



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Efecto del secado solar intermitente en la composición química del café**

## **Intermittent solar drying effect on the chemical composition of coffee**

**Esteban Largo Avila**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía  
Medellín, Colombia

2020

# **Efecto del secado solar intermitente en la composición química del café**

**Esteban Largo Avila, Ing. Agrícola, M.Sc.**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Doctor en Ingeniería – Sistemas Energéticos**

Director:

Ph.D. Héctor José Ciro Velásquez

Codirector:

Ph.D. Farid Chejne Janna

Línea de Investigación:

Sistemas de energía

Grupo de Investigación:

Ingeniería Agrícola (Facultad de Ciencias Agrarias)

Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas TAYEA (Facultad de Minas)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía

Medellín, Colombia

2020

# *Dedicación*

*A Dios en quien radica mi esperanza y confianza. A mi amada esposa Laura Quintero quien me animo siempre a seguir. A mis princesas hermosas Ana Sofia, Susana y Laura Raquel. A mis amados padres Hernando y Yolanda que siempre han sido un soporte emocional en mi vida. A mis amigos Víctor Borda y David Granados por su aliento en esta etapa de la vida.*

# Contenido

Agradecimientos .....	VI
Resumen.....	VII
Abstract .....	VIII
Lista de Tablas .....	IX
Lista de Figuras.....	X
Introducción general.....	XII
I. Capítulo 1. Estado del arte .....	18
1.1. Composición química del grano de café verde .....	18
1.2. Proceso de Beneficio del café .....	20
1.3. Secado solar .....	20
1.4. Secado solar de café .....	21
1.5. Secado mecánico.....	23
1.6. Importancia de la composición química del grano en la calidad sensorial del café .....	25
1.7. Efecto del secado en la composición química y propiedades físicas del café .....	27
1.8. Modelamiento matemático del secado del café .....	31
1.9. Referencias capítulo 1 .....	36
II. Capítulo 2. Efecto del secado en la composición química y calidad sensorial del café variedad Castillo® y Caturra .....	50
Resumen.....	50
Abstract .....	50
2.1. Introducción .....	51
2.2. Materiales y métodos .....	53
2.3. Resultados y discusión .....	57
2.4. Conclusiones .....	63
III. Capítulo 3. Dinámica de la concentración de ácidos grasos y sacarosa del café durante el proceso de secado .....	65
Resumen.....	65
Abstract .....	65
3.1. Introducción .....	66
3.2. Materiales y métodos .....	68
3.3. Resultados y discusión .....	71
3.4. Conclusiones .....	77
IV. Capítulo 4. Estudio de sistema artesanal “Marquesina” para el secado solar en capa fina de granos de café .....	78
Resumen.....	78
Abstract .....	78
4.1. Introducción .....	79
4.2. Descripción estructura artesanal “Marquesina” para el secado solar del café .....	81
4.3. Estudio teórico del secado solar artesanal para granos de café capa fina .....	82
4.4. Modelo para el secado de granos de café en capa fina en marquesina .....	83
4.4.1. Balances de masa .....	84
4.4.2. Balances de energía.....	85

4.4.3.	Condiciones de iniciales y de frontera .....	86
4.5.	Cinética de pérdida de humedad .....	87
4.6.	Material Vegetal.....	90
4.7.	Cuantificación de ácidos grasos saturados e insaturados y sacarosa .....	90
4.8.	Simulación del modelo de partícula para granos de café capa fina .....	91
4.8.1.	Solución del modelo.....	91
4.8.2.	Validación del modelo .....	92
4.9.	Resultados de la simulación.....	92
4.9.1.	Temperatura en la partícula para granos de café capa fina .....	93
4.10.	Comportamiento de los AGS, AGI y sacarosa durante el secado solar en marquesina.....	94
4.11.	Conclusions .....	99
	Referencias capítulos 2, 3 y 4 .....	100
	Anexo A. Análisis estadístico para compuestos químicos y atributos sensoriales. ....	111
	Ácidos grasos .....	111
	Carbohidratos .....	117
	Ácidos clorogénicos .....	118
	Cafeína .....	121
	Atributos sensoriales protocolo SCA.....	122
	Análisis factorial de datos mixtos (AFDM) .....	129
	Anexo B. Registro de variables ambientales y pérdida de peso al interior de la marquesina.....	131

# Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a los profesores Héctor Ciro (Facultad de Ciencias Agrarias) y Farid Chejne (Facultad de Minas), mis asesores de tesis, por su apoyo, dedicación, paciencia y por permitirme el gran honor de trabajar con ellos, al grupo de investigación de Ingeniería Agrícola (Facultad de Ciencias Agrarias) y Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas-TAYEA (Facultad de Minas), y los laboratorios de Procesos Agrícolas y Separaciones Químicas por el apoyo logístico durante la realización del trabajo experimental.

En particular a mis buenos amigos los doctores Víctor Borda y David Granados por su apoyo e importantes discusiones y aportes que enriquecieron este trabajo de investigación. A los magísteres Juliana Henao, Santiago Vélez por su ayuda en las actividades de experimentación en campo y laboratorio.

Al Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías de Colombia (FCTeI-SGR); Proyecto “Antioquia: Origen de cafés especiales”, mediante convenio de asociación 4600000539 con la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín, por financiar esta investigación. Igualmente agradecer a los productores y empleados de la hacienda Santa Isabel (Municipio de Fredonia-departamento de Antioquia) por permitir realizar el trabajo experimental en sus instalaciones, brindando las muestras de café, apoyo logístico y financiero.

# Resumen

La calidad del café evaluada a partir de su composición química, características físicas y organolépticas se ha convertido en un tema de investigación de importancia nacional e internacional para lograr una mejor comercialización del grano de café pergamino. Se realizó un estudio del efecto del secado solar intermitente (intermitencia provocada por el día y la noche) sobre algunos compuestos químicos de interés en la calidad del café. El efecto del secado se correlacionó con atributos sensoriales para la especie *C. arabica* variedades Caturra y Castillo®. En la primera etapa experimental se realizó un diseño factorial por bloques con variables independientes: 6 niveles para el proceso de secado (secado mecánico: 40 ° C y 50 °C con caudal de aire de 60 y 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps; secado con exposición al sol directo y secado solar en marquesina) y 2 niveles para la variedad de café (Caturra y Castillo®). Los experimentos de secado con dos repeticiones se realizaron en 3 fincas del departamento de Antioquia. En la segunda etapa experimental se construyó una marquesina para realizar el secado solar de café variedad Castillo® con recomendaciones técnicas del Comité de Cafeteros de Antioquia. Las variables como temperatura, humedad relativa y radiación solar dentro de la Marquesina se registraron con un Datalogger. Las curvas de pérdida de peso del café durante el secado solar y mecánico se construyeron bajo el método Gravimet (Cenicafé). La concentración de varios ácidos grasos y sacarosa se midió con técnicas de HPLC y GC-MS, y se concluyó que el tiempo de secado al sol afecta la evolución de estos compuestos. En este sentido, los procesos de secado al sol durante un período de tiempo más prolongado, como los de los sistemas artesanales (marquesina) condicionados por las condiciones climáticas y sometidos a la energía solar, hacen que los ácidos grasos y la sacarosa en los granos de café disminuyan de manera más significativa.

En este estudio, se desarrolló un modelo matemático 1D para predecir la evolución temporal de la pérdida de humedad durante el secado solar, y se validó con éxito con datos experimentales.

**Palabras claves:** Secado solar, marquesina, café, cinética, composición química, modelamiento.

# Intermittent solar drying effect on the chemical composition of coffee

## Abstract

The quality of coffee evaluated from its chemical composition, physical and organoleptic characteristics has become a research topic of national and international importance to achieve a better commercialization of parchment coffee bean. A study was carried out of the effect of intermittent solar drying (intermittence caused by day and night) on some chemical compounds of interest in the quality of coffee. The effect of drying was correlated with sensory attributes for the species *C. arabica* varieties Caturra and Castillo®. In the first experimental stage, a factorial design by blocks was carried out with independent variables: 6 levels for the drying process (mechanical drying: 40 °C and 50 °C with air flow of 60 and 100 m<sup>3</sup>/min.tonCPS; drying with exposure to direct sun and solar drying in *marquesina*) and 2 levels for a variety of coffee (Caturra and Castillo®). The drying experiments with two repetitions were carried out in 3 farms in the department of Antioquia. In the second experimental stage, a canopy was built to carry out the solar drying of Castillo® variety coffee with technical recommendations from the Comité de Cafeteros de Antioquia. Variables as temperature, relative humidity and solar radiation inside the Marquesina were recorded with a Datalogger. The coffee weight loss curves during solar and mechanical drying were constructed under the Gravimet method (Cenicafé). The concentration of several fatty acids and sucrose was measured with HPLC and GC-MS techniques, and it was concluded that the sun-drying time affects the evolution of these compounds. In this sense, sun-drying processes over a longer period of time, such as those in handcrafted systems (*marquesina*) conditioned by climate conditions and subjected to sunlight energy, cause the fatty acids and sucrose in the coffee grains to decrease more significantly. In this study, a 1D mathematical model was developed for predicting the time evolution of the moisture loss during solar drying and was successfully validated with experimental data.

**Keywords:** Solar drying, *marquesina*, coffee, kinetics, chemical compounds, modeling.



# Lista de Tablas

<b>Tabla 1-1.</b> Modelos semiteóricos más utilizados en el secado de granos (Erbay et al, 2009) .....	32
<b>Tabla 2-1.</b> Variables independientes. Diseño experimental para los procesos de secado.....	54
<b>Tabla 2-2.</b> Valores medios de los compuestos químicos medidos en el café verde según los procesos de secado.....	57
<b>Table 4-1.</b> Valores de propiedades utilizadas en el modelo. ....	86
<b>Table 4-2.</b> Pendientes obtenidas para las temperaturas registradas durante el secado.....	88

# Lista de Figuras

<b>Figura 1-1.</b> Secado con exposición directa al sol (Sharma et al. 2009) .....	21
<b>Figura 1-2.</b> Secador solar tipo túnel (Oliveros et al., 2006).....	22
<b>Figura 1-3.</b> Secador solar tipo “marquesina” en Antioquia (Federación Nacional de cafeteros de Colombia, 2014) .....	22
<b>Figura 1-4.</b> Secador tipo rotativo “Guardiola” (Gutiérrez & Copete, 2009) .....	23
<b>Figura 1-5.</b> Secador de una sola capa con inversión de la dirección del flujo de aire (Parra et al., 2008) .	24
<b>Figura 1-6.</b> Secador de dos capas verticales con inversión de la dirección del flujo del aire solo en la capa inferior (Parra et al., 2008b).....	24
<b>Figura 1-7.</b> Secador vertical de tres capas (Gutiérrez & Copete, 2009). .....	25
<b>Figura 2-1.</b> Procesos de secado realizados en la finca: (a) Secado mecánico, (b) sol directo y (c) marquesina. ....	53
<b>Figura 2-2.</b> Puntaje SCA en función de los procesos de secado (P1: 40°C – 60 m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> cps, P2: 40°C - 100 m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> cps, P3: 50°C – 60 m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> cps, P4: 50°C – 100 m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> cps, P5: solar en piso de concreto, P6: marquesina), variedad del café (Caturra y Castillo®) y tiempo de almacenamiento (2 y 4 meses). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba LDS Fisher (p<0.05).....	61
<b>Figura 2-3.</b> Análisis factorial de datos mixtos para los proceso de secado, variedad del café, compuestos orgánicos y atributos sensoriales del café: (a) análisis de correlación y (b) mapa de factores. (C14:0 = Mirístico, C16:0 = Palmítico, C16:1 = Palmitoléico, C17:0 = Heptadecanóico, C18:0 = Esteárico, C18:1 = Oléico, C18:2 = Linoléico, C18:3 = Linolénico, C20:0 = Araquídico, C20:1 = Eicosanoico, C22:0 = Behénico, P.T = Puntaje Total, F/A = fragancia/Aroma, S = Sabor, S.R = Sabor residual, A = Acidez, C = Cuerpo, B = Balance, _2 = 2 meses, _4 = 4 meses).....	62
<b>Figura 3-1.</b> Valores medios del cambio de concentración en el tiempo adimensionalizado de los compuestos orgánico medidos durante los procesos de secado: (a) Mirístico, (b) Palmítico, (c) Palmitoléico, (d) Heptadecanóico, (e) Esteárico, (f) Oléico, (g) Linoléico, (h) Linolénico, (i) Araquídico, (j) Eicosanoico, (k) Behénico y (l) Sacarosa.....	72
<b>Figura 3-2.</b> Valores medios del cambio de concentración con el contenido adimensionalizado de humedad de los compuestos orgánico medidos durante los procesos de secado: (a) Mirístico, (b) Palmítico, (c) Palmitoléico, (d) Heptadecanóico, (e) Esteárico, (f) Oléico, (g) Linoléico, (h) Linolénico, (i) Araquídico, (j) Eicosanoico, (k) Behénico y (l) Sacarosa. ....	74
<b>Figura 3-3.</b> Tasa de reducción de los compuestos orgánicos versus la temperatura promedio de secado: (a) Mirístico, (b) Palmítico, (c) Palmitoléico, (d) Heptadecanóico, (e) Esteárico, (f) Oléico, (g) Linoléico, (h) Linolénico, (i) Araquídico, (j) Eicosanoico, (k) Behénico y (l) Sacarosa.....	75
<b>Figura 3-4.</b> Relación de la concentración adimensionalizada de los ácidos grasos saturados (AGS) y ácidos grasos insaturados (AGI) durante el tiempo de secado.....	76
<b>Figura 3-5.</b> Relación AGS/AGI con el contenido de humedad.....	77
<b>Figure 4-1.</b> Descripción de la marquesina usada en el secado solar. (a) estructura, (b) cubierta plástica y (c) con café. ....	82
<b>Figure 4-2.</b> Concepto de partículas grano-café en capa fina en 1D. ....	83

<b>Figure 4-3.</b> Ajuste lineal para la pérdida de masa del café para el secado de 94 horas. ....	88
<b>Figure 4-4.</b> Ajustes lineales para la (a) pérdida de masa (M) y (b) las temperaturas.....	89
<b>Figure 4-5.</b> Comparación experimental del secado solar de 218 horas frente a simulación (a) Temperatura y (b) Humedad.....	92
<b>Figure 4-6.</b> Perfil experimental de temperatura superficial de los granos de café durante el secado solar en marquesina de (a) 94, (b) 120 y (c) 218 horas. ....	93
<b>Figure 4-7.</b> Experimental and theoretical comparison of moisture content in dry base for 94-h, 120-h, and 218-h sun-drying. ....	94
<b>Figure 4-8.</b> Concentración normalizada de AGS (a), AGI (b) y sacarosa (c) con relación al tiempo de secado solar normalizado. ....	97
<b>Figure 4-9.</b> Valores promedio del contenido de humedad, concentración de biocompuestos y condiciones ambientales para el secado solar en marquesina de 218 horas del café. ....	98

## Introducción general

El café, uno de los productos más importantes comercializados internacionalmente por Colombia, contribuyó con el 10% de la participación agrícola en el PIB nacional del año 2017 (Banco de la república-Colombia, 2018). El sector cafetero como la principal fuente de empleo en 52.5% de los municipios colombianos genera 530 mil empleos directos, con 2.5 millones de personas dependiendo de su cultivo, y una activa participación de la mujer, entre 30% y 50% (Global Coffee Platform, 2018). La pequeña (área cultivada < 2.37 ha) y mediana explotación cafetera (5-15 ha) (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), 2018) que constituye el 96% de los productores, proveen 55% de la producción nacional. Actualmente Colombia en el escenario internacional de producción de café ocupa el tercer lugar desde los años 90 (International Coffee Organization (ICO), 2018). Existen diferencias entre las producciones anuales de café en Brasil, Vietnam (primeros productores mundiales) y Colombia, respectivamente: 32%; 19%; y 9% (ICO, 2018)

Algunos problemas que afectan al sector cafetero colombiano están relacionados con la brecha existente en producción y sus altos costos, aunado al bajo precio internacional del grano, envejecimiento de caficultores, empobrecimiento de comunidades cafeteras, bajos niveles de organización y gestión, ausencia de relevo generacional, poca innovación y modernización tecnológica (TIC, mecanización agrícola y automatización de labores) y deterioro progresivo de agroecosistemas cafeteros, entre otros (Plataforma de Comercio Sostenible y Solidaridad, 2016).

En los últimos 30 años los países en desarrollo productores de café han direccionado sus esfuerzos en mejorar la calidad física, química y organoléptica del café, con el fin de ser competitivos y lograr posicionamiento en el mercado internacional frente a países que son grandes productores de café. Los mercados que reconocen esta calidad pagan un excedente por el producto, por lo cual los productores de café de alta calidad reciben mayores beneficios económicos.

Fenómenos naturales como El Niño y La Niña disminuyen la producción de café en un 10% (FNC, 2018), sumado a inapropiadas prácticas en manejo del cultivo: variedad genética, densidad de siembra, ausencia de sombrero, manejo inadecuado de los recursos agua y suelo; todos afectando la calidad del grano y en taza, disminuyendo el acceso a mercados diferenciados (Damatta et al., 2018). Estudios realizados demuestran que la calidad del grano de café está condicionada por factores como localización geográfica del cultivo, microclima de la zona, tipo de suelo, variedad de planta, tipo de siembra y modalidad de cosecha, entre

otros. Investigaciones en genómica buscan nuevas o mejoran variedades de café con alta calidad en taza, rendimiento, porte y tamaño del fruto. No obstante, se evidencian limitados estudios científicos y tecnológicos que relacionen las propiedades fisicoquímicas del grano de café con el perfil sensorial de la bebida, después de ser sometido el grano al proceso de beneficio (recolección, despulpado, fermentación y secado), almacenamiento y tuestión, para garantizar la calidad del café en taza y posicionarlo en mercados nacionales e internacionales (ASIC, 2014; Montoya et al., 2006; Zamora, 2017; Dong et al., 2017).

El café es una de las bebidas más consumidas en todo el mundo, es preparada a partir de los granos tostados del café. En la economía mundial las dos especies más comercializadas son la *Coffea arabica* (arabica) y la *Coffea canephora* (Robusta) (Roa et al., 1999), siendo la variedad arabica la más apreciada por su calidad fisicoquímica y delicioso sabor (Cannon et al., 2010). En Colombia la especie que se cultiva es la arabica, y se encuentran las siguientes variedades (Castillo, 1990; Murthy & Madhava, 2012).

El consumo de Cafés Especiales (CE) dada su excelente calidad sensorial (Specialty Coffee Association SCA, 2017) se ha incrementado en los últimos 7 años en un 25%, especialmente en Europa y EE. UU., generando mayor precio de venta sobre el café estándar. El café arabica producido en Colombia, es considerado un grano de alta calidad física, química y sensorial; reconocido mediante una bonificación económica en el mercado mundial (ICO, 2018). La calidad atribuida a los cafés especiales (CE) permite dar un valor agregado al mismo, debido a sus atributos fisicoquímicos, sensoriales, simbólicos y socioculturales (Togo et al., 2018).

La dificultad para demostrar la naturaleza del perfil sensorial (interacciones dadas entre aproximadamente 1000 compuestos químicos volátiles), con el agroecosistema cafetero, beneficio del café, almacenamiento y tuestión sigue siendo un objeto de estudio (Toci & Boldrin, 2017). El aroma y sabor son la razón principal de la alta aceptabilidad y disfrute de la bebida en todo el mundo, aspectos fundamentales para el reconocimiento de CE de alta calidad. La deficiente trazabilidad en el proceso de beneficio del café es derivada de la falta de apropiación tecnológica, inadecuadas prácticas agrícolas y limitada transferencia de conocimiento; factores determinantes para garantizar la sustentabilidad del producto (Caporaso et al., 2018).

La calidad del café se determina por el sabor y el aroma que se forman durante el proceso de tuestión, estas características sensoriales se generan desde compuestos químicos presentes en el café seco (Fagan et al. 2011). Los compuestos químicos responsables del sabor y el aroma de la bebida se acumulan en los granos durante su desarrollo en la planta. Sin embargo, en el procesamiento poscosecha del grano conocido en el

mundo como “beneficio del café” (Oliveros et al., 2009), una de las etapas que afecta la calidad del grano es el proceso de secado (Borém et al. 2014).

El secado permite conservar la calidad fisicoquímica y organoléptica del grano al reducir la actividad de agua, evitando su deterioro e impidiendo la proliferación de microorganismos y la actividad enzimática que pueden deteriorar la calidad del grano durante su almacenamiento. Entre las fuentes de energía renovables, la energía solar es abundante, económica, libre y limpia en comparación con el secado por convección forzada de aire que utiliza combustibles fósiles o energía eléctrica. La energía solar ha sido empleada para la deshidratación de gran variedad de productos agroalimentarios (Pirasteh et al., 2014; VijayaVenkataRaman et al., 2012; Belessiotis & Delyannis, 2011).

En Colombia el secado del café se ha realizado tradicionalmente mediante dos métodos: el secado solar y el secado por convección forzada de aire (secado mecánico). El secado es una operación unitaria que consiste en eliminar la humedad en el grano, la cual puede variar inicialmente de un 48 a 56% (base húmeda) y se busca reducirla a un rango de 10 a 12% b.h. El producto obtenido del proceso de secado se denomina café pergamino (Nilnont et al., 2012).

El secado solar es considerado como una práctica tradicional de los pequeños caficultores colombianos, que son aproximadamente un 90% de los productores de café (Zambrano et al., 2006; Oliveros et al., 2006; Aristizabal & Duque, 2005; Oliveros & Roa, 2002). Un adecuado secado solar puede determinar adecuados estándares de calidad química, física y organoléptica en el grano de café, necesarios para ser considerado un café especial (Piccino et al., 2014; Lyman et al., 2011). El secado solar se realiza a exposición directa al sol y en estructuras bajo cobertura plástica llamadas “marquesinas”. De las marquesinas la más implementada por los caficultores Colombianos ha sido es el secador parabólico tipo túnel, estructura económica, que se construye con materiales de fácil consecución en la zona cafetera, utiliza cubierta plástica transparente para conseguir el efecto invernadero (Prakash & Kumar, 2014), y permiten la fácil aireación de los granos de café, cabe resaltar que los avances en los diseños de estructuras de secado solar para café se han obtenido en función de métodos experimentales que describen la pérdida de humedad del grano durante el tiempo de secado (Oliveros et al., 2006, 2002, Zambrano et al., 2006).

La composición y concentración de compuestos químicos contenidos en los granos de café es fundamental para que el proceso de tuestión se forme compuestos volátiles de gran importancia en la calidad sensorial de la bebida. La cantidad de carbohidratos, proteínas y aminoácidos puede variar significativamente si se realiza un inadecuado proceso de secado, donde alcanzar temperaturas superiores a 50°C en el grano genera

disminución en la cantidad de estos compuestos (Shibamoto, 2015). En los granos de café secos, la presencia de compuestos orgánicos como los ácidos clorogénicos permite que se formen muchos compuestos aromáticos en el proceso de tuestión (Lee & Shibamoto, 2002).

La calidad química, física y organoléptica del café puede ser alterada al realizar un inadecuado proceso del secado solar, donde variables ambientales como; humedad relativa, radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del aire, afectan los mecanismos de transferencia de calor, masa y difusión de compuestos orgánicos desde el interior del grano de café hacia el ambiente (Ramírez et al., 2013; Bertrand et al., 2012 Kleinwächter & Selmar, 2010; Hernandez et al., 2008; Farah et al., 2006). El secado solar puede modificar la composición química de las almendras de café. Según Kleinwächter et al., (2015), en los últimos años se han logrado avances importantes en la comprensión de los procesos metabólicos que ocurren dentro de las almendras de café durante el proceso de poscosecha del café.

Para Colombia el proceso de secado solar puede llegar a superar los 10 días (Oliveros et al., 2006, 2002, Zambrano et al., 2006), esto, depende de las condiciones climáticas de cada región cafetera. El tiempo de secado solar es determinado por la cantidad de radiación solar disponible en el día y las condiciones climáticas de la noche. Todo esto genera que la pérdida de humedad en el grano no se de forma continua en el proceso de secado, lo que puede facilitar que al exterior e interior del grano de café se generen reacciones bioquímicas y fisiológicas que pueden alterar la calidad física y química del café.

Para productos agroalimentarios el modelamiento matemático del proceso de secado es complejo, dadas sus características físicas, procesos metabólicos, procesos microbiológicos y composición química. El secado por convección forzada de aire en alimentos, en particular el de granos ha sido modelado ampliamente utilizando modelos empíricos y semiteóricos (Kucuk et al., 2014; Erbay & Icier, 2009). Las modelaciones matemáticas para el secado por convección forzada de aire (secado mecánico) del café se han enfocado en la conservación de propiedades físicas, viabilidad embrionaria y eficiencia energética (Andrade et al. 2019; Borém et al. 2014; Parra-Coronado, Roa-Mejía, and Oliveros-Tascón, 2008), donde el modelamiento matemático para proceso de difusión de agua desde el interior hacia la superficie del grano de café es considerado como una propiedad promedio efectiva (Goneli et al., 2013; Tripathy & Kumar, 2009; Sfredo et al., 2005).

Para el secado solar del café son pocas las aproximaciones matemáticas para describir el proceso de pérdida de humedad en el grano (Suzihaque and Driscoll 2016; Suherman et al. 2020; Prada et al. 2019), evidenciando poca exploración de los procesos de transferencia de calor y masa para describir la pérdida de

humedad y su posible efecto sobre compuestos químicos de importancia en la calidad del café. En contraste con el proceso de secado por convección forzada de aire donde se han realizado modelamientos matemáticos de los procesos de transferencia de calor y masa para la pérdida de humedad durante el secado del café (Nilnont et al, 2012; Burmester & Eggers, 2010; Ciro et al., 2010; Hernández et al., 2008; Sfredo et al., 2005; Varadharaju et al., 2001; Parra & Oliveros, 2008).

De acuerdo con todo lo anterior, dada la importancia de causar la menor afectación a la calidad del café en composición química del café durante el proceso de beneficio, es pertinente evaluar el efecto del proceso de secado solar sobre el café, aportando conocimiento técnico con modelamiento predictivo sobre el contenido del agua y la concentración de compuestos químicos durante el secado del café.

El principal objetivo de esta investigación fue avanzar en el conocimiento científico en el área de del secado del café. Para ello, se realizaron experimentos de secado a escala real en finca cafetera con un riguroso control de las variables involucradas en el proceso de beneficio del café.

Entre los objetivos relevantes trazados en este trabajo de investigación fueron:

- Evaluar el efecto de diferentes procesos de secado sobre la composición química y calidad sensorial del café pergamino.
- Describir la dinámica de algunos compuestos químicos de interés para la calidad sensorial del café a medida que transcurre el tiempo del secado solar y secado mecánico.
- Implementar un modelo de transferencia de calor y masa 1D para la pérdida de humedad durante el secado solar en marquesina del café.

A continuación, se muestra una lista con una breve descripción de los capítulos:

- Capítulo 1: Estado del arte. Se hace una descripción sobre; composición química del café, cafés especiales, secado solar y secado mecanice del café, antecedentes del efecto del secado sobre la composición química del café y modelamiento del secado.
- Capítulo 2: Efecto del secado en la composición química y calidad sensorial del café variedad Castillo® y Caturra. Se muestra la metodología experimental realizada en tres fincas cafeteras del departamento de Antioquia, que permitió evaluar el efecto de seis procesos de secado sobre compuestos químicos de importancia en el café y su relación con el perfil sensorial a los dos y cuatro meses de almacenamiento.



- Capítulo 3: Dinámica de la concentración de ácidos grasos y sacarosa del café durante el proceso de secado. Se realizó un análisis matemático de la dinámica de la concentración de once ácidos grasos y la sacarosa durante el proceso de secado. Se efectuaron tres secados solares en marquesina y tres secados con convección forzada de aire (secado mecánico) a 50°C y un caudal de aire de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$  cps.
- Capítulo 4: Estudio de sistema artesanal “Marquesina” de secado solar para grano de café en capa fina. Se desarrollo un estudio teórico de la perdida de humedad durante el secado solar en marquesina, implementando un modelo de transferencia de calor y masa, el cual fue validado con datos experimentales de tres experimentos de secado solar con un tiempo de secado de 94, 120 y 218 horas.

# I. Capítulo 1. Estado del arte

Esta revisión del estado del arte se dividió en apartados considerados fundamentales para este trabajo de doctorado. Se desarrollan aspectos generales sobre la composición química del café, cafés especiales, proceso de beneficio, secado solar, secado mecánico, investigaciones sobre el efecto del secado sobre la composición química del café y modelos matemáticos para describir el secado del café.

## 1.1. Composición química del grano de café verde

El endospermo del café está compuesto principalmente por agua y materia seca. Principalmente la materia seca se compone de minerales y sustancias orgánicas como; polisacáridos, oligosacáridos, monosacáridos, lípidos, proteínas, aminoácidos, ácidos alifáticos, ácidos clorogénicos, cafeína, trigonelina (Ferreira 2014). A continuación, se describe la composición química del endospermo del café:

- **Agua.** En promedio el contenido de agua varía de un 54 a 56 % (base húmeda) (Puerta, 2011).
- **Carbohidratos.** Los carbohidratos (polisacáridos, oligosacáridos y monosacáridos) del café constituyen un 59 -61% del peso seco (Simões et al., 2019; Wei & Tanokura, 2015). Los carbohidratos junto con los aminoácidos son precursores de la reacción de Maillard en la cual se desarrollan el color y compuestos aromáticos. La sacarosa es el carbohidrato predominante en el café verde con una concentración de hasta 90 mg/g en café arábica y 45 mg/g en robusta, glucosa entre (0.01-0.45% y 0.01-0.56%) y fructosa entre (0.02-0.4% y 0.2-0.55%) para *C. arabica* y *C. canephora* respectivamente (Farah, 2012; Selmar et al., 2014).
- **Lípidos.** La fracción lipídica se encuentra en su mayoría alojada al interior de las células en el endospermo de los granos del café. Existe una marcada diferencia entre el contenido total de lípidos entre las especies *C. arabica* y *C. canephora*. alrededor del 15% en *C. arabica* y 10 % en *C. canephora* (Speer & Kölling-speer, 2006). Los triacilglicéridos presentes en el aceite del café están formados principalmente por los ácidos grasos; mirístico, palmítico, esteárico, oleico, linoleico, araquidónico y eicosanoico (Martin et al., 2001).
- **Proteínas, aminoácidos libres y péptidos.** Estos compuestos nitrogenados, donde se excluyen la cafeína y trigonelina representan el 11.2% de la composición química del endospermo del café

(Farah, 2012). Varían para *C. arabica* y *C. canephora*; aminoácidos libres entre (0.27-0.5% y 0.35-0.6%), péptidos (8.7-9.6% y 9.2-9.7%) y proteínas (0.34-0.95% y 0.30-0.59%) respectivamente (Selmar et al., 2014). Las albuminas y globulinas son las proteínas mayoritarias y el ácido glutámico, asparagina y ácido aspártico los principales aminoácidos libres (Puerta, 2011; Arnold et al., 1994).

- **Alcaloides.** La cafeína es el alcaloide principal en los granos de café, existe diferencia en la concentración según la especie de café. El contenido de este alcaloide en *C. canephora* es ~2% y en *C. arabica* ~1% (de Paula Lima & Farah, 2019; Hečimović et al., 2011). La concentración trigonelina en el endospermo de café puede variar de (0.8 – 1.05%) y (0.3 – 0.7%) en *C. arabica* y *C. canephora* respectivamente (Selmar et al., 2014). La cafeína y la trigonelina están relacionadas con la formación de productos como los furanos, pirazinas, alquilpiridinas y pirroles, que aportan al sabor de la bebida del café.
- **Ácidos clorogénicos.** Los ácidos clorogénicos (CGAs) son compuestos fenólicos que pueden alcanzar hasta el 10% de la materia seca del endospermo del grano de café verde (5-7.5% en *C. arabica* y 7-10% en *C. canephora*) (Selmar et al., 2014). A medida que la cereza del café madura en el árbol la concentración de los CGAs en el endospermo del café disminuye (Preedy, 2014). Principalmente se destacan el ácido dicafeoilquínico, ácido cafeoilquínico, ácido p-cumaroilquínico, ácido feruloilquínico, y el ácido quínico formado por diésteres mixtos de ácidos cafeico y ferúlico, se asocia sensorialmente la sensación de astringencia a los ácidos clorogénicos. (Matei et al., 2019; Farah & Donangelo, 2006).
- **Ácidos alifáticos.** Se han identificado ocho ácidos alifáticos en el café verde; cítrico, málico, acético, ascórbico, succínico, láctico, oxálico y tartárico (Puerta, 2011; Farah, 2012). Se reportan del 2–2.9% y 1.3–2.2% (peso seco) de los ácidos (cítrico, málico y químico) en los granos verdes *C. arabica* y *C. canephora* respectivamente (Belitz et al., 2009)
- **Compuestos aromáticos.** Se han encontrado cerca de 200 compuestos volátiles de diferente naturaleza química como hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos, ésteres, lactonas, nitrógeno y compuestos azufrados, éteres, fenoles, furanos y compuestos halogenados; estos compuestos contribuyen al olor característico del café verde y pueden incluso conservarse y aportar sabor y olor al café tostado (Holscher & Steinhart, 1995).

## 1.2. Proceso de Beneficio del café

Al proceso poscosecha del café se conoce como el “Beneficio del café”, es la etapa que sigue luego de la recolección de las cerezas del café del árbol, proceso mediante el cual se transforma el fruto en un producto comercial llamado café pergamino. La elección del método de procesamiento afecta directamente la rentabilidad de la producción de café y depende de diversos factores como las condiciones climáticas regionales; capital, tecnología y equipo disponibles; demanda de los consumidores de características de calidad específicas; derechos de uso del agua; y la disponibilidad de tecnología para el tratamiento de aguas residuales (Gonzalez-Rios et al., 2007). Para elegir el método de procesamiento de café es necesario realizar un análisis de costo/beneficio, cumplimiento de la legislación ambiental y calidad física y sensorial deseada en el café. Las formas más utilizadas de realizar el proceso de beneficio son por vía húmeda y vía seca, ambos métodos tienen por objeto llevar el contenido de humedad del grano a un 10-12% en base húmeda (Joët et al., 2010).

- **Beneficio seco.** Los frutos recolectados son depositados al secado inmediato, deshidratándolos para después trillarlos, removiendo en una sola operación todas las coberturas deshidratadas (exocarpio, mesocarpio, endocarpio y parte del endospermo) para dejar la semilla (grano sin lavar) y someterla después al proceso de torrefacción y posterior preparación de la bebida. (Teixeira et al., 2005).
- **Beneficio húmedo.** Se realiza en dos formas. Por vía húmeda donde primeramente se efectúa el despulpado del café removiendo la cascara del fruto y la separación del mucilago a través de fermentación natural o controlada, mientras que en el proceso por vía semi-húmeda se realiza la remoción mecánica del mucilago, para después deshidratar los granos de café y conservarlos durante un periodo de almacenamiento; para realizar después el proceso de torrefacción y posterior preparación de la bebida (Guerrero, 2007).

## 1.3. Secado solar

El secado solar utiliza la radiación solar como fuente de energía, la radiación solar incrementa la temperatura superficial del grano lo que permite evaporar el agua contenida en los granos de café. El proceso de secado solar se puede clasificar en función de cómo se transfiere el calor al producto húmedo, lo que permite definir el diseño y operación del secador (figura 1-1). Según Ekechukwu (1999) y Sharma et al (2009) el secado

solar en invernadero se puede clasificar principalmente según el tipo de estructura, empleándose mayormente las estructuras de forma parabólica y tipo iglesia.

