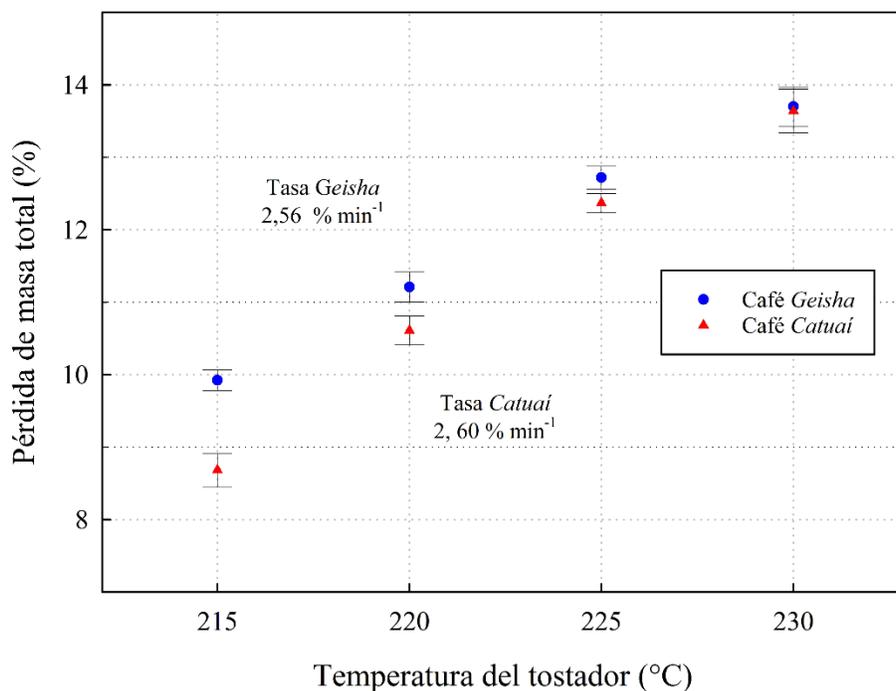
Figura 35. Pérdida de masa seca versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuái* y *Geisha*.



No existen diferencias significativas ($p > 0,05$) en la pérdida de masa seca en ambas variedades para todas las temperaturas de torrefacción de 215, 220 y 230 °C. La única diferencia significativa ($p < 0,05$) se presenta en 225 °C. Se observa una tasa de pérdida de materia seca similar para el café *Catuái* y el *Geisha*. Este resultado podría indicar que las reacciones de pirolisis durante el tueste que son responsables del consumo de la materia orgánica (Illy y Viani 2005; Stefan Schenker y Rothgeb 2017) podrían ser similares para ambas variedades durante la mayoría del proceso de torrefacción.

En la Figura 36 se observa la pérdida de masa total durante el proceso de torrefacción para ambas variedades estudiadas. Si bien no hay mucha información disponible para estas variedades, las dos pertenecen a la especie arábica, por lo que se podría inferir que ambas variedades se comportan similar según se reporta en investigaciones previas en esta especie. Según estas el aumento del tiempo y nivel de tueste producen que la pérdida de masa aumente (Abarca 2017; Barrantes 2022; Vargas 2014; Schouten et al. 2021; Zhu et al. 2022).

Figura 36. Pérdida de masa total versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuaí* y *Geisha*.



En la Figura 36 se observa que, la pérdida de masa total presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades para las temperaturas de 215, 220 y 225 °C. Y no se observan diferencias ($p > 0,05$) para 230 °C. Estas diferencias tienden a reducirse a medida que aumenta la temperatura de salida y avanza la torrefacción, alcanzando un valor similar a partir de los 225 °C. En una investigación previa realizada por Schouten et al. (2021) para dos especies de café (arábica y robusta) se observaron diferencias en la pérdida de masa para todos los niveles de tueste, estas se adjudicaron a diferencias en el contenido de humedad inicial para las dos especies utilizadas.

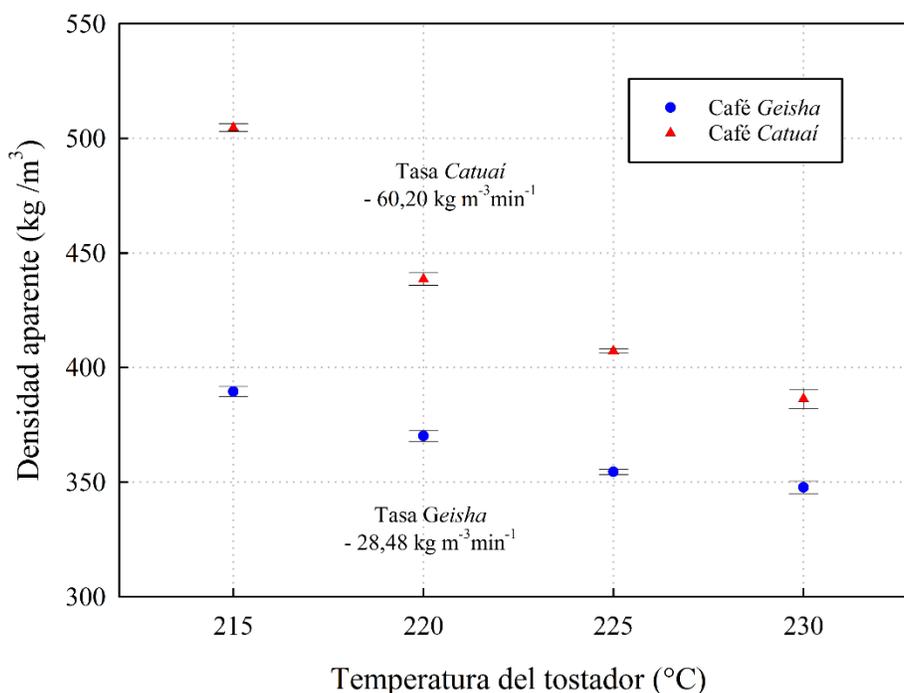
Para esta investigación se descarta tanto el efecto del proceso de beneficiado y de contenido de humedad, ya que ambas variedades tenían iguales tratamientos y condiciones iniciales de humedad. El efecto de la variedad puede asociarse a diferencias en la densidad aparente, con valores iniciales de 654,79 kg m⁻³ para *Geisha* y 718,47 kg m⁻³ para *Catuaí*. Estas diferencias se pueden deber al número de granos, la morfología y la estructura intragranular.

En etapas tempranas del tueste ocurre la mayor pérdida de agua y esta disminuye conforme avanza la torrefacción (Schenker y Rothgeb 2017). La morfología del grano de café *Geisha*, al ser más

grande que el *Catuái* (Velásquez 2019) y tener mayor superficie expuesta al calor, podría favorecer la pérdida de masa en forma de vapor de agua, lo que podría explicar las diferencias en las pérdidas de masa total entre las dos variedades durante los primeros minutos.

La Figura 37 muestra la reducción en la densidad aparente durante el proceso de torrefacción para ambas variedades. El café tostado *Geisha* experimenta una reducción total de 46,9 %, y el *Catuái* de 46,2 %, respecto a su valor inicial. Estos valores están cercanos a 50 %, reportado por otros autores, donde indican la relación entre la reducción en la densidad aparente y el nivel de tueste alcanzado (Illy y Viani 2005).

Figura 37. Densidad aparente versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuái* y *Geisha*.

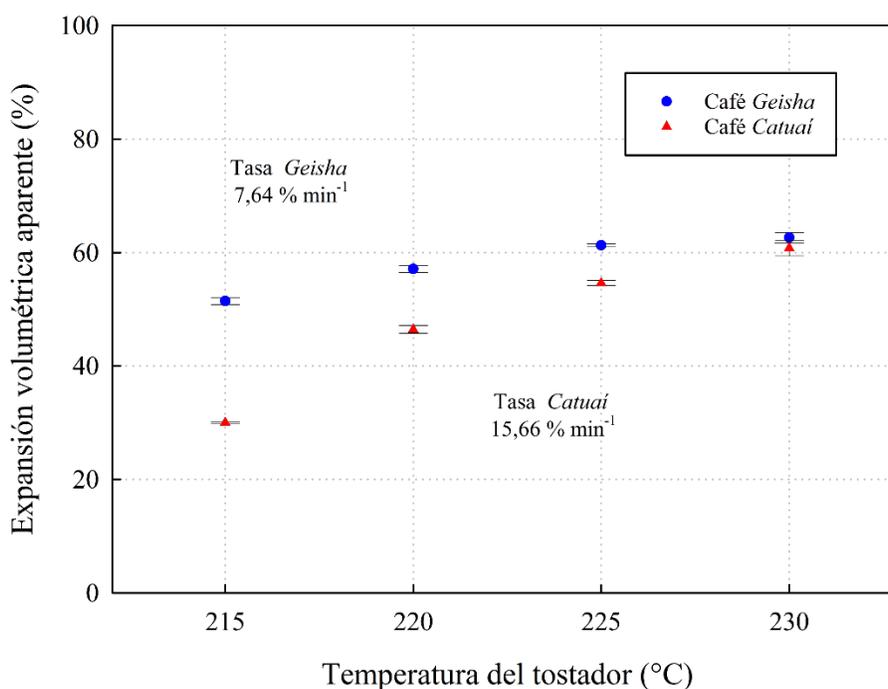


En condiciones similares de tueste y masa inicial, Barrantes (2022) registró una reducción de 51,7 % de la densidad aparente, para café *Catuái*, con una humedad de 11,03 % b.h. La diferencia de 5,5 % con la presente investigación, estaría relacionada con la diferencia en el contenido de humedad inicial entre los granos de café utilizados. El café *Catuái* utilizado en la presente investigación se encontraba a 10,02 % b.h.

El valor densidad aparente presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades para todas las temperaturas de torrefacción. Las diferencias en la tasa de reducción en densidad aparente entre variedades, como muestra la Figura 37, donde la tasa del *Catuái* es mayor, es consistente con la mayor densidad inicial de esta variedad y concuerdan con las menores pérdidas de masa total y expansión volumétrica registradas en esta investigación, según las Figuras 36 y 38, respectivamente.

En la Figura 38 se observa el aumento de la expansión volumétrica del café, con el aumento de la temperatura final y el nivel de tueste. Este fenómeno coincide con lo observado en investigaciones previas (Abarca 2017; Barrantes 2022; Vargas 2014). Para condiciones muy similares de torrefacción, Barrantes (2022) reportó una expansión de hasta un $61,2 \pm 2,4$ % en café *Catuái*, a 230 °C. En la presente investigación se obtuvo $60,8 \pm 1,3$ % para dicha variedad.

Figura 38. Expansión volumétrica aparente versus temperatura interna del tostador para café de la variedad *Catuái* y *Geisha*.



La expansión volumétrica presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambas variedades para todas las temperaturas de torrefacción. De acuerdo a Ganju et al. (2024), el cambio en la porosidad total es mayor entre el inicio (tueste claros) pero disminuye entre estos y los tuestes

oscuros, pasando de un 10-35 %, a un 2-15 %, respectivamente. Esto explicaría lo observado en la Figura 38. Al aumentar el nivel del tueste, las diferencias en la expansión entre las variedades disminuyen.

Durante la torrefacción, la temperatura del grano aumenta, dando inicio de las reacciones responsables de la expansión volumétrica (Illy y Viani 2005). Las diferencias en las tasas de expansión observadas en la Figura 38 entre ambas variedades, estarían relacionadas a la superficie de contacto del grano con el calor. El grano de variedad *Geisha* al ser de mayor tamaño (Velásquez 2019), comenzaría antes las reacciones y por consecuencia, el proceso de expansión. Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar que la variedad del café utilizado tiene efecto en la expansión volumétrica del grano durante la torrefacción.

5.3.Efecto del tipo de beneficiado en la expansión volumétrica aparente

5.3.1.Condiciones de torrefacción según el tipo de beneficiado.

Las condiciones de entrada y salida de la temperatura del tostador, así como el tiempo de torrefacción de granos de café se muestran en la Tabla 12. El promedio de la temperatura de entrada y salida corresponde a $280,8 \pm 0,3$ °C y $225,6 \pm 0,1$ °C, respectivamente. El tiempo promedio de torrefacción fue de $8,1 \pm 0,1$ min.

Tabla 12. Condiciones para torrefacción de café realizado para cada tipo de beneficiado.

Tipo beneficiado	Temperatura (°C)		Tiempo de torrefacción (min)
	Entrada	Salida	
Húmedo	$280,5 \pm 0,2^a$	$225,7 \pm 0,7^b$	$8,1 \pm 0,1^c$
Semiseco	$281,1 \pm 0,5^a$	$225,5 \pm 0,4^b$	$8,0 \pm 0,1^c$
Seco	$280,7 \pm 0,6^a$	$225,7 \pm 0,7^b$	$8,2 \pm 0,1^c$

Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

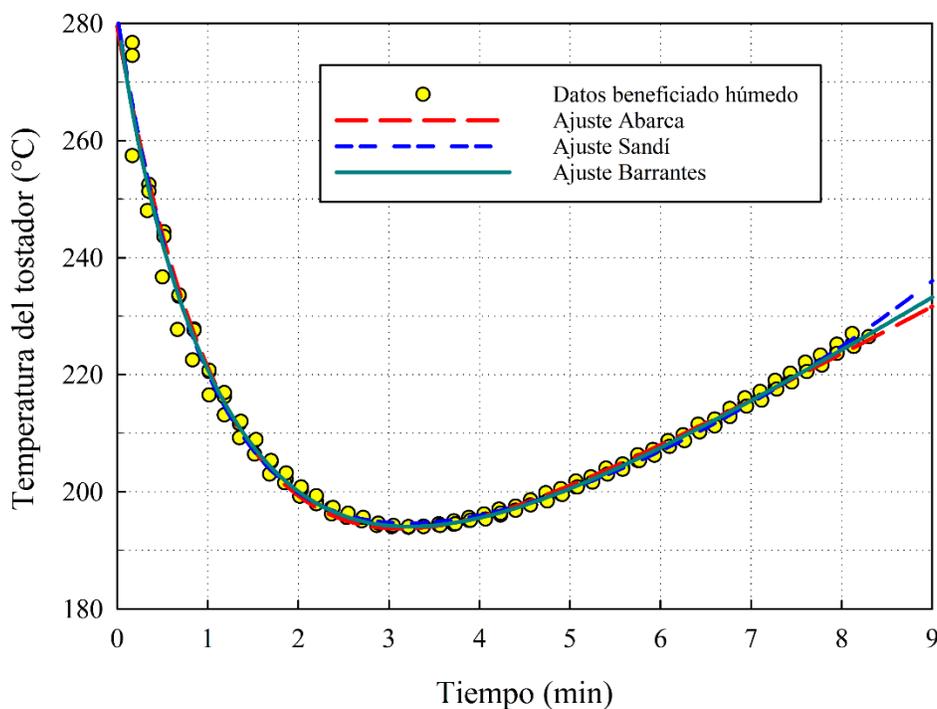
No se reportan diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre las temperaturas de entrada y salida, además de tiempo de torrefacción, para los diferentes tipos de beneficiado. Los

resultados mostrados indican que el proceso de torrefacción se mantuvo constante con base a la temperatura y el tiempo, independientemente del tipo de beneficiado.

5.3.2. Análisis de café procedente de un beneficiado húmedo (café lavado)

La Figura 39 muestra la misma tendencia en los ajustes de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) para el perfil de temperatura del tostador durante la torrefacción, para las tres repeticiones del café procedente de un beneficiado húmedo. La temperatura promedio de entrada al tostador es de $280,5 \pm 0,2$ °C, la temperatura de salida es de $225,7 \pm 0,7$ °C y el contenido de humedad inicial de $10,6 \pm 0,1\%$ b.h.

Figura 39. Ajustes del perfil de temperatura del tostador en granos de café *Catuái* procedentes de un beneficiado húmedo.



La duración del proceso (8,1 minutos) se encuentra dentro del rango recomendado por los estándares de la SCA de 8 a 12 min (SCA 2003). La investigación de Barrantes (2022) reportó tiempos de $9,4 \pm 0,6$ min, para el beneficiado húmedo, con un contenido de humedad de $10,95 \pm 0,25$ % b.h., bajo las mismas condiciones de temperatura, masa inicial y tostador.

Abarca (2017) para una temperatura inicial del tostador de 280 °C y una masa de 600 g, reportó tiempos de torrefacción desde 7,7 hasta 9,9 minutos, para tueste claro y oscuro, respectivamente, para una mezcla de café con beneficio húmedo de la variedad *Catuaí* y *Caturra*. Según el criterio de tiempo y nivel de tueste, el café con tipo de beneficiado húmedo se puede clasificar como un tueste medio.

La Tabla 13 muestra que los tres modelos ajustados para el perfil de temperatura del tostador obtuvieron coeficientes de determinación superiores a 0,98 y errores estándar de estimación inferiores a 2 %. Esto demuestra que los tres modelos permiten describir de manera adecuada el cambio en la temperatura del tostador a lo largo del tiempo.

Tabla 13. Coeficientes y parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café procedente de un proceso de beneficiado húmedo.

Modelo	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	C (°C)	k (min ⁻¹)	n (adim)	R² (dec)	R²_{adj} (dec)	ESS (%)
Abarca (2017)	121,929	8,223	157,572	0,787	-	0,989	0,988	2,005
Barrantes (2022)	135,158	9,469	147,350	0,747	0,892	0,990	0,990	1,859
Sandí (2023)	94,355	0,7160	186,999	1,033	-	0,990	0,990	1,855

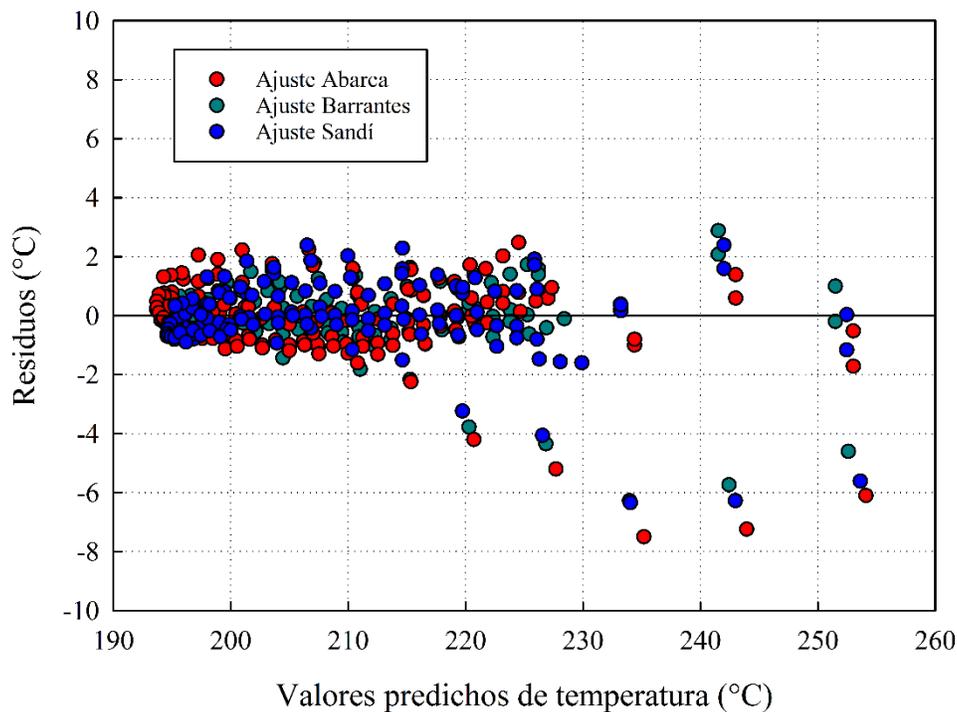
Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación. Valor $p < 0,0001$ en la determinación de coeficientes.