El objetivo del secador de invernadero es aprovechar al máximo la radiación solar. Sin embargo, según el modo de transferencia de calor, se clasifican como secadores en modo pasivo y secadores en modo activo. Donde, el ingreso del aire al secador tipo invernadero se da por convección natural (modo pasivo) y por convección forzada (modo activo).

#### 1.4. Secado solar de café

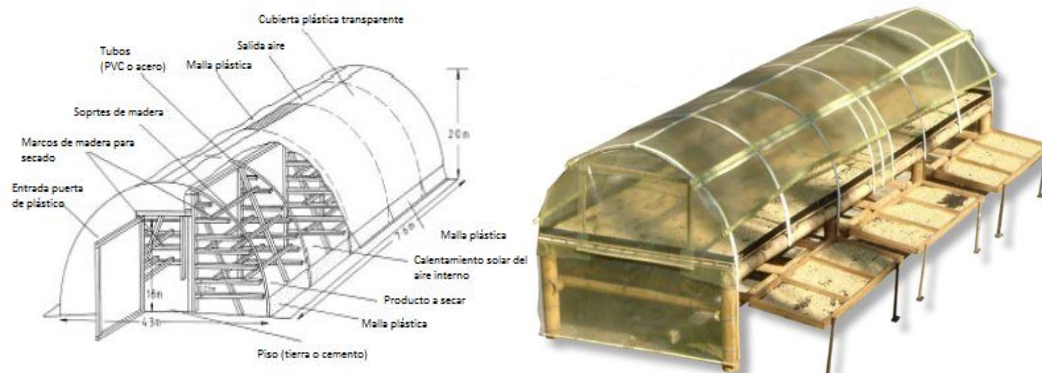
Se realiza para evitar garantizar una adecuada conservación de los granos de café durante el almacenamiento, reducir el contenido de humedad hasta un nivel adecuado para inhibir el desarrollo de hongos y evitar que el grano sufra daños en su aspecto físico y composición química, permitiendo obtener un producto estable que conserve su calidad por amplios periodos de tiempo (Cruz et al., 2010). Para la reducción de la humedad en los granos de café se utilizan dos sistemas: el secado con exposición directa al sol y bajo sistemas de cobertura plástica (marquesinas) (Oliveros et al., 2010).

- **Secado solar con exposición directa al sol.** Aprovecha la radiación solar global y la entalpía del aire para el secado, el tiempo de secado puede ser de 5 a 21 días dependiendo de las condiciones climatológicas de la región. Es el método más difundido en países en vía de desarrollo y el más económico (Fonseca et al., 2003). En la figura 1-1 se describe la forma tradicional de realizar el secado del café al sol directo en patios de concreto, caracterizándose como un proceso que involucra condiciones climáticas que pueden afectar la calidad fisicoquímica del café (Castoldi & Castoldi, 2013).



**Figura 1-1.** Secado con exposición directa al sol (Sharma et al. 2009)

- **Secado solar en Marquesina.** Se utiliza una estructura con cobertura plástica “marquesina” (Roa et al.,2000) para aprovechar al máximo la energía del sol, donde al interior de la estructura se da el efecto invernadero (Cruz et al., 2010). Las marquesinas mostradas en las figuras 1-2 y 1-3 son usadas por los cafeteros antioqueños. El proceso de secado puede durar de 3 a 10 días, dependiendo de condiciones climáticas. Dentro de estos tipos de estructuras se destacan, los secadores solares parabólicos, secadores tipo túnel y paseras solares (Botero & Betancur, 2012).



**Figura 1-2.** Secador solar tipo túnel (Oliveros et al., 2006)

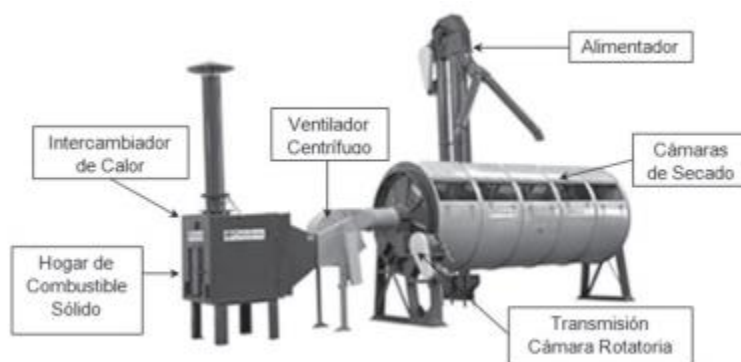


**Figura 1-3.** Secador solar tipo “marquesina” en Antioquia (Federación Nacional de cafeteros de Colombia, 2014)

## 1.5. Secado mecánico

El proceso de secado por convección forzada de aire caliente que atraviesa un lecho conformado por granos de café es conocido en el gremio cafetero como secado mecánico. Existen muchos modelos y tamaños para realizar el secado mecánico del café, en Colombia son muy empleados los secadores de capa estática, ya que son fáciles de operar y su construcción puede ser económica comparados con otras tecnologías de secado. Los secadores de capa estática tardan en las cámaras de presecado y secado en promedio de 25 a 30 h en llevar el café lavado y escurrido hasta café pergamino para una temperatura de secado de 50°C con relación al espesor de la capa (0.1 - 0.4 m) del lecho conformado por los granos de café y caudal de aire (20 - 40 m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>) (Parra et al, 2017).

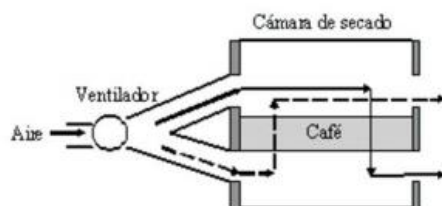
La Figura 1-4 muestra un secador mecánico tipo Guardiola, caracterizándose por ser una estructura cilíndrica dispuesta de forma horizontal que gira continuamente y garantiza una distribución más uniforme del aire caliente que está en contacto con los granos de café (Gutiérrez & Copete, 2009). Una ventaja de esta tecnología de secado es que permite obtener café pergamino con un contenido de humedad uniforme en todos los granos de café, su principal desventaja es la baja eficiencia térmica que incrementa los costos de operación del secado, por lo que gradualmente se fueron sustituyendo por secadores de capa estática con sus diversas modificaciones tales como la inclusión de inversión de flujos de aire (Oliveros et al., 2009).



**Figura 1-4.** Secador tipo rotativo “Guardiola” (Gutiérrez & Copete, 2009)

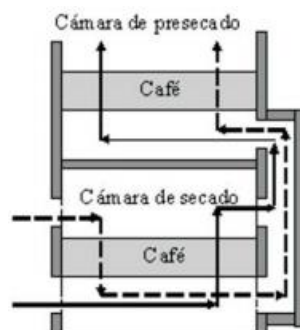
En la figura 1-5 se muestra un secador estático de una cámara de secado, este secador se caracteriza porque el flujo de aire caliente atraviesa el lecho conformado por los granos de café. Para obtener una mayor uniformidad en el contenido de humedad del grano, el flujo del aire se invierte cada 6 a 12 horas hasta obtener el contenido de humedad final (Cenicafé, 2004). Los resultados de investigaciones realizadas en Cenicafé indican que para secadores de capa estática el flujo mínimo recomendado es de 25 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> de

café pergamino seco ( $66 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t CPS}$ ), temperatura máxima del aire de secado de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  y el espesor de la capa de granos de  $40 \text{ cm}$  (Roa, 1991 citado por Parra et al., 2008).



**Figura 1-5.** Secador de una sola capa con inversión de la dirección del flujo de aire (Parra et al., 2008)

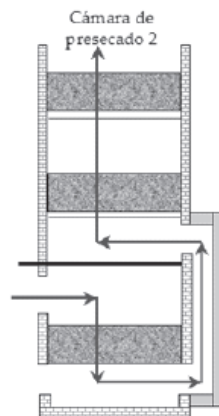
El silo secador de dos pisos, conocido también como “silo secador vertical”. En este secador la cámara de pre-secado está localizada sobre la cámara de secado, el aire que sale de la cámara inferior pasa a la cámara superior realizando el pre-secado; cuando el café de la cámara inferior ha alcanzado el contenido de humedad deseado se retira y el café que se encuentra en la cámara superior se deja caer a la cámara inferior abriendo una compuerta situada en el piso del segundo nivel, donde el café termina su proceso de secado (Figura 1-6).



**Figura 1-6.** Secador de dos capas verticales con inversión de la dirección del flujo del aire solo en la capa inferior (Parra et al., 2008b)

Para obtener una mayor uniformidad en la humedad final del café pergamino seco se adicionó un nuevo piso al secador vertical de dos pisos, dando paso al secador de tres pisos o tres capas con inversión del flujo de aire de secado solo en el piso inferior como se muestra en la Figura 1-7 (Gutiérrez & Copete, 2009). Este último diseño de cámaras de secado es económico y permite obtener un producto con una humedad uniforme con capas de café de  $25 \text{ cm}$  de espesor por cámara de secado y un caudal de aire de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t CPS}$  (Roa, 2004).





**Figura 1-7.** Secador vertical de tres capas (Gutiérrez & Copete, 2009).

## **1.6. Importancia de la composición química del grano en la calidad sensorial del café**

El contenido de proteína en los granos de café varía según la ubicación geográfica, ya que la concentración final de proteína en el café se ve influenciado por el clima, la altitud, el tipo de suelo y el método de procesamiento empleado (Rodríguez et al., 2010). Igualmente, las diferencias entre especies y factores ambientales determinan el contenido de cafeína, siendo mayor la concentración de cafeína en cafés cultivados en grandes alturas (Avelino et al., 2005).

Información científica de cómo se afecta la calidad aromática del café usando nuevas tecnologías de procesamiento es escasa y a veces contradictoria: González et al., (2007) encontraron un perfil aromático con notas desagradables en cafés a los que se les retiró el mucilago mecánicamente; mientras que Puerta (1999) encontró que el desmucilaginado mecánico no afectó las características sensoriales del café.

Alcázar et al., (2003) determinaron el contenido de ácidos orgánicos en café verde y tostado de las especies arabica y robusta, encontrando predominancia en el ácido cítrico seguido del málico, estas concentraciones fueron mayores en el café verde y menores en el café tostado; a su vez se presentaron concentraciones más altas de estos ácidos en arabica que en robusta. Mientras que algunos ácidos se degradan durante el tostado, otros incrementan su concentración como el fórmico, acético, glicólico y láctico (Sunarharum et al., 2014). Algunos de ellos pueden ser producto de contaminaciones resultantes del proceso de beneficio del grano verde, el transporte o el almacenamiento.

La composición de los granos de café varía según las especies, orígenes y métodos de análisis utilizados en el análisis químico; los polisacáridos, lípidos y proteínas parecen ser los principales componentes en el grano verde de *C. arabica* (Arabica) y *C. canephora* (Robusta) y los componentes presentes en menor cantidad, como la cafeína, trigonelina, ácidos clorogénicos, azúcares libres (principalmente sacarosa), aminoácidos libres, son de mucho interés, ya que estos son la fuente importante de aroma del café (Wei et al., 2012).

La concentración de compuestos químicos en los granos del café se ve afectada por la altura sobre el nivel del mar, para la cafeína y los ácidos clorogénicos estos disminuyen cuando se incrementa la altitud de 0.12 y 1.23 g.kg<sup>-1</sup>.100m<sup>-1</sup>. Mientras, el contenido de sacarosa se incrementa con la altura en 3.02 g.kg<sup>-1</sup>.100m<sup>-1</sup> en el proceso de beneficio por vía húmeda y en 0.36 g.kg<sup>-1</sup>.100m<sup>-1</sup> en el beneficio por vía seca (Worku et al., 2018).

El crecimiento de microorganismos, la actividad enzimática, la estabilidad y la vida útil de los productos alimenticios se ve afectada directamente con la actividad del agua (Mendonça et al., 2007). Según Reh et al., (2006) la reducción del contenido de humedad reflejado en una disminución de la actividad del agua del grano de café durante el secado permite mantener la estabilidad química, microbiológica y la calidad sensorial.

Según Murkovic & Derler (2006) la concentración de sacarosa es fundamental para la formación de compuestos que aportan características sensoriales especiales al sabor y aroma se dan durante la reacción de Millard en el proceso de tostión del café, donde la especie arabica tiene mayor concentración de sacarosa que la especie robusta.

La fracción lipídica de los granos de café evita la volatilización y la pérdida de sabores durante el proceso de tostado (Wagemaker et al., 2011). Ésta está compuesta principalmente por triacilglicerolos (aproximadamente 75%), ácidos grasos (1%), esteroides (2,2% no esterificados y 3.2% esterificados con ácidos grasos) y tocoferoles (Farah, 2012).

La formación de compuestos volátiles tales como melanoidinas, pirazinas, furanos, pirroles, piridinas y aldehídos se atribuyen a la presencia de proteínas, aminoácidos libre y péptidos, donde la concentración de estos compuestos químicos en los granos de café se puede alterar sino se rea un adecuado proceso de beneficio (Hwang et al., 2012). Además, la cafeína y la trigonelina aportan al sabor amargo de la bebida del café (Higdon & Frei, 2006; Tello et al., 2011).

La sensación sensorial de astringencia en la bebida del café se asocia a una mayor concentración de ácidos clorogénicos en los granos de café antes de realizar el proceso de tostión, esto se puede relacionar con la presencia de granos verde e inmaduros al momento de realizar la cosecha del café y no realizar un control de estos granos durante el proceso de beneficio del café (Farah et al., 2006).

Para la variedad Castillo® no se encontraron diferencias sensoriales cuando el proceso es realizado por vía húmeda y vía semi-húmeda. Pero, variables tales como el color, pH y contenido de cafeína mostraron diferencias dependiendo del método de beneficio (Rodríguez et al., 2020).

### **1.7. Efecto del secado en la composición química y propiedades físicas del café**

El proceso de beneficio puede incidir en la calidad del grano, mejorándola o deteriorándola si se emplean métodos inapropiados para realizar el despulpado, fermentación, lavado y secado (Chacón, 2001). Se ha reportado que el beneficio por vía húmeda del café acompañado del secado solar es adecuado para el procesamiento en la obtención de cafés especiales (Tai et al., 2014; Haddis & Devi, 2008).

Sí se realiza un proceso de secado adecuado del café, se puede garantizar que continúen dentro de la almendra los compuestos orgánicos precursores del sabor y aroma. Aunque la concentración de los compuestos orgánicos puede variar, debido a la transferencia de masa y calor durante el proceso de secado (Puerta, 2011). Durante el proceso de secado del café los CGAs pueden ser parcialmente isomerizados, hidrolizados o degradados a compuestos de bajo peso molecular (Leulop, 2005 citado por Preedy, 2014).

Cuando el café pergamino después de cosechado se deja por más de 48 horas con su contenido de humedad inicial por retraso en el proceso de secado, o cuando éste se almacena con contenidos de humedad superiores al 12% por un secado deficiente, el riesgo de ser atacado por hongos y de ser contaminado con micotoxinas es muy alto, a su vez si el café se deshidrata por debajo del 11 % (base húmeda) se generan zonas cristalizadas que en el momento de la trilla se vuelve quebradizo (Parra et al., 2008a).

Rattanamechaiskul & Junka (2020) evaluaron el efecto de la temperatura del aire sobre el rompimiento del pergamino usando el secado por fluidización. El rompimiento del pergamino es un factor de calidad del café asociado a la comercialización y venta. El rompimiento del pergamino se puede asociar a altas temperaturas en el aire de secado que causan una rápida disminución del contenido de humedad aumentando al estrés mecánico en la superficie del café. Los resultados sugieren que la técnica de secado por fluidización afectó

la velocidad de secado y el rompimiento del pergamino de los granos de café. Con el ajuste de regresión a una ecuación de primer orden, se pueden predecir las condiciones de secado con el menor consumo energético específico, garantizando el contenido de humedad y el porcentaje de rompimiento del pergamino establecido con los estándares comerciales.

Dong et al., (2019) investigaron los perfiles volátiles y sensoriales para granos de café tostado variedad robusta, mediante el uso de nariz electrónica, lengua electrónica y espectrometría de masas acoplada a cromatografía de gases de microextracción en fase sólida de espacio de cabeza (HS-SPME-GC-MS). Los granos de café tostado provenían de diferentes procesos de secado (sol directo, secado solar, secado con bomba de calor, secado con aire caliente y secado por liofilización). Los resultados indicaron que el proceso de secado afectó notablemente el pH, la acidez titulable total, los sólidos totales y los sólidos solubles totales. La combinación de los resultados de la composición química mediante nariz electrónica, lengua electrónica y HS-SPME-GC-MS, permitieron discriminar eficazmente las muestras de café tostado provenientes de diferentes procesos de secado. Adicionalmente, el secado por bomba de calor fue superior para conservar cetonas, fenoles y ésteres.

Kulapichitr et al., (2019) evaluaron el efecto del secado con bomba de calor a 40 °C, 45 °C y 50 °C, secado en bandeja con aire caliente y secado al sol sobre la calidad del café Arabica. El proceso de secado no afectó el contenido de cafeína, pero influyó en los niveles de algunos aminoácidos. Con el secado con bomba de calor y aire caliente se obtuvo mayor contenido de sacarosa comparado con el secado solar. El aroma percibido en la bebida del café usando del secado solar y secado por bomba de calor fue similar, pero difería del secado con aire caliente. El análisis estadístico de correlaciones separó el secado solar de los secados con bomba de calor y con aire caliente.

Scholz et al., (2019) identificaron como interfieren en la calidad de la bebida del café fenómenos bioquímicos y puntos críticos relacionados con los procesos de beneficio (natural y semiseco). Observaron cambios en los atributos sensoriales asociados con el método de beneficio relacionados con el contenido de lípidos, compuestos fenólicos, cafeína y ácidos clorogénicos, atribuidos a la ocurrencia de la germinación durante el secado.

Cheng et al., (2019) estudiaron el efecto del secado al sol directo, secado con bomba de calor, secado por liofilización, secado al vacío por microondas y secado combinado al vacío por microondas, sobre los ingredientes activos de los granos de café verde variedad robusta. Los resultados mostraron que los granos verdes secados por microondas al vacío presentaron menor actividad de la polifenol oxidasa, mayor

contenido de ácidos fenólicos y mayor actividad antioxidante. Adicionalmente el tiempo de secado (0,63 h/kg) y consumo de energía (1,88 kWh/kg) menor en el secado por microondas al vacío. El secado por microondas al vacío puede ser un método de secado adecuado para la conservación de compuestos fenólicos y bioactivos de los granos de café verde.

Dong et al., (2018) secaron café variedad robusta, evaluando el efecto de la potencia por microondas al vacío sobre el coeficiente de difusión efectivo ( $Deff$ ) de humedad, la temperatura de la superficie, la temperatura de transición vítrea y la microestructura. Adicionalmente, determinaron durante el secado la cinética de los cambios de color, el contenido fenoles totales y la actividad antioxidante (DPPH, FRAP y ABTS). Los resultados mostraron que la potencia del microondas afectó la porosidad de los granos de café, el color, el contenido de fenoles totales y actividad antioxidante. Los resultados proporcionan una referencia para considerar técnicas de secado que pueden potenciar la conservación de compuestos químicos importantes en los mecanismos de formación del sabor y el control de calidad de los granos del café secos.

Livramento et al., (2017) realizaron un perfil proteómico para granos de café *C. arabica* despulpados y naturales, secados en un patio y con aire caliente a 60 °C. El café secado a 60 °C mostro un perfil proteómico alterado, con una reducción de las proteínas más abundantes en comparación con los granos secados al sol en patio. Se lograron identificar proteínas implicadas en el metabolismo de los azúcares como respuesta al estrés hídrico causado por el secado. Los resultados demostraron que los procesos poscosecha que impactan la calidad del café están relacionados con cambios en la abundancia de proteínas en granos de café sometidos a diferentes procesos poscosecha.

Dong et al., (2017) investigaron el efecto de diferentes técnicas de secado (exposición directa al sol, secado solar en gabinete, secado con bomba de calor, secado con aire caliente y secado liofilización) en componentes bioactivos, composición de ácidos grasos y perfil de compuestos volátiles de los granos de café variedad robusta. Encontraron que la liofilización es un método eficaz para conservar los ácidos grasos saturados e insaturados y ácidos orgánicos. El secado con aire caliente fue ideal para retener ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos. Identificaron sesenta y dos compuestos volátiles en los granos de café secados de manera diferente. Con el secado con bomba de calor se obtuvo la mayor cantidad de volátiles y con la liofilización se obtuvo mayor concentración de volátiles. Se demostró una estrecha relación entre los métodos de secado exposición directa al sol, secado solar en gabinete y secado con bomba de calor, mientras que los métodos de liofilización y secado con aire caliente fueron significativamente diferentes entre ellos y el resto de proceso de secado.

Borém et al., (2014) evaluaron el efecto de realizar un secado intermitente sobre la calidad del café luego de doce meses de almacenamiento. En primer lugar, el café despulpado fue extendido en piso de concreto sin superar 7 cm de espesor y se revolvió cada 30 minutos por dos días consecutivos. Luego el café fue secado mecánicamente a 40°C hasta obtener una humedad del 16%, 20% y 24% (bh). Después el café se almacena durante dos, seis y doce días en cajas de madera. Luego de cada periodo de almacenamiento el café continuo el proceso de secado mecánico hasta alcanzar una humedad del 11% (bh). El tratamiento control consistió en un secado mecánico continuo a 40 °C hasta alcanzar el 11% (bh) de humedad. Los resultados mostraron que la calidad del café evaluada en las propiedades fisicoquímicas (conductividad eléctrica, lixiviación de potasio, azúcares reductores y no reductores totales, acidez total titulable) tuvieron menor afectación comparadas con el secado mecánico continuo.

Las camas africanas con piso de esteras de bambú o malla de alambre elevadas del suelo para cargas de 20 a 40 kg/m<sup>2</sup> de café, permitió obtener café de alta calidad de realizar luego de realizar el proceso de solar comparado con el secado en piso de concreto (Tsegave et al., 2014).

Borém et al., (2013) realizaron diferentes experimentos de secado para dos procesos de beneficio (vía seca y vía humedad). Se utilizaron cuatro métodos de secado para café variedad arabica: secado en patio y secado mecánico a 50/40 °C, 60/40 °C y 40/60 °C. Para el secado mecánico cuando el café alcanza una humedad del 30 ± 2% (bh) se realizó el cambio de temperatura y el secado termino cuando el café llego a 11% ± 1% (bh) de húmeda. El análisis por microscopia diferencial de barrido mostró resultados similares para el secado realizado a 50/40 °C y secado en patio con relación a los dos métodos de beneficio, sin signos evidentes de ruptura en la membrana celular del café. El café secado a 40/60 °C fue el que más daño causó a las estructuras celulares, independientemente del tipo de procesamiento.

Kramer et al., (2010) encontraron mediante herramientas moleculares (acumulación de un metabolito de estrés general, GABA (ácido  $\gamma$ -aminobutírico) y las deshidrinas) el incremento de la actividad metabólica que sufren los granos de café durante el secado. La actividad metabólica en los granos de café se acelera cuando es sometido a una condición de estrés hídrico producto del proceso de secado. Los resultados muestran que acumulación de GABA durante el secado se correlaciona con la expresión de isocitrato liasa y, por lo tanto, con los procesos de germinación en curso en las semillas de café y se cree que son inducidos directamente por el estrés por deshidratación en el tejido del embrión y del endospermo, respectivamente. Kleinwächter & Selmar (2010) atribuyen la alta reducción de glucosa y fructosa al inicio del secado a procesos netamente metabólicos producido por el estrés hídrico en los granos de café y descartan la idea que sea producto de la lixiviación de azúcares.

Borém et al., (2008) evaluaron el impacto de la temperatura de secado (40 °C, 50°C y 60°C) sobre la integridad de la membrana celular del grano de café. Con el uso de técnicas de histoquímicas y microscopia electrónica de barrido fue posible evaluar y comparar las alteraciones en la estructura del endospermo de la semilla de café. Los resultados mostraron que, para los granos de café pergamino secados a 40 °C, no hubo cambios en la integridad celular de la membrana plasmática y las vesículas donde el contenido celular interno permaneció intacto y el espacio entre la membrana plasmática y la pared celular estaba vacío. Por el contrario, en el endospermo de granos de café pergamino secados a 60 °C, se observaron cuerpos oleosos fusionados que dieron lugar a gotas grandes en el espacio intercelular, lo que indica una ruptura de las vesículas y la membrana plasmática, adicionalmente se observó una ruptura de las células, representada por espacios intercelulares ocluidos, lo que indica una fuga de parte del protoplasma.

Coradi et al., (2007) evaluaron durante el almacenamiento café natural y despulpado luego de realizar el secado en patio (sol directo) y mecánicamente a 40 °C y 60 °C. Los resultados mostraron que el café secado a 60 °C luego de 90 días de almacenamiento presentó la peor calidad según las evaluaciones físico-químicas y que el café lavado presenta mejor calidad en comparación con el producto secado de forma natural. Henrique et al., (2007) analizaron la lixiviación de potasio, conductividad eléctrica, azúcares totales, prueba de taza durante un periodo de almacenamiento de un año para café secado al sol en terrazas de tierra, piso de concreto y piso de asfalto con dos espesores de capa (fina y gruesa). El secado en capa gruesa es el que más influye en una pérdida de calidad durante el almacenamiento asociado a las terrazas de tierra.

Dussert et al., ( 2006) describe que café almacenado a 20°C luego de realizar un secado lento indujo una disminución significativa en las concentraciones dos grupos de antioxidantes producto del ciclo glutatión-ascorbato, y un aumento en el contenido de ácidos grasos libres producto de oxidación del material lipídico, en contraste para el café almacenado a bajas temperaturas (5°C) se reduce la tasa de oxidación de lípidos y se reduce la tasa de reducción de antioxidantes.

## **1.8. Modelamiento matemático del secado del café**

El secado de alimentos agroalimentarios se reporta desde el año 1957 con estudios realizados en maíz (Hall, 1957), luego Brooker et al., (1973) presentan la importancia y los fundamentos teóricos del proceso de secado. El mecanismo de secado del café es un proceso complejo de transferencia de calor y masa, donde se deben conocer y controlar todas aquellas variables que influyen en el proceso del secado del café, con el

fin de mantener la calidad del producto (Parra et al., 2017; Castoldi & Castoldi, 2013; Rodríguez et al., 2012).

El modelado del proceso de secado de productos agroalimentarios, en especial el de granos se ha realizado utilizando el concepto de secado en capa o lecho fino, donde las revisiones de literatura realizadas por Kukuc et al., (2014) y Erbay et al., (2009) muestran que los modelos utilizados para secado en capa fina son principalmente semiteóricos y empíricos.

Los estudios han demostrado que la dependencia puramente de las prácticas de secado experimentales, sin consideraciones matemáticas de la cinética de secado, puede afectar significativamente la eficiencia de los secadores, aumentar el costo de producción y reducir la calidad del producto secado. Por lo tanto, el uso de modelos matemáticos para estimar la cinética de secado, el comportamiento y la energía necesaria en el secado de productos agrícolas y alimenticios se vuelve indispensable (Onwude et al., 2016).

Las formas simplificadas de los modelos semiteóricos más utilizados se derivan de la segunda ley de Fick y la ley de enfriamiento de Newton. Según Tunde (2011), Los modelos semiteóricos y empíricos han sido deducidos a partir de condiciones experimentales del proceso de secado y brindan información limitada del comportamiento fenomenológico del producto durante el secado. En la tabla 1 se muestran los modelos semiteóricos más usados en el secado de granos.

**Tabla 1-1.** Modelos semiteóricos más utilizados en el secado de granos (Erbay et al, 2009)

<b>Nombre del modelo</b>	<b>Modelo</b>
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Midilli and others model	$MR = a \exp(-kt) + bt$
Demir and others model	$MR = a \exp((-kt)^n) + b$
Thompson	$t = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$
Peleg model	$MR = 1 - t/(a + bt)$



Hasta la fecha de revisión del estado del arte, no se reportan investigaciones donde se implemente o se desarrollen un modelo fenomenológico para secado solar de café. Por lo tanto, a continuación, se citan las investigaciones publicadas para la simulación del proceso de secado del café por convección forzada de aire.

De Almeida et al., (2020) desarrollaron un modelo basado en un sistema de resistencias en serie para describir el proceso de secado del café natural. Encontrando que la resistencia a la salida de agua, independientemente del método del beneficio de fruta del café, es mayor cuando el café se seca con humedades relativas menores en el aire de secado.

Andrade et al., (2019) modelaron matemáticamente las cinéticas de secado para granos inmaduros de café natural (*Coffea arabica* L.). El flujo de aire fue de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  con una temperatura de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y 10%, 17,5% y 32,5% de humedad relativa. El café seco fue almacenado durante seis meses y se tomaron mediciones cada dos meses de conductividad eléctrica, lixiviación de potasio y color. El modelo de Midilli tuvo el mejor ajuste para la cinética de secado del café natural inmaduro y no se observó daño inmediato en la calidad física y fisiológica de los cafés.

Phitakwinai et al., (2019) evaluaron el secado en capa fina para obtener café pergamino de la especie *Coffea arabica* L. El secado se realizó a temperaturas controladas de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  y humedades relativas entre (10 -30%). Se ajustaron nueve modelos de secado de capa delgada (Newton, Page, Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, Henderson y Pabis modificados, exponencial de dos términos, difusión de aproximación y Midilli modificado) a los datos experimentales del café pergamino. Encontraron que el modelo Midilli modificado fue el de mejor ajuste y que se puede utilizar para diseñar el secador óptimo. En este trabajo no se presentan análisis relacionados con aspectos químicos y sensoriales del café.

Larasati et al., (2019) operaron y monitorearon el proceso de secado del café con tecnología Wi-Fi en sistemas híbrido de secado solar (panel solar con cámara de secado) en Indonesia. El sistema de control implementado para el secado solar híbrido permitió registrar una temperatura de  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  en un día soleado sin nubosidad y una temperatura de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  en un clima templado al interior de la cámara de secado. Sugieren que esto beneficia la calidad del café al tener mayor control sobre el proceso de secado solar.

Onwude et al., (2016) en la revisión de modelos usados para describir el secado de producto alimenticios encontró que la velocidad del aire y la humedad relativa eran los factores menos significativos que afectan

la cinética de secado de frutas y verduras, mientras que la temperatura y el grosor fueron los factores que más afectan la cinética de secado de capa fina.

Nilnont et al., (2012) utilizó elementos finitos para la simulación del secado de café por convección forzada de aire. Con los resultados obtenidos se describe la difusión de la humedad y la contracción volumétrica que sufre el grano durante el secado. Asumen el secado en capa fina, con condiciones controladas para la temperatura del aire de secado y la humedad relativa. El coeficiente de difusividad promedio del agua para el grano verde y el café pergamino, están relacionados con las temperaturas de secado y son expresados mediante ecuaciones de tipo Arrhenius.

Reinato et al., (2011) reporta que durante el secado solar la calidad del café en sus propiedades fisicoquímicas depende de los diferentes tipos de superficie (tierra, concreto y asfalto) utilizados y el espesor de la capa de grano. Los resultados obtenidos mostraron que el café pergamino sobre superficies de concreto y asfalto dio la mejor calidad sensorial de la bebida.

Isquierdo et al., (2011) concluye que interrumpir el proceso de secado por convección forzada de aire cuando el contenido de humedad en el grano alcanza un 24% (base húmeda = bh) con periodos de descanso de 2 a 12 días no genera fermentaciones adicionales. Por lo tanto, al terminar el secado del grano con un 11% (bh), se generan menores valores de lixiviación de potasio y conductividad eléctrica, propiedades físicas que permite cuantificar la integridad del sistema de membrana celular de los granos de café. Isquierdo compara que el café sometido a secado continuo sufre mayores daños en la estructura de la membrana, permitiendo que se aceleren los procesos metabólicos en el grano de café afectando la calidad fisicoquímica.

Burmester & Eggers (2010) determinaron para secado por convección forzada de aire los coeficientes de transferencia de calor. Se usaron diferentes velocidades para el aire de secado. Encontraron que el proceso de secado puede ser descrito con las ecuaciones adimensionales conocidas para el flujo por convección forzada que rodea una esfera.

Ciro et al., (2010) implementaron un modelo computacional basado en el concepto de secado de capa fina. Se asumió una geometría esférica de radio equivalente para el grano de café y se realizó un análisis en estado transitorio en dirección radial usando la técnica de volumen de control. El modelo fue desarrollado para simular el proceso de secado de café pergamino. Los resultados obtenidos mostraron que, a pesar de que el valor numérico en magnitud es pequeño para el coeficiente de transferencia de masa (alrededor de  $10^{-7}$  m/s), las predicciones del contenido de humedad fueron sensibles a este valor.

Parra-Coronado et al., (2008) implementaron los modelos de Thompson y de la Universidad del Estado de Michigan (MSU) para realizar simulaciones del proceso de secado mecánico del café. Luego de realizar las validaciones de los modelos, se implementó un modelo que brinda recomendaciones para realizar una adecuada y eficiente operación del secado mecánico para alcanzar en el café un contenido de humedad entre el 10 y 12% base húmeda.

Hernández et al., (2008), proponen un modelo de transferencia de calor y masa con coordenadas esféricas para describir el secado de los granos de café verdes. El modelo describe los perfiles de humedad y temperatura en el interior del grano. Además, el coeficiente de difusividad efectivo promedio para el agua se obtuvo en función de la temperatura y la humedad del grano.

Sfredo et al., (2005) realizaron un análisis para la transferencia de calor y masa que permite determinar la cinética de secado, los coeficientes de transferencia de masa y calor, y el coeficiente de difusividad efectiva de la humedad. Él estudió evaluó el efecto de incorporar la vibración al lecho de café, lo cual permite disminuir el tiempo de secado a temperaturas de 45°C.

Varadharaju et al., (2001) desarrollaron dos modelos semi-teóricos de capa fina para el proceso de secado del grano de café sin despulpar. El coeficiente de difusión se determinó usando los datos de humedad de equilibrio a partir de una función de tipo Arrhenius. El estudio mostró que la calidad del café evaluada con una prueba de taza (intensidad, acidez y sabor) no presento alteraciones en el rango de temperatura estudiado.

Pérez y Ciro (2001) realizaron una modificación al modelo Bakker-Arkema para simular el proceso de secado del café en lecho profundo utilizando una ecuación de capa fina adaptado para café pergamino. El modelo predijo la pérdida de humedad (base húmeda) con una desviación máxima del 3%, con intervalos de 3 o 6 horas para el cambio de la dirección del flujo para el aire de secado a 55°C. Fueron necesarias veintisiete horas para alcanzar un nivel de humedad del 11% (bh) utilizando un flujo de aire de  $15,24 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Dado el contexto anterior es necesario para el proceso de secado solar del café implementar modelos de secado que describan la pérdida de humedad del grano en función de las condiciones variables del proceso.

## 1.9. Referencias capítulo 1

Alcázar, A., Fernández, P., Martín, M., Pablos, F., & González. (2003). Ion chromatographic determination of some organic acids, chloride and phosphate in coffee and tea. *Talanta*, 61(2), 95–101.

Andrade, Ednilton T. De, Isabella A. Lemos, Camila De A. Dias, Paula De A. Rios, and Flavio M. Borém. 2019. “Mathematical modelling and immediate and latent quality of natural immature coffee under different drying conditions.” *Engenharia Agrícola* 39(5):630–38.

Aristizábal C y Duque H. (2005). Caracterización del proceso de beneficio de café en cinco departamentos cafeteros de Colombia. *Cenicafé*, 56(4); 299 – 318.

Arnold, U., Ludwig, E., Kiihn, R., & Mschwitzer, U. (1994). Original paper Analysis of free amino acids in green coffee beans. *Lebensm Unters Forsch*, 199, 22–25.

ASIC. 2014. (11 de septiembre de 2014). 25 conferencia sobre ciencia y café. Armenia, Quindio.

Avelino, J., Barboza, B., Araya, J. C., Fonseca, C., Davrieux, F., Guyot, B., & Cilas, C. (2005). Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitudeterroirs of Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1869–1876.

Bacon, C. “Confronting the Coffee Crisis: Can Fair Trade, Organic, and Specialty Coffees Reduce Small-Scale Farmer Vulnerability in Northern Nicaragua?” *World Development* 33,3(2005):497–511.

Banco de la República - Colombia. (2018). BANREP. Recuperado el 20 junio de 2018, de PIB: <http://www.banrep.gov.co/>

Belessiotis V and Delyannis E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85; 1665–1691.

Belitz, D., Grosch, W., and Schieberle, P. (2009). *Food Chem.*, ed. H.-D. Belitz, W. Grosch and P. Schieberle, Springer, Berlin, 4th edn, 2009, vol. 21, pp. 938–951.

Bertrand, B., Boulanger, R., Dussert, S., Ribeyre, F., Berthiot, L., Descroix, F., & Joët, T. (2012). Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. *Food Chemistry*, 135(4), 2575–83.

Borém, F. M., Marques, E. R., & Alves, E. (2008). Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. *Biosystems Engineering*, 99(1), 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.027>

Borém, Flávio Meira, de Oliveira, P. D., Isquierdo, E. P., Giomo, G. da S., Saath, R., & Cardoso, R. A. (2013). Scanning electron microscopy of coffee beans subjected to different forms of processing and drying. *Coffee Science*, 8(2), 227–237. <https://doi.org/10.25186/cs.v8i2.420>

Borém, Flávio Meira, Isquierdo, E. P., Oliveira, P. D., Ribeiro, F. C., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. da S. (2014). Effect of intermittent drying and storage on parchment coffee quality. *Bioscience Journal*, 30(5), 609–616.

Botero, J., & Betancur, W. (2012). Buenas prácticas agrícolas en el beneficio del café en Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Agrónomo. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 85 p.

Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F.W. & Hall C. W. (1973). *Drying Cereal Grain*. The AVI Publishing Company. Westport, Connecticut. USA. 265 p.

Burmester, K., Eggers, R. (2010). Heat and mass transfer during the coffee drying process. *Journal of Food Engineering*, 99, 430–436.

Cannon, R. J., Trinnaman, L., Grainger, B., & Trail, A. (2010). The key odorants of coffee from various geographical locations. In N. C. Da Costa, & R. J. Cannon (Eds.), *Flavors in noncarbonated beverages*, Vol. 1036. (pp. 77–90): American Chemical Society.

Cano, C. G., Vallejo, C., Caicedo, E., Amador, J. S., & Tique, E. Y. (2012). *Borradores de Economía: El mercado mundial del café y su impacto en Colombia*. Bogotá - Colombia. 57 p.

Caporaso, N., Whitworth, M., Cui, C., & Fisk, I. (Junio de 2018). Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS. *Food Research International*, 108, 628-640.

Castillo ZJ. (1990). Mejoramiento genético del café en Colombia. (pp. 46 - 53). Presentado en 50 años de Cenicafé 1938-1958. Conferencias conmemorativas., Chinchiná, Cenicafé: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ.

Castoldi, G., & Castoldi, G. (2013). Pré-processamento e secagem de café. *Revista Varia Scientia Agrárias*, 3(2), 175–193.

Cenicafé. Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2004). Beneficio del café II: Secado del café Pergamino. Recuperado de: [http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla\\_21.\\_Secado\\_del\\_cafe.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf)

Chacón, E. (2001). Evaluación de los sistemas tradicional y ecológico de beneficio húmedo de café. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Zamorano, Honduras. 52p.

Cheng, K., Dong, W., Long, Y., Zhao, J., Hu, R., Zhang, Y., & Zhu, K. (2019). Evaluation of the impact of different drying methods on the phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro digestion of green coffee beans. *Food Science and Nutrition*, 7(3), 1084–1095. <https://doi.org/10.1002/fsn3.948>

Chung, T.J. (2010). *Computational fluid dynamics*. Cambridge University Press. New York, USA. 1058 p.

Ciro, H.J., Abud L. C. & Perez L.R. (2010). Numerical simulation of thin layer coffee drying by control volumes. *Dyna*; 77, (163): 270-278.

Cruz, D., Lopez, E., Pascual, L. F., & Battaglia, M. (2010). Guía técnica de construcción y funcionamiento de secadoras solares tipo domo. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 104(3-4), 125–138.

Damatta, F., Avila, R., & Cardoso, A. (Marzo de 2018). Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A Review. *Agricultural and food chemistry*.

De Almeida Dias, C., Tavares de Andrade, E., Àvila Lemos, I., Meira Borém, F., Nogueira Westerich, D., & Claudia Almeida da Silva, A. (2020). Mathematical modeling of dehydration resistance of pericarp tissues and endosperm in fruits of arabic coffee. *Coffee Science*, 15(1957), 1–9. <https://doi.org/10.25186/v15i.1670>

De Paula Lima, J., & Farah, A. (2019). Chapter 23 Caffeine and Minor Methylxanthines in Coffee. In *Coffee: Production, Quality and Chemistry* (pp. 543–564). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782622437-00543>

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, 272(August 2018), 723–731. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.068>

Dong, W., Cheng, K., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Long, Y. (2018). Effect of microwave vacuum drying on the drying characteristics, color, microstructure, and antioxidant activity of green coffee beans. *Molecules*, 23(5). <https://doi.org/10.3390/molecules23051146>

Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, 234, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156>

Dussert, S., Davey, M. W., Laffargue, A., Doulebeau, S., Swennen, R., & Etienne, H. (2006). Oxidative stress, phospholipid loss and lipid hydrolysis during drying and storage of intermediate seeds. *Physiologia Plantarum*, 127(2), 192–204. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00666.x>

Ekechukwu OV. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion and Management*, 40; 593–613.

Erbay Z and Icier F. (2009). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50; 441–464.

Fagan, E. B., Souza, C. H. E., Pereira, N. M. B & Machado, V. J. (2011). Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea* sp) na qualidade da bebida. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 27, n. 5, p. 729-738.

Farah A, Monteiro MC, Calado V, Franca AS and Trugo LC. (2006). Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. *Food Chemistry*, 98; 373-380.

Farah, A. (2012). Coffee constituents. Y.-F. Chu (Ed.), *Coffee: Emerging health effects and disease prevention*, Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 21 –58.

Farah, A., & Donangelo, C. M. (2006). Phenolic compounds in coffee. *Braz. J. Plant Physiol*, 18(1), 23–36.

Farah, A., Monteiro, M. C., Calado, V., Franca, A. S., & Trugo, L. C. (2006). Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. *Food Chemistry*, 98(2), 373–380.

Ferreira, C. (2014). Chapter 11. Microbial Activity during Coffee Fermentation. In R. Schwan & G. Fleet (Eds.), *Cocoa and Coffee Fermentations* (p. 633). CRC Press.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC. (2018). Informe Departamental de la Federación Nacional De Cafeteros. Medellín: Sistema de información cafetera.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC. (2013 a). Cafés especiales: que son. En: [http://www.federaciondefcafeteros.org/particulares/es/nuestro\\_cafe/cafes\\_especiales/que\\_son](http://www.federaciondefcafeteros.org/particulares/es/nuestro_cafe/cafes_especiales/que_son)

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC. (2011). Nuestros cafés especiales. En: [http://www.federaciondefcafeteros.org/clientes/es/nuestra\\_propuesta\\_de\\_valor/portafolio\\_de\\_productos/nuestro\\_cafe\\_especial](http://www.federaciondefcafeteros.org/clientes/es/nuestra_propuesta_de_valor/portafolio_de_productos/nuestro_cafe_especial)

Fonseca, S. F., Rodríguez, J. L. A., Fernández, V. R. F., Enríquez, J. P., & Yen, A. T. (2003). Estudio comparativo del secado solar de café en plazoletas tradicionales y ennegrecidas. *Tecnología Química*, 23(3), 48-54.

Global Coffee Plataform. (2018). Análisis de la equidad de género en el sector de café en Colombia. Bogotá.

Goneli A, Corrêa P, Oliveira G and Afonso P. (2013). Water sorption properties of coffee fruits pulped and green coffee. *LWT - Food Science and Technology*, 50; 386-391.



Gonzalez-Rios, O., Suarez-Quiroz, M. L., Boulanger, R., Barel, M., Guyot, B., Guiraud, J.-P., & Schorr-Galindo, S. (2007). Impact of “ecological” post-harvest processing on the volatile fraction of coffee beans: I. Green coffee. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(3-4), 289–296.

Gonzalez-Rios, O., Suarez-Quiroz, M. L., Boulanger, R., Barel, M., Guyot, B., Guiraud, J.-P., & Schorr-Galindo, S. (2007). Impact of “ecological” post-harvest processing on the volatile fraction of coffee beans: I. Green coffee. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(3-4), 289–296.

Guerrero, J. (2007). Estudio de diagnóstico y diseño de beneficios húmedos de café. IICA Nicaragua - Promecafé.

Gutiérrez, J. M., & Copete, H. (2009). Hacia la Mejora del Secado Mecánico del Café en Colombia. *Revista Tecnológicas*, 23, 109–132.

Haddis, A., & Devi, R. (2008). Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 259–62.

Hall, C. W. 1957. *Drying Farm Crops*. AVI Publishing Company. Westport, Connecticut. USA. 336 p.

Hečimović, I., Belščak-Cvitanović, A., Horžić, D., & Komes, D. (2011). Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting. *Food Chemistry*, 129(3), 991 – 1000.

Hernández W, Ruiz I, Salgado M, Rodríguez G and García M. (2008). Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. *Journal of Food Engineering*, 86; 1–9.

Higdon, J. V., & Frei, B. (2006). Coffee and health: a review of recent human research. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), 101 –23.

Holscher, W., & Steinhart, H. (1995). Aroma Compounds in Green Coffee. *Developments in Food Science*, 37, 785–803.

Hwang, C.-F., Chen, C.-C., & Ho, C.-T. (2012). Contribution of coffee proteins to roasted coffee volatiles in a model system. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(10), 2117–2126.

International Coffee Organization. (2018). <http://www.ico.org/>. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://www.ico.org/>: <http://www.ico.org/>

Isquierdo, E.P. (2011). Qualidade do café desmucilado submetido ao parcelamento da secagem. *Coffee Science, Lavras*, 6(1), 83-90.

Joët, T., Laffargue, A., Descroix, F., Doulebeau, S., Bertrand, B., Kochko, A. De, & Dussert, S. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, 118(3), 693–701.

Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2010). Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees. *Food Chemistry*, 119(2), 500–504. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.048>

Kleinwächter, M., Bytof, G. & Selmar D. (2015). Coffee in health and disease prevention. *Coffee Beans and Processing*. Chapter 9. Academic Press. London, UK. 73 – 81 p.

Kramer, D., Breitenstein, B., Kleinwachter, M., & Selmar, D. (2010). Stress Metabolism in Green Coffee Beans (*Coffea arabica* L.): Expression of Dehydrins and Accumulation of GABA during Drying. *Plant and Cell Physiology*, 51(4), 546–553. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcq019>

Kucuk H, Midilli A, Kilic A and Dincer I. (2014). A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Drying Technology*, 32; 757–773.

Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chemistry*, 291(April), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>

Larasati, D. A., Kalandro, G. D., Fibriani, I., Hadi, W., Herdiyanto, D. W., & Sarwono, C. S. (2019). Optimization of Coffee Bean Drying Using Hybrid Solar Systems and Wi-Fi Data Communication. *Proceedings of 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, ICECOS 2018*, 17, 29–32. <https://doi.org/10.1109/ICECOS.2018.8605196>

Lee K.G. & Shibamoto T. (2002). Toxicology and antioxidant activities of non-enzymatic browning reaction products: review. *Food Rev Inter* ;18: 151–75 p.

Livramento, K. G. do, Borém, F. M., José, A. C., Santos, A. V., Livramento, D. E. do, Alves, J. D., & Paiva, L. V. (2017). Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process. *Food Chemistry*, 221, 1874–1882. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.069>

Lyman D, Benck R and Merle S. (2011). Difference Spectroscopy in the Analysis of the Effects of Coffee Cherry Processing Variables on the Flavor of Brewed Coffee. *International Journal of Spectroscopy*, 5p.

Marín, C., & Puerta, G. I. (2008). Contenido de ácidos clorogénicos en granos de *coffea arabica* y *c. canephora* , según el desarrollo del fruto. *Cenicafé*, 59(1), 7–28.

Matei, M. F., Seung-Hun, L., & Kuhnert, N. (2019). Chapter 24 Chlorogenic Acids. In *Coffee: Production, Quality and Chemistry* (pp. 565–583). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782622437-00565>

Mendonça, J. C. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2007). A comparative evaluation of methodologies for water content determination in green coffee. *LWT - Food Science and Technology*, 40(7), 1300–1303.

Montoya-ortiz, G., Cristancho-ardila, M., & Moncada-botero, M. (2006). Análisis de secuencias de genes de coffee arabica var. caturra. *Cenicafé*, 79-87.

Murkovic, M., & Derler, K. (2006). Analysis of amino acids and carbohydrates in green coffee. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 69(1 -2), 25–32.

Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58.

Nilnont W, Thepa S, Janjai S, Kasayapananda, Thamrongmasb C Bala BK. (2012) Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying *Food and Bioproducts Processing* 90 (2), 341–350.

Oliveros C, Ramirez C y Roa G. (2002). Construya el secador solar parabólico. Cenicafé. Avances Técnicos 305. 8p

Oliveros C, Ramirez C, Sanz J y Peñuela A. (2006) Secador solar de túnel para café pergamino. Cenicafé. Avance Técnico 353. 8p.

Oliveros, C. E., López, L., Buitrago, C. M., & Moreno, E. L. (2010). Determinación del Contenido de Humedad del Café Durante el Secado en Silos. Cenicafé, 61(2), 108–118.

Oliveros, C. E., Peñuela, A., & Jurado, J. M. (2009). Controle la humedad del café en el secado solar, utilizando el método gravimet. Avances Técnicos, Cenicafé, 387.

Oliveros-tascón, C. E., Sanz, J. R., Ramírez, C. A., & Peñuela, A. E. (2009). Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. Avances Técnicos, Cenicafé, 380(14).

Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599–618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>

Prada, Álvaro, Cynthia P. Vela, Gabriela Bardález, and Jorge Saavedra. 2019. “Efectividad de Un Proceso de Secado de Café Usando Secadores Solares Con Sistema de Flujo de Aire Continúo Impulsado Por Energía Fotovoltaica, En La Región San Martín, Perú.” *Información Tecnológica* 30(6):85–92.

Parra-Coronado, Alfonso, Roa-Mejía, Gonzalo, Oliveros-Tascón, Carlos E, Sanz-Uribe, Juan R. 2017. *Optimización Operacional de Secadores Mecánicos Para Café Pergamino*. edited by C. E. Cenicafé.

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (2008b). SECAFÉ Parte I: modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(4), 415–427. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400013>

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (2008a). SECAFÉ Part II: Recommendations for the efficient operation of mechanical dryers for parchment coffee. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(4), 428–434. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400014>

Pérez-Alegría, L. R., & Ciro-Velasquez, H. J. (2001). Mathematical simulation of parchment coffee drying in a deep bed with airflow reversal. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 44(5), 1229–1234. <https://doi.org/10.13031/2013.6415>

Phitakwinai, S., Thepa, S., & Nilnont, W. (2019). Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science and Nutrition*, 7(9), 2921–2931. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1144>

Piccino S, Boulanger R, Descroix F and Cheong A. (2014). Aromatic composition and potent odorants of the “specialty coffee” brew “Bourbon Pointu” correlated to its three trade classifications. *Food Research International*, 61; 264–271.

Pirasteh G, Saidur R, Rahman S.M.A and Rahim N.A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31; 133–148.

Plataforma de Comercio Sostenible. Solidaridad. (2016). Comercio Sostenible. Recuperado en mayo de 2018, de <http://comerciosostenible.org/es>

Prakash O and Kumar A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29; 905–910.

Preedy, V. R. (2014). *Processing and Impact on Antioxidants in Beverages*. Copyright, Elsevier Inc. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, 320 p.

Puerta, G. I. (2011). Composición química de una taza de café. *Avances Técnicos, Cenicafé*, 414.

Ramírez A, Salgado M, Rodríguez G, García M, Cherblanc F and Bénét J. (2013). Water transport in parchment and endosperm of coffee bean. *Journal of Food Engineering*, 114; 375–383.

Rattanamechaiskul, C., & Junka, N. (2020). Modeling of fragment formation of parchment coffee beans for rapid heat and mass transfer during fluidization drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, April, 1–9. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14555>

Reh, C., Gerber, a, Prodolliet, J., & Vuataz, G. (2006). Water content determination in green coffee – Method comparison to study specificity and accuracy. *Food Chemistry*, 96(3), 423–430.

Roa, G., Oliveros, C. E., Alvarez, J., Ramírez, C. A., Sanz, J. R., Álvarez, J. R., & Rodríguez, N. (1999). Beneficio ecológico del café. *Cenicafé*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná (Colombia), 1 -273.

Roa-mejía, G., Oliveros-tascón, C. E., & Ramírez-g, C. A. (2000). Utilice la Energía Solar para Secar Correctamente el Café. *Cenicafé Avances Técnicos* 281, 281, 1–4.

Roa, G., (2004). “El secado solar y mecánico del café pergamino en Colombia” Reunión Nacional de Especialistas en Beneficio de Café para Unificación de Criterios sobre el Beneficio Ecológico. *Cenicafé*, Chinchiná, noviembre 23-26.

Rodriguez, Y. F. B., Guzman, N. G., & Hernandez, J. G. (2020). Effect of the postharvest processing method on the biochemical composition and sensory analysis of arabica coffee. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 177–183. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p177-183/2020>

Rodrigues, C. H., Meira, F., Angelo, M., & Carvalho, E. (2012). Qualidade do Café Secado em Terreiros com Difertes Pavimentações e Espessuras de Camada. *Coffee Science*, Lavras, 7(3), 223–237.

Rodrigues, C. I., Maia, R., & Máguas, C. (2010). Comparing total Nitrogen and Crude Protein content of Green Coffee Beans from Different Geographical Origins. *Coffee Science*, Lavras, 5(3), 197–205.

Selmar D, Bytof G, Kleinwächter M. Metabolic responses of coffee beans during processing and their impact on coffee flavour. In: Schwan RF, Fleet GH, editors. *Cocoa and coffee fermentations. Fermented foods and beverages*. CRC Press; 2014, in press.

Scholz, M. B. dos S., Prudencio, S. H., Kitzberger, C. S. G., & Silva, R. S. dos S. F. da. (2019). Physico-chemical characteristics and sensory attributes of coffee beans submitted to two post-harvest processes. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(1), 831–839. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9995-x>

Sfredo M, Finzer J and Limaverde J. (2005). Heat and mass transfer in coffee fruits drying. *Journal of Food Engineering*, 70; 15–25.

Sharma A, Chen CR and Lan NV. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13; 1185-1210.

Shibamoto, T. (2015). Coffee in health and disease prevention. Volatile Chemicals from Thermal Degradation of Less Volatile Coffee Components. Chapter 14. Academic Press. London, UK. 129 – 135 p.

Simões, J., Moreira, A., Passos, C., Nunes, F. M., Domingues, M. R., & Coimbra, M. (2019). CHAPTER 19. Polysaccharides and Other Carbohydrates: Production, Quality and Chemistry. In *Coffee: Production, Quality and Chemistry* (pp. 445–457). <https://doi.org/10.1039/9781782622437-00445>

Speer, K., & Kölling-speer, I. (2006). The lipid fraction of the coffee bean. *Braz. J. Plant Physiol*, 18(1965), 201 –216.

Specialty Coffee Association. (2017). <http://scaa.org/index.php?goto=home>. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://scaa.org/index.php?goto=home>: <http://scaa.org/index.php?goto=home>

Suherman, Suherman, Hasri Widuri, Shelyn Patricia, Evan Eduard Susanto, and Raafi Jaya Sutrisna. 2020. “Energy Analysis of a Hybrid Solar Dryer for Drying Coffee Beans.” *International Journal of Renewable Energy Development* 9(1):131–39.

Sunarharum, W. B., Williams, D. J., & Smyth, H. E. (2014). Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. *Food Research International*, 62, 315–325.

Suzihaque, M. U. H., and Robert Driscoll. 2016. “Effects of Solar Radiation, Buoyancy of Air Flow and Optimization Study of Coffee Drying in a Heat Recovery Dryer.” *Procedia Engineering* 148:812–22.

Tai, E.-S., Hsieh, P.-C., & Sheu, S.-C. (2014). Effect of Polygalacturonase and Feruloyl Esterase from *Aspergillus tubingensis* on Demucilage and Quality of Coffee Beans. *Process Biochemistry*.

Teixiera, A., Brando, C., Thomaziello, R., and Teixeira, R. *Espresso Coffee: The Science of Quality*, ed. A. Illy and R. Viani, Elsevier Academic Press, San Diego, 2nd edn, 2005, pp. 91–96.

Tello, J., Viguera, M., & Calvo, L. (2011). Extraction of caffeine from Robusta coffee (*Coffea canephora* var. Robusta) husks using supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 59, 53–60.

Toci, A., & Boldrin, M. (2017). Coffee beverages and their aroma compounds. En *Natural and artificial flavoring agents and food dyes* (págs. 397-425). London: Academic press.

Togo M, T., Norbert, L., & Deacue, F. (Junio de 2018). What explains specialty coffee quality scores and prices: A case study from the cup of excellence program. *Journal of Agricultura and Applied Economics*, 1 - 20.

Tsegaye, B., Mohammed, A., and Getachew, E. (2014). Impact of Sun Drying Methods and Layer Thickness on the Quality of Highland Arabica Coffee Varieties at Limmu, Southwestern Ethiopia. *Journal of Horticulture*, 01(03), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000117>

Tripathy P and Kumar S. (2009). A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: Application to solar drying. *Journal of Food Engineering*, 90; 212–218.

Tunde-Akintunde T.Y. (2011). Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy*, 36: 2139-2145

Valencia, F. F. (2007). Cafés especiales. In Editorial Blanecolor Ltda (Ed.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (primera ed., p. 295).

Varadharaju, N., Karunanidhi, C. & Kailappan R. (2001). Coffee cherry drying: a two-layer model. *Drying Technology*, 19(3&4): 709–715.

VijayaVenkataRaman S, Iniyam S and Goic R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16; 2652–2670.

Wagemaker, T. A. L., Carvalho, C. R. L., Maia, N. B., Baggio, S. R., & Guerreiro Filho, O. (2011). Sun protection factor, content and composition of lipid fraction of green coffee beans. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 469–473.



Wei F, Furihata K, Koda M, Hu F, Kato R, Miyakawa T and Tanokura M. (2012). <sup>13</sup>C NMR-Based Metabolomics for the Classification of Green Coffee Beans According to Variety and Origin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60; 10118 –10125.

Wei, F., & Tanokura, M. (2015). Chapter 17 - Organic Compounds in Green Coffee Beans. In V. R. B. T.-C. in H. and D. P. Preedy (Ed.), *Coffee: Production, Quality and Chemistry* (pp. 149–162). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00017-6>

Worku, M., de Meulenaer, B., Duchateau, L., & Boeckx, P. (2018). Effect of altitude on biochemical composition and quality of green arabica coffee beans can be affected by shade and postharvest processing method. *Food Research International*, 105(March 2017), 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.016>

Zambrano D, López U, Rodríguez V y Ramírez C. (2006). Paseras solares de bajo costo para secar café. *Avances Tecnicos* 345. 12p.

Zamora, A. (2017). Publican la primera secuencia genómica de la variedad comercial de café más cultivada en el mundo. Obtenido de <http://fundacion-antama.org>.

## II. Capítulo 2. Efecto del secado en la composición química y calidad sensorial del café variedad Castillo® y Caturra

### Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes procesos de secado sobre algunos compuestos químicos de interés en el café y la calidad sensorial en taza para la especie *C. arabica* variedades Caturra y Castillo®. Se realizó un diseño factorial por bloques con variables independientes: 6 niveles para el proceso de secado (secado mecánico: 40°C y 50°C con caudal de aire de 60 y 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps; secado con exposición al sol directo y secado solar en marquesina) y 2 niveles para variedad del café (Caturra y Castillo®). Los experimentos de secado fueron realizados en 3 fincas con dos repeticiones. Pasados dos meses de almacenamiento se midió en el café verde: perfil de ácidos grasos, carbohidratos, ácidos clorogénicos y cafeína. El perfil sensorial fue realizado a los 2 y 4 meses de almacenamiento según el protocolo SCA con un panel de 5 jueces Q Grader. Con el secado por convección forzada de aire a 50°C y 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps se obtuvo en promedio un 25% y 34% mayor concentración de ácidos grasos y azúcares respectivamente comparado con los secados solares, donde el puntaje SCA fue de 84,79 ± 0,27 comparado con los 82,92 ± 0,10 de los secados solares. Los resultados hallados muestran que los procesos de secado afectan la composición química y el perfil sensorial de la bebida del café independientemente de las variedades estudiadas, esto indica que con el secado mecánico se puede obtener café con mayor concentración de ácidos grasos y azúcares, con mejores atributos sensoriales en la bebida del café.

**Palabras claves:** Secado mecánico, secado solar, compuestos químicos y perfil sensorial.

### Abstract

This study was carried out with the aim of evaluating the effect of different drying processes on chemical compounds and the sensory quality for the species *C. arabica* varieties Caturra and Castillo®. A factorial design by blocks was carried out with independent variables: drying method and coffee variety. For the drying method, there were 6 levels: drying temperature (40 and 50°C) and airflow (60 and 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup> cps) for mechanical drying in a three-mesh silo with capacity for 5 @ of coffee; direct sun drying and

marquesina solar drying. Two levels for the coffee varieties: Caturra and Castillo® were considered. After two months of storage, the variables measured in the green coffee at the end of the drying process were: profile of fatty acids, carbohydrates, caffeine, chlorogenic acids, color, and drying time. The sensory evaluation was performed following the SCA protocol by a panel of 5 Q Grader judges, who rated each sensory attribute on a scale of 0 to 10 points to obtain an overall score for each of the samples. With drying by forced air convection at 50 °C and 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, higher concentrations of fatty acids, sugars, and higher sensory scores (84.79 ± 0.27) were found compared to the other drying processes, contrasting with solar drying that reported the lower concentrations of organic compounds and lower sensory score (82.92 ± 0.10) for the coffee varieties analyzed. The results showed that the drying processes affect the chemical composition and the sensory profile of the coffee drink independent of the Caturra and Castillo® varieties of coffee.

**Keywords:** Mechanical drying, solar drying, chemical compounds and sensory profile.

## 2.1. Introducción

Según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) [1], en el año 2019 el sector cafetero colombiano produjo 13.9 millones de sacos de 60 kg, ubicando a Colombia como el mayor productor de *C. arabica* suave lavado del mundo. El café es segundo producto comercializado en el mundo luego del petróleo [2]. En Colombia dependen económicamente del cultivo del café 556.000 familias, de las cuales el 95% cultivan entre 1 a 5 ha de café. El café suave lavado colombiano es el resultado del proceso de beneficio por vía húmeda. Las etapas del beneficio por vía húmeda luego de que las cerezas de café son recolectadas son: despulpado, remoción del mucilago (fermentación), lavado y secado [3], [4]. Se sabe que el beneficio húmedo del café está ligado a la calidad final de la bebida del café, una de las más consumidas en el mundo [5].

El secado del café es la etapa final del beneficio húmedo del café, es la etapa donde concluyen los efectos de las anteriores etapas del beneficio. El secado del café se realiza con el fin de reducir la humedad del grano, para facilitar su almacenamiento, evitando la proliferación de microorganismos y facilitar su comercialización y transformación agroindustrial [6], [7].

El secado al sol del café es usado por el 90% de los productores de café en Colombia, ya que el secado al sol se recomienda para fincas con una producción anual promedio de 42 sacos de 60 kg de café, esto ligado al bajo costo de operación comparado con el secado mecánico [8], [9]. Una desventaja del secado solar se

relaciona con el tiempo que dura el proceso de secado del café, ya que en las zonas productoras de café el tiempo de cosecha se caracteriza por tener precipitaciones de lluvias abundantes, alta nubosidad y pocas horas de brillo solar, condiciones ambientales que no son favorables para realizar el secado del café, generando largos periodos de secado que pueden superar hasta los 15 días [10].

El secado mecánico en Colombia es utilizado por productores de café con área mayor a 10 ha, donde las condiciones ambientales y los requerimientos de espacio para realizar el secado solar no son favorables. Cerca del 70% del café que produce Colombia es secado por convección forzada de aire, donde el aire es calentado en intercambiadores de calor por la combustión de carbón, cascarilla de café o gas propano entre otros [9], [10]. El control del proceso de secado del café es una ventaja del secado mecánico y esto puede estar ligado a la calidad final de la bebida del café.

La materia seca de los granos de café está constituida por minerales y sustancias orgánicas como: carbohidratos, lípidos, proteínas, alcaloides, ácidos carboxílicos, ácidos fenólicos y por compuestos volátiles, que son importantes en la formación del sabor y aroma de la bebida del café [11]. Varias investigaciones han logrado caracterizar el café verde respecto a su contenido de carbohidratos [12]–[15], ácidos grasos [16]–[20], proteínas y aminoácidos [21]–[23], alcaloides[2], [24]–[26] y ácidos clorogénicos [7], [27], [28]; con relación a las variedades de café, procesos de beneficio y variables ambientales asociadas al cultivo del café.

Dong et al. (2017) [29] para café variedad robusta resalta el efecto del secado por liofilización, bomba de calor y secado con aire caliente en la preservación de biocompuestos al final del secado comparado con el secado solar. Similarmente, Kulapichitr et al. (2019) [30] para café variedad arabica reporta el efecto de diferentes condiciones de secado con bomba de calor, secado en bandejas con aire caliente y secado solar; encontrando que los contenidos de aminoácidos cambiaron dependiendo del proceso de secado y que el contenido de sacarosa fue mayor en el secado por bomba de calor y secado de bandejas comparado con el secado solar. El resultado final de la calidad de la bebida del café es el resultado de la combinación de diferentes factores como: la variedad, el suelo, el clima, las prácticas de producción, las prácticas de cosecha y poscosecha, la torrefacción, entre otras [31].

El efecto de los diferentes métodos de secado sobre la composición química del café verde y como afecta el perfil organoléptico de la bebida del café, sigue siendo un tema significativo de interés en la industria del café; por lo cual este estudio tuvo como objetivo evaluar sistemas tradicionales de secado de café (secado

mecánico y secado solar) con relación a sus efectos sobre la composición química y calidad en taza para las variedades de café Caturra y Castillo®.

## 2.2. Materiales y métodos

**Experimentación y material vegetal.** La estrategia experimental se basó en pruebas de secado realizadas en la finca (figura 2-1) mediante (a) convección forzada de aire caliente en equipo semi-industrial, (b) al sol directo en piso de concreto y (c) marquesina. Los experimentos se realizaron en la finca Vuelta Bonita (5°53'49''N, 75°57'56''W) del municipio de Ciudad Bolívar, finca Santa Isabel (5°52'09''N, 75°40'06''W) y finca Villa Sol (5°54'04.4''N, 75°40'16.4''W) del municipio de Fredonia, ambos municipios del departamento de Antioquía – Colombia.



**Figura 2-1.** Procesos de secado realizados en la finca: (a) Secado mecánico, (b) sol directo y (c) marquesina.

Las cerezas del café de las variedades Caturra y Castillo® fueron recolectadas de árboles sembrados a una altura en promedio de 1900 msnm. Se recolectaron 800 kg de café cereza de cada variedad Caturra y Castillo®, las cerezas recolectadas se depositaron en tanques con agua limpia para separar por flotación impurezas; granos verdes, brocados y vanos. El porcentaje de cerezas verdes fue menor del 2% en el café seleccionado por flotación, enseguida el café fue despulpado para seguir a la etapa de fermentación. El tiempo de fermentación se controló con el método Fermaestro [32]. Al terminar la fermentación el café se lavó con agua limpia para retirar restos de mucílago y granos vanos. El café lavado y escurrido se repartió en 128 kg para los procesos de secado mecánico (32 kg x 4 Procesos - silo de tres mallas), 15 kg al sol directo y 15 kg en marquesina.

El secado finalizó cuando los granos de café alcanzaron en promedio una humedad del 11% base húmeda. Luego las muestras de café pergamino seco se depositaron en bolsas multicapas laminadas (con barrera al

oxígeno, vapor de agua y luz) y fueron transportadas para su almacenamiento a las instalaciones de la Estación Agraria Paysandú (6°15'34''N, 75°30'20''W) de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín en condiciones ambientales promedio de  $15 \pm 1^\circ\text{C}$  y  $75 \pm 5\%$  HR por cuatro meses.

**Diseño experimental.** Se realizó un diseño experimental factorial en bloques. Las variables independientes (Factores) se muestran en la Tabla 2-1. Se realizaron 12 experimentos ejecutados en dos tiempos de experimentación para las tres fincas (bloque), generando en total 72 unidades experimentales.

**Tabla 2-1.** Variables independientes. Diseño experimental para los procesos de secado

Bloque	Factores	Niveles
Vuelta Bonita Santa Isabel Villa Sol	Proceso de secado	P1: Temperatura $40^\circ\text{C}$ – Flujo de aire $60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$
		P2: Temperatura $40^\circ\text{C}$ – Flujo de aire $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$
		P3: Temperatura $50^\circ\text{C}$ – Flujo de aire $60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$
		P4: Temperatura $50^\circ\text{C}$ – Flujo de aire $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$
		P5: Solar – Sol Directo en piso de concreto
		P6: Solar - Marquesina
	Variedad	V1: Caturra V2: Castillo®

**Secado Mecánico.** Se utilizaron cuatro secadoras de capa estática con capacidad de 5 arrobas marca JM-Estrada, las cuales se cargaron con la misma cantidad de café y se operaron simultáneamente con el fin de tener un registro de los tiempos de secado y contenido de humedad. El porcentaje de humedad de los granos de café durante el secado mecánico se determinó utilizando un medidor de humedad para granos “Grain moisture tester PM 410” tomando muestras de café a 5, 10, 15 y 20 cm medidos desde la superficie del lecho conformado de café. Para calentar el aire de secado se utilizó combustión directa con gas propano regulando la potencia de la llama de para garantizar las temperaturas de 40 y  $50^\circ\text{C}$ . Para alcanzar un caudal de aire constante durante el proceso de secado se utilizó la ecuación 1, ecuación semiempírica obtenida por Oliveros y Roa (1986) citado por Parra et. al (2017) [33].

$$Q/A = (9,523 - 0,0476 M) \left( \Delta p/h \right)^{0,676} \quad (1)$$

Dónde:

$Q$ : Caudal de aire que pasa a través de una capa de café, en  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

$A$ : Área del secador en  $\text{m}^2$ .

$M$ : Humedad del grano, en porcentaje base húmeda.

$\Delta p$ : Pérdida de presión, en cm de agua.

$h$ : Altura de la capa, en m.

La caída de presión generada por las diferentes capas de café fue medida utilizando un manómetro digital TSI AXD560 ALNOR con tubo de Pitot. Para regular la velocidad de giro del ventilador se utilizó un variador de frecuencia (Yaskawa A1000), con el objetivo de tener control sobre la velocidad del aire hasta obtener la caída presión con la cual se alcanzaron caudales de aire de 100 y 60  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$  cps.

**Secado solar.** El café se expuso a secado al sol directo y en marquesina. Los controles realizados en el secado solar fueron:

- El café se depositó y extendió sobre un costal de fique en piso de concreto y en el piso de la marquesina inmediatamente después del lavado y escurrido.
- La capa de café no superó los 2 cm.
- El café se removió diez veces al día durante los dos primeros días de secado, luego cuatro veces al día hasta que alcanzó un rango de humedad del 10% al 12% en base húmeda.
- En las noches el café se protegió para evitar rehumedecimiento por el incremento de la humedad relativa del ambiente.
- El porcentaje de humedad del café fue determinado utilizando un medidor de humedad para granos “Grain moisture tester PM 410”.