Los modelos de Abarca y Barrantes obtuvieron una tasa de calentamiento (b) entre 8,2 °C min⁻¹ y 9,5 °C min⁻¹ en la fase final de la torrefacción, para un contenido de humedad de 10,58 ± 0,10 % b.h. Barrantes (2022) para café procedente de beneficiado húmedo con un contenido de humedad de 10,95 ± 0,25 % b.h. obtuvo valores de b de 6,5 y 7,2 °C min⁻¹ para la ecuación de Abarca y Barrantes, respectivamente. Estas diferencias se atribuyen a que la muestra de café presentaba un mayor contenido de humedad. El calentamiento lineal de los granos en su etapa final, se considera como la etapa más importante del proceso de torrefacción (Vargas 2014)

El análisis de los residuos para los tres modelos utilizados en café procedente de un beneficiado húmedo se observa en la Figura 40. El intervalo entre los 230 y 260 °C reporta una variación máxima de 8 °C. Este intervalo representa los primeros segundos de torrefacción cuando se inicia

el intercambio de calor entre la temperatura del tostador precalentado que es elevada y los granos a temperatura ambiente, generando un choque térmico difícil de predecir.

Figura 40. Análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café procedente de un proceso de beneficiado húmedo.

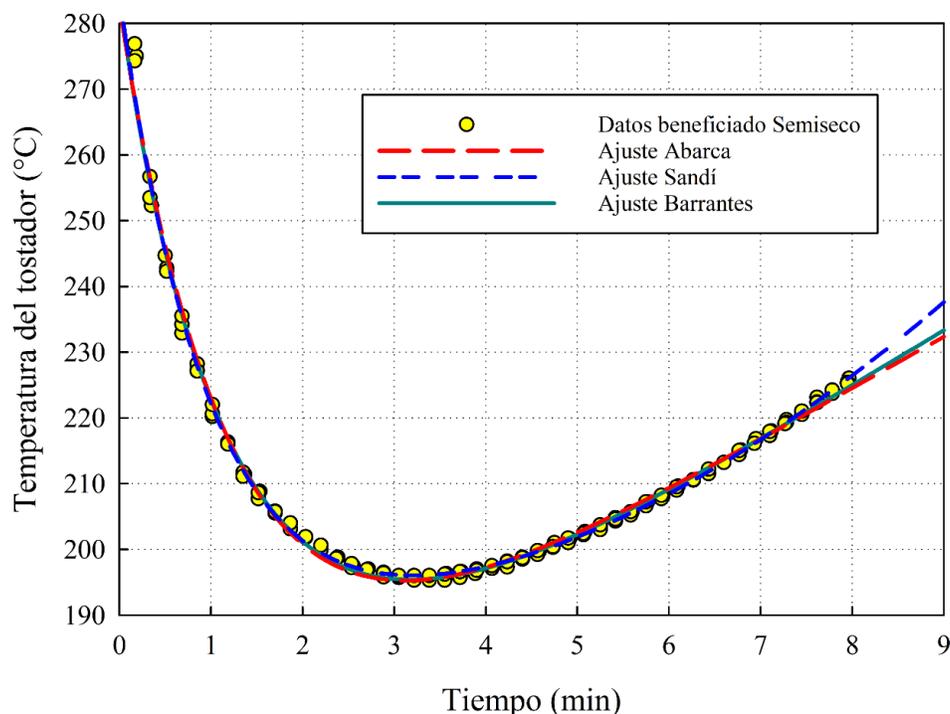


El ajuste de la temperatura para el intervalo entre 190 y 230 °C es preciso. El margen de error corresponde a un rango de ± 2 °C para la mayor densidad de datos. Se puede observar como de los tres modelos ajustados presentan valores residuales cercanos a cero, para la mayor parte del proceso.

5.3.3. Análisis de café procedente de un beneficiado semiseco (café miel)

La temperatura promedio de entrada al tostador fue $281,1 \pm 0,5$ °C, y la de salida $225,5 \pm 0,4$ °C, para un contenido de humedad inicial de $10,0 \pm 0,1\%$ b.h. La Figura 41 muestra los ajustes de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) para el perfil de temperatura del tostador obtenido para las tres repeticiones en café proveniente de un beneficiado semiseco.

Figura 41. Ajustes del perfil de temperatura del tostador en granos de café *Catuái* procedentes de un beneficiado semiseco.



Porras et al. (2019) reportaron tiempos de torrefacción de ~8 minutos para una temperatura de entrada de 325 °C y de 225 °C para salida, en café procedente de un beneficiado semiseco con un contenido de humedad de 10,67 % b.h. El presente estudio con un contenido de humedad de 10 % b.h. y una temperatura del tostador inicial de 280 °C y de salida de 225 °C, registro tiempos de torrefacción similares (8 minutos).

Barrantes (2022) reportó tiempos de 9,2 ± 0,2 min, para beneficiado semiseco con un contenido de humedad de 11,03 ± 0,07 % b.h., con iguales condiciones de temperatura, masa y tostador que el presente estudio. Las diferencias de ~1 minuto en el tiempo de torrefacción se atribuyen a diferencias de 1% b.h. en el contenido de humedad inicial de los granos utilizados en ambas investigaciones. Otro factor que afecta los tiempos de torrefacción es el nivel de llama utilizado en el tostador. La apertura de la válvula de gas puede alterar la altura de la llama y afectar los tiempos de torrefacción hasta un 40 % (Porras et al. 2019).

Las tasas de calentamiento lineal (b) para las ecuaciones de Abarca y Barrantes son 7,9 y 8,6 °C min⁻¹, respectivamente. Barrantes (2022) para café procedente de un beneficiado semiseco, con contenido de humedad mayor en comparación al presente estudio, registró tasas de 6,5 y 7,5 °C min⁻¹, respectivamente. Los coeficientes para cada modelo matemático ajustado al perfil de temperatura se muestran en la Tabla 14.

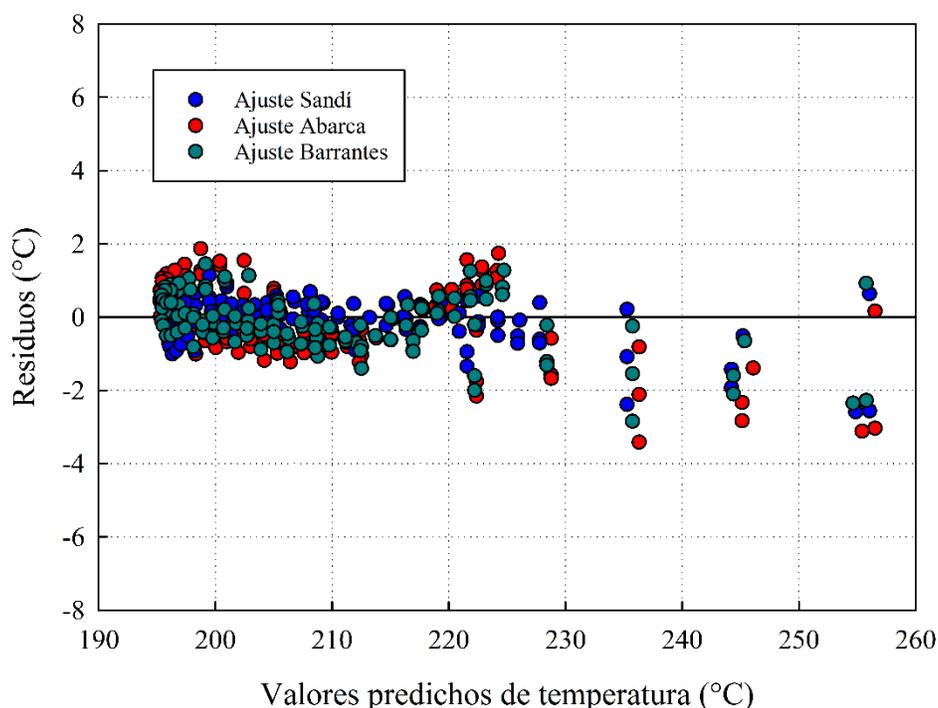
Tabla 14. Coeficientes y parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café procedente de un proceso de beneficiado semiseco.

Modelo	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	C (°C)	k (min ⁻¹)	n (adim)	R² (dec)	R²_{adj} (dec)	ESS (%)
Abarca (2017)	122,109	7,959	160,650	0,810	-	0,994	0,994	1,490
Barrantes (2022)	128,213	8,572	155,962	0,789	0,945	0,994	0,994	1,442
Sandí (2023)	95,997	0,7197	188,377	1,037	-	0,996	0,995	1,283

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para p<0,0001 en la determinación de los coeficientes.

Los datos de la Tabla 14 muestran que los tres modelos utilizados se ajustan de manera adecuada a la temperatura interna del tostador, con base en los coeficientes de determinación mayores a 0,99 y errores estándar de estimación menores a 1,5 %. En la Figura 42 se muestra el análisis de residuos para los tres modelos utilizados. El café procedente de un beneficiado semiseco presenta menores residuos que el café procedente de un beneficiado húmedo y un rango menor de las temperaturas predichas entre 2 y -4 °C.

Figura 42. Análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café procedente de un proceso de beneficiado semiseco.

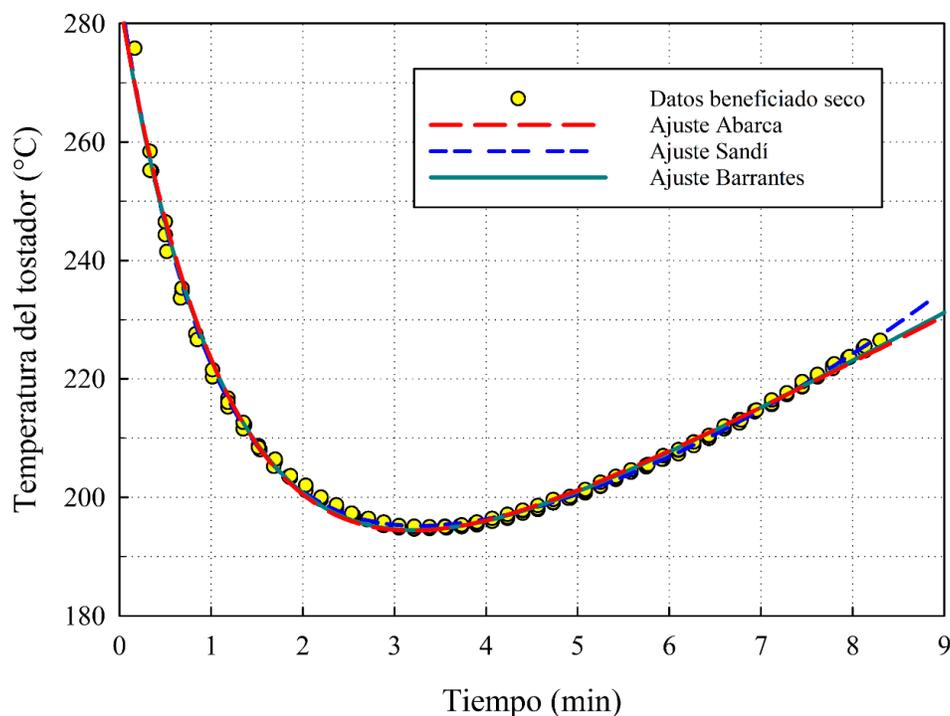


La precisión de los ajustes en la temperatura del tostador depende de la etapa de la torrefacción. Las temperaturas superiores a 230 °C presentan valores en los residuos que tienen una tendencia a aumentar. Esto también fue reportado para café procedente de un beneficiado húmedo. Además, se aprecia como para la mayor densidad de datos, en el intervalo entre 195 y 230 °C, el error disminuye a ± 2 °C.