**Composición química.** Transcurridos dos meses de almacenamiento del café pergamino seco, el café fue trillado y luego molido en un molino criogénico. El café verde molido fue almacenado a  $-40^\circ\text{C}$  en ultracongelación mientras se realizaban los diferentes análisis químicos. Cada muestra de café se analizó por triplicado.

- **Perfil de ácidos grasos.** La determinación de ácidos grasos se realizó adaptando la metodología propuesta por Bertrand et al. (2008) [34]. Para la identificación y cuantificación de los ácidos grasos se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a masas (GCMS-QP2010 ultra - Shimadzu) y un kit de estándares de ácidos grasos para comparar los cromatogramas y los tiempos de retención de las muestras. Las condiciones cromatográficas empleadas fueron: Inyector AOC-20i-S. volumen de inyección  $1\mu\text{L}$ . solvente Diclorometano. GC. temperatura del inyector  $225^\circ\text{C}$ . modo de inyección Split. columna DB-WAX (60 m. 0.320 mm. 0.25  $\mu\text{m}$ ). flujo de columna 1.2 ml/min. división Split 20:1. horno  $100^\circ\text{C} - 4\text{min}$ .  $3^\circ\text{C}/\text{min} - 240^\circ\text{C} - 10\text{min}$ . MS. temperatura de la fuente  $250^\circ\text{C}$ . temperatura de la interface  $250^\circ\text{C}$ . tiempo 0.3 s. modo Scan (35 – 800 m/z).

- **Carbohidratos.** La cuantificación se realizó adaptando el método de extracción descrito por Mullin y Emmons (1997) [35]. Donde 3 g de café verde previamente molido se mezclaron con 100 mL de agua Milli-Q a 90 °C en un erlenmeyer. La mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente. se vortizó y luego del reposo se filtró por gravedad. El filtrado se aforó a un volumen de 100 mL; seguidamente. una alícuota de 2.5 mL se llevó a un balón volumétrico de 10 mL. aforando con acetonitrilo grado HPLC. La mezcla final se filtró usando un filtro de nylon de 0.45 µm para analizar el contenido de azúcares mediante HPLC-RID. Los reactivos utilizados fueron estándares de sacarosa, glucosa y frutosa (Sigma Aldrich) y acetonitrilo (Merck). La columna Zorbax NH2 analytical (4.6 x 150 mm. 5- Micron. Agilent) se utilizó para la separar la sacarosa a temperatura ambiente. La separación cromatográfica se realizó con una fase móvil de elución isocrática de 75 % de acetonitrilo y 25% de agua. El flujo se ajustó a 1 mL/min. el volumen inyectado fue de 10 µL y el tiempo total de corrido de 30 min [36].
- **Ácidos clorogénicos.** La cuantificación de los ácidos clorogénicos comprendió cuatro etapas: extracción, purificación, separación y cuantificación de los diferentes compuestos por cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC. La metodología utilizada para la extracción y purificación fue tomada según la norma “DIN 10767 (1992) [37]. Para la identificación de los ácidos se empleó cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC – Shimadzu 20A), columna Zorbax Eclipse Plus C18 (4,6 x 150 mm 5-Micron), modo gradiente solvente A (1000 ml H<sub>2</sub>O Milli-Q + 10 ml H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> al 85% de pureza), solvente B (acetonitrilo grado HPLC), flujo de 1 ml/min, detector UV (Longitud de onda 324 nm). Para la cuantificación de los ácidos se emplearon estándares de ácido caféico, cumárico, ferúlico y sinápico con los cuales se construyó la curva de calibración.
- **Cafeína.** Se determino según la NTC-ISO 20481 [38] . Para la identificación de la cafeína en la mezcla de café se comparó el tiempo de retención y el peso molecular con el estándar del compuesto (Cafeína anhidro puro). Se empleó cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC – Shimadzu 20A), columna Zorbax Eclipse Plus C18 con guarda columna C18, solvente fase móvil MeOH al 24%, modo Isocrático, flujo 1 ml/min, detector UV a 272 nm, volumen de inyección 10 µl, temperatura de columna 40 °C, tiempo corrido 15 min, tiempo de retención Cafeína 4,443 min.

**Análisis sensorial.** Para el análisis sensorial, las muestras fueron codificadas con números aleatorios de cuatro dígitos para evitar sesgos y errores por parte de los jueces. El panel sensorial estuvo compuesto por un grupo de 5 jueces con certificación “*Q Grader*” que evaluaron el café de acuerdo con las siguientes características: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad de taza, taza



limpia, dulzor y puntaje global. Los diez atributos anteriores se calificaron en una escala de cero a diez puntos, dichos puntajes se sumaron al final para obtener un puntaje SCA por juez de cada una de las muestras, según protocolo SCA [39]. El análisis sensorial se realizó a los dos y cuatro meses de almacenamiento del café.

**Análisis estadístico.** Se realizó un análisis de varianza (ANAVA) para los compuestos químicos medidos. Se calcularon los valores medios y se comprobado mediante una prueba LDS Fisher ( $p < 0,05$ ). El mapeo de los descriptores sensoriales, compuestos químicos, tiempo de secado y su correlación con los procesos de secado se llevó a cabo utilizando un análisis factorial de datos mixtos (AFDM) utilizando el paquete FactoMineR en lenguaje R [40]. Para los análisis se utilizó en software R versión 3.6.3 [41]. Los datos se expresaron con su valor medio  $\pm$  desviación estándar.

### 2.3. Resultados y discusión

**Composición química.** En la Tabla 2-2 se muestran los valores medios de los compuestos químicos en los granos de café pergamino (café verde) luego del almacenamiento de dos meses. Los ácidos grasos medidos fueron: mirístico C14:0, palmítico C16:0, palmitoléico C16:1, heptadecanoico C17:0, esteárico C18:0, Oléico C18:1, Linoléico 18:2, linolénico C18:3, araquídico C20:0, eicosanoico C20:1, behénico C22:0. Los carbohidratos sacarosa y glucosa. Los ácidos clorogénicos: cafeico, cumarico, felurico y sinapico. Finalmente la cafeína.

**Tabla 2-2.** Valores medios de los compuestos químicos medidos en el café verde según los procesos de secado.

Compuestos químicos (mg/g bs)	Proceso de secado					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mirístico	0,113 $\pm$ 0,003 <sup>c</sup>	0,115 $\pm$ 0,004 <sup>b</sup>	0,120 $\pm$ 0,006 <sup>a</sup>	0,122 $\pm$ 0,004 <sup>a</sup>	0,107 $\pm$ 0,005 <sup>c</sup>	0,111 $\pm$ 0,002 <sup>d</sup>
Palmítico	0,704 $\pm$ 0,127 <sup>c</sup>	0,739 $\pm$ 0,114 <sup>bc</sup>	0,774 $\pm$ 0,087 <sup>b</sup>	0,889 $\pm$ 0,116 <sup>a</sup>	0,551 $\pm$ 0,047 <sup>d</sup>	0,556 $\pm$ 0,074 <sup>d</sup>
Palmitoléico	0,057 $\pm$ 0,001 <sup>ab</sup>	0,057 $\pm$ 0,002 <sup>ab</sup>	0,057 $\pm$ 0,002 <sup>b</sup>	0,057 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,055 $\pm$ 0,001 <sup>b</sup>	0,056 $\pm$ 0,001 <sup>c</sup>
Heptadecanoico	0,062 $\pm$ 0,005 <sup>bc</sup>	0,063 $\pm$ 0,008 <sup>c</sup>	0,062 $\pm$ 0,006 <sup>bc</sup>	0,064 $\pm$ 0,008 <sup>c</sup>	0,059 $\pm$ 0,003 <sup>ab</sup>	0,060 $\pm$ 0,004 <sup>a</sup>
Esteárico	0,235 $\pm$ 0,033 <sup>c</sup>	0,254 $\pm$ 0,029 <sup>b</sup>	0,257 $\pm$ 0,032 <sup>b</sup>	0,283 $\pm$ 0,028 <sup>a</sup>	0,212 $\pm$ 0,016 <sup>d</sup>	0,208 $\pm$ 0,027 <sup>d</sup>
Oléico	0,114 $\pm$ 0,018 <sup>c</sup>	0,124 $\pm$ 0,022 <sup>b</sup>	0,126 $\pm$ 0,015 <sup>b</sup>	0,135 $\pm$ 0,019 <sup>a</sup>	0,107 $\pm$ 0,011 <sup>c</sup>	0,106 $\pm$ 0,015 <sup>c</sup>
Linoléico	0,212 $\pm$ 0,035 <sup>d</sup>	0,233 $\pm$ 0,032 <sup>c</sup>	0,248 $\pm$ 0,029 <sup>b</sup>	0,267 $\pm$ 0,023 <sup>a</sup>	0,189 $\pm$ 0,015 <sup>e</sup>	0,187 $\pm$ 0,021 <sup>e</sup>
Linolénico	0,056 $\pm$ 0,001 <sup>c</sup>	0,057 $\pm$ 0,002 <sup>c</sup>	0,057 $\pm$ 0,002 <sup>bc</sup>	0,057 $\pm$ 0,002 <sup>c</sup>	0,056 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,056 $\pm$ 0,001 <sup>ab</sup>
Araquídico	0,185 $\pm$ 0,018 <sup>c</sup>	0,201 $\pm$ 0,016 <sup>b</sup>	0,199 $\pm$ 0,021 <sup>b</sup>	0,212 $\pm$ 0,023 <sup>a</sup>	0,184 $\pm$ 0,011 <sup>c</sup>	0,184 $\pm$ 0,013 <sup>c</sup>
Eicosanoico	0,045 $\pm$ 0,003 <sup>a</sup>	0,044 $\pm$ 0,001 <sup>ab</sup>	0,045 $\pm$ 0,002 <sup>ab</sup>	0,045 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,044 $\pm$ 0,001 <sup>b</sup>	0,044 $\pm$ 0,002 <sup>ab</sup>
Behénico	0,179 $\pm$ 0,007 <sup>bc</sup>	0,180 $\pm$ 0,008 <sup>c</sup>	0,179 $\pm$ 0,005 <sup>c</sup>	0,180 $\pm$ 0,005 <sup>c</sup>	0,176 $\pm$ 0,003 <sup>a</sup>	0,175 $\pm$ 0,003 <sup>ab</sup>

Glucosa	11,732 ± 0,945 <sup>d</sup>	12,395 ± 0,948 <sup>c</sup>	14,381 ± 0,635 <sup>b</sup>	17,685 ± 0,762 <sup>a</sup>	9,259 ± 0,609 <sup>e</sup>	10,018 ± 0,733 <sup>f</sup>
Sacarosa	87,579 ± 0,626 <sup>d</sup>	92,107 ± 0,855 <sup>c</sup>	98,499 ± 0,644 <sup>b</sup>	104,686 ± 1,148 <sup>a</sup>	72,279 ± 0,733 <sup>e</sup>	78,13 ± 0,947 <sup>f</sup>
Cafeico	2,612 ± 0,076 <sup>a</sup>	2,601 ± 0,156 <sup>a</sup>	2,639 ± 0,097 <sup>a</sup>	2,638 ± 0,134 <sup>a</sup>	2,651 ± 0,069 <sup>a</sup>	2,670 ± 0,106 <sup>a</sup>
Cumárico	0,468 ± 0,021 <sup>a</sup>	0,464 ± 0,023 <sup>a</sup>	0,460 ± 0,027 <sup>a</sup>	0,466 ± 0,017 <sup>a</sup>	0,467 ± 0,017 <sup>a</sup>	0,469 ± 0,019 <sup>a</sup>
Ferúlico	0,313 ± 0,005 <sup>a</sup>	0,312 ± 0,003 <sup>a</sup>	0,312 ± 0,006 <sup>a</sup>	0,311 ± 0,005 <sup>a</sup>	0,312 ± 0,003 <sup>a</sup>	0,309 ± 0,006 <sup>a</sup>
Sinapico	0,389 ± 0,010 <sup>a</sup>	0,384 ± 0,009 <sup>a</sup>	0,387 ± 0,007 <sup>a</sup>	0,385 ± 0,008 <sup>a</sup>	0,390 ± 0,004 <sup>a</sup>	0,388 ± 0,006 <sup>a</sup>
Cafeína	9,428 ± 0,914 <sup>a</sup>	9,424 ± 1,049 <sup>a</sup>	9,249 ± 1,089 <sup>a</sup>	9,414 ± 0,792 <sup>a</sup>	9,629 ± 0,617 <sup>a</sup>	9,604 ± 0,595 <sup>a</sup>

P1: 40°C – 60 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P2: 40°C - 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P3: 50°C – 60 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P4: 50°C – 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P5: solar directo, P6: marquesina. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes según el test LDS Fisher (p<0.05).

El ANAVA reveló que para el factor procesos de secado se encontró diferencias estadísticas (p<0.05) con relación a la concentración de ácidos grasos y carbohidratos. Adicionalmente, no se evidencian diferencias estadísticas (p>0,05) para las concentraciones de ácidos grasos y carbohidratos con relación a las variedades y la interacción variedad por proceso de secado, ni para los contenidos de ácidos clorogénicos y cafeína con relación con los factores controlados y sus interacciones.

En general la concentración de ácidos grasos y carbohidratos según el proceso de secado fue P4>P3>P2>P1>P5>P6 (ver Tabla 2-2). Las concentraciones medidas de los ácidos grasos y la sacarosa son similares a los reportados en investigaciones para café pergamino seco [17], [29], [42]–[44].

En los granos de café secos, la concentración de ácidos grasos y carbohidratos medidos fue mayor estadísticamente en todos los procesos de secado mecánico comparados con los secados solares. El mayor contenido de ácidos grasos puede estar relacionado con el tiempo de secado. El tiempo promedio de secado hasta alcanzar una humedad del 10-12% (b.h) en el café para P4, P3, P2, P1, P5 y P6 fue de 16, 18, 29, 34, 288 y 156 horas respectivamente, esto indica que tener un proceso de secado controlado permite obtener mayor concentración de ácidos grasos en los granos de café. En este sentido, los secados P5 y P6 con una baja tasa de evaporación de agua, asociando una alta actividad acuosa en el grano, puede propiciar fermentaciones adicionales, mayor actividad metabólica embrionaria y reacciones de oxidación relacionadas con: actividad microbiológica, energía solar y presencia de oxígeno, propiciando un menor contenido de ácidos grasos en el café [45]–[48].

En Colombia la mayor producción de café pergamino seco comúnmente llamado café comercial es secado mecánicamente. Según los resultados reportados por Kwon et al. (2015) [49], se encontraron mayores concentraciones de ácidos grasos en cafés comerciales comparados con cafés especiales de varias regiones

del mundo incluyendo cafés de origen colombiano. Es conocido que el secado solar es el proceso más utilizado en la obtención de cafés especiales en Colombia, donde con los resultados del trabajo realizado por Kwon se puede inferir que la concentración de ácidos grasos al final del secado es mayor con el secado mecánico comparado con el secado solar, lo anterior es acorde a los resultados encontrados en la presente investigación.

Se encontró mayor concentración de carbohidratos en los procesos de secado mecánico (99 a 121 mg/g bs) comparados con los secados solares (81 a 88 mg/g bs) con diferencias estadísticamente significativas (ver tabla 2-2). Estos resultados sugieren que realizar un proceso de secado mecánico de los granos del café, permite obtener una mayor acumulación de azúcares al finalizar el proceso de secado. El grano de café se considera una semilla intermedia que tolera una deshidratación hasta porcentajes de humedad entre el 10% y 12.5 % (b.h) para garantizar la viabilidad del embrión, en este sentido, durante el proceso de secado se genera un estrés hídrico al interior de los granos de café que puede conducir a una mayor actividad metabólica del embrión, esta mayor actividad metabólica se puede asociar con la reducción del contenido de carbohidratos que busca proteger y preservar la viabilidad del embrión al interior del grano de café. Varios estudios han reportado los cambios y disminución en las concentraciones de los carbohidratos producto de la actividad metabólica que da inicio al proceso de germinación del café [13], [22], [50], [51].

Se encontró que el secado P4 genera el menor tiempo de secado teniendo control del proceso, donde se puede asociar una mayor concentración de sacarosa y glucosa, resultados similares se pueden inferir de investigaciones donde reportan el uso de tecnologías como: bomba de calor, secado mecánico, liofilización y microondas, donde tener control del proceso de secado está asociado a mayores concentraciones de compuestos orgánicos en el café [29], [30], [52].

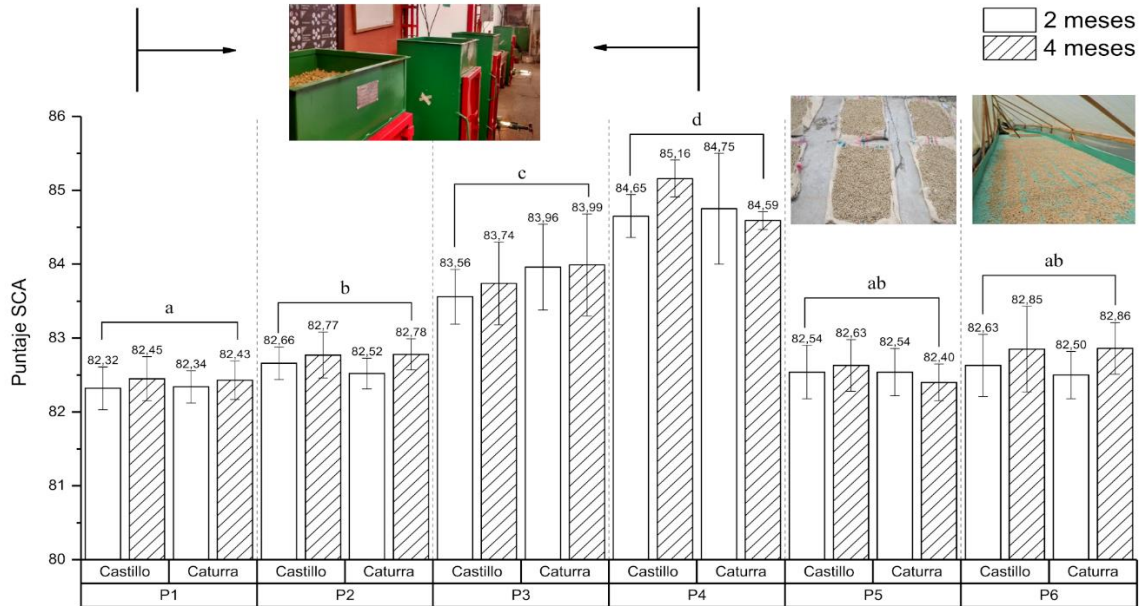
A diferencia de lo reportado en la literatura, en esta investigación no se encontraron diferencias entre el contenido de ácidos clorogénicos y los procesos de secado, esto puede explicarse a que las cerezas de café fueron procesadas en estado óptimo de madurez fisiológica y que los ácidos analizados se encuentran en bajas concentraciones en comparación con los demás isómeros como el 5CQA, 4CQA, 3CQA, cuyas concentraciones en el café pueden ser más altas del 40% [53]. Marín & Puerta (2008) [37] determinaron la concentración de ácidos clorogénicos de las variedades Castillo®, Caturra, Típica y Borbón, siendo mayor el contenido de ácido cafeico y cumárico en la variedad Castillo® y Borbón, respectivamente, esto concuerda con lo encontrado para las variedades en este estudio.

Algunos autores aseguran que los principales cambios en la concentración de ácidos clorogénicos ocurren en etapas anteriores al secado. Factores climáticos como la temperatura durante el desarrollo de la semilla, tiene un impacto directo sobre el contenido de ácidos clorogénicos, existiendo mayor acumulación de estos compuestos en el café cultivado en climas con temperaturas bajas [17]; a su vez, se ha encontrado mayor acumulación de dichos compuestos en cafés cultivados a mayor altura [34].

Las diferencias principales en el contenido de cafeína se dan dependiendo del estado de maduración de los frutos y en los granos con defectos, encontrándose mayor concentración de este alcaloide en frutos de café inmaduros [54], [55]. Sin embargo, se encontró una tendencia hacia el aumento de concentración cuando se utilizan temperaturas para el secado de 50°C y cuando se seca al sol. Nilnont et al., (2012) [56] también encontraron que la concentración de cafeína es más alta para los granos de café secados a 50°C y 60°C comparados con los secados a 40°C. En otros estudios no se han encontrado diferencias significativas en el contenido de cafeína para los cafés procesados por diferentes métodos (húmedo y seco), ya que por ser un compuesto termoestable permanece casi inalterable en las etapas de beneficio [42].

**Análisis sensorial.** El análisis del puntaje SCA sensorial indicó que no se presentaron diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ) atribuibles a la variedad y a las interacciones entre los factores de control. Resultados similares han sido reportados en la literatura, Bertrand et al. (2006) [57] compararon la calidad sensorial y la composición bioquímica de las variedades tradicionales cultivadas en países centroamericanos, con híbridos de arabica cultivados a diferentes alturas, estos autores no encontraron diferencias significativas en la evaluación sensorial entre los híbridos y cultivares tradicionales. En el estudio realizado por Alvarado et al. (2009) [58] se estableció que la variedad Castillo® y los testigos tradicionales Típica, Tabí, Borbón y Caturra tienen características semejantes en la mayoría de los atributos analizados y poseen una calidad global en taza similar.

Los diferentes procesos evaluados para el secado del café afectaron significativamente la variable respuesta “Puntaje SCA” ( $p < 0,05$ ). Los valores medios para dicha variable en función de los procesos de secado, variedad y tiempo de almacenamiento se muestran en la figura 2-2.

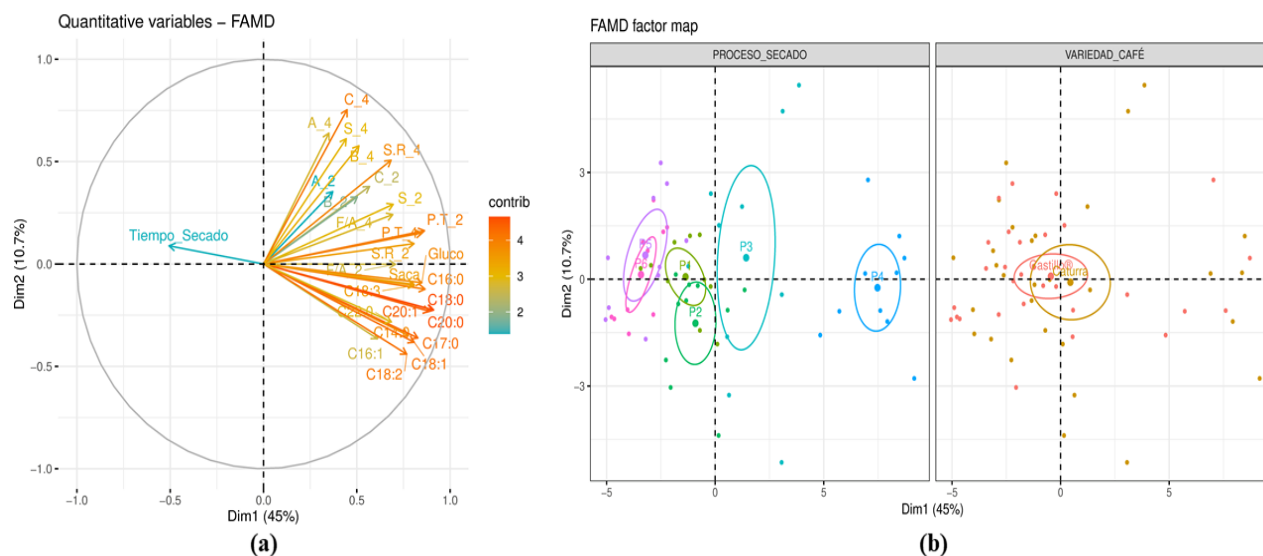


**Figura 2-2.** Puntaje SCA en función de los procesos de secado (P1: 40°C – 60 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P2: 40°C - 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P3: 50°C – 60 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P4: 50°C – 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps, P5: solar en piso de concreto, P6: marquesina), variedad del café (Caturra y Castillo®) y tiempo de almacenamiento (2 y 4 meses). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba LDS Fisher (p<0.05).

En la figura 2-2 para las variedades estudiadas, los mayores puntajes de calidad en taza se obtuvieron con los procesos P4 y P3, lo que corresponde a una temperatura de 50°C y flujos de aire de 100 y 60 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps respectivamente. Para los secados P4 y P3 el tiempo de secado fue entre 16 y 18 horas, mientras que los secados P1, P2, P5 y P6 tardaron 29, 34, 288, 156 horas para alcanzar una humedad del 10-12% (b.h). Tiempos de secado prolongado pueden ocasionar fermentaciones adicionales indeseadas en los granos de café, sobre todo al comienzo del secado cuando la actividad acuosa (a<sub>w</sub>) del café es mayor a 0.8, favoreciendo así la proliferación de microorganismos que producen compuestos no deseados como el ácido butírico y propiónico [7]. Silva et al. (1998) [59] determinaron el efecto de la temperatura del aire de secado en la calidad de la bebida de café; estos autores involucraron tres niveles de temperatura del aire de secado (35, 45, 55°C), obteniendo menor calidad en la bebida al utilizar temperaturas de secado de 35 y 45°C. También Nilnont et al. (2012) [56] realizaron una simulación del secado mecánico del café utilizando elementos finitos, estos autores obtuvieron una mayor puntuación en los atributos sensoriales para los cafés secados a 50°C y mayores niveles de cafeína en los cafés secados con temperaturas por encima de los 40°C.

Con el fin de observar la correlación entre las concentraciones de ácidos grasos, carbohidratos, puntaje SCA, tiempo de secado y los procesos de secado, se realizó un análisis factorial de datos mixtos (AFDM)

encontrando la correspondencia entre las variables estudiadas. Se seleccionaron dos dimensiones (componentes principales) que explican la varianza del 45,0% y 10,7% para la Dim1 y Dim2 respectivamente (figura 2-3).



**Figura 2-3.** Análisis factorial de datos mixtos para los proceso de secado, variedad del café, compuestos orgánicos y atributos sensoriales del café: (a) análisis de correlación y (b) mapa de factores. (C14:0 = Mirístico, C16:0 = Palmítico, C16:1 = Palmitoléico, C17:0 = Heptadecanóico, C18:0 = Estearico, C18:1 = Oléico, C18:2 = Linoléico, C18:3 = Linolénico, C20:0 = Araquídico, C20:1 = Eicosanoico, C22:0 = Behénico, P.T = Puntaje Total, F/A = fragancia/Aroma, S = Sabor, S.R = Sabor residual, A = Acidez, C = Cuerpo, B = Balance, \_2 = 2 meses, \_4 = 4 meses)

En la Dim1 se correlacionó positivamente la concentración de los compuestos orgánicos y los atributos sensoriales. Mientras que en el Dim2 solo se hubo correlación positiva para los atributos sensoriales evaluados en la bebida del café.

En la figura 2-3(a) se observa una correlación negativa entre los compuestos químicos medidos y el tiempo de secado. Este análisis de correlación da evidencia que la concentración de compuestos químicos de importancia en el café depende del tiempo de secado y que adicionalmente estos compuestos químicos favorecen los atributos sensoriales de la bebida del café. Adicionalmente, esto se confirma en la figura 2-3(b) donde los centroides de las elipses muestran claramente las diferencias entre los procesos de secado para las variables medidas, mostrando un distanciamiento mayor de la elipse del P4 con el resto de los tratamientos, en la misma figura se observa que las elipses de las variedades Caturra y Castillo® se interceptan, indicando que no se encontraron diferencias para las variables analizadas.

Investigaciones realizadas [60]–[62], reportan correlaciones negativas entre el contenido total de ácidos grasos y la calidad sensorial, sobre todo durante el almacenamiento, mostrando alteraciones en el sabor y olor del café debido a reacciones oxidativas de los ácidos grasos, atribuidas al efecto de las condiciones de proceso en el secado mecánico sobre la composición de ácidos grasos, esto atribuido a una mayor concentración de ácidos grasos cuando se usan temperaturas altas; el aumento de la concentración se atribuye a una afectación a la estructura de la membrana celular generando un escape del material lipídico del interior de las células hacia el exterior del grano mostrando un aumento en el contenido de ácidos grasos durante el tiempo de almacenamiento debido a la acción de lipasas que causan hidrólisis en el material graso, en este sentido, durante el almacenamiento la hidrólisis del material graso inicia antes de la hidrólisis de carbohidratos y proteínas, por lo que el contenido de ácidos grasos libres puede ser usado como un indicador del deterioro de los granos, aunque en este estudio no se evaluó la oxidación lipídica, con las condiciones de almacenamiento y tipo de empaque usadas en este trabajo se muestra poca afectación al perfil sensorial de la bebida, que puede atribuirse a una menor oxidación lipídica.

Las correlaciones entre el contenido de ácidos clorogénicos y la calidad sensorial del café luego del proceso de tostión reportados en la literatura muestran que los cafés con mejor calidad sensorial presentan menores niveles en el contenido de ácidos clorogénicos, dado que, algunos de estos ácidos forman sustancias fenólicas que contribuyen al amargor de la bebida, asociando una alta concentración de ácidos clorogénicos con una mayor astringencia y han correlacionado dichos niveles con la cantidad de frutos verdes que se incluyen en la cosecha [42], [63], [64].

Se han realizado diferentes estudios para correlacionar el sabor amargo del café con el contenido de cafeína con poco éxito. La cafeína contribuye solo en un 10% al sabor amargo del café [53]. En esta investigación no se encontró un efecto del proceso de secado sobre el contenido de cafeína y los atributos sensoriales. Con mayores niveles de cafeína en frutos inmaduros no se encontró una correlación directa entre el contenido de cafeína y la calidad de la bebida [55].

## 2.4. Conclusiones

Se obtuvo menor concentración de ácidos grasos y carbohidratos en el secado solar y secado mecánico a 40°C. El secado mecánico a 50°C con un caudal de aire de 100 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>cps es adecuado para garantizar un mayor contenido de compuestos químicos de interés en el café pergamino seco.

La calidad sensorial de la bebida del café fue superior usando el secado mecánico comparado con el secado solar. Con esto se da evidencia de que un proceso de secado controlado y realizado en menor tiempo puede garantizar mejores atributos sensoriales en la bebida del café.

Las variedades de café Caturra y Castillo® de la especie *C. arabica* mostraron un comportamiento similar en las concentraciones de los compuestos químicos y atributos sensoriales evaluados.



# III. Capítulo 3. Dinámica de la concentración de ácidos grasos y sacarosa del café durante el proceso de secado

## Resumen

En Colombia el proceso de secado se realiza tradicionalmente usando convección forzada con aire caliente (secado mecánico) y secado en estructuras artesanales llamadas marquesinas. En este trabajo se describe la dinámica de once ácidos grasos y la sacarosa contenidos en los granos de café variedad Castillo® a medida que avanza el proceso de secado. Se realizaron 6 procesos de secado (3 en marquesina y 3 mecánicos a 50°C con  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$ ). Se desarrolló una modelación matemática (cinética) del cambio de la concentración de los compuestos químicos en función del tiempo y el contenido de humedad. Los resultados mostraron una menor reducción de la concentración de los ácidos grasos en el secado mecánico comparado con el secado en marquesina. Para los ácidos grasos Palmítico y linoleico mayoritarios en el café, la reducción promedio en la concentración fue de 40%, 50%, 60% y 75% para 18 horas (secado mecánico) 94, 120 y 218 horas (secados en marquesina) respectivamente. La concentración de sacarosa en el secado mecánico se incrementó en 10%, mientras que en los secados solares se obtuvo una reducción de 20%, 30% y 40% para 94, 120 y 210 horas en el secado solar respectivamente. Estos resultados muestran la importancia de tener control sobre el tiempo de secado, donde el contenido final de los compuestos químicos analizados se favorece con el secado mecánico.

**Palabras claves:** Secado, café, cinética, compuestos químicos.

## Abstract

In Colombia the drying process is traditionally carried out by forced convection using heated air (mechanical drying) and solar drying in artisanal structures called canopies. This work describes the effect of drying on eleven fatty acids and sucrose to Castillo® variety coffee beans. 6 drying processes were carried out (3 in *marquesina* and 3 mechanical drying at 50°C with  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$ ). A mathematical description was made to the change in the concentration of chemical compounds as a function of time and moisture content. A lower reduction in the concentration of fatty acids was found in mechanical drying compared to solar drying, where the majority of Palmitic and linoleic fatty acids in coffee reduced the concentration was 40%, 50%,

60%, and 75% for 18 hours (mechanical drying) 94, 120 and 218 hours (canopy drying) respectively. The sucrose concentration in mechanical drying increased by 10%, while in solar drying a reduction of 20%, 30%, and 40% was obtained for 94, 120, and 210 hours in solar drying respectively. The importance of the drying time that depends on the process conditions is demonstrated, showing that the final content of the analyzed chemical compounds is favored with mechanical drying.

**Key words:** Drying, coffee, kinetics, chemical compounds.

### 3.1. Introducción

El café colombiano es apreciado en el mundo por su aroma y sabor, donde Colombia es considerado el primer productor de café suave lavado a nivel mundial con una producción 14.8 millones de sacos de 60 kg [65]. La concentración de compuestos químicos en los granos de café pergamino (café verde) al momento de ingresar al proceso de tuestión están directamente relacionados con la formación del aroma y sabor de la bebida del café [48], [66], [67].

El proceso de secado del café es una etapa crítica del benéfico (vía seca, semi húmeda y húmeda) del café, es una etapa donde se busca disminuir en el grano la actividad del agua que permita garantizar un adecuado almacenamiento del grano para protegerlo de posibles alteraciones metabólicas, microbiológicas, físicas y químicas [68], [69].

Los ácidos grasos y la sacarosa son compuestos químicos de gran interés en la formación del sabor y aroma en el proceso de tuestión. Los ácidos grasos son importantes en el sabor y la sacarosa en la reacción de Maillard, donde se generan gran cantidad de compuestos aromáticos que imparten características sensoriales apreciadas a nivel mundial por los consumidores de la bebida del café [70], [71] .

En Colombia los métodos tradicionales para realizar el proceso del secado del café emplean la energía solar y el calentamiento del aire por convección forzada. El secado solar se realiza por exposición directa al sol y en estructuras artesanales de secado conocidas como marquesinas. El secado mecánico se realiza generalmente en silos de capa estática de tres mallas con convección forzada de aire caliente, para el calentamiento del aire se emplean combustibles tales como; carbón, madera, cisco de café, gas propano, entre otros [33], [72]–[74].

El centro nacional de investigaciones del café (CENICAFE) ha realizado importantes aportes en el secado del café, donde se resalta la optimización de la operación del secado mecánico, buscando la eficiencia energética del proceso garantizando la calidad física del grano de café, igualmente se han desarrollado mejoras tecnológicas en el diseño y operación de secadores solares parabólicos para reducir el tiempo de secado del café [75]–[78].

Recientes trabajos de investigación [29], [30], [68], [79] evidencian el efecto del secado en cafés de las especies arábica y robusta, reportan que la tecnología empleada para realizar el secado afecta la concentración final de los compuestos químicos en el café pergamino, las mediciones de estos compuestos se realizaron al finalizar el proceso de secado. Se puede inferir de estas investigaciones que el tiempo de secado condicionado por el tipo de tecnología empleada en el secado del café permite obtener mayores concentraciones de compuestos químicos contenidos en los granos de café secos.

En este sentido, el efecto del tiempo de secado sobre compuestos químicos de gran importancia en el café ha sido poco explorado, ya que el interés del proceso de secado se ha centrado en la remoción del agua del grano, para garantizar la viabilidad embrionaria, disminución de la actividad microbiológica, conservación de la calidad física del grano del café durante el almacenamiento y eficiencia energética. El efecto de las variables de proceso de secado que permitan conservar o mitigar la reducción de la concentración de compuestos químicos es de gran interés en todos los actores involucrados en la cadena de valor del café [80]–[82].

Los cafés especiales asociados a microlotes que son evaluados y valorados por puntaje en taza (SCA), son una oportunidad comercial para los pequeños productores de café, pero se ha encontrado que la calidad sensorial de estos cafés especiales no es consistente en el tiempo, ya que la mayoría de pequeños productores de café usan la energía solar para realizar el secado del café [83], [84]. La afectación en la calidad puede deberse a las condiciones ambientales variables que se tienen al momento de realizar el proceso de secado, ya que las épocas de cosecha en las regiones cafeteras se caracterizan por altas precipitaciones de lluvias, mucha nubosidad y pocas horas de brillos solar lo que genera que se tengan periodos largos de secado que pueden llegar a superar los 10 días [10], [74].

Por lo tanto, con el presente estudio se describe la dinámica de la concentración de once ácidos grasos y la sacarosa contenidos en los granos del café durante el tiempo de secado. Se realizó un análisis matemático del efecto del secado mecánico y del secado solar en marquesina sobre el cambio de la concentración de los compuestos químicos medidos en el café con relación al tiempo y con el contenido de humedad.

### 3.2. Materiales y métodos

Los experimentos de secado se realizaron en la finca Santa Isabel (5°52'09''N, 75°40'06''W) del municipio de Fredonia, departamento de Antioquía – Colombia. Se realizaron 3 experimentos de secado solar en marquesina, comparando cada experimento con el secado mecánico. El secado finalizó cuando en los granos de café se obtuvo en promedio un 11% de humedad en base húmeda.

**Material vegetal.** Las cerezas del café variedad Castillo® fueron recolectadas de árboles sembrados a una altura en promedio de 1900 msnm. Se recolectaron 800 kg de café cereza que se depositaron en tanques con agua limpia para separar por flotación impurezas; granos verdes, brocados y vanos. El porcentaje de cerezas verdes fue menor del 2% en el café seleccionado por flotación, luego el café fue despulpado para seguir a la etapa de fermentación. El tiempo de fermentación se controló con el método Fermaestro desarrollado por Cenicafé [32]. Al terminar la fermentación el café fue lavado con agua limpia para retirar restos de mucílago y granos vanos. El café escurrido se repartió en 250 kg para el secado solar en marquesina y 33 kg para el secado mecánico.

**Secado Mecánico.** Se utilizó una secadora de capa estática de tres mallas de 7.5 arrobas marca Mallas & Silos. Se depositaron 33 kg de café escurrido en la primera malla con una altura de capa del grano de 20 cm. La temperatura del aire de secado a la entrada del lecho del café fue 50°C, y se controló calentando el aire mediante combustión directa con gas propano regulando la potencia de la llama.

El flujo del aire se fijó en  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} \text{cps}$ , usando la ecuación semiempírica (ecuación 1) obtenida por Oliveros y Roa (1986) citada por Parra et. al (2017) [33]. El flujo de aire que ingresa al lecho del café se controló utilizando un variador de frecuencia para la velocidad de giro del motor del ventilador centrifugo. La caída de presión generada por las diferentes capas de café fue medida utilizando un tubo de Pitot. La humedad durante el secado se determinó utilizando un medidor de humedad para granos “Grain moisture tester PM 410”, tomando muestras en diferentes puntos (5, 10, 15 y 20 cm) del lecho de café después de 8, 10, y 12 horas de secado, luego de que el café alcanzo un 13% de humedad se tomó muestras cada media hora hasta llegar a un 11% de humedad.

$$Q/A = (9,523 - 0,0476 M) \left( \Delta p/h \right)^{0,676} \quad (1)$$

Dónde:

$Q$ : Caudal de aire que pasa a través de una capa de café, en  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

$A$ : Área del secador en  $\text{m}^2$ .

$M$ : Humedad del grano, en porcentaje base húmeda.

$\Delta p$ : Pérdida de presión, en cm de agua.

$h$ : Altura de la capa, en m.

**Secado solar en marquesina.** 250 kg de café escurridos fueron depositados y extendidos en el piso al interior de una marquesina, la cual fue construida para realizar esta etapa experimental teniendo en cuenta los criterios de construcción definidos por la FNC para este tipo de estructuras. Los controles realizados en el secado fueron:

- La capa de café no superó 1 cm de espesor.
- El café se removió diez veces al día durante los dos primeros días de secado, luego cuatro veces al día hasta que alcanzó en promedio una humedad de 11% base húmeda.
- El registro de la humedad se realizó usando el método Gravimet [85] para secado solar, donde se distribuyeron al interior de la marquesina 6 canastillas para el registro del peso y calcular la humedad.
- En las noches el café se protegió para evitar rehumedecimiento por el incremento de la humedad relativa del ambiente.

**Composición química.** Durante el tiempo de secado se tomaron muestras cada 12 horas para el secado solar en marquesina y cada 3 horas para el secado mecánico y empleando GC-MS se cuantificaron las concentraciones de 11 ácidos grasos (Mirístico, Palmítico, Palmitoléico, Heptadecanóico, Esteárico, Oléico, Linoléico, Linolénico, Araquídico, Eicosanoico, y Behénico) y la sacarosa por HPLC. Las muestras de café fueron molidas empleando nitrógeno líquido y se almacenaron a  $-40^\circ\text{C}$  en ultracongelación mientras se realizaban los diferentes análisis químicos. Cada muestra de café se analizó por triplicado.

- **Perfil de ácidos grasos.** La determinación de ácidos grasos se realizó adaptando la metodología propuesta por Bertrand et al. (2008) [34]. Para la identificación y cuantificación de los ácidos grasos se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a masas (GCMS-QP2010 ultra - Shimadzu) y un kit de estándares de ácidos grasos para comparar los cromatogramas y los tiempos de retención de las muestras. Las condiciones cromatográficas empleadas fueron: Inyector AOC-20i-S. volumen de inyección  $1\mu\text{L}$ . solvente Diclorometano. GC. temperatura del inyector  $225^\circ\text{C}$ . modo de inyección Split. columna DB-WAX (60 m. 0.320 mm. 0.25  $\mu\text{m}$ ). flujo de columna 1.2 ml/min. división Split

20:1. horno 100°C – 4min. 3°C/min - 240°C - 10 min. MS. temperatura de la fuente 250°C. temperatura de la interface 250°C. tiempo 0.3 s. modo Scan (35 – 800 m/z).

- **Sacarosa.** La cuantificación se realizó adaptando el método de extracción descrito por Mullin y Emmons (1997) [35]. 3 g de café verde previamente molido se mezclaron con 100 mL de agua Milli-Q a 90 °C en un erlenmeyer. La mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente. se vortizó y luego del reposo se filtró por gravedad. El filtrado se aforó a un volumen de 100 mL; seguidamente. una alícuota de 2.5 mL se llevó a un balón volumétrico de 10 mL. aforando con acetonitrilo grado HPLC. La mezcla final se filtró usando un filtro de nylon de 0.45 µm para analizar el contenido de azúcares mediante HPLC-RID. Los reactivos utilizados fueron estándares de sacarosa, glucosa y frutosa (Sigma Aldrich) y acetonitrilo (Merck). La columna Zorbax NH2 analytical (4.6 x 150 mm. 5- Micron. Agilent) se utilizó para la separar la sacarosa a temperatura ambiente. La separación cromatográfica se realizó con una fase móvil de elución isocrática de 75 % de acetonitrilo y 25% de agua. El flujo se ajustó a 1 mL/min. el volumen inyectado fue de 10 µL y el tiempo total de corrido de 30 min [36].

**Análisis matemático de compuestos orgánicos.** El análisis matemático del comportamiento de los once ácidos grasos y la sacarosa contenidos en los granos del café durante el secado mecánico y marquesina se realizó utilizando los resultados de las concentraciones medidas en GC-MS y HPLC. Los resultados de las concentraciones se tomaron en el avance del secado a diferentes tiempos. Con los resultados de las concentraciones en función del tiempo se procedió a desarrollar un ajuste óptimo con la ecuación (2), la cual se evaluó en el ajuste por el coeficiente de determinación con valor superior  $R^2 > 0.98$ . Los parámetros ( $a, b = 1/\tau$ ) se estimaron para la ecuación (2) con el mejor ajuste de curva, normalizando las concentraciones de cada uno de los compuestos orgánicos medidos en los granos del café; la normalización se realizó con la concentración máxima obtenida para cada compuesto orgánico,  $\hat{C} = (C_i/C_{max})$ ; y el tiempo se normalizó para cada uno de los tiempos de los procesos de secado y se expresó como  $\hat{t} = (t_i/t_{max})$ , donde  $t$  es el tiempo de secado.

$$\hat{C} = ae^{-b\hat{t}} = ae^{-\left(\frac{\hat{t}}{\tau}\right)} \quad (2)$$

La ecuación (2) permite describir el comportamiento de la concentración normalizada ( $\hat{C}$ ) del compuesto químico en función del tiempo adimensionalizado ( $\hat{t}$ ) para los diferentes tiempos de secado. La ecuación (2) se puede transformar a la ecuación (3) a través de la derivada, la cual informa del comportamiento de pérdida del compuesto en función del tiempo dimensional

$$\frac{d\hat{C}}{d\tau} = -\frac{a}{\tau} e^{-\left(\frac{\hat{t}}{\tau}\right)} \quad (3)$$

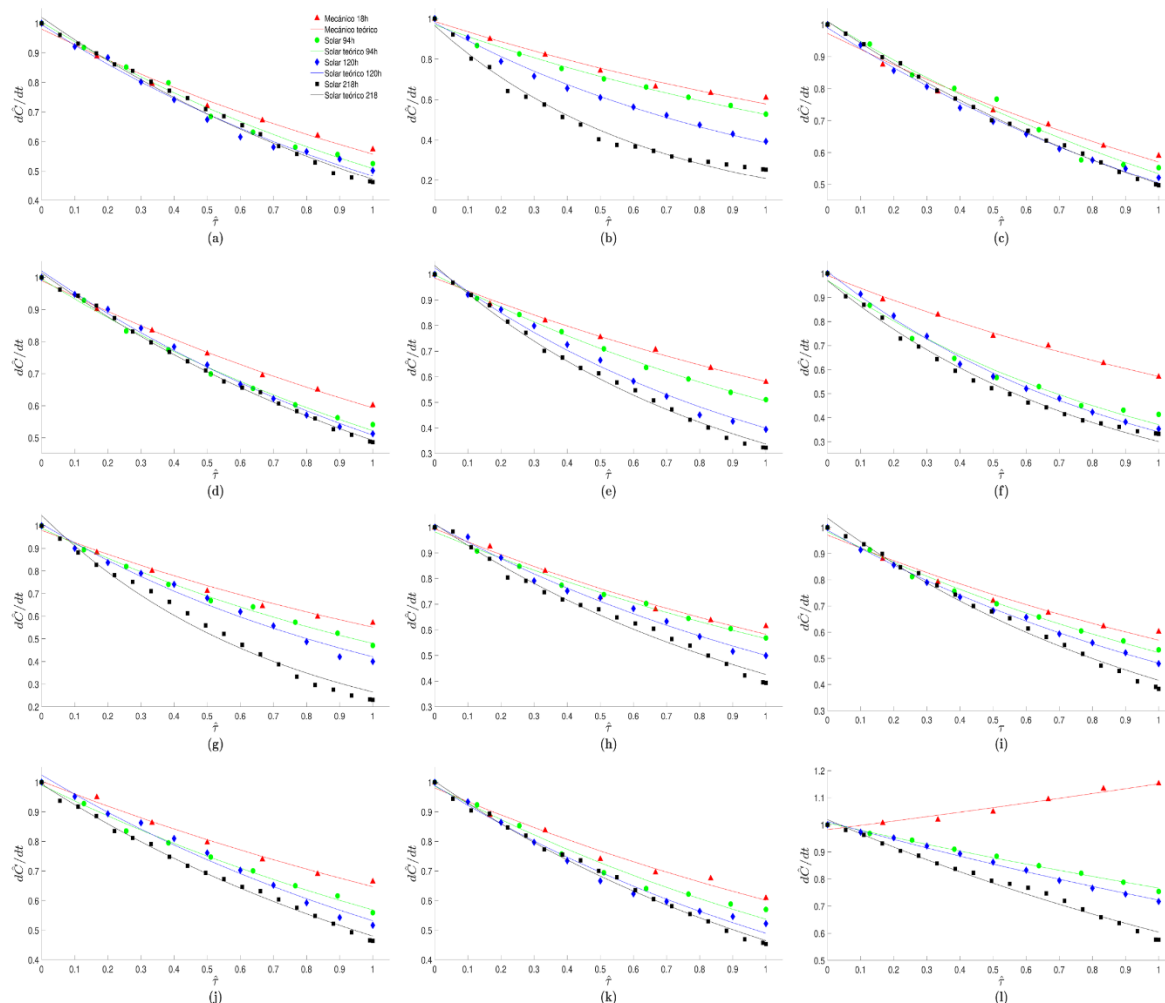
La ecuación (3) contiene el comportamiento de la pérdida de la concentración del compuesto durante el tiempo de secado para cada técnica; el término  $(-a/\tau)$  informa sobre la velocidad de reducción de la concentración de los compuestos orgánicos durante el avance del secado.

Para la tasa de cambio de la concentración de los compuestos orgánicos versus el contenido de humedad, se realizaron ajustes lineales con las variables normalizadas. El contenido de humedad normalizado se expresó como  $w = (W_i/W_{max})$ , donde  $W$  es el contenido de humedad en base seca y  $W_{max}$  es el contenido de humedad inicial del grano de café.

### 3.3. Resultados y discusión

En la figura 3-1 se describe la dinámica del cambio promedio de la concentración de los once ácidos grasos y la sacarosa medidos durante el tiempo de secado con el ajuste matemático de la ecuación 1. Los valores de los ajustes (coeficientes de determinación) fueron  $R^2 > 0.95$ . En general para los once ácidos grasos la concentración disminuye a medida que avanza el secado del café. En las figuras 3-1(b)(e)(f)(g)(j) los ácidos grasos Palmítico, Esteárico, Oléico, Linoléico y Eicosanoico presentaron mayor reducción en la concentración a medida que se incrementa el tiempo de secado, evidenciando que con un secado mecánico con duración promedio de 18 horas se obtiene una menor reducción de la concentración de ácidos grasos.

Para la sacarosa en la figura 3-1(l) se muestra que en el secado mecánico se da un incremento en la concentración de sacarosa a medida que transcurre el tiempo de secado, un comportamiento contrario se da con los secados en marquesina. En los secados en marquesina se da una mayor reducción de la concentración de sacarosa cuando el tiempo de secado se incrementa, esto resalta la importancia de las condiciones ambientales disponibles al momento de realizar el secado del café.



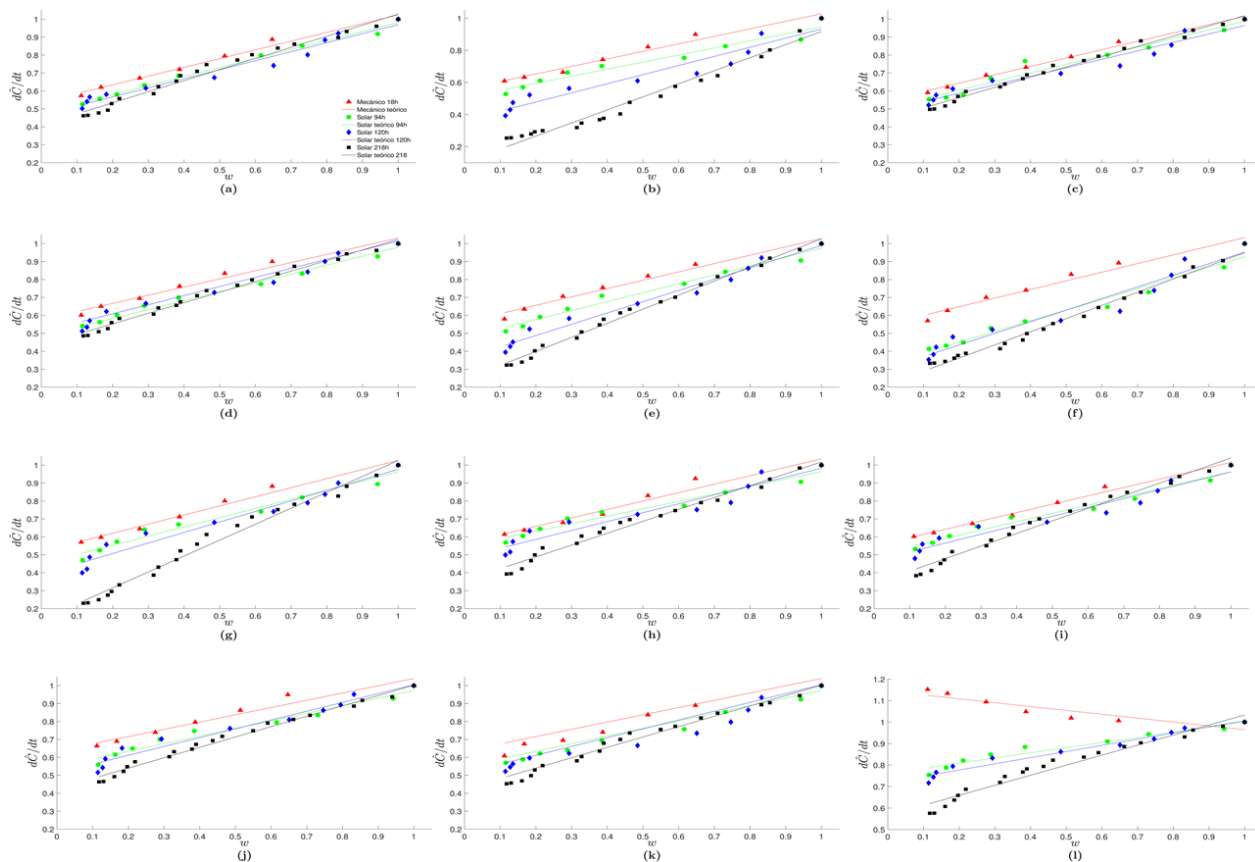
**Figura 3-1.** Valores medios del cambio de concentración en el tiempo adimensionalizado de los compuestos orgánico medidos durante los procesos de secado: (a) Mirístico, (b) Palmítico, (c) Palmitoléico, (d) Heptadecanóico, (e) Esteárico, (f) Oléico, (g) Linoléico, (h) Linolénico, (i) Araquídico, (j) Eicosanoico, (k) Behénico y (l) Sacarosa.

Estos cambios de concentración en los ácidos grasos y la sacarosa durante el tiempo de secado están condicionados a procesos metabólicos, actividad microbiológica, actividad enzimática, procesos de hidrólisis y procesos de oxidación en presencia de oxígeno, enzimas y luz solar que se pueden dar durante el secado del café. Resultados de investigaciones donde se han evaluado el efecto de estos procesos en diferentes etapas del beneficio del café, describen que la cantidad y contenido de compuestos orgánicos en el café son susceptibles a una gran cantidad de variables externas e internas durante todo el proceso de beneficio del café, variables que condicionan la tasa de velocidad a la cual se presenta reacciones de carácter químico, metabólico y microbiológico en los granos del café [49], [86], [87].



El estrés hídrico al que se somete el grano al iniciar el proceso de secado desencadena una serie de reacciones metabólicas que buscan preservar la viabilidad del embrión, en este sentido se puede sugerir que tiempos prolongados de secado propician una mayor actividad embrionaria que conlleva a un consumo al interior del grano del material graso y propicia la hidrólisis de sacarosa para suplir las necesidades de fructosa y glucosa como fuentes de energía para los diferentes procesos a nivel celular [13], [50], [51], [88]–[90]. Los resultados encontrados permiten entender que el proceso de secado es una etapa crítica en el procesamiento de los granos del café, etapa donde se presenta una reducción de la concentración de compuestos químicos de interés en la calidad del café para la formación del sabor y aroma en el proceso de tuestión que afectan la calidad de la bebida del café.

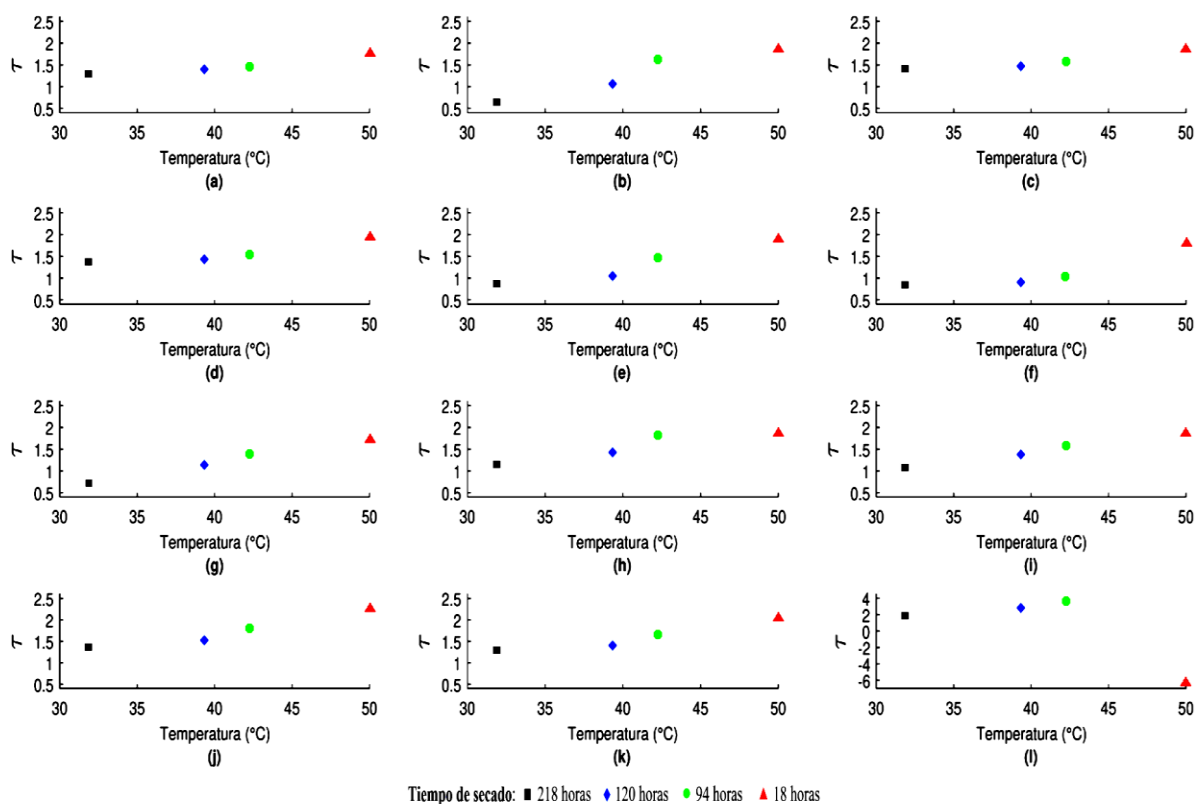
En la figura 3-2 se presentan las dinámicas de los compuestos químicos medidos en función del contenido de humedad. Se realizaron ajustes lineales para describir la dinámica de la concentración de los ácidos grasos y sacarosa. La disminución que se presenta no se puede atribuir a la evaporación del agua, dado que la sacarosa y los ácidos grasos (ésteres) al interior del grano de café son moléculas de largas cadenas de carbonos y se requieren de mucha energía para su evaporación (procesos de secado a bajas temperatura ( $T_{\text{secado}} < 50^{\circ}\text{C}$ ), por lo tanto este comportamiento puede ser atribuido a la actividad acuosa ( $a_w$ ) mayor a 0.8 donde se facilitan las reacciones de pardeamiento enzimático, hidrólisis, oxidación y alta actividad microbiológica [91], [92].



**Figura 3-2.** Valores medios del cambio de concentración con el contenido adimensionalizado de humedad de los compuestos orgánico medidos durante los procesos de secado: (a) Mirístico, (b) Palmítico, (c) Palmitoléico, (d) Heptadecanóico, (e) Estearico, (f) Oléico, (g) Linoléico, (h) Linolénico, (i) Araquídico, (j) Eicosanoico, (k) Behénico y (l) Sacarosa.

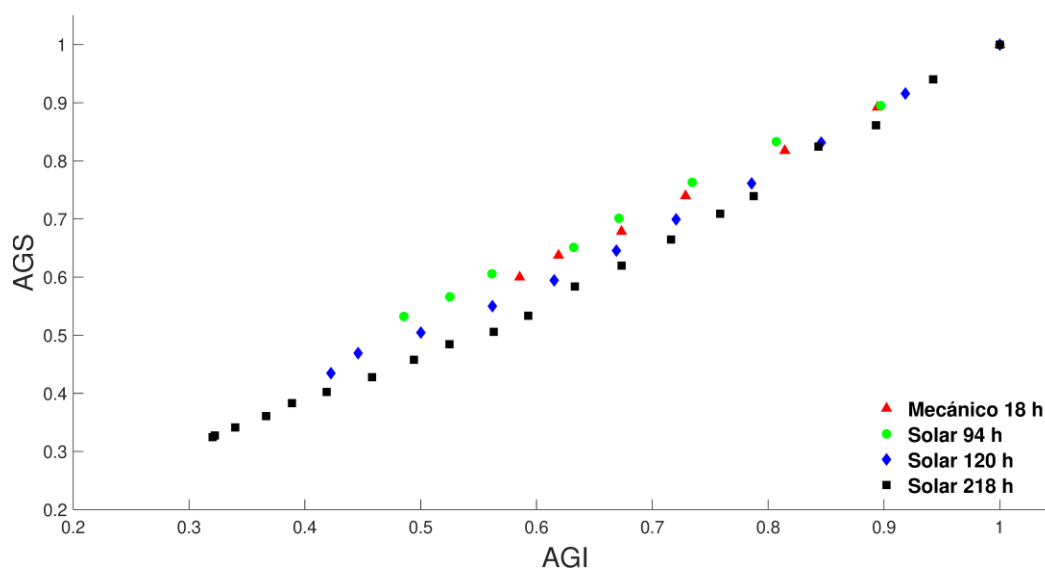
Los valores del tiempo de respuesta ( $\tau$ ) para la reducción de los once ácidos grasos y la sacarosa se muestran en la figura 3-3. Se relaciona el valor de  $\tau$  con la temperatura promedio de secado para los diferentes procesos realizados. Mayores valores de  $\tau$  indican que la reducción de los compuestos orgánicos se da a una menor tasa de reacción, esto se obtuvo a medida que se incrementa la temperatura promedio de secado, obteniéndose una menor reducción de los compuestos químicos a una temperatura de 50°C. Se encontró que los secados en marquesina asociados a mayores tiempos de secado condicionado por menores temperaturas de secado, el  $\tau$  es menor, obteniéndose mayor reducción de los ácidos grasos y la sacarosa. Para la sacarosa el cambio en el signo del  $\tau$  [ver figura 3-3(l)] para una temperatura de secado de 50°C (secado mecánico) muestra un aumento en la concentración a medida que avanza el secado del café, comportamiento contrario en el secado en marquesina donde hay mayor reducción de la concentración de sacarosa a medida que se incrementa el tiempo de secado a menor temperatura de secado.

Varias investigaciones muestran daño a la estructura de la membrana celular cuando el secado del café se realiza con convección forzada de aire a temperaturas mayores de 50°C. Este daño a la estructura de la membrana celular puede inducir la oxidación lipídica, dado que el material lipídico migra a la superficie del grano y queda expuesto a procesos de oxidación en presencia de oxígeno, enzimas. Los procesos de secado realizados en este estudio no superaron los 50°C generándose posiblemente poca afectación a la estructura de la membrana celular del café. Adicionalmente, en muchos procesos térmicos el incremento de la temperatura con tiempos cortos de secado se reduce la concentración de compuestos químicos [52], [79], en este sentido, un comportamiento contrario para el secado de los granos del café mostro el análisis de temperatura y tiempo de secado realizado, sugiriendo que la reducción de ácidos grasos y sacarosa puede estar condicionado a procesos metabólicos, microbiológicos y químicos enunciados anteriormente.



**Figura 3-3.** Tasa de reducción de los compuestos orgánicos versus la temperatura promedio de secado: (a) Mirístico, (b) Palmítico, (c) Palmitoléico, (d) Heptadecanoico, (e) Esteárico, (f) Oléico, (g) Linoléico, (h) Linolénico, (i) Araquídico, (j) Eicosanoico, (k) Behénico y (l) Sacarosa.

La figura 3-4 se muestra el cambio de los AGS vs AGI con el propósito de evidenciar el efecto del tiempo de secado sobre el cambio de concentración del material lipídico. Existe una alta correlación en la reducción de AGS y AGI a medida que transcurre el tiempo de secado, generándose una reducción aproximada del 40 %, 50%, 60% y 70% para 18, 94, 120 y 218 horas respectivamente. Adicionalmente la alta correlación observada para la reducción de los ácidos grasos describe que no hay una selectividad al interior del grano para el consumo de material lipídico, dado que dentro del grano el material lipídico se encuentra como esteres y la tasa de reducción de AGS y AGI es similar. Al final del proceso de secado de 18 h (secado mecánico) se obtiene una mayor concentración de ácidos grasos que son relevantes en el proceso de tostión, ya que se el material lípido en el café está asociado al sabor de la bebida y tener una mayor concentración de ácidos grasos puede generar mejores atributos sensoriales en la bebida del café.



**Figura 3-4.** Relación de la concentración adimensionalizada de los ácidos grasos saturados (AGS) y ácidos grasos insaturados (AGI) durante el tiempo de secado.

La relación AGS/AGI versus el contenido de humedad en base seca normalizado (figura 3-5) permite entender que la reducción del material lipídico no depende de la velocidad a que se da la evaporación del agua, dado que se observa que la relación AGS/AGI estuvo entre (0.9 a 1.0) para todos los procesos de secado realizados. Esto indica que la reducción de la concentración de los ácidos grasos puede estar asociada a la oxidación por posibles procesos enzimáticos, producto de enzimas generadas en fermentaciones adicionales dada una mayor  $a_w$  en los granos del café durante los primeros días del secado en marquesina, igualmente la presencia de especies reactivas de oxígeno acelera los procesos de oxidación y pueden incrementarse en presencia de la luz [45], [46], [93]. Adicionalmente el inicio de la etapa de

germinación incrementa la actividad metabólica en el grano del café lo que puede llevar a un consumo de grasas para suplir las necesidades calóricas requerido para la preservación del embrión [22].

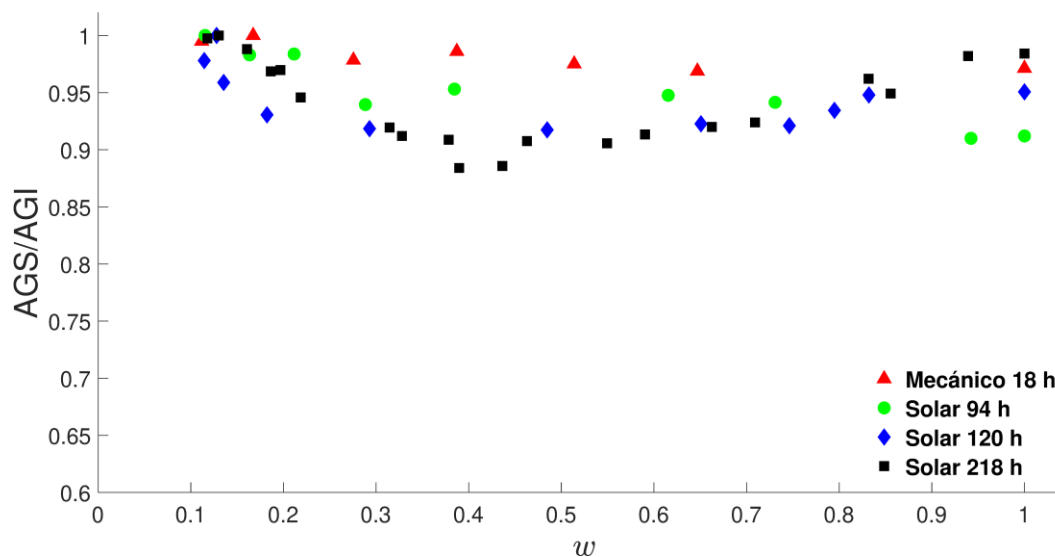


Figura 3-5. Relación AGS/AGI con el contenido de humedad.

### 3.4. Conclusiones

Se describió matemáticamente la dinámica de la concentración de compuestos químicos de interés para la calidad del café. En consecuencia, se presenta evidencia concluyente que el tiempo de secado condiciona la concentración final de ácidos grasos y sacarosa en el café. Esto permite abordar el secado más allá de un fenómeno netamente térmico, en este sentido, la reducción de la concentración de ácidos grasos y sacarosa pueden ser producto de procesos; metabólicos, oxidativos y microbiológicos, que se dan al interior y exterior de los granos del café durante el secado.

Un tiempo de secado de 18 horas, asociado al secado mecánico de 50°C con un caudal de aire de 100  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$  cps garantiza una mayor concentración de ácidos grasos y sacarosa en el café, comparado con los tiempos de secado solar en marquesina. Se debe pensar en mejoras tecnológicas que permitan aprovechar eficientemente la energía solar para reducir el tiempo de secado en una marquesina.

## IV. Capítulo 4. Estudio de sistema artesanal “Marquesina” para el secado solar en capa fina de granos de café

### Resumen

Las condiciones ambientales durante el secado solar de los granos de café tienen una influencia directa sobre la respuesta térmica del secador y la calidad del producto. La marquesina es comúnmente utilizada por los productores de café en Colombia siendo considerada un secado intermitente ya que incluye el día (cuando ocurre la pérdida de humedad en el grano) y la noche (cuando el contenido de humedad permanece constante). El siguiente estudio describe el efecto del tiempo de secado sobre la humedad, los ácidos grasos saturados (SFA), los ácidos grasos insaturados (UFA) y el contenido de sacarosa utilizando un sistema de secado solar de estructura de marquesina artesanal. Adicionalmente, se presentan y validan con datos experimentales los resultados del desarrollo de un modelo de transferencia de calor y masa del secado solar marquesina de granos de café en un lecho de capa fina en 1D. En este estudio se muestran las correlaciones entre la concentración de SFA, UFA y sacarosa con el tiempo de secado del grano durante el secado solar del café. Los resultados de la simulación mostraron que el modelo de partículas desarrollado se ajusta bien y predice el cambio en el contenido de humedad y la temperatura a medida que avanza el secado solar del café. La reducción de la concentración de sacarosa fue del 25%, 29% y 42%; ácidos grasos (SFA y UFA) fue del 49%, 55% y 65% para el secado solar de 94 horas, 120 horas y 218 horas respectivamente. Los resultados indican que el secado solar es una etapa crítica en el proceso de beneficio del café que afecta la concentración de compuestos químicos presentes en el grano al final del secado solar en la marquesina.

**Palabras clave:** Secado solar, marquesina, grano de café, modelo de secado, composición química

### Abstract

The environmental conditions during solar drying of coffee beans have a direct influence on thermal response of the dryer and product quality. The *marquesina* is commonly used by coffee producers in Colombia being considered an intermittent drying since it includes the day (when the loss of moisture in the grain occurs) and the night (when the moisture content remains constant). The following study describes the effect of drying time on the moisture, saturated fatty acids (SFA), unsaturated fatty acids (UFA), and sucrose content using a handcrafted *marquesina* structure solar drying system. Additionally, the results of the development of a model for heat and mass transfer of the *marquesina* solar drying of coffee beans in a

thin layer bed in 1D are presented and validated with experimental data. In this study, the correlations between the concentration of SFA, UFA, and sucrose with the drying time of the bean during coffee solar drying are shown. Simulation results showed that the particle model developed fits well and predicts the change in moisture content and temperature as the solar drying of the coffee progresses. The concentration reduction of sucrose was 25%, 29% and 42%; fatty acids (SFA and UFA) was 49%, 55%, and 65% for the 94-hour, 120-hour and 218-hour solar drying respectively. The results indicate that solar drying is a critical stage in the coffee benefit process that affects the concentration of chemical compounds present in the bean at the end of solar drying in the *marquesina*.