5.3.4. Análisis de café procedente de un beneficiado seco (café natural)

La temperatura de entrada promedio al tostador fue de $280,7 \pm 0,6$ °C y la de salida de $225,7 \pm 0,7$ °C, para un contenido de humedad inicial de $10,4 \pm 0,1\%$ b.h. Los ajustes de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) para el perfil de temperatura del tostador y las tres repeticiones realizadas se observan en la Figura 43.

Figura 43. Ajustes del perfil de temperatura del tostador en granos de café procedentes de un beneficiado seco.



El tiempo de torrefacción de 8,2 min para un contenido de humedad de $10,37 \pm 0,10$ % b.h. se encuentra dentro del rango recomendado por los estándares de la SCA (2003). Barrantes (2022) reportó tiempos de torrefacción de $10,2 \text{ min} \pm 0,2 \text{ min}$ para café procedente de un beneficiado seco, utilizando condiciones de temperatura, masa y tostador similares, con un contenido de humedad de $12,76 \pm 0,07$ % b.h. Las diferencias de $\sim 2,3$ % b.h. en el contenido humedad reportadas entre ambas investigaciones, corresponden a las mayores discrepancias en los tiempos de torrefacción entre los tipos de beneficiado estudiados, con una diferencia de ~ 2 minutos entre ambos procesos.

Los coeficientes para cada modelo ajustado a la temperatura del tostador se muestran en la Tabla 15. Los coeficientes de determinación son superiores a 0,99 y los errores estándar de estimación menores a 1,9% en los tres modelos utilizados, lo cual representa un ajuste de los datos muy acertado que permite predecir el proceso de torrefacción.

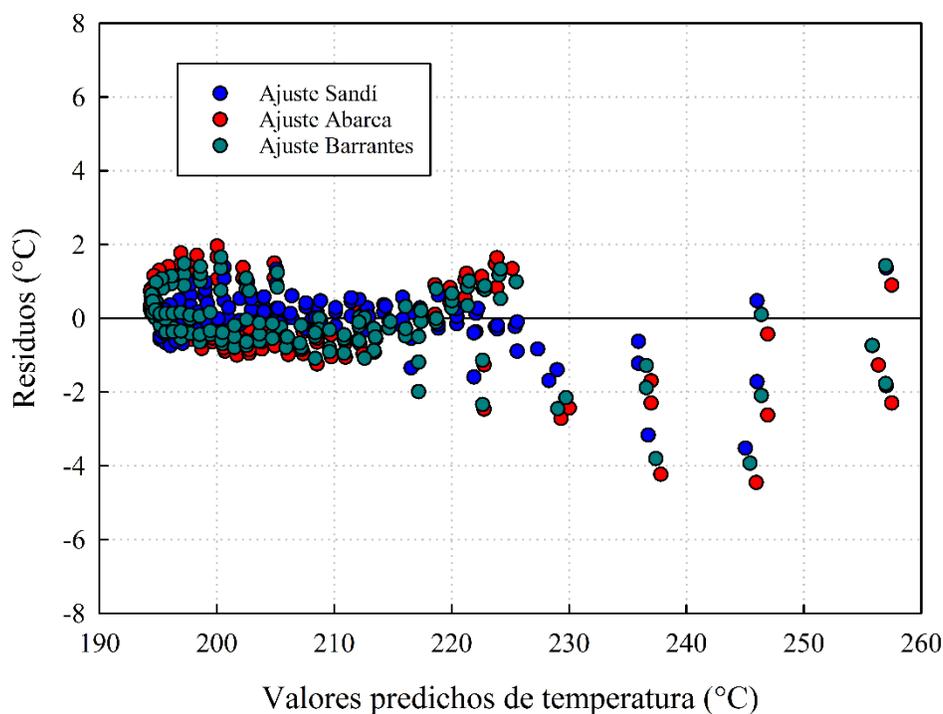
Tabla 15. Coeficientes y parámetros estadísticos para el perfil de temperatura del tostador para café procedente de un beneficiado seco.

Modelo	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	c (°C)	k (min ⁻¹)	n (adim)	R ² (dec)	R ² _{adj} (dec)	ESS (%)
Abarca (2017)	124,616	7,909	159,345	0,798	-	0,991	0,991	1,858
Barrantes (2022)	128,724	8,309	156,233	0,785	0,962	0,991	0,991	1,843
Sandí (2023)	98,142	0,698	187,5081	1,0231	-	0,992	0,992	1,695

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para p<0,0001 en la determinación de los coeficientes.

Para el café procedente de un beneficiado seco, Barrantes (2022) reportó tasas de calentamiento (*b*) de 6,5 °C min⁻¹ para Abarca y 7,4 °C min⁻¹, para Barrantes. Estos valores son menores a los reportados en esta investigación. El análisis de residuos se observa en la Figura 44.

Figura 44. Análisis de los residuos para el ajuste de los modelos de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Sandí (2023) en café procedente de un proceso de beneficiado seco.



El ajuste hecho a temperaturas mayores a 230 °C, correspondiente a los primeros segundos de la torrefacción, pierde exactitud debido al intercambio de temperatura abrupto que fue registrado y a

una caída rápida en la temperatura del tostador. Antes de los 230 °C, los tres modelos presentan ajustes con errores residuales en el rango de ± 2 °C.

5.3.5. Efecto del proceso de beneficiado perfil de temperatura del tostador

Los tres modelos utilizados describen de manera adecuada el perfil de temperatura del tostador para los tres tipos de beneficiado estudiados en esta investigación. Se determinó utilizar el modelo de Barrantes (2022), para describir este proceso y poder comparar los procesos de beneficiados húmedo, seco y semiseco de los cuales se extrajo el grano, ya que este presentó valores del coeficiente de determinación de superiores a 0,99 y errores de estimación menores a 1,86 %. Los coeficientes y parámetros estadísticos se muestran en la Tabla 16.

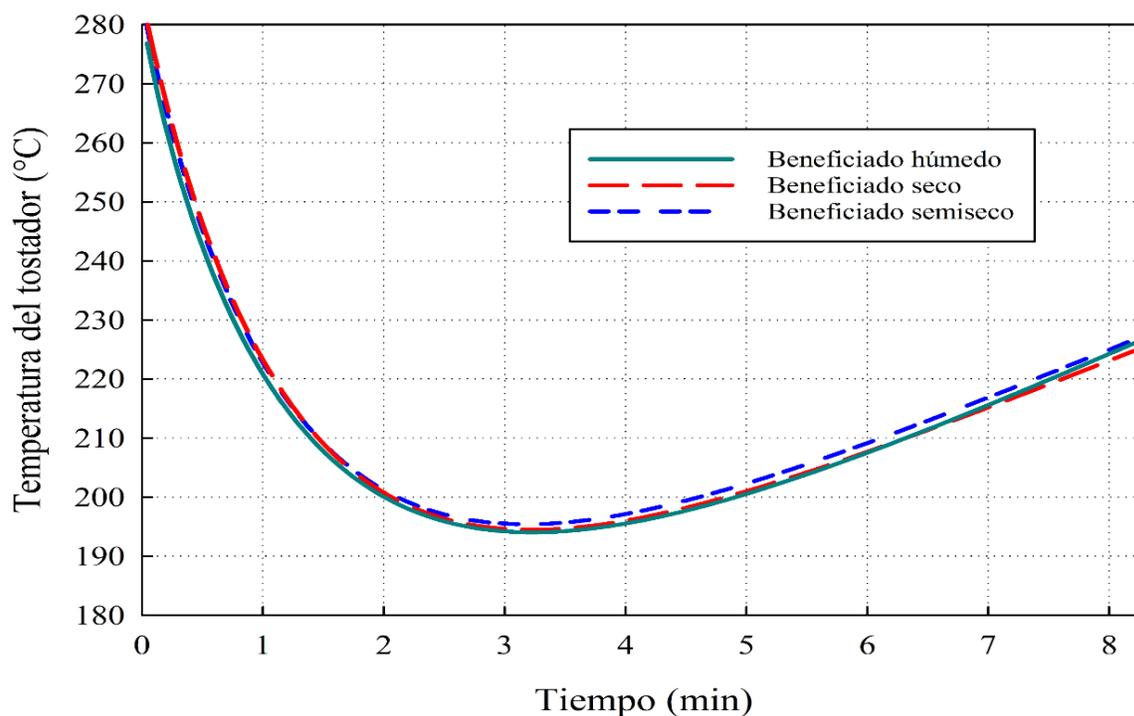
Tabla 16. Coeficientes de la ecuación de Barrantes (2022) para el perfil de temperatura del tostador para cada tipo de beneficiado.

Tipo de beneficiado	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	C (°C)	k (min ⁻¹)	n (adim)	R² (dec)	R²_{adj} (dec)	ESS (%)
Húmedo	135,158	9,469	147,350	0,747	0,892	0,990	0,990	1,859
Semiseco	128,213	8,572	155,962	0,789	0,945	0,994	0,994	1,442
Seco	128,724	8,309	156,233	0,785	0,962	0,991	0,991	1,843

Nota: adim: adimensional. dec: decimal. ESS: error estándar de estimación. R²: Coeficiente de determinación, para p<0,0001 en la determinación de los coeficientes.