**Keywords:** Solar drying, handcrafted (*marquesina*), coffee beans, drying model, chemical composition.

## 4.1. Introducción

El café es uno de los commodities más importantes en la economía mundial, generador de millones de empleos y muchas familias caficultoras dependen del cultivo para su subsistencia [30], [94]. El café, uno de los productos más importantes comercializados internacionalmente por Colombia, contribuyó con el 9.5% de la participación agrícola en el PIB nacional del año 2019 [95]. Es una de las mayores bebidas consumidas en el mundo es el café, y la calidad de la bebida está altamente ligada a los procesos realizados en la finca desde la transformación del café en cereza hasta el pergamino seco [96].

El proceso de secado del café es una etapa crítica en el proceso de poscosecha del grano, ya que en este se alcanza el contenido de humedad que permite un almacenamiento adecuado del grano garantizando la calidad física y química al momento de preparar la bebida. Realizar un inadecuado proceso de secado del grano de café puede generar alteraciones indeseables tales como; contaminación microbiológica y aparición de sabores extraños al momento de la preparación de la bebida. Lo anterior causa pérdida de calidad y un precio menor de venta del grano de café seco [23], [29], [97].

En Colombia el secado solar es el método tradicional usado por los pequeños productores (< 5 ha) de café para realizar el secado del grano de café. El uso del secado solar está relacionado con la cantidad de café producido en la finca, su bajo costo y fácil operación. Las dos formas más empleadas de usar la energía solar en el secado del café son: secado al sol directo y en estructuras artesanales de secado comúnmente llamadas “marquesinas”. La marquesina más usada es la de forma parabólica y se caracteriza por que se

construye generalmente con madera y una cobertura plástica que genera en el interior de la marquesina el efecto invernadero [77], [98].

Se ha demostrado que la marquesina permite reducir el tiempo de secado comparado con el secado al sol directo de café [10]. Una desventaja en el secado solar es que no se tiene control sobre las variables (humedad relativa, temperatura e irradiancia solar) que determinan el tiempo de secado, lo puede generar una afectación a la calidad física y química del grano de café. Las condiciones ambientales para realizar el proceso de secado solar del café generalmente en Colombia no son favorables en el tiempo de la cosecha cafetera, lo que puede generar un proceso de secado no uniforme de los granos de café y generando pérdida de calidad y precio al momento de comercializar el café [72], [99].

Los fenómenos de transferencia de calor y masa al momento de realizar el proceso de secado solar toman una importancia relevante al evaporar el agua contenida en el grano de café, la velocidad de evaporación del agua desde la superficie del grano al ambiente circundante afecta los procesos fisicoquímicos que se dan al interior de los granos, en donde actualmente se tiene una comprensión parcial de cómo se dan estos procesos fisicoquímicos durante el secado solar del café [100], en este sentido, entender mejor el efecto de los fenómenos de transferencia de calor y masa en el secado solar del café es una interrogante que despierta el interés de investigadores, productores y comercializadores del grano, ya que la cantidad de agua contenida en el grano de café luego de realizar el proceso de secado juega un papel fundamental en la estabilización física y química del grano de café durante el almacenamiento [14], [50], [97], [101].

Para el secado mecánico (convección forzada de aire caliente) se han realizado modelaciones matemáticas para la pérdida de humedad en el grano de café durante el proceso de secado [56], [102]–[109], en contraste con el secado solar donde son pocas las aproximaciones matemáticas para describir la pérdida de humedad del grano de café [74], [99], [110], [111], sumado al desconocimiento del efecto del secado solar en la composición química del grano. Se considera el secado solar como un proceso intermitente dadas las condiciones ambientales que se tienen para realizar el secado, en general durante el día se da la pérdida de humedad en el grano debido a los gradientes de temperatura y humedad relativa entre el grano y el ambiente circundante, en contraste con la noche ya que si no se protege el grano de café este puede absorber nuevamente humedad del ambiente.

En Colombia la época de la cosecha principal del café se caracteriza por las pocas horas de brillo solar al día (< 3 horas en promedio en las regiones cafeteras colombianas), esto genera largos periodos de secado (5



a 15 días en promedio) cuando se realiza el proceso de poscosecha. Aun empleando estructuras plásticas “marquesinas”, donde se presenta el fenómeno del efecto invernadero [112]–[114].

Son pocas las investigaciones que describan los cambios de concentraciones de compuestos químicos en el grano de café durante el secado solar y su relación con el contenido de humedad [13], [90], adicionalmente se tiene poco conocimiento de cómo afecta el transcurso del tiempo de secado solar la composición química y física del grano de café. La importancia de entender cómo se dan estos cambios químicos y físicos que determinan el contenido final de biocompuestos al interior del grano del café, es crucial para el proceso de tostión, donde las propiedades físicas y químicas del café permitirán que se formen una gran cantidad de compuestos responsables del aroma y sabor de la bebida [115], [116].

Recientes investigaciones [29], [30], [117] muestran el efecto de utilizar diferentes tecnologías de secado sobre la concentración de compuestos químicos al final del proceso de secado del café, pero la dinámica de la concentración de compuestos químicos y la evaporación del agua con la duración del tiempo de secado solar no se ha descrito. Es posible analizar el comportamiento de biocompuestos (ácidos grasos y sacarosa) presentes en el grano de café usando técnicas de análisis químico (HPLC y GC-MS) y relacionar su contenido con el tiempo de secado solar del café.

Por lo tanto, con la presente investigación se evaluó el efecto que tiene la duración del secado solar en marquesina del café dependiente de las condiciones ambientales, mostrando el comportamiento de los ácidos grasos saturados e insaturados, sacarosa y el contenido de humedad a medida que avanza el secado solar del café. Para describir el contenido de humedad en el grano del café durante el secado solar en marquesina fueron considerados los fenómenos de transferencia de calor y masa con el desarrollo de un modelo en lecho de capa fina para el secado solar intermitente de grano de café en 1D.

## **4.2. Descripción estructura artesanal “Marquesina” para el secado solar del café**

En la figura 4-1 se describe el secador solar tipo marquesina usado en la experimentación. Consta de una estructura hecha en madera, guadua y tubos de PVC [figura 4-1(a)], que forma un túnel parabólico el cual se cubre con plástico Agroplas [figura 4-1(b)]. El área de secado fue de 36 m<sup>2</sup> (4 m ancho x 9 m fondo) para una masa de 250 kg de café húmedo con un espesor de 1 cm [figura 4-1(c)].



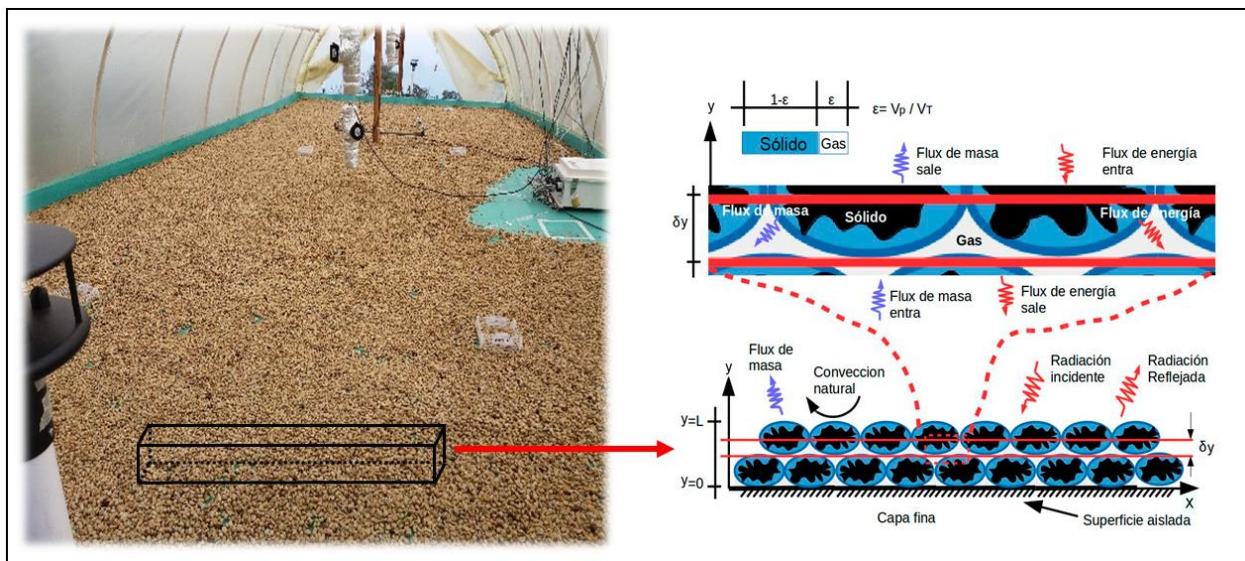
**Figure 4-1.** Descripción de la marquesina usada en el secado solar. (a) estructura, (b) cubierta plástica y (c) con café.

### 4.3. Estudio teórico del secado solar artesanal para granos de café capa fina

Se propuso un modelo fenomenológico en 1D para simular el proceso de secado de granos de café en capa fina en un sistema de secado por marquesina “efecto invernadero”. Con este modelo se predicen los perfiles de temperatura, la dinámica de la pérdida de humedad del grano y a partir de los resultados del contenido de humedad, la dinámica de los compuestos orgánicos evaluados en el grano de café. El modelo se desarrolló para tres condiciones de secado solar en una marquesina tradicional del sector cafetero colombiano, que incluye la temperatura de secado en la superficie del grano, donde esta temperatura depende de la irradiancia solar local, la humedad relativa del aire y otros factores [118], [119]. Para la construcción del modelo se realizaron varios supuestos como los que se plantean a continuación:

- Se construyó un modelo 1D como se ilustra en la Figura 4-2 y se construyó conceptualmente una capa fina de granos de 10 mm (no más de dos granos apilados verticalmente) para realizar los balances de masa y energía. La intención fue simplificar el modelo para generar solución aproximada a los comportamientos del secado solar descrito por diferentes autores [120]–[122].
- Se consideró transferencia de calor por radiación debida a la irradiancia solar, la temperatura circundante de la capa fina, la humedad relativa del aire y transferencia de calor por convección natural dentro de la marquesina.
- La humedad del grano de café se asume ubicada en la superficie del grano, y su cinética de secado se asume como una ecuación constitutiva tipo Arrhenius de primer orden.
- Las propiedades termodinámicas dentro del volumen de control se asumen como efectivas. Las propiedades del agua se calcularon según la teoría de secado propuesta por Whitaker [123].

- Los compuestos orgánicos (ácidos grasos) se consideran que se encuentran en la fase líquida durante el proceso de secado [20]. Los cambios físicos de compuestos orgánicos como la disminución en la concentración se asumen que son debido a los efectos de pérdida de humedad [29], [30].
- Se analiza una forma regular de una placa delgada (Figura 4-2). Este supuesto se basa en la conformación de la capa fina reportada por otros autores [123]–[125].
- Se considera un medio poroso debido a que la capa fina es conformada (Figura 4-2).
- No hay procesos difusivos debido a la conformación de la capa fina de granos.
- Se asume el equilibrio térmico de las fases dentro del volumen de control y las variaciones de las propiedades termodinámicas se definen por la saturación líquida del agua.



**Figure 4-2.** Concepto de partículas grano-café en capa fina en 1D.

Con los supuestos anteriores, es posible predecir los perfiles de temperatura de la capa fina de granos, la pérdida de humedad, y a partir de estos resultados se pueden obtener los efectos sobre los compuestos orgánicos estudiados para 3 escenarios de simulación en secado por marquesina.

#### 4.4. Modelo para el secado de granos de café en capa fina en marquesina

El modelo para el secado de granos de café en capa fina en marquesina se desarrolló considerando los fenómenos de transporte en la pérdida de humedad y la transferencia de calor originado por el secado solar. A continuación, se hace una descripción de los balances de masa y energía para el sistema café-agua en la capa fina.

#### 4.4.1. Balances de masa

##### *Sistema Café-Agua*

El balance de masa planteado para el secado de café es realizado para el sistema café-agua. Para este balance de masa, el único compuesto que se pierde en el proceso es el agua, que como se mencionó anteriormente se supone en la superficie del café. La pérdida de masa para el sistema descrito puede ser expresado mediante la ecuación (1).

$$\frac{\partial m_{cw}}{\partial t} = -\rho_{cw} V_{cw} k_1 \quad (1)$$

En donde  $m$ ,  $\rho$  y  $V$  representan la masa, la densidad y el volumen del sistema café-agua respectivamente. El subíndice  $cw$  representa el dominio café-agua. En esta expresión, las propiedades son calculadas como efectivas, es decir, representan la propiedad promedio de los sólidos considerados dentro del volumen de control.

El término  $k_1$  representa la velocidad de pérdida de masa del agua de acuerdo con la expresión de Arrhenius. Este término es negativo porque durante el proceso de secado siempre se pierde agua. La expresión que define el término  $k_1$  es la siguiente:

$$k_1 = A e^{-(E/RT)} \quad (2)$$

En donde los términos  $A$ ,  $E$ ,  $R$  y  $T$  representan el factor pre-exponencial, la energía de activación, la constante universal de los gases, y la temperatura.

##### *Gases*

La fase gaseosa de este modelo está conformada del agua evaporada desde la superficie del grano de café y ocupa el espacio entre los granos de café que conforman la fase gaseosa. El cambio en la masa de la fase gaseosa dentro del modelo puede ser representado por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial m_{gas}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{gas} V_{gas} \vec{v}_{gas}) = \rho_{gas} V_{gas} k_1 \quad (3)$$

En donde  $\vec{v}$  representa la velocidad del gas dentro del volumen de control, y el subíndice *gas* representa el dominio gaseoso. El primer término representa el cambio en la masa de la fase gaseosa en cualquier volumen de control, el segundo término representa el cambio en la masa del gas debido al transporte convectivo de la masa. De acuerdo con la geometría estudiada, una película delgada de material, la velocidad del gas en el eje x se considera despreciable. El tercer término representa la variación de la masa como consecuencia de la evaporación del agua desde la superficie del grano de café.

La velocidad del gas dentro del espacio poroso del lecho formado entre los granos de café puede ser expresada mediante la ley de Darcy, la cual establece una relación de la velocidad del gas con la presión ( $P$ ), viscosidad ( $\mu_{gas}$ ) y la permeabilidad del espacio poroso ( $B$ ).

$$v_{gas} = - \frac{B}{\mu_{gas}} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4)$$

#### 4.4.2. Balances de energía

Un balance de masa fue realizado para el volumen de control comprendiendo las fases del modelo café-agua y gases. Como se mencionó anteriormente, se supone que las fases están en equilibrio térmico, lo cual puede darse, debido a que las diferencias en las propiedades térmicas de estas dos fases no son considerablemente diferentes.

$$\left( \epsilon_{cw} \rho_{cw} c_{p_{cw}} + \epsilon_{gas} \rho_{gas} c_{p_{gas}} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \left( \epsilon_{gas} \rho_{gas} c_{p_{gas}} \vec{v}_{gas} T \right) = \text{div} (k_{eff} \nabla T) + \dot{Q}_{reacciones} \quad (5)$$

En donde  $\epsilon$ ,  $C_p$  y  $T$  representan la fracción volumétrica, el calor específico y la temperatura. El término  $k_{eff}$  representa la conductividad térmica efectiva, es decir, el promedio de las conductividades térmicas de cada una de las fases en el volumen de control. El primer término de la ecuación de energía corresponde a la acumulación de energía, el segundo término representa el cambio de la temperatura debido a fenómenos convectivos entre las fases. El tercer término establece el cambio de temperatura como consecuencia de los transportes difusivos. El término final de la ecuación establece el consumo o generación de energía en el

volumen de control como consecuencia de reacciones, en este caso de reacciones de evaporación, y puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{reactions} = \Delta H_{evap} \epsilon_w \rho_w k_1 \quad (6)$$

En esta expresión  $\Delta H_{evap}$ ,  $\epsilon_w$  y  $\rho_w$  representan la entalpía de reacción para el agua que se evapora, la fracción volumétrica y la densidad del agua, respectivamente. Como en el modelo matemático, esta es la única reacción considerada, el término será siempre negativo debido a la reacción endotérmica de evaporación del agua.

Los valores de las propiedades utilizadas en el modelo pueden ser observados en la Tabla 4-1. El valor de  $X_{db}$  corresponde al contenido de húmeda en base seca.

**Table 4-1.** Valores de propiedades utilizadas en el modelo.

Propiedad	Valor	Unidades	
$\rho_{cw}$	$268.02 \cdot X_{db} + 322.23$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	[126]
$\rho_w$	1000	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	[127]
$c_{p_{cw}}$	$2288.66 \cdot X_{db} + 2056.91$	$\left(\frac{J}{kg K}\right)$	[126]
$c_{p_w}$	4185	$\left(\frac{J}{kg K}\right)$	[127]
$c_{p_{gas}}$	1000	$\left(\frac{J}{kg K}\right)$	[127]
$k_{cw}$	$0.0096 \cdot X_{db} + 0.0107$	$\left(\frac{W}{m K}\right)$	[126]
$k_w$	$6.9 \cdot 10^{-3}$	$\left(\frac{W}{m K}\right)$	[127]
$k_{gas}$	$8.4044 \cdot 10^{-5} \cdot T + 4.63 \cdot 10^{-5}$	$T \text{ en } K, \left(\frac{W}{m K}\right)$	[127]
$B$	$1.29 \cdot 10^{-7}$	$m^2$	[106]
$\mu_{gas}$	$5.87 \cdot 10^{-6} + 4.25 \cdot 10^{-8} \cdot T$	$T \text{ en } K, (Pa \cdot s)$	[127]

#### 4.4.3. Condiciones de iniciales y de frontera

Las condiciones iniciales para las variables utilizadas en el modelo son las que se presentan a continuación.

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_{cw} = \epsilon_{cw_0} \\ \epsilon_{gas} = 0 \\ T_{cw} = T_{gas} = T_0 \end{array} \right\} t = 0 \quad (7)$$

Las condiciones de frontera para los balances de masa y energía presentados en el modelo son los que muestran a continuación:

$$\rho_{gas} \vec{v}_{gas} \Big|_{y=h} = h_m (\rho_{gas} - \rho_{\infty}) \quad (8)$$

$$\rho_{gas} \vec{v}_{gas} \Big|_{x=0=L; y=0} = 0 \quad (9)$$

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = T_{cw_s}(t) \quad (10)$$

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=0=L; y=0} = 0 \quad (11)$$

$T_{cw_s}$  es la temperatura en la superficie del grano del café en la sección superior de la capa fina del lecho ( $y = h$ ), se registraron mediciones experimentales con el fin de reproducir el comportamiento variable de la temperatura en un día de secado. Con la ecuación (10) se establece una temperatura dependiente del tiempo para cada día de secado simulado.

#### 4.5. Cinética de pérdida de humedad

Las cinéticas de pérdida de humedad se desarrollaron con mediciones experimentales cada 2 horas durante el día de secado, este cálculo se realiza con el fin de definir la cinética de pérdida de humedad durante las horas de sol. Las cinéticas propuestas en este artículo son expresiones obtenidas de la pérdida de masa del café a través de la obtención de las velocidades instantáneas de pérdidas de masa durante su proceso de secado durante las horas sol, se ajusta con una línea la pérdida de masa al día en función de la masa evaporada en el mismo día. En la figura 4-3 se ilustra las líneas de ajustes para intervalos de sol durante el tiempo de secado. Para cada una de las líneas obtenidas en el secado del café, se identificó la temperatura promedio del proceso, con el fin de relacionar la velocidad de secado con la temperatura a la cual se presentó.

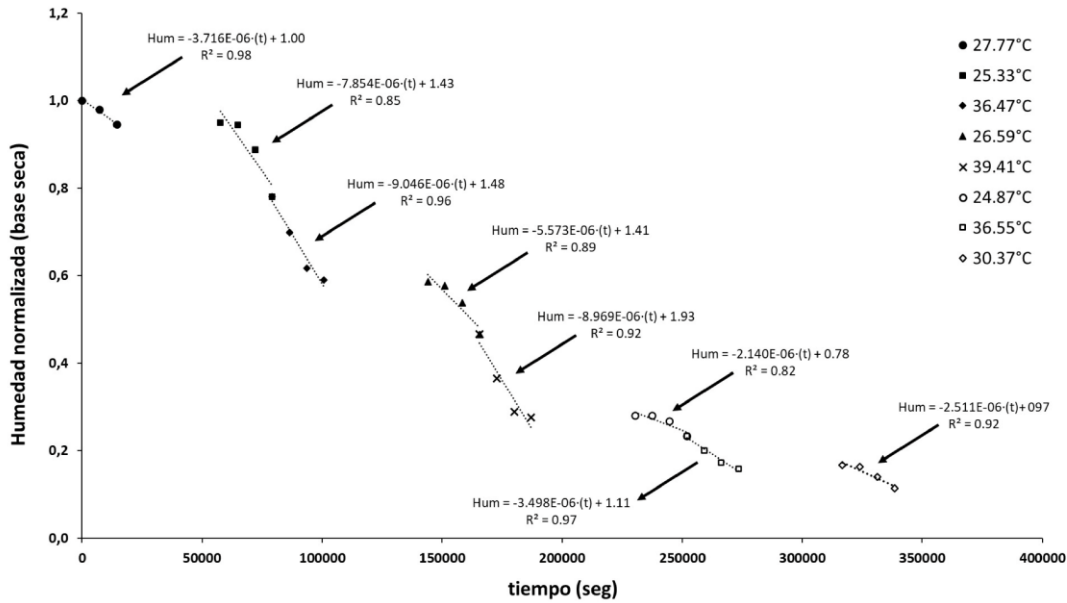


Figure 4-3. Ajuste lineal para la pérdida de masa del café para el secado de 94 horas.

En algunos días en los que se realizó el proceso de secado del café, la temperatura al interior de la marquesina presentó variaciones que fluctuaron entre los 20 a 40°C durante el día, presentándose temperaturas menores en las horas de la mañana que aquellas registradas en las horas de la tarde. Por lo anterior, se propuso un procedimiento de división mañana y tarde de los registros de secado para todos los días, de tal forma que para un día de secado se obtienen dos velocidades de pérdida de masa con dos líneas de ajuste diferentes para el mismo día. En cada una de las divisiones, se obtiene de nuevo la temperatura promedio en la cual se presentó la pérdida de masa. Este procedimiento permite obtener dos ajustes lineales de pérdida de masa en función de las temperaturas en la mañana y en la tarde. Dicho procedimiento se aplicó para los tres secados realizados de 94, 120 y 218 horas.

Una vez identificadas las pendientes de las líneas de ajuste de todos los días de los secados, se realizó un listado agrupado por temperaturas promedio de secado, se agrupó los datos por temperaturas similares y se generó una nueva línea de ajuste en función de la temperatura, los valores de pérdida de masa se normalizaron y se recalcó una nueva línea para todo el período de secado en función de sus temperaturas.

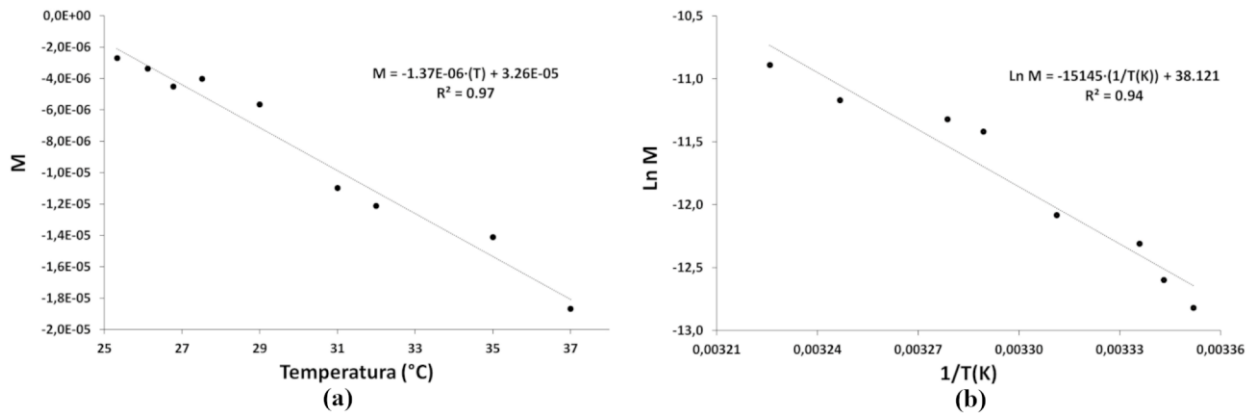
Table 4-2. Pendientes obtenidas para las temperaturas registradas durante el secado.

T (°C)	M	ln M	[1/T(K)]·10 <sup>-3</sup>
25	-2.709E-06	-12.82	3.352
26	-3.374E-06	-12.60	3.343
27	-4.508E-06	-12.31	3.336
28	-4.028E-06	-12.42	3.328



29	-5.648E-06	-12.08	3.311
31	-1.097E-05	-11.42	3.289
32	-1.213E-05	-11.32	3.279
35	-1.411E-05	-11.17	3.247
37	-1.867E-05	-10.89	3.226

Para cada temperatura se obtuvo un valor de la pendiente que representa su velocidad de secado reportada en la en la Tabla 4-2. Se seleccionaron los ajustes lineales utilizando el coeficiente de determinación superior a 0.90. con esta información se elaboraron unas nuevas líneas de ajuste entre la pérdida de masa (M) y las temperaturas como se ilustra en la figura 4. Este procedimiento permite encontrar unos parámetros cinéticos promedios de acuerdo con las divisiones del día en mañana y tarde para un período de secado.



**Figure 4-4.** Ajustes lineales para la (a) pérdida de masa (M) y (b) las temperaturas.

De la figura 4-4(a). se observa un coeficiente de determinación superior a 0.95. por lo cual se puede considerar una relación directa entre la velocidad de secado y la temperatura del proceso, independiente de la concentración de humedad presente en el material. Dicha expresión es como se muestra en la ecuación (12).

$$M = -1.369 \times 10^{-6} * T + 3.258 \times 10^{-5} \quad (12)$$

A través de un ajuste experimental se puede expresar con la ecuación (12) la velocidad de secado en cualquier momento, conociendo solamente la temperatura del lecho fino de café. De la figura 4-4(b) se puede encontrar los parámetros cinéticos tipo Arrhenius como el factor pre-exponencial A y la Energía de activación para el secado del café en marquesina, según se observa en la ecuación (13).

$$k_1 = 3.595 * 10^{16} e^{-\left(\frac{125.92}{RT}\right)} \quad (13)$$

#### 4.6. Material Vegetal

Los experimentos de secado solar se realizaron en la finca Santa Isabel (5°52'09''N. 75°40'06''W) ubicada en el municipio de Fredonia del departamento de Antioquía – Colombia. Se utilizó café de variedad Castillo® que provino del lote Bellavista con un área de siembra de 4.11 ha a una altura de 1967 msnm. Se realizó el proceso de beneficio por vía humedad [82].

El café luego del proceso de fermentación fue lavado y colocado al interior de la marquesina para el proceso de secado solar. Se usó una muestra de 250 kg de café lavado para cada uno de los procesos de secado realizados en marquesina, garantizando un espesor de 1cm de capa de granos de café. El proceso de secado del café se dio por culminado cuando el café alcanzó un contenido de humedad del 11% en base húmeda, esto se verificó usando el método Gravimet [85]. El registro de las variables ambientales se realizó usando un equipo de adquisición de datos marca Campbell Scientific datalogger CR1000 [128].

#### 4.7. Cuantificación de ácidos grasos saturados e insaturados y sacarosa

La determinación de ácidos grasos se realizó adaptando la metodología propuesta por [34]. Para la identificación y cuantificación de los ácidos grasos se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a masas (GCMS-QP2010 ultra - Shimadzu) y un kit de estándares de ácidos grasos para comparar los cromatogramas y los tiempos de retención de las muestras. Las condiciones cromatográficas empleadas fueron: Inyector AOC-20i-S. volumen de inyección 1µL. solvente Diclorometano. GC. temperatura del inyector 225°C. modo de inyección Split. columna DB-WAX (60 m. 0.320 mm. 0.25 µm). flujo de columna 1.2 ml/min. división Split 20:1. horno 100°C – 4min. 3°C/min - 240°C - 10 min. MS. temperatura de la fuente 250°C. temperatura de la interface 250°C. tiempo 0.3 s. modo Scan (35 – 800 m/z).

Los resultados obtenidos se agruparon (Mirístico, Palmítico, Heptadecanóico, Esteárico, Araquídico y Behénico) por ácidos grasos saturados (AGS) y (Palmitoleico, Oleico, linoleico, linolénico y Eicosanoico) ácidos grasos insaturados (AGI).

La determinación de sacarosa se realizó utilizando adaptando el método de extracción descrito por [35]. donde 3 g de café verde previamente molido se mezclaron con 100 mL de agua Milli-Q a 90 °C en un

erlenmeyer. La mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente. se vortizó y luego del reposo se filtró por gravedad. El filtrado se aforó a un volumen de 100 mL; seguidamente. una alícuota de 2.5 mL se llevó a un balón volumétrico de 10 mL. aforando con acetonitrilo grado HPLC. La mezcla final se filtró usando un filtro de nylon de 0.45  $\mu\text{m}$  para analizar el contenido de azúcares mediante HPLC-RID. El reactivo utilizado fue estándar de sacarosa (Sigma Aldrich) y acetonitrilo (Merck). La columna Zorbax NH<sub>2</sub> analytical (4.6 x 150 mm. 5- Micron. Agilent) se utilizó para la separar la sacarosa a temperatura ambiente. La separación cromatográfica se realizó con una fase móvil de elución isocrática de 75 % de acetonitrilo y 25% de agua. El flujo se ajustó a 1 mL/min. el volumen inyectado fue de 10  $\mu\text{L}$  y el tiempo total de corrido de 30 min [36].

La toma de muestras para la cuantificación de AGS, AGI y sacarosa se realizó al iniciar el proceso de secado solar y tomando muestras de café cada 12 horas hasta que el café alcanzó aproximadamente un 11% de humedad en base humedad. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

#### **4.8. Simulación del modelo de partícula para granos de café capa fina**

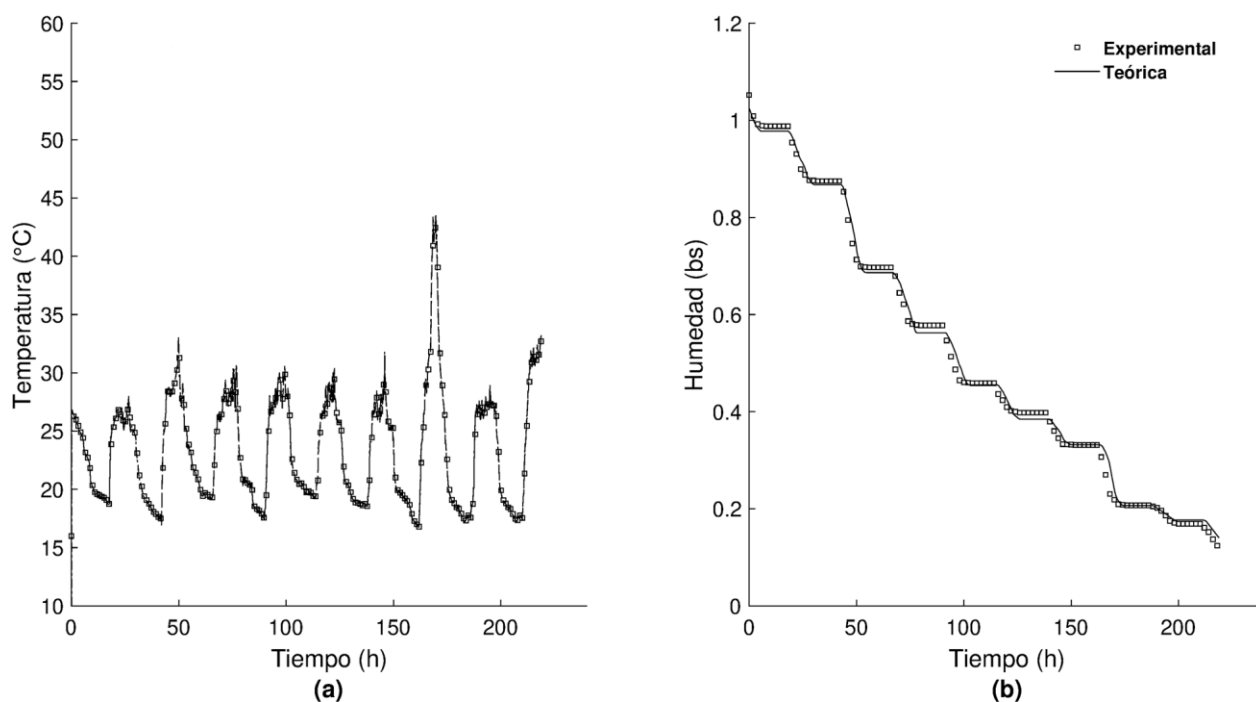
La simulación del modelo de la partícula para granos de café de capa fina se realizó en código FORTRAN® y se compararon con resultados experimentales en secado por marquesina de 218 horas de secado considerando los cambios de temperatura del día y la noche durante el tiempo secado. A continuación. se elabora la solución y validación del modelo que da cuenta del comportamiento del secado en marquesina.

##### **4.8.1. Solución del modelo**

La solución al modelo planteado en las ecuaciones descritas arriba (ecuaciones 1-6 y 10-11) se realizó por la técnica de volumen finito para una geometría unidimensional de capa fina como está representado en la figura 2. Las ecuaciones se discretizan en la dirección vertical de la capa fina para luego ser incorporadas en código FORTRAN® y a dichas ecuaciones se les imponen las condiciones de frontera descritas en las ecuaciones (7-9). La solución numérica utilizó el algoritmo de Adams Moulton de las herramientas de FORTRAN® IMSL. Se define como criterio una tolerancia en las diferencias del error de la discretización en un valor  $1 \times 10^{-4}$  confirmadas con la rutina de FORTRAN® GEAR utilizando la rutina Fortran Gear. Se elaboró el criterio de independencia de llama como herramienta de simulación de la aproximación de los datos teóricos de la simulación frente a los datos experimentales utilizando 200 nodos en la dirección del eje vertical de la capa fina. El valor de 200 nodos fue adecuado para definirlo como criterio de simulación.

### 4.8.2. Validación del modelo

En la figura 4-5 se muestra la correspondencia de los datos experimentales para la temperatura en la superficie del grano (a) y contenido de humedad base seca (b). Se observa que el modelo propuesto para determinar el contenido de humedad durante el secado solar en marquesina describe de manera adecuada el comportamiento entre los datos experimentales y teóricos en todo el rango del tiempo de simulación del secado que fue de 218 horas. Los resultados muestran que se tiene un buen ajuste entre el comportamiento de la pérdida de humedad y los cambios de temperatura durante el tiempo de secado que involucra el día y la noche. Con esta información se confirma que el modelo propuesto en las ecuaciones mencionadas arriba confirma a través de la simulación la validación del modelo.



**Figure 4-5.** Comparación experimental del secado solar de 218 horas frente a simulación (a) Temperatura y (b) Humedad.