Los coeficientes del modelo y los parámetros estadísticos para los tres ajustes son cercanos. Este resultado se obtiene con las mismas condiciones de la llama del tostador, masa inicial, temperatura y el contenido de humedad en las muestras analizadas. Como resultado se observa una tendencia muy similar en los procesos húmedo, seco y semiseco, como muestra la Figura 45.

Figura 45. Ajuste del perfil de temperatura del tostador con el modelo de Barrantes (2022) para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco.



Las similitudes observadas en los tres perfiles a lo largo de todo el proceso de torrefacción muestran que el tipo de beneficiado no tiene efecto en el perfil de temperatura del tostador. Esto podría ser un indicativo de que, a nivel de propiedades físicas, todos los procesos de beneficiado comparten características similares.

5.3.6. Propiedades físicas del café según el tipo de beneficiado.

La Tabla 17 muestra los valores reportados para los parámetros de L^* , a^* y b^* medidos para los tres procesos de beneficiado en café oro y café tostado. Los tres tipos de beneficiado registraron una tendencia similar. Los parámetros L^* y b^* reportaron una disminución y el parámetro a^* un aumento. Lo observado concuerda con lo registrado en otras investigaciones previas en café arábica (Hamzalıoğlu y Gökmen 2020; Porras-Zúñiga et al. 2019; Schouten et al. 2021).

Tabla 17. Parámetros CIE L^*a^*b para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco.

Tipo beneficiado	L^*		a^*		b^*	
	Oro	Tostado	Oro	Tostado	Oro	Tostado
Húmedo	$61,2 \pm 1,6^a$	$29,6 \pm 1,8^a$	$4,0 \pm 0,4^a$	$11,5 \pm 1,0^a$	$20,0 \pm 0,7^a$	$15,4 \pm 1,5^a$
Semiseco	$61,2 \pm 1,0^a$	$27,7 \pm 0,8^b$	$3,0 \pm 0,6^b$	$10,9 \pm 0,7^a$	$18,7 \pm 0,9^b$	$13,6 \pm 1,1^b$
Seco	$62,0 \pm 0,7^a$	$27,2 \pm 1,0^b$	$5,6 \pm 0,3^c$	$10,8 \pm 0,8^a$	$20,4 \pm 0,4^a$	$13,4 \pm 1,6^b$

Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$

Kulapichitr et al. (2022) para café oro variedad *Catimor*, secado mediante diferentes métodos y temperaturas, reportó valores entre 55,2 y 61,1 para L^* , 2,8 y 4,3 para a^* y 11 y 15,3 para b^* . A excepción del parámetro b^* , los valores reportados concuerdan con los obtenidos en esta investigación.

Porras-Zúñiga et al. (2019) determinó en café arábica, variedad *Típica*, que con el aumento de la temperatura de torrefacción el valor del parámetro L^* disminuye. Según la ecuación planteada por estos autores y para una temperatura de 225 °C, se obtiene un valor de L^* de 28,4. Este valor coincide con los obtenidos en esta investigación para la torrefacción realizada a esta misma temperatura.

Los valores de L^* no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los procesos seco y semiseco. Esto concuerda con lo observado en café tostado de manera cualitativa por Abarca (2017) que requirió una diferencia de 1% en la pérdida de masa entre niveles de tueste, para observar diferencias en el color de los granos. La similitud en los valores de L^* obtenidos para los cafés tostados, descarta el efecto del tipo de beneficiado en el oscurecimiento de los granos.

En la Tabla 18 se muestra el contenido de humedad inicial y final para los tres procesos de beneficiado, con valores promedio de $10,35 \pm 0,33$ % b.h. y $1,86 \pm 0,08$ % b.h., respectivamente. Se evidencia una marcada reducción del contenido de humedad durante la torrefacción. Esto ya ha sido estudiado en investigaciones previas (Vargas 2014; Yusibani et al. 2023; Zhu et al. 2022), donde a medida que avanza el tiempo y nivel de tueste, el valor de la humedad disminuye hasta estabilizarse.

Tabla 18. Contenido de humedad en grano entero para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco.

Tipo beneficiado	Contenido humedad (% b.h.)		Reducción de humedad (%)
	Oro	Tostado	
Húmedo	10,58 ± 0,10 ^a	1,85 ± 0,10 ^a	82,55
Semiseco	10,01 ± 0,10 ^b	1,78 ± 0,11 ^a	82,20
Seco	10,37 ± 0,10 ^{ab}	1,94 ± 0,07 ^b	81,35

Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

Utilizando las mismas condiciones para la torrefacción de café, pero distintos contenidos de humedad inicial, entre 10,95 y 12,76 % b.h., Barrantes (2022) obtuvo contenidos de humedad en café tostado de 2,57 %, 2,35 % y 2,58 % b.h., y una reducción en el contenido de humedad de 76,5 %, 78,7 % y 79,8 %, para café con beneficiado húmedo, semiseco y seco, respectivamente. Los porcentajes de reducción de humedad de esta investigación tuvieron un promedio de 82,03% ± 0,6 %.

Los valores de contenido de humedad para los beneficiados húmedo y semiseco no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$), pero sí presentan diferencias con el proceso seco. Los valores de contenido de humedad obtenidos van desde 1,78 hasta 1,94 %. El método utilizado para medir el contenido de humedad en esta investigación permite una tolerancia de ± 0,5% en las mediciones (MAPA 2009). Estas diferencias se encuentran dentro del rango de tolerancia del método, por lo tanto, el tipo de beneficiado no tuvo efecto en el contenido de humedad de los granos tostados. En la Tabla 19 se muestran los datos de la actividad del agua obtenidos para café oro y tostado a 225 °C, según el tipo de beneficiado. Los granos beneficiados mediante los tres procesos presentaron una actividad de agua promedio de 0,55. Este resultado es adecuado para evitar el desarrollo de hongos (Puerta Q. 2006).

Tabla 19. Actividad de agua para café procedente de un proceso de beneficiado húmedo, seco y semiseco.

Tipo beneficiado	Actividad de agua	
	Oro	Tostado
Húmedo	0,5558 ± 0,0043 ^a	0,2007 ± 0,0175 ^a
Semiseco	0,5376 ± 0,0025 ^b	0,1706 ± 0,0138 ^b
Seco	0,5679 ± 0,0060 ^c	0,1980 ± 0,0135 ^a

Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

Durante el secado de café el contenido de humedad disminuye; por ende, la actividad de agua también llegando a valores de 0,6 para contenidos de humedad de 10 % (Puerta Q. 2006). Esto concuerda con los valores reportados en la Tabla 19, que presentan una actividad de agua entre 0,53 y 0,57 para café con contenidos de humedad entre 10 y 10,6 % respectivamente. Los valores de actividad de agua en café tostado para los beneficiados húmedo y seco no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$), pero sí presentan diferencias ($p < 0,05$) con el proceso semiseco.

La investigación de Fiore et al. (2006) mostró que a medida que incrementa el tiempo de torrefacción, la actividad de agua disminuye en café arábica. Los tiempos entre 7-9 minutos obtuvieron valores de actividad de agua entre 0,1 y 0,2. Estos valores coinciden con los resultados de la presente investigación, con un tiempo promedio de 8,1 minutos, la actividad de agua está entre 0,17 y 0,20, para los tres tipos de beneficiado analizados.

En la Tabla 20 se muestran las pérdidas de masa total y seca, registradas por los cafés procedentes de tres procesos de beneficiado. Las pérdidas de masa no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$). Esta investigación reportó valores promedio de 12,58 ± 0,23 % para la pérdida de masa total y 4,33 ± 0,25 % para la masa seca. Según lo observado por Abarca (2017) en granos de la variedad *Caturra* y *Catuái*, para estos valores de pérdida de masa, los tres tipos de café se catalogan con un grado de tueste medio.

Tabla 20. Pérdidas de masa durante la torrefacción para café procedente de un proceso de beneficiado húmedo, seco y semiseco.

Tipo beneficiado	Pérdida de masa (%)	
	Total	Seca
Húmedo	12,65 ± 0,17 ^a	4,13 ± 0,09 ^b
Semiseco	12,36 ± 0,09 ^a	4,34 ± 0,22 ^b
Seco	12,73 ± 0,27 ^a	4,53 ± 0,26 ^b

Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

Barrantes (2022) registró pérdidas de masa total de 15,08 % para beneficiado húmedo, 15,62 % semiseco y 17,51 % para seco. Estos valores son mayores a los obtenidos en la presente investigación. Esto se relaciona con el tiempo de torrefacción, con diferencias de aproximadamente un minuto para café procedente de un beneficiado húmedo y semiseco, y dos minutos para café procedente de un beneficiado seco. La investigación de Tadesse et al. (2016) en café arábica, determino que no existe diferencias en pérdida de masa para beneficiado húmedo y seco.

Vargas-Elías et al. (2016) determinaron que la pérdida de masa en café *Catuái* depende del grado de tueste alcanzado por el grano, y que una diferencia mayor a 0,8 % en la pérdida de masa, generaba diferencias significativas entre los tuestes. Abarca (2017) menciona que se necesitan diferencias mayores a $\pm 0,5$ % en la pérdida de masa entre un nivel de tueste y otro. La máxima variación observada en la pérdida de masa en esta investigación fue menor a 0,4 %. Basado en estos datos, no existe efecto del tipo de beneficiado en la pérdida de masa total y seca del café durante la torrefacción y pueden considerarse con el mismo nivel de tueste.

La densidad aparente medida antes y después de la torrefacción para café procedente de los tres procesos de beneficiado se observa en la Tabla 21. Los valores obtenidos para café verde y tostado, en la presente investigación, están dentro del rango descrito (Illy y Viani 2005) y presentan una disminución máxima en la densidad de 55 %.

Tabla 21. Densidad aparente para café procedente de beneficiado húmedo, seco y semiseco.