## 4.9. Resultados de la simulación

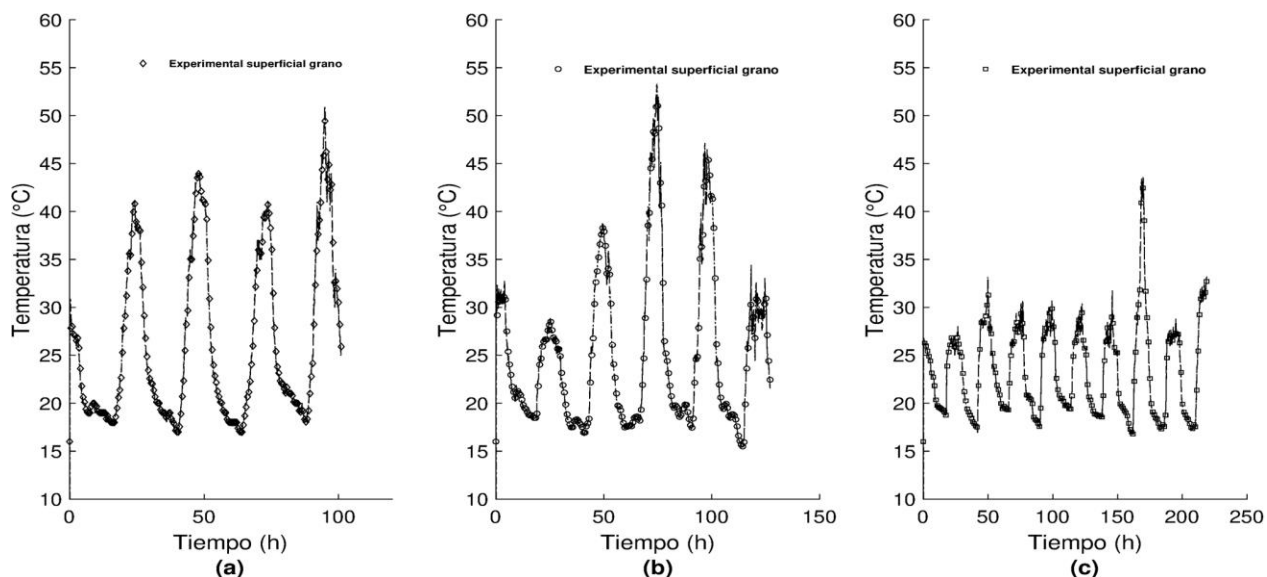
La simulación se realizó para tres tiempos de secado en marquesina (94, 120 y 218 horas). Para cada uno de esos tiempos de secado se tiene los datos experimentales del secado en café considerando los cambios de temperatura del día y la noche. Los resultados experimentales se reportan en puntos mientras que los

resultados de la simulación se reportan en líneas continuas. Se elaboraron los diferentes perfiles de cambios de temperatura y pérdida de humedad para los granos de café.

#### 4.9.1. Temperatura en la partícula para granos de café capa fina

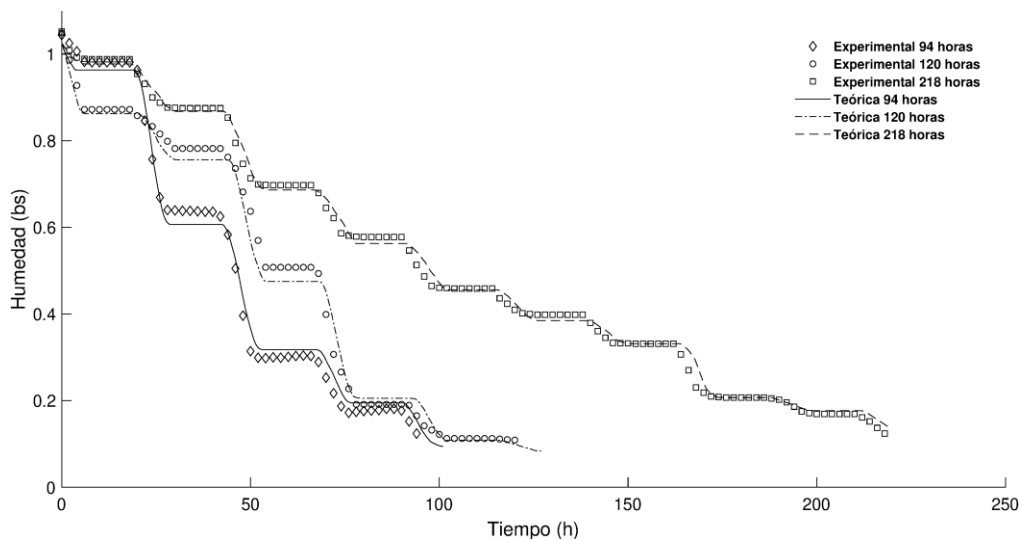
En la figura 4-6 se ilustra el comportamiento de los cambios de temperatura en la superficie del grano para las simulaciones con tiempo de secado solar de (a) 94, (b) 120 y (c) 210 horas. El comportamiento de la temperatura es característico de lo que sucede cuando avanza el día y la noche. Este comportamiento de la temperatura es similar a los reportados por Vijayan et al.[123].

En la figura 4-6(a) la temperatura superficial del grano del café alcanzó valores entre 40 y 50°C generando un tiempo de secado de 94 horas, mientras que en la figura 4-6(b) el segundo día de secado no superó los 30 °C en la superficie del grano alargando el secado a 120 horas. En la figura 4-6(c) se observa que, al tener temperaturas superficiales del grano por debajo de 30°C, el proceso de secado se da de forma lenta generando largos tiempos de secado. Se evidencia que temperaturas superficiales del grano entre 40 y 50°C disminuyen notoriamente el tiempo de secado solar en marquesina del café. En general el secado solar en marquesina del café es un proceso que se da a bajas temperaturas producto de las condiciones ambientales disponibles al momento de realizar el secado.



**Figure 4-6.** Perfil experimental de temperatura superficial de los granos de café durante el secado solar en marquesina de (a) 94, (b) 120 y (c) 218 horas.

En la figura 4-7 se ilustra el comportamiento de la humedad en base seca vs el tiempo del secado solar en marquesina. El modelo desarrollado con las ecuaciones (1-13) describen de manera adecuada el contenido de humedad de los granos del café a medida que avanza el secado solar. Los resultados muestran un adecuado ajuste entre los datos experimentales y los datos teóricos, indicando que el proceso de secado solar en marquesina para café lavado puede aproximarse con el modelo propuesto. Es importante resaltar que el modelo propuesto da cuenta de la intermitencia generada durante el secado solar, intermitencia producto del día y la noche, mostrando que durante el día se da la pérdida de humedad en el grano y durante la noche la humedad permanece constante. Efectivamente el tiempo de secado depende directamente de las condiciones ambientales [8], [111], [129], donde con el modelo desarrollado se da constancia de que mayores tiempos de secado están relacionados con tasas menores de evaporación de agua ligadas a las condiciones ambientales del lugar donde se realice el secado solar. Aunque el modelo propuesto no considera los fenómenos difusivos del agua desde el interior del grano hacia la superficie, el adecuado ajuste obtenido para el contenido de humedad experimental y el contenido teórico puede ser producto de que el proceso de secado solar en marquesina del café es un proceso lento y a bajas temperaturas y por lo tanto los fenómenos difusivos no son relevantes.



**Figure 4-7.** Experimental and theoretical comparison of moisture content in dry base for 94-h, 120-h, and 218-h sun-drying.

#### **4.10. Comportamiento de los AGS, AGI y sacarosa durante el secado solar en marquesina**

En las figuras 4-8(a) y 4-8(b) se representa el comportamiento de la concentración de los ácidos grasos saturados (AGS) y ácidos grasos insaturados (AGI) con relación a como avanza el tiempo de secado solar en marquesina de 94, 120 y 218 horas. La concentración inicial promedio de AGS y AGI en el café fue de  $2.50 \pm 0.31$  y  $0.97 \pm 0.05$  (mg/g bs) respectivamente para los tres escenarios de secado solar. Cuando el grano de café alcanzó aproximadamente un contenido de humedad del 11% [29], [30] se finalizó el proceso de secado. Se obtuvo una mayor reducción del contenido de AGS y AGI para un tiempo de secado de 218 horas, evidenciando que para menores tiempos de secado (94 y 120 horas) se tienen mayores concentraciones de AGS y AGI.

Se encontró una reducción del 65, 55 y 49% en la concentración de AGS y AGI para los tiempos de secado de 218, 120 y 94 horas respectivamente al finalizar el secado solar en marquesina. Esto permite comprender la importancia que tiene la duración del secado solar en marquesina del café, que es un proceso de secado lento e intermitente producto del día y la noche. Claramente se observa que las condiciones ambientales gobiernan la duración del tiempo del secado solar en marquesina y esto condiciona la cantidad de AGS y AGI al interior de los granos del café. La calidad de la bebida del café está ligada a la concentración de AGS y AGI al final del proceso del secado, dado que el contenido de AGS y AGI influyen positivamente en la calidad sensorial de la bebida del café luego del proceso de tostión [18], [130].

Con los resultados obtenidos de la dinámica de la concentración de los AGS y AGI se evidenció el efecto que tiene diferentes tiempos de secado solar en marquesina del café, mostrando mayor concentración de AGS y AGI si el tiempo de secado solar se reduce. Según la revisión de literatura realizada por [82], muestra que los procesos metabólicos de los granos de café siguen a medida que se dan las diferentes etapas de poscosecha del café (despulpado, fermentación y secado), donde la etapa de secado es crítica para disminuir la actividad microbológica y desacelerar procesos metabólicos en los granos de café.

Adicionalmente, esta reducción de los AGS y AGI se puede atribuir a que en los granos de café se dan procesos de oxidación lipídica por efecto del oxígeno, la luz solar y enzimas provenientes de levaduras que aún están presentes en el ambiente natural donde se realiza el proceso de secado solar en marquesina del café, indicando que la actividad de agua ( $a_w > 0.8$ ) asociada a un secado lento y periodos extensos de secado solar pueden propiciar en los granos de café fermentaciones adicionales y procesos de estrés metabólico que pueden generar disminución en la concentración de AGS y AGI.

En la figura 4-8(c) se ilustra el comportamiento del contenido de sacarosa normalizado con relación a los tres escenarios de secado solar en marquesina. Donde el contenido inicial promedio de sacarosa en los

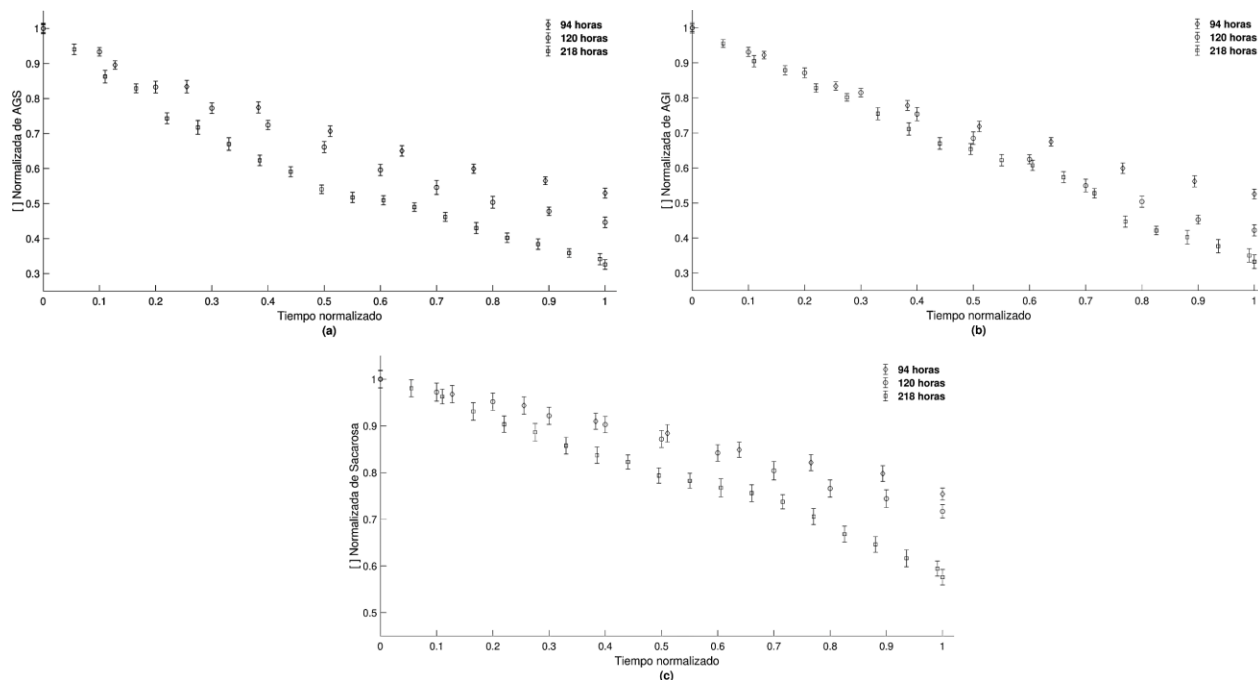
granos de café sometidos a los tres escenarios de secado solar de  $105.13 \pm 5.31$  (mg/g bs). Se presentó una mayor reducción del contenido de sacarosa al finalizar el secado solar de 218 horas. Se obtuvo una reducción de sacarosa del 42, 29 y 25% para el secado solar en marquesina de 218, 120 y 94 horas respectivamente.

La reducción del contenido de sacarosa en los granos de café usando el secado solar está directamente relacionado con el tiempo de secado, donde Kulapichitr et al. [30] y Dong et al. [29] muestran que el contenido final medido de sacarosa en el café esta correlacionado con la tecnología empleada para realizar el proceso del secado, de estas investigaciones se puede inferir el efecto asociado a los tiempos de secado según la tecnología empleada sobre los biocompuestos presente en el café.

Los resultados encontrados permiten afirmar que tiempos prolongados de secado relacionados con bajos flujos de evaporación de agua, tiempos característicos del secado solar, determinan el contenido final de sacarosa al interior de los granos de café al finalizar el secado solar en marquesina. Los contenidos finales de sacarosa en los granos de café luego de realizar el secado solar en esta investigación son similares a los reportados empleando el secado solar para el café por varios investigadores [13], [14], [42], [82], sin embargo los resultados hallados en esta investigación permiten entender la evolución del contenido de sacarosa en el café a medida que avanza el tiempo de secado solar en marquesina.

La sacarosa es unos de los carbohidratos más importantes en las reacciones de Millard en el proceso de tostión, ya que es precursora de muchos sabores y aromas que imparten calidad a la bebida del café [131], por lo tanto, obtener mayores contenidos de sacarosa al final del proceso de secado solar está directamente ligado a menores tiempos de secado. Se resaltan las condiciones de experimentación en el presente trabajo, ya que el proceso de secado fue realizado en una marquesina tradicional de la zona cafetera colombiana, donde hay una congruencia de muchas variables que afectan la calidad del grano al realizar el proceso de secado solar.





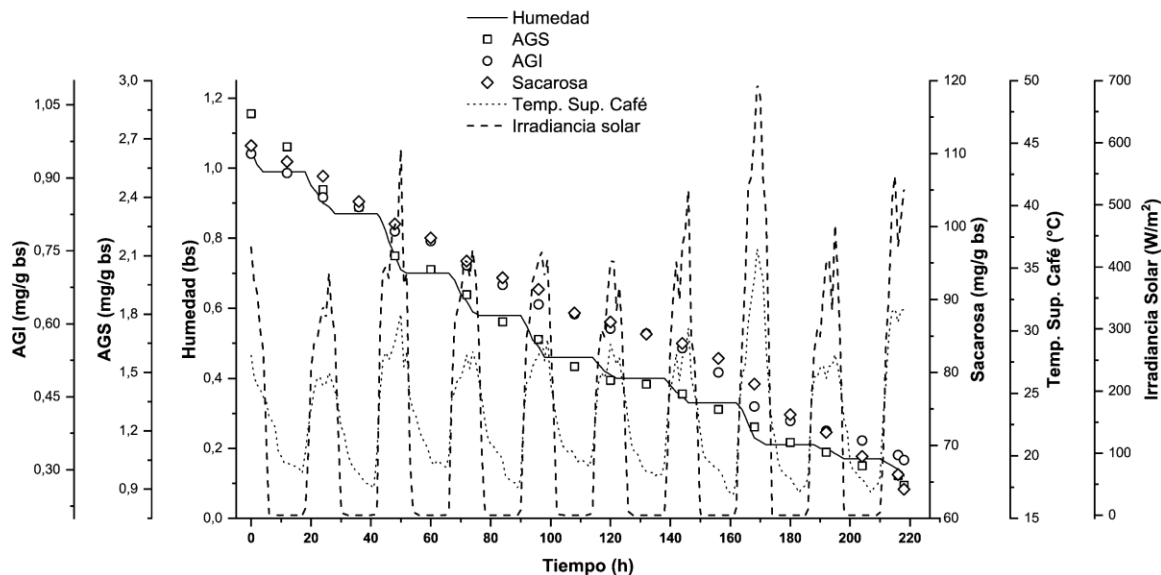
**Figure 4-8.** Concentración normalizada de AGS (a), AGI (b) y sacarosa (c) con relación al tiempo de secado solar normalizado.

En la figura 4-9 se relacionan el contenido de humedad, concentración de AGS, concentración de AGI, concentración de sacarosa, la temperatura superficial del café e irradiancia solar registrados experimentalmente para el tiempo de secado solar en marquesina de 218 horas (9 días), tiempo de duración de secado solar más común en la caficultura colombiana.

El contenido promedio inicial de húmeda del café fue 1.02 (kg agua/kg materia seca) (0.54 kg agua/materia húmeda) y finalizó con una humedad del 0.12 (kg agua/kg materia seca) (0.11 kg agua/kg materia húmeda).

La concentración promedio inicial en los granos de café fue de 111.08 (mg/g bs), 2.81 (mg/g bs) y 0.96 (mg/g bs) para Sacarosa, AGS y AGI respectivamente. Al terminar el proceso de secado las concentraciones finales de Sacarosa, AGS y AGI fueron de 63.51 (mg/g bs), 0.93 (mg/g bs) y 0.32 (mg/g bs) respectivamente.

La temperatura promedio registrada en la superficie de los granos de café de 7:00 am a 6:00 pm fue de  $26.93 \pm 1.58$  °C y la irradiancia solar promedio registrada al interior de la marquesina de 10:00 am a 4:00 pm fue de  $403.02 \pm 81.56$  (W/m<sup>2</sup>) durante todo el tiempo de secado solar.



**Figure 4-9.** Valores promedio del contenido de humedad, concentración de biocompuestos y condiciones ambientales para el secado solar en marquesina de 218 horas del café.

En la curva de secado del café se observa que la temperatura superficial del café y la irradiancia solar disponibles durante el día y la noche indican sobre la velocidad de evaporación del agua desde la superficie del grano al ambiente, confirmando que la reducción de humedad solo se presenta durante el día. Se observa que la concentración promedio de AGS, AGI y Sacarosa al interior de los granos de café disminuye a medida que transcurre el tiempo de secado solar y se reduce el contenido de humedad. Es claro que el secado solar en marquesina condicionado por variables ambientales presentes en el día y noche genera una intermitencia del secado y que esto determina las concentraciones de los biocompuestos en los granos del café, biocompuestos importantes en la formación del sabor y aroma del café al ser torrefactado.

En los granos de café verde se presenta un estrés hídrico al ser sometidos al secado, esto desencadena una serie de procesos metabólicos que buscan preservar la viabilidad del proceso de germinación del embrión alojado en el endospermo del grano, en este sentido se han identificado marcadores de esta actividad metabólica tales como el ácido gamma-aminobutírico ( $\gamma$ -aminobutírico, o GABA, por sus siglas en inglés), las dehidrinas [50] y proteínas [22] que se relacionan con el metabolismo de compuestos orgánicos presentes en el café verde.

El efecto de un proceso de secado lento, asociado a los procesos físicos, químicos y biológicos derivados de la actividad acuosa en el grano del café condicionan los contenidos de AGS, AGI y sacarosa. Los resultados

mostrados sugieren que realizar en menor tiempo el secado solar en marquesina permite obtener mayor concentración de biocompuestos en el café.

#### **4.11. Conclusions**

Una comparación detallada y completa de la evaluación de los diferentes compuestos relevantes en la composición de la calidad del café fue realizada en este estudio y se determinó de manera contundente que el tiempo de secado afecta la evolución de estos compuestos. En este sentido secados prolongados como los que se dan en sistemas artesanales condicionado por las condiciones ambientales y sometidos a la energía solar son los que más reducen los AGS, AGI y sacarosa.

La evolución en el tiempo de los compuestos orgánicos (AGS, AGI y sacarosa) medidos durante el secado solar del café en marquesina, revela que se deben implementar mejoras tecnológicas para reducir el tiempo de secado. Por lo tanto, es imperativo mejorar los aspectos convectivos del aire al interior de la marquesina, aprovechar la energía solar para un calentamiento previo del aire y lograr introducir con condiciones más controladas de temperatura y humedad relativa; de tal manera que se reduzca significativamente el tiempo de secado y se evite los efectos nocivos de procesos microbiológicos y metabólicos.

Un modelo matemático unidimensional fue desarrollado para predecir la evolución en el tiempo de la pérdida de humedad durante el secado, el cual fue validado satisfactoriamente con datos experimentales. Se logró predecir que el secado solar en marquesina evoluciona lentamente, indicando pausas prolongadas en la reducción de la humedad durante la noche; que las condiciones ambientales afectan de manera significativa la evolución del secado, lo cual redundará sobre la afectación de la calidad del producto final.

## Referencias capítulos 2, 3 y 4

- [1] Federación nacional de cafeteros de Colombia, “Informe del gerente al 87 congreso nacional de cafeteros,” 2019. [Online]. Available: <https://federaciondefcafeteros.org/app/uploads/2019/12/Informe-del-Gerente-al-87-Congreso-Nacional-de-Cafeteros-2019.pdf>.
- [2] L. Tuccio, P. Pinelli, A. Godina, J. M. Medina, and G. Agati, “The chemical composition and quality of the Parainema coffee cultivar under different shading conditions, as assessed by a leaf flavonol optical index,” *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 245, no. 8, pp. 1733–1741, 2019, doi: 10.1007/s00217-019-03285-1.
- [3] L. Bravo-Monroy, S. G. Potts, and J. Tzanopoulos, “Drivers influencing farmer decisions for adopting organic or conventional coffee management practices,” *Food Policy*, vol. 58, pp. 49–61, 2016, doi: 10.1016/j.foodpol.2015.11.003.
- [4] G. Puerta, “Influencia del proceso de beneficio en la calidad del cafe,” *Cenicafe*, vol. 50, no. 1, pp. 78–88, 1999.
- [5] L. T. Lim, M. Zwicker, and X. Wang, *Coffee: One of the most consumed beverages in the world*, Third Edit., vol. 4. Oxford: Elsevier, 2019.
- [6] F. M. Borém, E. R. Marques, and E. Alves, “Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells,” *Biosyst. Eng.*, vol. 99, no. 1, pp. 62–66, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.09.027.
- [7] R. F. Schwan and G. H. Fleet, *Cocoa and Coffee Fermentations*. Taylor & Francis Group, 2014.
- [8] J. . Jurado, E. . Montoya, C. . Oliveros, and J. García, “Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café,” *Rev. Cenicafé*, vol. 60, no. 2, pp. 135–147, 2009.
- [9] R. Osorio Hernandez, L. M. Guerra-Garcia, I. de F. Ferreira-Tinôco, J. A. Osorio-Saraz, and I. D. Aristizábal-Torres, “Simulation of a thermal environment in two buildings for the wet processing of coffee,” *DYNA*, vol. 82, no. 194, pp. 214–220, Dec. 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n194.49526.
- [10] FNC-Cenicafé, *Manual del Cafetero Colombiano (Tomo III)*, no. 3. 2013.
- [11] G. I. Puerta, “Composición química de una taza de café,” *Av. Técnicos, Cenicafé*, vol. 414, 2011.
- [12] M. Murkovic and K. Derler, “Analysis of amino acids and carbohydrates in green coffee,” *J. Biochem. Biophys. Methods*, vol. 69, no. 1–2, pp. 25–32, Nov. 2006.
- [13] M. Kleinwächter and D. Selmar, “Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees,” *Food Chem.*, vol. 119, no. 2, pp. 500–504, 2010, doi: 10.1016/j.foodchem.2009.06.048.

- [14] S. Knopp, G. Bytof, and D. Selmar, "Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans," *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 223, no. 2, pp. 195–201, Jun. 2006, doi: 10.1007/s00217-005-0172-1.
- [15] D. Selmar, "Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans," no. July, 2014, doi: 10.1007/s00217-005-0172-1.
- [16] D. Villarreal, L. Baena, and H. Posada, "Análisis de lípidos y ácidos grasos en café verde de líneas avanzadas de *coffea arabica* cultivadas en Colombia," *Cenicafé*, vol. 63, no. 1, pp. 19–40, 2012.
- [17] T. Joët *et al.*, "Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans," *Food Chem.*, vol. 118, no. 3, pp. 693–701, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.foodchem.2009.05.048.
- [18] K. Speer and I. Kölling-Speer, "The lipid fraction of the coffee bean," *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 18, no. 1, pp. 201–216, 2006, doi: 10.1590/S1677-04202006000100014.
- [19] N. Caporaso, M. B. Whitworth, S. Grebby, and I. D. Fisk, "Rapid prediction of single green coffee bean moisture and lipid content by hyperspectral imaging," *J. Food Eng.*, vol. 227, pp. 18–29, 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.01.009.
- [20] F. Borém, E. R. Marques, and E. Alves, "Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells," *Biosyst. Eng.*, vol. 99, no. 1, pp. 62–66, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.09.027.
- [21] C. I. Rodrigues, R. Maia, and C. Máguas, "Comparing total Nitrogen and Crude Protein content of Green Coffee Beans from Different Geographical Origins," *Coffee Sci. Lavras*, vol. 5, no. 3, pp. 197–205, 2010.
- [22] K. G. do Livramento *et al.*, "Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process," *Food Chem.*, vol. 221, pp. 1874–1882, 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.10.069.
- [23] M. de S. G. Barbosa, M. B. dos S. Scholz, C. S. G. Kitzberger, and M. de T. Benassi, "Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews," *Food Chem.*, vol. 292, no. April, pp. 275–280, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.04.072.
- [24] I. Hečimović, A. Belščak-Cvitanović, D. Horžić, and D. Komes, "Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting," *Food Chem.*, vol. 129, no. 3, pp. 991–1000, Dec. 2011.
- [25] J. Avelino *et al.*, "Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitudeterroirs of Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 85, no. 11, pp. 1869–1876, Aug. 2005, doi: 10.1002/jsfa.2188.
- [26] B. Cheng, A. Furtado, H. E. Smyth, and R. J. Henry, "Influence of genotype and environment on coffee quality," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 57, pp. 20–30, 2016, doi: 10.1016/j.tifs.2016.09.003.

- [27] A. B. A. De Azevedo, T. G. Kieckbush, A. K. Tashima, and R. S. Mohamed, "Extraction of green coffee oil using supercritical carbon dioxide," vol. 44, pp. 186–192, 2008, doi: 10.1016/j.supflu.2007.11.004.
- [28] M. C. Monteiro and A. Farah, "Chlorogenic acids in Brazilian Coffea arabica cultivars from various consecutive crops," *Food Chem.*, vol. 134, no. 1, pp. 611–614, 2012, doi: 10.1016/j.foodchem.2012.02.118.
- [29] W. Dong, R. Hu, Z. Chu, J. Zhao, and L. Tan, "Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans," *Food Chem.*, vol. 234, pp. 121–130, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.156.
- [30] F. Kulapichitr, C. Borompichaichartkul, I. Suppavorasatit, and K. R. Cadwallader, "Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee," *Food Chem.*, vol. 291, no. April, pp. 49–58, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.152.
- [31] A. Escarramán *et al.*, "Determinación de los Atributos de Calidad del Café en Zonas Productoras de la República Dominicana," Santo domingo, 2007.
- [32] A. E. Peñuela Martínez, J. P. Pábon Usaquén, and J. R. Sanz Uribe, "MÉTODO FERMAESTRO: Para determinar la finalización de la Fermentación del mucílago de café," *Cenicafé Av. Técnicos 431*, pp. 1–8, 2013.
- [33] J. R. Parra-Coronado, Alfonso, Roa-Mejía, Gonzalo, Oliveros-Tascón, Carlos E, Sanz-Uribe, *Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino*. 2017.
- [34] B. Bertrand, D. Villarreal, A. Laffargue, H. Posada, P. Lashermes, and S. Dussert, "Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) varieties and growing origins," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 56, no. 6, pp. 2273–2280, 2008, doi: 10.1021/jf073314f.
- [35] W. J. Mullin and D. B. Emmons, "Determination of organic acids and sugars in cheese, milk and whey by high performance liquid chromatography," *Food Res. Int.*, vol. 30, no. 2, pp. 147–151, 1997, doi: 10.1016/S0963-9969(97)00026-4.
- [36] C. Liu, N. Yang, Q. Yang, C. Ayed, R. Linforth, and I. D. Fisk, "Enhancing Robusta coffee aroma by modifying flavour precursors in the green coffee bean," *Food Chem.*, vol. 281, no. November 2018, pp. 8–17, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.12.080.
- [37] C. Marín and G. I. Puerta, "Contenido de Ácidos Clorogénicos en Granos de Coffea Arabica y C. Canephora, según el desarrollo del fruto," *Cenicafé*, vol. 59, no. 1, pp. 7–28, 2008.
- [38] International Organization for Standardization, *Coffee and coffee products. Determination of the Caffeine Content using High Performance Liquid Chromatography (HPLC)-Reference method*, ISO. Geneve: ISO:20481, 2008.

- [39] Specialty Coffee Association, “Coffee Standards,” p. 14, 2018, [Online]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/584f6bbef5e23149e5522201/t/5bd985c1352f53cb4cc1be48/1540982325719/Coffee+Standards-Digital.pdf>.
- [40] S. Lê, J. Josse, and F. Husson, “FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis,” *J. Stat. Softw.*, vol. 25, no. 1, pp. 253–258, 2008, doi: 10.18637/jss.v025.i01.
- [41] R Development Core Team, *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. 2004.
- [42] G. S. Duarte, A. A. Pereira, and A. Farah, “Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods,” *Food Chem.*, vol. 118, no. 3, pp. 851–855, 2010, doi: 10.1016/j.foodchem.2009.05.042.
- [43] N. Caporaso, M. B. Whitworth, S. Grebby, and I. D. Fisk, “Non-destructive analysis of sucrose, caffeine and trigonelline on single green coffee beans by hyperspectral imaging,” *Food Res. Int.*, vol. 106, no. September 2017, pp. 193–203, 2018, doi: 10.1016/j.foodres.2017.12.031.
- [44] C.-L. Ky, J. Louarn, S. Dussert, B. Guyot, S. Hamon, and M. Noiro, “Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P. accessions,” *Food Chem.*, vol. 75, no. 2, pp. 223–230, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0308-8146(01)00204-7.
- [45] S. Dussert, M. W. Davey, A. Laffargue, S. Doulebeau, R. Swennen, and H. Etienne, “Oxidative stress, phospholipid loss and lipid hydrolysis during drying and storage of intermediate seeds,” *Physiol. Plant.*, vol. 127, no. 2, pp. 192–204, 2006, doi: 10.1111/j.1399-3054.2006.00666.x.
- [46] I. Tejero, A. González-Lafont, J. M. Lluch, and L. A. Eriksson, “Photo-oxidation of lipids by singlet oxygen: A theoretical study,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 398, no. 4–6, pp. 336–342, 2004, doi: 10.1016/j.cplett.2004.09.093.
- [47] M. Y. Rendón, T. De Jesus Garcia Salva, and N. Bragagnolo, “Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage,” *Food Chem.*, vol. 147, pp. 279–286, 2014, doi: 10.1016/j.foodchem.2013.09.123.
- [48] M. B. dos S. Scholz, S. H. Prudencio, C. S. G. Kitzberger, and R. S. dos S. F. da Silva, “Physico-chemical characteristics and sensory attributes of coffee beans submitted to two post-harvest processes,” *J. Food Meas. Charact.*, vol. 13, no. 1, pp. 831–839, Mar. 2019, doi: 10.1007/s11694-018-9995-x.
- [49] D. J. Kwon *et al.*, “Assessment of green coffee bean metabolites dependent on coffee quality using a <sup>1</sup>H NMR-based metabolomics approach,” *Food Res. Int.*, vol. 67, pp. 175–182, 2015, doi: 10.1016/j.foodres.2014.11.010.
- [50] D. Kramer, B. Breitenstein, M. Kleinwachter, and D. Selmar, “Stress Metabolism in Green Coffee Beans (*Coffea arabica* L.): Expression of Dehydrins and Accumulation of GABA during Drying,” *Plant Cell Physiol.*, vol. 51, no. 4, pp. 546–553, Apr. 2010, doi: 10.1093/pcp/pcq019.

- [51] G. Bytof, S. E. Knopp, P. Schieberle, I. Teutsch, and D. Selmar, "Influence of processing on the generation of  $\gamma$ -aminobutyric acid in green coffee beans," *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 220, no. 3–4, pp. 245–250, 2005, doi: 10.1007/s00217-004-1033-z.
- [52] K. Cheng *et al.*, "Evaluation of the impact of different drying methods on the phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro digestion of green coffee beans," *Food Sci. Nutr.*, vol. 7, no. 3, pp. 1084–1095, 2019, doi: 10.1002/fsn3.948.
- [53] R. J. Clarke and R. Macrae, *COFFEE CHEMISTRY*, vol. 1. Elsevier Science Publishers LTD, 1989.
- [54] D. Habtamu and A. Belay, "First order derivative spectra to determine caffeine and chlorogenic acids in defective and nondefective coffee beans," *Food Sci. Nutr.*, vol. 8, no. 9, pp. 4757–4762, 2020, doi: 10.1002/fsn3.1723.
- [55] K. Ramalakshmi, I. R. Kubra, and L. J. M. Rao, "Physicochemical Characteristics of Green Coffee: Comparison of Graded and Defective Beans," *J. Food Sci.*, vol. 72, no. 5, pp. S333–S337, Jun. 2007, doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00379.x.
- [56] W. Nilnont, S. Thepa, S. Janjai, N. Kasayapanand, C. Thamrongmas, and B. K. Bala, "Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying," *Food Bioprod. Process.*, vol. 90, no. 2, pp. 341–350, 2012, doi: 10.1016/j.fbp.2011.06.007.
- [57] B. Bertrand, P. Vaast, Edgardo Alpizar, E. Hervé, D. Fabrice, and C. Pierre, "Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of Arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America," *Tree Physiol.*, vol. 26, no. 9, pp. 1239–1248, Sep. 2006.
- [58] G. Alvarado-Alvarado, E. Moreno-González, E. C. Montoya-Restrepo, and R. Alarcón-Suárez, "Calidad física y en taza de los componentes de la variedad Castillo y sus derivadas regionales," *Rev. Cenicafé*, vol. 60, no. 3, pp. 210–228, 2009.
- [59] C. Silva, P. Correa, and J. Martins, "Qualidade da bebida do café (*Coffea arabica* L.) em função da proporção de frutos verdes e da temperatura do ar de secagem," *Rev. Bras. Armazenamento*, vol. 23, no. 1, pp. 45–48, 1998.
- [60] E. P. Isquierdo, "Cinética de secagem de café natural e suas relações com a qualidade para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar," LAVRAS, Minas Gerais - BRASIL, 2011.
- [61] P. Carteri, "Alterações na qualidade do café cereja natural e despulpado submetidos a diferentes condições de secagem e armazenamento.," LAVRAS, Minas Gerais - BRASIL, 2006.
- [62] J. Da Silva, "Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem," LAVRAS, Minas Gerais - BRASIL, 2009.
- [63] S. A. Abrahão, R. G. F. A. Pereira, S. M. da S. Duarte, A. R. Lima, D. J. Alvarenga, and E. B.