Tipo beneficiado	Densidad (kg m ⁻³)	
	Oro	Tostado
Húmedo	681,23 ± 1,03 ^a	376,21 ± 0,94 ^a
Semiseco	682,02 ± 1,06 ^a	383,26 ± 1,45 ^b
Seco	700,07 ± 1,37 ^b	383,22 ± 1,99 ^b

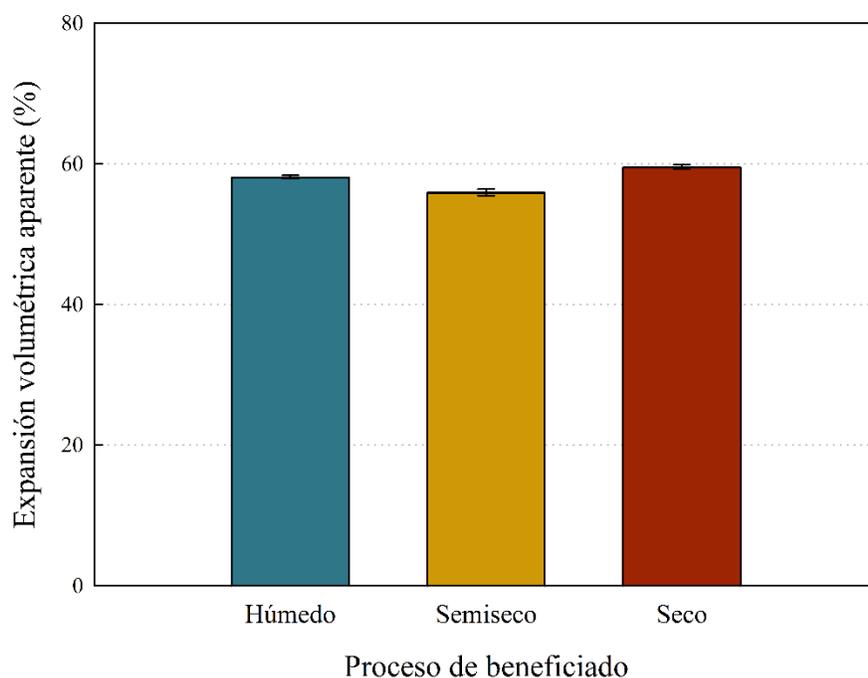
Nota: Valores con letra diferente en la misma columna presentan diferencias significativas con $p < 0,05$.

La disminución de la densidad con el aumento en la temperatura para cada proceso de beneficiado fue descrita por Barrantes (2022), donde bajo condiciones similares de torrefacción, masa utilizada, y tostador, obtuvo valores de $371,5 \pm 13,24 \text{ kg m}^{-3}$ para húmedo, $384,64 \pm 6,38 \text{ kg m}^{-3}$ para semiseco y $382,96 \pm 13,89 \text{ kg m}^{-3}$ para beneficiado seco. Estos valores coinciden con los obtenidos en la presente investigación.

No existen diferencias significativas ($p > 0,05$) en la densidad aparente de café tostado para los procesos semiseco y seco, pero sí existen ($p < 0,05$) con el húmedo, sin embargo, esta diferencia de $\sim 7 \text{ kg m}^{-3}$ es menor a la incertidumbre de medición reportada para café tostado por Vargas-Elías (2011) con $\pm 11,01 \text{ kg m}^{-3}$, Abarca (2017) con $\pm 14,44 \text{ kg m}^{-3}$ y Barrantes (2022) con $\pm 18,03 \text{ kg m}^{-3}$. Por lo tanto, no se puede concluir que el proceso de beneficiado afecta el valor de la densidad final de las muestras analizadas. Esto coincide con lo reportado por Sualeh et al. (2014) para café de la especie arábica con distintos tipo de beneficiado, donde no hubo diferencias significativas en la densidad final.

La Figura 46 muestra la expansión volumétrica aparente que tuvieron los granos de café provenientes de distintos procesos de beneficiado luego del proceso de torrefacción. El grano que presentó mayor porcentaje de expansión volumétrica aparente fue el proveniente del proceso seco, con $59,56 \pm 0,30 \%$, seguido del proceso húmedo con $58,16 \pm 0,22 \%$ y por último el semiseco, con $55,96 \pm 0,47 \%$. La expansión volumétrica presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) para los tres tipos de beneficiado.

Figura 46. Expansión volumétrica aparente durante la torrefacción para café procedente de un beneficiado húmedo, seco y semiseco.



La expansión del grano depende de la temperatura y el grado de tueste (Abarca 2017; Vargas 2014), así como de la masa utilizada (Abarca 2017). El trabajo realizado por Barrantes (2022) y el presente trabajo, fueron realizados utilizando valores muy similares para estos tres parámetros. Las diferencias observadas en ambas investigaciones pueden estar relacionadas con la diferencia en el contenido de humedad de los granos utilizados. Tadesse et al. (2016) en su investigación en café arábica con beneficiado seco y húmedo, no encontró diferencias en la expansión volumétrica.

Barrantes (2022), reportó expansiones volumétricas de $46,55 \pm 1,74$ % para beneficiado seco, $56,78 \pm 2,57$ % en semiseco y $62,13 \pm 6,36$ % para húmedo. Además, indicó que una diferencia de 4 °C en la temperatura del tostador genera diferencias entre los tuestes. Esto generó diferencias en la expansión volumétrica entre tuestes desde $4,44$ % hasta un máximo de $8,07$ %.

Con base en estos resultados y a la diferencia máxima en expansión reportada en esta investigación que fue observada entre el beneficiado seco y el semiseco, con un valor de $3,6$ %, se determina que, aunque con diferencias estadísticamente significativas, para efectos a nivel de tueste, se descarta el efecto del tipo de beneficiado en el nivel de expansión de los granos.

6. CONCLUSIONES

1. La cinética de la expansión volumétrica aparente de los granos con diferentes temperaturas de extracción del proceso de torrefacción, se ajustó adecuadamente a un modelo matemático propuesto en el presente estudio.
2. La expansión volumétrica aparente durante el proceso de torrefacción se vio afectada por la variedad de los granos utilizados en cafés *Geisha* y *Catuaí* rojo.
3. El tipo de beneficiado, seco, semiseco y húmedo no tuvo efecto en la expansión volumétrica aparente de los granos para cafés con el mismo nivel de tueste.
4. La tendencia uniforme en los perfiles de temperatura durante la torrefacción indica que las propiedades físicas de los granos tostados son similares.
5. Los modelos matemáticos propuestos por Abarca, Barrantes y Sandí, se ajustaron adecuadamente a los perfiles de temperatura interna del tostador, con altos coeficientes de determinación y bajos valores del error estándar de estimación.
6. Los granos de café especial utilizados en esta investigación con un nivel de tueste medio se obtuvieron con tiempos entre 7,5 y 8,5 minutos y con temperaturas de extracción de 225 a 230 °C.
7. La pérdida de masa, actividad de agua, nivel de oscurecimiento, densidad aparente y contenido de humedad de los granos tostados, presentaron diferencias por efecto de la variedad de grano utilizado. Sin embargo, para un mismo nivel de tueste, se descartó el efecto del proceso de beneficiado sobre estas propiedades físicas.

7. RECOMENDACIONES

1. El contenido de humedad utilizado en esta investigación fue aproximadamente 10 % b.h. Se debe investigar el efecto de diferentes contenidos de humedad inicial desde 9 hasta 13 % b.h. y medir la influencia en el perfil de temperatura por medio de la variación de los coeficientes de las ecuaciones, así como el desarrollo de las propiedades físicas del café tostado.
2. Estudiar el cambio en las propiedades físicas durante la torrefacción de café utilizando diferentes variedades comerciales de café, y diferentes tipos de beneficiado, incluyendo el beneficiado por fermentación extendida.
3. El efecto de la variedad del grano en el cambio de las propiedades físicas durante el tueste se debe analizar bajo condiciones homogéneas de humedad, y en etapas tempranas de la torrefacción, desde tuestes claros hasta oscuros, donde las diferencias podrían ser más apreciables.
4. Un estudio de la estructura interna, porosidad intragranular y composición química en la pared celular del grano puede explicar las diferentes tasas de expansión observadas en las variedades de café estudiadas en este trabajo.
5. Comparar tres niveles de tueste (claro, medio y oscuro) en cada tipo de beneficiado de café, para verificar si las similitudes en las propiedades físicas observadas en esta investigación se mantienen para otros niveles de tueste.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, Royner. 2017. “Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional”. Licenciatura, Universidad de Costa Rica. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352>.
- Alfaro, Verónica V. 2015. “Efectos de la altitud sobre las características físicas y organolépticas del café de la zona de los Santos”. Licenciatura, Universidad de Costa Rica. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2016/02/tesis-veronica-alfaro.pdf>
- Anastácio, Larissa Marcia, Marliane de Cássia Soares da Silva, Danieli Grancieri Debona, Tomas Gomes Reis Veloso, Thaynara Lorenzoni Entringer, Vilian Borchardt Bullergahn, José Maria Rodrigues da Luz, Aldemar Polonini Moreli, Maria Catarina Megumi, y Lucas Louzada Pereira. 2023. “Relationship between Physical Changes in the Coffee Bean Due to Roasting Profiles and the Sensory Attributes of the Coffee Beverage”. *European Food Research and Technology* 249 (2): 327–39. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04118-4>.
- Baggenstoss, Juerg, Luigi Poisson, Ruth Kaegi, Rainer Perren, y Felix Escher. 2008. “Coffee Roasting and Aroma Formation: Application of Different Time–Temperature Conditions”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56 (14): 5836–46. <https://doi.org/10.1021/jf800327j>.
- Barrantes, Sergio Ignacio. 2022. “Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (*Coffea arabica*)”. Universidad de Costa Rica. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86824>.
- Bolka, Muluken, y Shimelis Emire. 2020. “Effects of coffee roasting technologies on cup quality and bioactive compounds of specialty coffee beans”. *Food Science & Nutrition* 8 (11): 6120–30. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1904>.
- Bustos-Vanegas, Jaime Daniel, Paulo Cesar Corrêa, Márcio Arêdes Martins, Fernanda Machado Machado Baptestini, Renata Cássia Campos, Gabriel Henrique Horta de Oliveira, y Eduardo Henrique Martins Nunes. 2018. “Developing predictive models for determining physical properties of coffee beans during the roasting process”. *Industrial Crops and Products* 112 (febrero):839–45. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.015>.

- CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 2020. “El Geisha se consolida entre las variedades más exitosas en la taza de la excelencia”. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11719>.
- Clarke, R. J., y R Macrae. 1989. *Coffee: Volume 2: Technology*. Elsevier Applied Science.
- Diaferia, Francesco. 2019. “Physical Properties of Coffee Related to the Roasting Process”. Universidade Católica Portuguesa. <https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/31491/1/Final%20Thesis.pdf>.
- Fiore, Anna, Carla Severini, Roberto Romaniello, y Giorgio Peri. 2006. “Study of Physical Properties of Coffee Beans during Roasting. Application of Hyperspectral Image Analysis”. <https://doi.org/10.13140/2.1.1070.4005>.
- Ganju, Eshan, Kunal Chawla, Samuel Yang, y Nikhilesh Chawla. 2024. “Time-resolved roasting-induced microstructural evolution of *Arabica* coffee beans from Brazil, Colombia, and Ethiopia captured using x-ray computed micro-tomography”. *Journal of Food Engineering* 361 (enero):111733. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111733>.
- Gloess, Alexia N., Anita Vietri, Flurin Wieland, Samo Smrke, Barbara Schönbächler, José A. Sánchez López, Sergio Petrozzi, Sandra Bongers, Thomas Kozirowski, y Chahan Yeretian. 2014. “Evidence of different flavour formation dynamics by roasting coffee from different origins: On-line analysis with PTR-ToF-MS”. *International Journal of Mass Spectrometry*, Special issue: Tilmann Märk, 365–366 (mayo):324–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2014.02.010>.
- Gómez, Heilyn. 2018. “Costa Rica es el segundo país de Latinoamérica con más consumidores de café”. *EKA* (blog). el 2 de octubre de 2018. <https://ekaenlinea.com/costa-rica-es-el-segundo-pais-de-latinoamerica-con-mas-consumidores-de-cafe/>.
- ICAFFE. 2023. “Producción de café de la cosecha 22-23 supera en un 14.14% a la producción de la cosecha anterior.” *ICAFFE* (blog). el 12 de abril de 2023. <https://www.icafe.cr/cosecha22-23/>.
- Illy, Andrea, y Rinantonio, Viani. (2005). *Espresso coffee: The science of quality* (2a ed.). Elsevier Academic Press.
- Jokanović, Marija, Natalija Džinić, Cvetković Biljana, Slavica Grujic, y Božana Odžaković. 2012. “Changes of physical properties of coffee beans during roasting”. *Acta Periodica Technologica* 2012 (enero):21–31. <https://doi.org/10.2298/APT1243021J>.

- Krishnan, Sarada. 2014. "Genetic Characterization of Geisha Coffee Final Report". https://www.researchgate.net/publication/265167842_Genetic_Characterization_of_Geisha_Coffee_Final_Report#fullTextFileContent.
- Kulapichitr, Fareeya, Chaleeda Borompichaichartkul, Mingchih Fang, Inthawoot Suppavorasatit, y Keith R. Cadwallader. 2022. "Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans". *Food Chemistry* 366 (enero):130504. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130504>.
- Leme, Dimas Samid, Sabrina Alves da Silva, Bruno Henrique Groenner Barbosa, Flávio Meira Borém, y Rosemary Gualberto Fonseca Alvarenga Pereira. 2019. "Recognition of coffee roasting degree using a computer vision system". *Computers and Electronics in Agriculture* 156 (enero):312–17. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.029>.
- Martinez, Yimara Martinez. 2021. "An Introduction to Water Activity in Green Coffee". *Roast Magazine*, el 23 de junio de 2021. <https://dailycoffeenews.com/2021/06/23/an-introduction-to-water-activity-in-green-coffee/>.
- Mendonça, Juliana C. F., Adriana S. Franca, y Leandro S. Oliveira. 2007. "A comparative evaluation of methodologies for water content determination in green coffee". *LWT - Food Science and Technology* 40 (7): 1300–1303. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.08.013>.
- Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. 2009. *Regras Para Análise De Sementes*. Gov.br. Mapa.
- Münchow, Morten, Jesper Alstrup, Ida Steen, y Davide Giacalone. 2020. "Roasting Conditions and Coffee Flavor: A Multi-Study Empirical Investigation". *Beverages* 6 (2): 29. <https://doi.org/10.3390/beverages6020029>.
- Nakilcioğlu-Taş, Emine, y Semih Ötleş. 2019. "Physical Characterization of Arabica Ground Coffee with Different Roasting Degrees". *Anais Da Academia Brasileira de Ciências* 91 (abril). <https://www.scielo.br/j/aabc/a/F44XMrhpdQtMbjCySbg3pBM/>
- Odžaković, Božana, Dzinic Natalija, Jokanovic Marija, y Slavica Grujic. 2019. "The influence of roasting temperature on the physical properties of Arabica and Robusta coffee". *Acta Periodica Technologica* 50 (enero):172–78. <https://doi.org/10.2298/APT1950172O>.
- Poisson, Luigi, Imre Blank, Andreas Dunkel, y Thomas Hofmann. 2017. "Chapter 12 - The Chemistry of Roasting-Decoding Flavor Formation". *The Craft and Science of Coffee*, Brita Folmer, 273–302. Academic Press.

- Porras, M, G Vargas-Elías, L Araúz-Madrid, y Y Abarca-Alpizar. 2019. “Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café”. *Revista Tecnología en Marcha* 32 (abril). https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4255.
- Pramudita, D., T. Araki, Y. Sagara, y A. H. Tambunan. 2017. “Roasting and Colouring Curves for Coffee Beans with Broad Time-Temperature Variations”. *Food and Bioprocess Technology* 10 (8): 1509–20. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1912-5>.
- Puerta Q., G. I. 2006. “La humedad controlada del grano preserva la calidad del café”. Technical Report 352. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/418>.
- Sandí, Ana María. 2023. “Modelación matemática de la temperatura durante la torrefacción del cacao (*Theobroma cacao* L.) en un tostador cilíndrico con fuente de gas y otro con fuente eléctrica.” Licenciatura, Universidad de Costa Rica. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/89548>.
- Santamaría, Nohely, Félix Meléndez, Patricia Arroyo, Patricia Calvo, Francisco Sánchez, Jesús Lozano, y Ramiro Sánchez. 2023. “Olfactory Evaluation of Geisha Coffee from Panama Using Electronic Nose”. *Chemosensors* 11 (11): 559. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11110559>.
- SCA. 2003. “Protocols & Best Practices”. Specialty Coffee Association. 2003. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>.
- Schenker, Stefan, S. Handschin, B. Frey, R. Perren, y F. Escher. 2000. “Pore Structure of Coffee Beans Affected by Roasting Conditions”. *Journal of Food Science* 65 (3): 452–57. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16026.x>.
- Schenker, Stefan, y Trish Rothgeb. 2017. “Chapter 11 - The Roast—Creating the Beans’ Signature”. En *The Craft and Science of Coffee*, editado por Britta Folmer, 245–71. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00011-6>.
- Schouten, Maria Alessia, Silvia Tappi, Simone Angeloni, Manuela Cortese, Giovanni Caprioli, Sauro Vittori, y Santina Romani. 2021. “Acrylamide formation and antioxidant activity in coffee during roasting – A systematic study”. *Food Chemistry* 343 (mayo):128514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128514>.

- Sualeh, Abrar, Ali Mohammed Ibrahim, y Solomon Endris. 2014. “Processing method, variety and roasting duration effect on physical quality attributes of roasted Arabica coffee beans”, mayo, 53–061. https://www.researchgate.net/profile/Abrar-Sualeh/publication/341787150_Processing_method_variety_and_roasting_duration_effect_on_physical_quality_attributes_of_roasted_Arabica_coffee_beans/links/5ed4982b299bf1c67d321a55/Processing-method-variety-and-roasting-duration-effect-on-physical-quality-attributes-of-roasted-Arabica-coffee-beans.pdf.
- Tadesse, F.T, Jemal Yassin, y Abebe Haile. 2016. “Effect of Green Coffee Processing Methods and Roasting Temperatures on Physical and Cup Quality of Sidama Coffee, Southern Ethiopia”. *Journal of Nutrition Ecology and Food Research* 3 (marzo):55–61. <https://doi.org/10.1166/jnef.2016.1119>.
- Tsiafitsa, Anthi, Vasiliki Oikonomopoulou, Magdalini Krokida, y Nymphodora Papassiopi. 2022. “Effect of heat treatment on physicochemical and sensory properties of selected coffee varieties”. *European Food Research and Technology* 248 (agosto):1–12. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04025-8>.
- Vargas, Guillermo. 2014. “Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação”. Universidade Federal de Viçosa. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75637>.
- Vargas-Elías, Guillermo. 2011. “Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação”. Universidade Federal de Viçosa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3458.3446>.
- Vargas-Elías, Guillermo, Paulo Correa, NATÁLIA SOUZA, Fernanda Baptestini, y Evandro Melo. 2016. “Kinetics of mass loss of arabica coffee during roasting process”. *Engenharia Agrícola* 36 (abril):300–308. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p300-308/2016>.
- Velásquez, Rafael. 2019. *Guía de variedades de café Guatemala*. Segunda edición. Anacafé. <https://www.anacafe.org/uploads/file/9a4f9434577a433aad6c123d321e25f9/Gu%C3%A9nDa-de-variedades-Anacaf%C3%A9.pdf>.
- Vignola, Raffaele, William Watler, Karina Poveda, y Armando Vargas. 2018. “Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en Costa Rica”. MAG. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>.

- Wintgens, J. N. 2004. “Coffee - Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders and Researchers”. En *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*, 2a ed., 1–24. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527619627.ch1>.
- Yusibani, Elin, Ikramullah Ikramullah, Zulkarnain Jalil, Endi Suhendi, y Evi Yufita. 2023. “The Effect of Temperature and Roasting Time on The Physical Properties of Arabica and Robusta Gayo Coffee Bean”. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology* 7 (2): 100–108. <https://doi.org/10.55043/jaast.v7i2.75>.
- Zhu, Mengting, You Long, Yingjie Ma, Yousheng Huang, Yin Wan, Qiang Yu, Jianhua Xie, y Yi Chen. 2022. “Investigation of thermal contaminants in coffee beans induced by roasting: A kinetic modeling approach”. *Food Chemistry* 378 (junio):132063. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132063>.

APÉNDICES

Tabla A.1. Equipos de laboratorio utilizados.

Uso	Equipo
Medición de Masa	Balanza granataria Boeco modelo BPS 51 plus
	Balanza semianalitica marca Optika
Medición de Temperatura tostador	Termómetro infrarojo portátil
	Escáner con termopares EW-92000-00
Torrefacción	Tostador BENDIG modelo EC0-2000
Secado y medición de contenido humedad	Horno de convección IMPERIAL IV
Densidad aparente	Densímetro de caída libre
Color	Colorímetro espectrofotómetro digital de mano
Actividad agua	AQUALAB 4TE
Molido de granos	Molino eléctrico casero

Tabla A.2. Contenidos de humedad por variedad antes y después del secado.

Tipo de beneficiado	Antes (% b.h.)	Después (% b.h.)
<i>Geisha</i>	11,17 ± 0,12	9,88 ± 0,08
<i>Catuaí</i>	10,02 ± 0,10	10,02 ± 0,10
Promedio	10,60 ± 0,61	9,94 ± 0,11

Tabla A.3. Contenidos de humedad por proceso de beneficiado antes y después del secado.

Tipo de beneficiado	Antes (% b.h.)	Después (% b.h.)
Húmedo	11,74 ± 0,04	10,58 ± 0,10
Semiseco	10,54 ± 0,14	10,01 ± 0,08
Seco	10,41 ± 0,11	10,37 ± 0,08
Promedio	10,89 ± 0,73	10,32 ± 0,29

Figura A.1. Diagrama del diseño experimental.

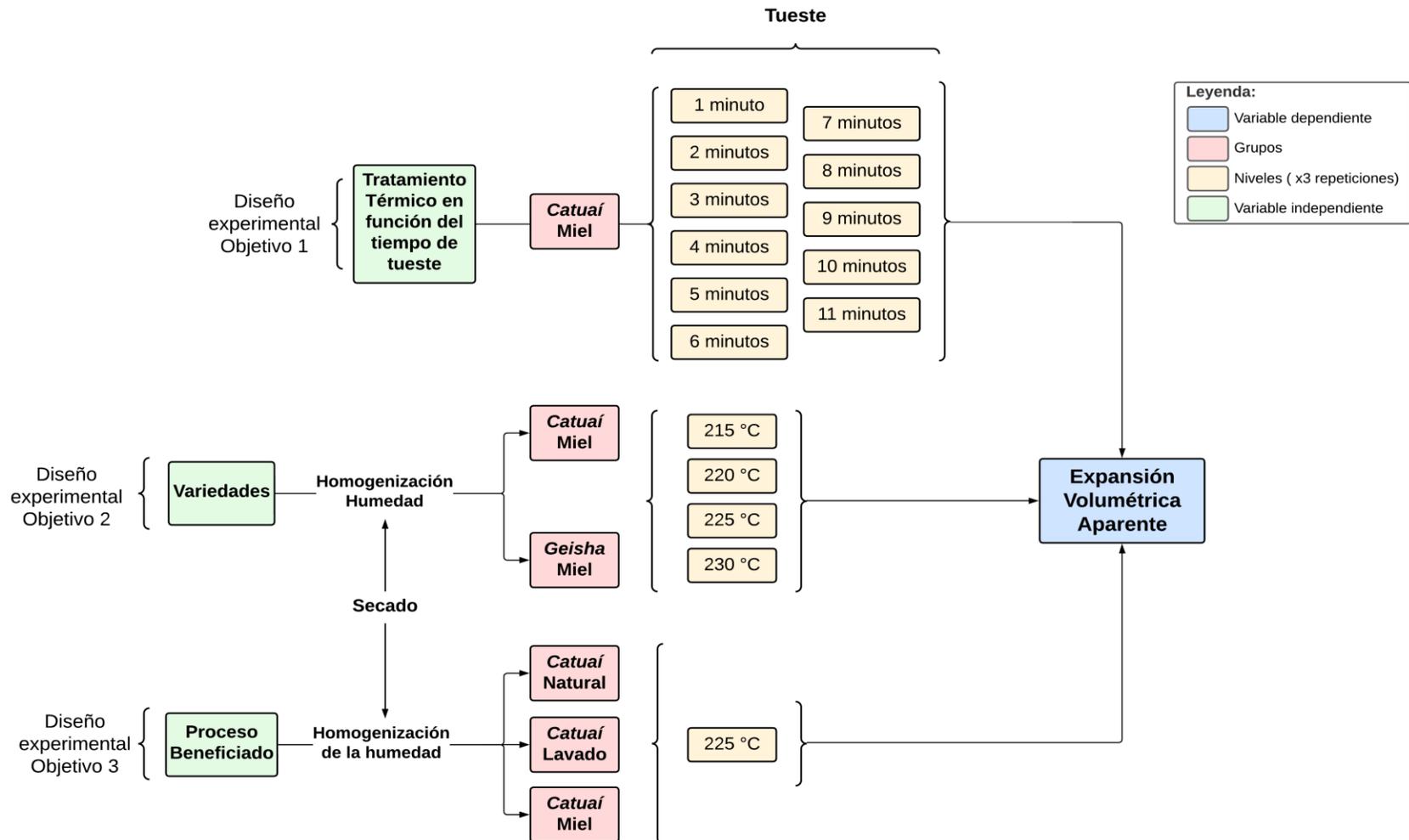


Figura A.2. Metodología utilizada para desarrollo del primer objetivo.

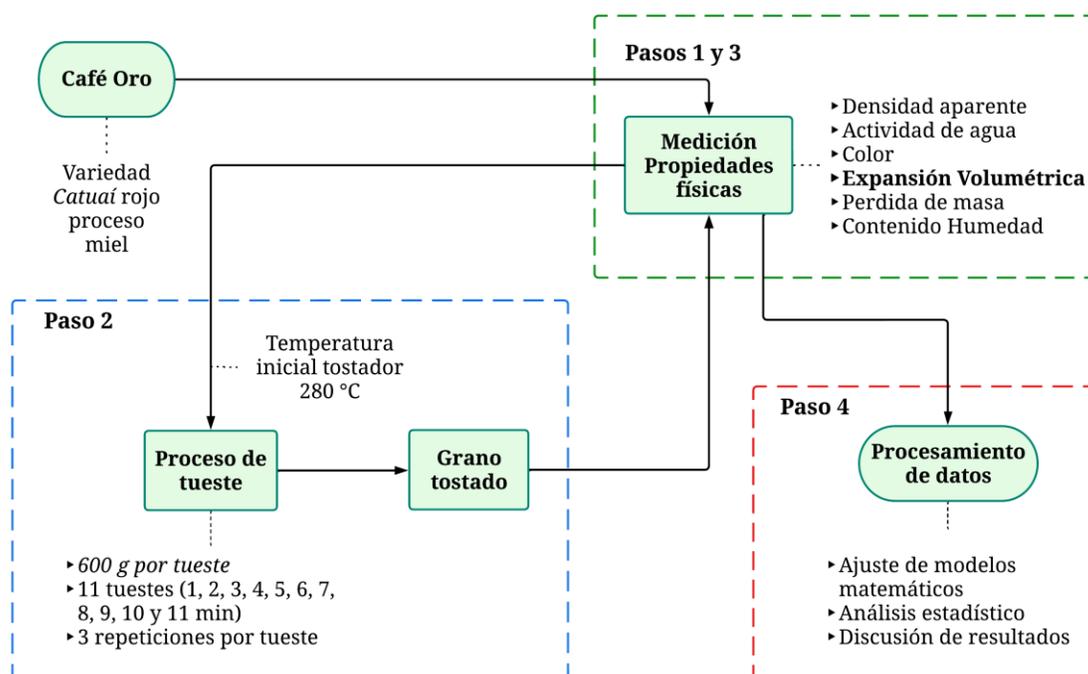


Figura A.3. Metodología utilizada para desarrollo del segundo objetivo.

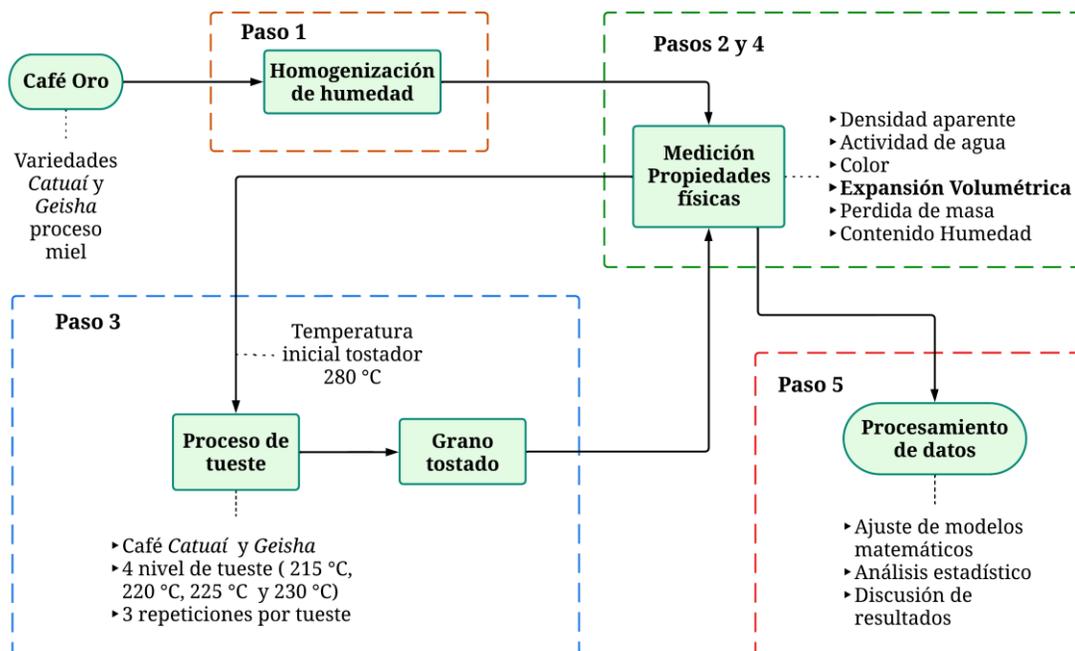


Figura A.4. Metodología utilizada para desarrollo del tercer objetivo.