- Ferreira, “Compostos bioativos e atividade antioxidante do café (*Coffea arabica* L.),” *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 34, no. 2, pp. 414–420, 2010, doi: 10.1590/s1413-70542010000200020.
- [64] D. E. Ribeiro, “Interação genótipo e ambiente na composição química e qualidade sensorial de cafés especiais em diferentes formas de processamento,” LAVRAS, Minas Gerais - BRASIL, 2013.
- [65] F. Federación Nacional de Cafeteros, “Estadísticas Cafeteras,” 2020. <https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/> (accessed Feb. 08, 2000).
- [66] F. L. F. Silva *et al.*, “The concentration of polyphenolic compounds and trace elements in the *Coffea arabica* leaves: Potential chemometric pattern recognition of coffee leaf rust resistance,” *Food Res. Int.*, vol. 134, no. October 2019, p. 109221, 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109221.
- [67] S. Sittipod, E. Schwartz, L. Paravisini, and D. G. Peterson, “Identification of flavor modulating compounds that positively impact coffee quality,” *Food Chem.*, vol. 301, no. March, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125250.
- [68] E. P. Isquierdo, F. M. Borém, E. T. De Andrade, J. L. G. Corrêa, P. D. De Oliveira, and G. E. Alves, “Drying kinetics and quality of natural coffee,” *Trans. ASABE*, vol. 56, no. 3, pp. 1003–1010, 2013, doi: 10.13031/trans.56.9794.
- [69] G. E. Alves, F. M. Borém, E. T. Andrade, É. P. Isquierdo, V. C. Siqueira, and C. D. A. Dias, “INFLUENCE OF DIFFERENT TEMPERATURES AND AIRFLOWS ON DRYING OF NATURAL AND PULPED COFFEE *Coffea arabica* L ., This study aimed to evaluate drying kinetics for natural and pulped coffee , using different temperatures and drying airflows . For the conduction ,” vol. 4430, pp. 192–200, 2020.
- [70] W. B. Sunarharum, D. J. Williams, and H. E. Smyth, “Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective,” *Food Res. Int.*, vol. 62, pp. 315–325, 2014, doi: 10.1016/j.foodres.2014.02.030.
- [71] D. L. Kalschne, T. Biasuz, A. J. De Conti, M. C. Viegas, M. P. Corso, and M. de T. Benassi, “Sensory characterization and acceptance of coffee brews of *C. arabica* and *C. canephora* blended with steamed defective coffee,” *Food Res. Int.*, vol. 124, no. March 2018, pp. 234–238, 2019, doi: 10.1016/j.foodres.2018.03.038.
- [72] A. Parra, G. Roa, and C. Oliveros, “SECAFÉ Parte I: modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 12, no. 4, pp. 415–427, 2008, doi: 10.1590/s1415-43662008000400013.
- [73] A. Parra-Coronado, G. Roa-Mejía, and C. E. Oliveros-Tascón, “SECAFÉ Part II: Recommendations for the efficient operation of mechanical dryers for parchment coffee,” *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.*, vol. 12, no. 4, pp. 428–434, 2008, doi: 10.1590/S1415-43662008000400014.
- [74] S. Deeto, S. Thepa, V. Monyakul, and R. Songprakorp, “The experimental new hybrid solar dryer

- and hot water storage system of thin layer coffee bean dehumidification,” *Renew. Energy*, vol. 115, pp. 954–968, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.009.
- [75] Carlos E. Oliveros Tascón; Juan R. Sanz Uribe; Cesar A. Ramírez Gómez; Aída E. Peñuela Martínez, “Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café,” *Cenicafé Av. Técnicos* 380, vol. 380, no. 14, p. 2, 2009, [Online]. Available: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/370/1/avt0380.pdf>.
- [76] G. Roa-mejía, C. E. Oliveros-tascón, and C. A. Ramírez-g, “Utilice la Energía Solar para Secar Correctamente el Café,” *Cenicafé Av. Técnicos* 281, no. 281, pp. 1–4, 2000.
- [77] C. Oliveros, C. Ramírez, J. Sanz, and A. Peñuela, “Secador parabólico mejorado,” 2008. [Online]. Available: <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0376.pdf>.
- [78] M. GUTIERREZ, J. SANZ, C. OLIVEROS, and C. OROZCO, *Ventiladores para secadores de café*. 2012.
- [79] W. Dong, K. Cheng, R. Hu, Z. Chu, J. Zhao, and Y. Long, “Effect of microwave vacuum drying on the drying characteristics, color, microstructure, and antioxidant activity of green coffee beans,” *Molecules*, vol. 23, no. 5, 2018, doi: 10.3390/molecules23051146.
- [80] D. Beverly, P. J. Fryer, S. Bakalis, E. Lopez-Quiroga, and R. Farr, “Mathematical modelling of the steam stripping of aroma from roast and ground coffee,” *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 157–164, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.075.
- [81] I. A. Kouadio, L. B. Koffi, J. G. Nemlin, and M. B. Dosso, “Effect of Robusta (*Coffea canephora* P.) coffee cherries quantity put out for sun drying on contamination by fungi and Ochratoxin A (OTA) under tropical humid zone (Côte d’Ivoire),” *Food Chem. Toxicol.*, vol. 50, no. 6, pp. 1969–1979, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.fct.2012.03.042.
- [82] A. Hameed, S. A. Hussain, M. U. Ijaz, S. Ullah, I. Pasha, and H. A. R. Suleria, “Farm to Consumer: Factors Affecting the Organoleptic Characteristics of Coffee. II: Postharvest Processing Factors,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17, no. 5, pp. 1184–1237, 2018, doi: 10.1111/1541-4337.12365.
- [83] P. Poltronieri and F. Rossi, “Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance,” *Challenges*, vol. 7, no. 2, p. 19, 2016, doi: 10.3390/challe7020019.
- [84] J. N. Hernandez-Aguilera *et al.*, “Quality as a Driver of Sustainable Agricultural Value Chains: The Case of the Relationship Coffee Model,” *Bus. Strateg. Environ.*, vol. 27, no. 2, pp. 179–198, Feb. 2018, doi: 10.1002/bse.2009.
- [85] C. Oliveros, A. Peñuela, and J. Jurado, “Controle la Humedad del Cafe en el Secado Solar, Utilizando el Metodo Gravimet,” *Cenicafe Av. Técnicos* 387, vol. 387, pp. 1–8, 2009, [Online]. Available: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/385/1/avt0387.pdf>.

- [86] S. J. Zhang *et al.*, “Following Coffee Production from Cherries to Cup: Microbiological and Metabolomic Analysis of Wet Processing of *Coffea arabica*,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 85, no. 6, pp. 1–22, Feb. 2019, doi: 10.1128/AEM.02635-18.
- [87] S. J. Zhang *et al.*, “Influence of Various Processing Parameters on the Microbial Community Dynamics, Metabolomic Profiles, and Cup Quality During Wet Coffee Processing,” *Front. Microbiol.*, vol. 10, no. November, pp. 1–24, Nov. 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.02621.
- [88] D. Selmar, G. Bytof, and S.-E. Knopp, “New Aspects of Coffee Processing: The Relation Between Seed Germination and Coffee Quality,” *Dix-neuvième Colloq. Sci. Int. sur le Café*, pp. 19–25, 2002.
- [89] S. Knopp, G. Bytof, and D. Selmar, “Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans,” *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 223, no. 2, pp. 195–201, 2006, doi: 10.1007/s00217-005-0172-1.
- [90] D. Selmar, G. Bytof, and S.-E. Knopp, “The Storage of Green Coffee (*Coffea arabica*): Decrease of Viability and Changes of Potential Aroma Precursors,” *Ann. Bot.*, vol. 101, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2008, doi: 10.1093/aob/mcm277.
- [91] L. Manzocco and M. C. Nicoli, “Modeling the Effect of Water Activity and Storage Temperature on Chemical Stability of Coffee Brews,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 55, no. 16, pp. 6521–6526, Aug. 2007, doi: 10.1021/jf070166k.
- [92] E. Iaccheri *et al.*, “Different analytical approaches for the study of water features in green and roasted coffee beans,” *J. Food Eng.*, vol. 146, pp. 28–35, 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.08.016.
- [93] D. B. Min and J. M. Boff, “Chemistry and reaction of singlet oxygen in foods,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 1, no. 2, pp. 58–72, 2002, doi: 10.1111/j.1541-4337.2002.tb00007.x.
- [94] T. Ferreira, J. Shuler, R. Guimarães, and A. Farah, “CHAPTER 1 Introduction to Coffee Plant and Genetics,” in *Coffee: Production, Quality and Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 1–25.
- [95] DANE, “Boletín Técnico PIB IV Trimestre 2019,” Bogotá - Colombia, 2020. [Online]. Available: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bol\\_PIB\\_IVtrim19\\_produccion\\_y\\_gasto.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bol_PIB_IVtrim19_produccion_y_gasto.pdf).
- [96] O. Guerreiro and M. Perez, “CHAPTER 3 Breeding Strategies,” in *Coffee: Production, Quality and Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 89–99.
- [97] F. Borém *et al.*, “CHAPTER 16. Influence of Genetics, Environmental Aspects and Post-harvesting Processing on Coffee Cup Quality,” in *Coffee*, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 387–417.
- [98] C. Ramírez, C. Oliveros, and G. Roa, “Construya El Secador Solar Parabólico,” 2002. [Online]. Available:

- [https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras\\_publicaciones/avances\\_tecnicos/avance\\_tecnico\\_0305](https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/avances_tecnicos/avance_tecnico_0305).
- [99] M. U. H. Suzihaque and R. Driscoll, “Effects of Solar Radiation, Buoyancy of Air Flow and Optimization Study of Coffee Drying in a Heat Recovery Dryer,” *Procedia Eng.*, vol. 148, pp. 812–822, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.617.
- [100] G. V. de Melo *et al.*, “Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review,” *Food Chem.*, vol. 272, no. August 2018, pp. 441–452, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.08.061.
- [101] R. F. Schwan, G. H. Fleet, and E. O. Afoakwa, “Cocoa and coffee fermentations.” 2015, [Online]. Available: <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439847930>.
- [102] E. P. Isquierdo, F. M. Borém, E. T. De Andrade, J. L. G. Corrêa, P. D. De Oliveira, and G. E. Alves, “Drying Kinetics and Quality of Natural Coffee,” *Trans. ASABE*, vol. 56, no. 3, pp. 995–1001, Jul. 2013, doi: 10.13031/trans.56.9794.
- [103] A. Ramírez-Martínez, M. A. Salgado-Cervantes, G. C. Rodríguez-Jimenes, M. A. García-Alvarado, F. Cherblanc, and J. C. Bénet, “Water transport in parchment and endosperm of coffee bean,” *J. Food Eng.*, vol. 114, no. 3, pp. 375–383, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.08.028.
- [104] W. Hernández, I. Ruiz, M. Salgado, G. Rodríguez, and M. García, “Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry,” *J. Food Eng.*, vol. 86, no. 1, pp. 1–9, 2008, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.08.025.
- [105] H. Ciro, L. Abud, and L. Pérez, “Numerical simulation of thin layer coffee drying by control volumes,” *Dyna*, vol. 163, pp. 270–278, 2010.
- [106] J. Bathiebo, M. Daguénet, B. Zeghmati, and C. M’Bow, “Numerical study of natural convection drying of coffee grains contained in a vertical channel with constant heat flux on walls,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 24, no. 4, pp. 171–188, Oct. 2003, doi: 10.1080/01430750.2003.9674921.
- [107] A. Putranto, X. D. Chen, Z. Xiao, and P. A. Webley, “Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA),” *J. Food Eng.*, vol. 105, no. 4, pp. 638–646, 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.03.036.
- [108] K. Burmester and R. Eggers, “Heat and mass transfer during the coffee drying process,” *J. Food Eng.*, vol. 99, no. 4, pp. 430–436, 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.12.021.
- [109] Č. Mizera, D. Herák, P. Hrabě, A. Kabutey, M. Wasserbauer, and H. Pouzarová, “Describing of drying curves of green coffee beans using mathematical model,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 420, no. 1, p. 012075, Oct. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/420/1/012075.
- [110] S. Suherman, H. Widuri, S. Patricia, E. E. Susanto, and R. J. Sutrisna, “Energy Analysis of a Hybrid Solar Dryer for Drying Coffee Beans,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 9, no. 1, pp. 131–139, Feb.

- 2020, doi: 10.14710/ijred.9.1.131-139.
- [111] S. Vélez-Piedrahita, H. J. Ciro-Velásquez, J. A. Osorio-Saraz, and E. Largo-Avila, “Study of the Effect of the Geometry of a Typical Solar Dryer for Coffee Using CFD Abstract,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 18, no. 35, pp. 149–161, Dec. 2019, doi: 10.22395/rium.v18n35a9.
- [112] E. Menya and A. Komakech, “Investigating the effect of different loading densities on selected properties of dried coffee using a GHE dryer,” *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 15, no. 3, pp. 231–237, 2013.
- [113] B. Briceño, J. Castillo, R. Carrión, and D. Díaz, “Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada,” *Ingenius*, no. 24, pp. 36–48, Jun. 2020, doi: 10.17163/ings.n24.2020.04.
- [114] M. Kumar, S. K. Sansaniwal, and P. Khatak, “Progress in solar dryers for drying various commodities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 346–360, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.158.
- [115] M. F. Lemos *et al.*, “Chemical and sensory profile of new genotypes of Brazilian *Coffea canephora*,” *Food Chem.*, vol. 310, no. October 2019, p. 125850, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125850.
- [116] L. L. Pereira *et al.*, “New propositions about coffee wet processing: Chemical and sensory perspectives,” *Food Chem.*, vol. 310, no. October 2019, p. 125943, 2020, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125943.
- [117] W. Dong *et al.*, “Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS,” *Food Chem.*, vol. 272, no. August 2018, pp. 723–731, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.08.068.
- [118] G. Tong, D. M. Christopher, and B. Li, “Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 68, no. 1, pp. 129–139, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.compag.2009.05.004.
- [119] V. P. Sethi, K. Sumathy, C. Lee, and D. S. Pal, “Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies,” *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 56–82, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.06.034.
- [120] T. Tunde, “Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2139–2145, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.01.017.
- [121] I. T. Togrul and D. Pehlivan, “Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers,” *J. Food Eng.*, vol. 55, no. 3, pp. 209–216, 2002, doi: 10.1016/S0260-8774(02)00065-1.
- [122] I. N. Ramos, T. R. S. Brandão, and C. L. M. Silva, “Simulation of solar drying of grapes using an

- integrated heat and mass transfer model,” *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 896–902, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.04.011.
- [123] S. Vijayan, T. V Arjunan, and A. Kumar, “Fundamental Concepts of Drying BT - Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment,” O. Prakash and A. Kumar, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 3–38.
- [124] Z. Erbay and F. Icier, “A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results,” *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 50, no. 5, pp. 441–464, May 2010, doi: 10.1080/10408390802437063.
- [125] S. Phitakwinai, S. Thepa, and W. Nilnont, “Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity,” *Food Sci. Nutr.*, vol. 7, no. 9, pp. 2921–2931, 2019, doi: 10.1002/fsn3.1144.
- [126] L. R. Pérez, H. J. Ciro, and L. C. Abud, “Physical and thermal properties of parchment coffee bean,” *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 44, no. 6, pp. 1721–1726, 2001, doi: 10.13031/2013.6983.
- [127] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Unit Operations*. Allyn and Bacon, 1978.
- [128] I. Campbell Scientific, “CR1000 Measurement and Control System.” Campbell Scientific, Logan, Utah, p. 678, 2015, [Online]. Available: [https://shop.profec-ventus.com/images/Datasheets/Data\\_loggers/SCI/CR1000/cr1000-manual-2015.pdf](https://shop.profec-ventus.com/images/Datasheets/Data_loggers/SCI/CR1000/cr1000-manual-2015.pdf).
- [129] C. Oliveros, J. Sanz, C. Ramírez, and A. Peñuela, “Secador solar de túnel para café pergamino,” 2006.
- [130] T. A. L. Wagemaker, C. R. L. Carvalho, N. B. Maia, S. R. Baggio, and O. Guerreiro Filho, “Sun protection factor, content and composition of lipid fraction of green coffee beans,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 33, no. 2, pp. 469–473, 2011, doi: 10.1016/j.indcrop.2010.10.026.
- [131] A. Farah, M. C. Monteiro, V. Calado, A. S. Franca, and L. C. Trugo, “Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee,” *Food Chem.*, vol. 98, no. 2, pp. 373–380, 2006, doi: 10.1016/j.foodchem.2005.07.032.

# Anexo A. Análisis estadístico para compuestos químicos y atributos sensoriales.

## Ácidos grasos

- Proceso de secado = Proce
- Variedad del café = Var

### **\*\*Mirístico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.003217	0.0006433	56.755	< 2e-16 ***
Var	1	0.000011	0.0000113	1.001	0.319
Proce:Var	5	0.000094	0.0000189	1.664	0.150
Residuals	105	0.001190	0.0000113		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Miris)

W = 0.99221, p-value = 0.7357

g\$Myr groups

CT	0.1148390	a
CS	0.1143066	a

g\$Myr groups

P4	0.1216931	a
P3	0.1200142	a
P2	0.1153599	b
P1	0.1126704	c
P5	0.1111082	c
P6	0.1065383	d

### **\*\*Palmítico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	1.7025	0.3405	53.144	< 2e-16 ***
Var	1	0.0023	0.0023	0.362	0.549
Proce:Var	5	0.0186	0.0037	0.581	0.714
Residuals	105	0.6727	0.0064		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Palmi)  
 W = 0.99255, p-value = 0.7677

```

      g$Pal groups
CT 0.7057381      a
CS 0.6988363      a

```

```

      g$Pal groups
P4 0.8885124      a
P3 0.7737457      b
P2 0.7386793     bc
P1 0.7035780      c
P5 0.5562023      d
P6 0.5510135      d

```

**\*\*Palmitoléico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Proce	5	3.102e-05	6.204e-06	5.329	0.00021	***
Var	1	1.710e-06	1.713e-06	1.471	0.22784	
Proce:Var	5	1.441e-05	2.883e-06	2.476	0.03664	*
Residuals	105	1.222e-04	1.164e-06			

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Palmito)  
 W = 0.95975, p-value = 0.1141

```

      g$Palmi groups
CT 0.05657390     a
CS 0.05636787     a

```

```

      g$Palmi groups
P4 0.05720748     a
P2 0.05665252     ab
P1 0.05662967     ab
P3 0.05651309     b
P5 0.05631120     b
P6 0.05549709     c

```



**\*\*Heptadecanóico\*\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Proce	5	0.0003340	0.0000668	4.040	0.00215	**
Var	1	0.0001039	0.0001039	6.282	0.01373	*
Proce:Var	5	0.0000241	0.0000048	0.291	0.91703	
Residuals	105	0.0017363	0.0000165			

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Hepta)

W = 0.91149, p-value = 0.1268

	g\$Hep	groups
CT	0.06261050	a
CS	0.06091812	b

	g\$Hep	groups
P4	0.06400439	a
P2	0.06340895	a
P3	0.06225100	ab
P1	0.06151076	abc
P5	0.06027591	bc
P6	0.05901032	c

**\*\*Esteárico\*\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Proce	5	0.08196	0.016392	25.423	< 2e-16	***
Var	1	0.00006	0.000057	0.088	0.767	
Proce:Var	5	0.00243	0.000486	0.753	0.586	
Residuals	105	0.06770	0.000645			

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Estea)

W = 0.98687, p-value = 0.2947

	g\$Ste	groups
CT	0.2419915	a
CS	0.2410874	a

	g\$Ste	groups
P4	0.2828087	a
P3	0.2567772	b
P2	0.2538593	b

P1 0.2348806 c  
 P6 0.2120113 d  
 P5 0.2082611 d

### **\*\*Oléico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.012975	0.002595	15.056	3.93e-11 ***
Var	1	0.000016	0.000016	0.090	0.7647
Proce:Var	5	0.001693	0.000339	1.965	0.0899 .
Residuals	105	0.018097	0.000172		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Ole)  
 W = 0.98991, p-value = 0.5199

g\$Ole groups  
 CT 0.1189603 a  
 CS 0.1185377 a

g\$Ole groups  
 P4 0.1348565 a  
 P3 0.1259867 b  
 P2 0.1240807 b  
 P1 0.1138448 c  
 P6 0.1072149 c  
 P5 0.1062333 c

### **\*\*Linoléico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.10481	0.020961	38.418	< 2e-16 ***
Var	1	0.00002	0.000019	0.035	0.852
Proce:Var	5	0.00205	0.000411	0.753	0.586
Residuals	105	0.05729	0.000546		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Lino)  
 W = 0.99203, p-value = 0.7188

g\$Lino groups  
 CS 0.2232019 a  
 CT 0.2219475 a

```

g$Lino groups
P4 0.2672228      a
P3 0.2475680      b
P2 0.2326014      c
P1 0.2120273      d
P6 0.1888187      e
P5 0.1867400      e

```

### **\*\*Linolénico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	3.119e-05	6.238e-06	3.611	0.00471 **
Var	1	8.330e-06	8.328e-06	4.821	0.03032 *
Proce:Var	5	4.400e-06	8.790e-07	0.509	0.76891
Residuals	105	1.814e-04	1.728e-06		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Linole)  
W = 0.96592, p-value = 0.03708

```

g$Linole groups
CT 0.05654108     a
CS 0.05605082     b

```

```

g$Linole groups
P4 0.05701274     a
P2 0.05662193     a
P3 0.05650082     ab
P1 0.05637512     ab
P6 0.05572085     bc
P5 0.05551569     c

```

### **\*\*Araquídico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.013248	0.0026496	12.509	1.57e-09 ***
Var	1	0.000023	0.0000233	0.110	0.7408
Proce:Var	5	0.003178	0.0006356	3.001	0.0143 *
Residuals	105	0.022241	0.0002118		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Araq)  
W = 0.98394, p-value = 0.1608

```

g$Ara groups
CT 0.1944112      a
CS 0.1938507      a

```

```

g$Ara groups
P4 0.2117399      a
P2 0.2005458      b
P3 0.1992588      b
P1 0.1851200      c
P6 0.1842834      c
P5 0.1835032      c

```

### **\*\*Eicosanoico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	2.103e-05	4.210e-06	1.718	0.137
Var	1	2.700e-07	2.700e-07	0.110	0.740
Proce:Var	5	1.648e-05	3.300e-06	1.346	0.251
Residuals	105	2.571e-04	2.450e-06		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Eicos)  
W = 0.97887, p-value = 0.05414

```

g$Eic groups
CT 0.04457329      a
CS 0.04450231      a

```

```

g$Eic groups
P1 0.04507755      a
P4 0.04504168      a
P3 0.04453595      ab
P6 0.04439673      ab
P2 0.04418709      ab
P5 0.04400357      b

```

### **\*\*Behénico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.0004182	8.363e-05	3.568	0.00509 **
Var	1	0.0000050	5.030e-06	0.215	0.64400
Proce:Var	5	0.0001207	2.415e-05	1.030	0.40377
Residuals	105	0.0024609	2.344e-05		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Behe)  
W = 0.97644, p-value = 0.1182

```

      g$Beh groups
CT 0.1784451      a
CS 0.1781336      a

```

```

      g$Beh groups
P4 0.1804757      a
P2 0.1797926      a
P1 0.1790002      a
P3 0.1789702      a
P6 0.1759286      b
P5 0.1754860      b

```

**Carbohidratos****\*\*Glucosa\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	794.0	158.80	248.485	< 2e-16 ***
Var	1	0.1	0.10	0.162	0.688460
Proce:Var	5	5.0	1.00	1.559	0.179589
Residuals	92	58.8	0.64		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Glu)  
W = 0.99191, p-value = 0.7752

```

      az$Glucosa groups
CS 12.97804      a
CT 12.91616      a

```

```

      az$Glucosa groups
P4 17.685377     a
P3 14.380570     b
P2 12.394584     c
P1 11.731707     d
P5  9.018476     e
P6 10.259099     f

```

**\*\*Sacarosa\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	10868	2173.6	3265.104	<2e-16 ***
Var	1	1	1.2	1.748	0.189
Proce:Var	5	6	1.2	1.802	0.120
Residuals	92	61	0.7		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

```
data: resid(a.Saca)
W = 0.99228, p-value = 0.8049
```

```
az$Sacarosa groups
CT 90.82833 a
CS 90.62074 a
```

```
az$Sacarosa groups
P4 104.68551 a
P3 98.49890 b
P2 92.10714 c
P1 87.57929 d
P5 72.13020 e
P6 78.27865 f
```

**Ácidos clorogénicos****\*\*Caféico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.0587	0.01175	0.915	0.4753
Var	1	0.0483	0.04830	3.761	0.0555 .
Proce:Var	5	0.0236	0.00472	0.367	0.8697
Residuals	92	1.1816	0.01284		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

```
data: resid(a.Cafei)
W = 0.9952, p-value = 0.9723
```

```
cl$Cafeico groups
CS 2.654489 a
CT 2.612193 a
```

```

cl$Cafeico groups
P5  2.669862      a
P6  2.650750      a
P3  2.639497      a
P4  2.637511      a
P1  2.612239      a
P2  2.600632      a

```

### **\*\*Cumárico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.00344	0.000688	1.979	0.0891 .
Var	1	0.01015	0.010154	29.193	5.11e-07 ***
Proce:Var	5	0.00065	0.000131	0.376	0.8637
Residuals	92	0.03200	0.000348		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

```

data: resid(a.Cuma)
W = 0.98454, p-value = 0.2459

```

```

cl$Cumarico groups
CT  0.4788403      a
CS  0.4594472      b

```

```

cl$Cumarico groups
P3  0.4803686      a
P5  0.4692448      ab
P1  0.4677514      b
P6  0.4673223      b
P4  0.4655007      b
P2  0.4635819      b

```

### **\*\*\*Ferúlico\*\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.0001779	3.558e-05	1.635	0.15847
Var	1	0.0000014	1.420e-06	0.065	0.79901
Proce:Var	5	0.0000239	4.780e-06	0.220	0.95319
Residuals	92	0.0020017	2.176e-05		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

```

data: resid(a.Feru)
W = 0.97736, p-value = 0.06215

```

```

cl$Ferulico groups
CT  0.3115362      a
CS  0.3113070      a

```

```

cl$Ferulico groups
P1  0.3131198      a
P6  0.3119907      ab
P2  0.3118509      ab
P3  0.3117153      ab
P4  0.3108390      ab
P5  0.3093553      b

```

### **\*\*Sinápico\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	0.000725	0.0001451	3.964	0.00267 **
Var	1	0.000019	0.0000192	0.526	0.47031
Proce:Var	5	0.000117	0.0000235	0.642	0.66843
Residuals	92	0.003367	0.0000366		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

```

data: resid(a.Sina)
W = 0.98829, p-value = 0.4729

```

```

cl$Sinapico groups
CS  0.3885298      a
CT  0.3876857      a

```

```

cl$Sinapico groups
P4  0.3914900      a
P6  0.3898182      ab
P1  0.3891973      ab
P5  0.3880041      ab
P3  0.3874647      bc
P2  0.3836985      c

```



**Cafeína****\*\*Cafeína\*\***

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Proce	5	2.22	0.444	0.758	0.582
Var	1	0.07	0.070	0.119	0.731
Proce:Var	5	1.44	0.287	0.490	0.783
Residuals	92	53.95	0.586		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Shapiro-Wilk normality test

data: resid(a.Caf)

W = 0.98918, p-value = 0.5427

```

caf$Cafeína groups
CT 9.464440 a
CS 9.413585 a

```

```

caf$Cafeína groups
P6 9.628693 a
P5 9.603521 a
P1 9.428290 a
P2 9.424099 a
P4 9.414491 a
P3 9.248790 a

```

## Atributos sensoriales protocolo SCA

- Proceso de secado = Proce
- Variedad del café = Var
- Tiempo de almacenamiento = Alma

### Análisis de Varianza para Puntaje Total (SCA)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Proce	90.1668	5	18.0334	118.25	0.0000
B:Var	0.0186501	1	0.0186501	0.12	0.7273
C:Alma	0.583808	1	0.583808	3.83	0.0533
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.890314	5	0.178063	1.17	0.3308
AC	0.277045	5	0.055409	0.36	0.8724
BC	0.136283	1	0.136283	0.89	0.3469
ABC	0.5755	5	0.1151	0.75	0.5846
RESIDUOS	14.6398	96	0.152498		
TOTAL (CORREGIDO)	107.288	119			

### Pruebas de Múltiple Rangos para Puntaje Total (SCA) por Proceso de secado

Método: 95.0 porcentaje LSD

Proce	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
P1	20	82.3829	0.0873206	X
P5	20	82.5266	0.0873206	XX
P2	20	82.6803	0.0873206	X
P6	20	82.7088	0.0873206	X
P3	20	83.8127	0.0873206	X
P4	20	84.7861	0.0873206	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P1 - P2	*	-0.2974	0.245126
P1 - P3	*	-1.4298	0.245126
P1 - P4	*	-2.4032	0.245126
P1 - P5		-0.1437	0.245126
P1 - P6	*	-0.3259	0.245126
P2 - P3	*	-1.1324	0.245126
P2 - P4	*	-2.1058	0.245126
P2 - P5		0.1537	0.245126
P2 - P6		-0.0285	0.245126
P3 - P4	*	-0.9734	0.245126
P3 - P5	*	1.2861	0.245126
P3 - P6	*	1.1039	0.245126
P4 - P5	*	2.2595	0.245126
P4 - P6	*	2.0773	0.245126
P5 - P6		-0.1822	0.245126

\* indica una diferencia significativa.

**Análisis de Varianza para Fragancia/Aroma**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
<b>A:Proce</b>	3.03542	5	0.607083	30.67	<b>0.0000</b>
B:Var	0.01875	1	0.01875	0.95	0.3328
C:Alma	0.00208333	1	0.00208333	0.11	0.7463
INTERACCIONES					
AB	0.05625	5	0.01125	0.57	0.7240
AC	0.160417	5	0.0320833	1.62	0.1618
BC	0.00208333	1	0.00208333	0.11	0.7463
ABC	0.0729167	5	0.0145833	0.74	0.5976
RESIDUOS	1.9	96	0.0197917		
TOTAL (CORREGIDO)	5.24792	119			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Frag/Aroma por Proceso de secado**

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Proce</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P5	20	7.575	0.0314576	X
P6	20	7.6375	0.0314576	XX
P1	20	7.6625	0.0314576	XX
P2	20	7.675	0.0314576	X
P3	20	7.9125	0.0314576	X
P4	20	8.0125	0.0314576	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
P1 - P2		-0.0125	0.0883078
P1 - P3	*	<b>-0.25</b>	0.0883078
P1 - P4	*	<b>-0.35</b>	0.0883078
P1 - P5		0.0875	0.0883078
P1 - P6		0.025	0.0883078
P2 - P3	*	<b>-0.2375</b>	0.0883078
P2 - P4	*	<b>-0.3375</b>	0.0883078
P2 - P5	*	<b>0.1</b>	0.0883078
P2 - P6		0.0375	0.0883078
P3 - P4	*	<b>-0.1</b>	0.0883078
P3 - P5	*	<b>0.3375</b>	0.0883078
P3 - P6	*	<b>0.275</b>	0.0883078
P4 - P5	*	<b>0.4375</b>	0.0883078
P4 - P6	*	<b>0.375</b>	0.0883078
P5 - P6		-0.0625	0.0883078

\* indica una diferencia significativa.

**Análisis de Varianza para Sabor**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A:Proce</b>	1.42878	5	0.285755	6.26	<b>0.0000</b>
B:Var	0.0292969	1	0.0292969	0.64	0.4250
C:Alma	0.0949219	1	0.0949219	2.08	0.1525
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.108984	5	0.0217969	0.48	0.7922
AC	0.180859	5	0.0361719	0.79	0.5576
BC	0.0292969	1	0.0292969	0.64	0.4250
ABC	0.121484	5	0.0242969	0.53	0.7513
RESIDUOS	4.38125	96	0.045638		
TOTAL (CORREGIDO)	6.37487	119			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Sabor por Proceso de secado**

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Proce</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P6	20	7.48125	0.0477692	X
P5	20	7.575	0.0477692	XX
P2	20	7.575	0.0477692	XX
P1	20	7.5875	0.0477692	XX
P3	20	7.625	0.0477692	X
P4	20	7.8375	0.0477692	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
P1 - P2		0.0125	0.134098
P1 - P3		-0.0375	0.134098
P1 - P4	*	<b>-0.25</b>	0.134098
P1 - P5		0.0125	0.134098
P1 - P6		0.10625	0.134098
P2 - P3		-0.05	0.134098
P2 - P4	*	<b>-0.2625</b>	0.134098
P2 - P5		0	0.134098
P2 - P6		0.09375	0.134098
P3 - P4	*	<b>-0.2125</b>	0.134098
P3 - P5		0.05	0.134098
P3 - P6	*	<b>0.14375</b>	0.134098
P4 - P5	*	<b>0.2625</b>	0.134098
P4 - P6	*	<b>0.35625</b>	0.134098
P5 - P6		0.09375	0.134098

\* indica una diferencia significativa.

**Análisis de Varianza para Sabor Residual**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A:Proce</b>	3.60417	5	0.720833	23.07	<b>0.0000</b>
B:Var	0.00208333	1	0.00208333	0.07	0.7968
C:Alma	0.0333333	1	0.0333333	1.07	0.3043
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.160417	5	0.0320833	1.03	0.4064
AC	0.154167	5	0.0308333	0.99	0.4300
BC	0.00208333	1	0.00208333	0.07	0.7968
ABC	0.160417	5	0.0320833	1.03	0.4064
RESIDUOS	3.0	96	0.03125		
TOTAL (CORREGIDO)	7.11667	119			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Sabor Residual por Proceso de secado**

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Proce</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P6	20	7.275	0.0395285	X
P2	20	7.2875	0.0395285	X
P5	20	7.3125	0.0395285	X
P1	20	7.325	0.0395285	X
P3	20	7.4875	0.0395285	X
P4	20	7.7625	0.0395285	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
P1 - P2		0.0375	0.110964
P1 - P3	*	<b>-0.1625</b>	0.110964
P1 - P4	*	<b>-0.4375</b>	0.110964
P1 - P5		0.0125	0.110964
P1 - P6		0.05	0.110964
P2 - P3	*	<b>-0.2</b>	0.110964
P2 - P4	*	<b>-0.475</b>	0.110964
P2 - P5		-0.025	0.110964
P2 - P6		0.0125	0.110964
P3 - P4	*	<b>-0.275</b>	0.110964
P3 - P5	*	<b>0.175</b>	0.110964
P3 - P6	*	<b>0.2125</b>	0.110964
P4 - P5	*	<b>0.45</b>	0.110964
P4 - P6	*	<b>0.4875</b>	0.110964
P5 - P6		0.0375	0.110964

\* indica una diferencia significativa.

**Análisis de Varianza para Acidez**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Proce	0.502604	5	0.100521	2.01	0.0840
B:Var	0.0630208	1	0.0630208	1.26	0.2644
C:Alma	0.0333333	1	0.0333333	0.67	0.4162
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.252604	5	0.0505208	1.01	0.4159
AC	0.160417	5	0.0320833	0.64	0.6684
BC	0	1	0	0.00	1.0000
ABC	0.38125	5	0.07625	1.53	0.1892
RESIDUOS	4.8	96	0.05		
TOTAL (CORREGIDO)	6.19323	119			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Acidez por Proceso de secado**

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Proce</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P6	20	7.45	0.05	X
P5	20	7.475	0.05	X
P2	20	7.5	0.05	X
P1	20	7.5375	0.05	XX
P3	20	7.55	0.05	XX
P4	20	7.65	0.05	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
P1 - P2		0.0375	0.14036
P1 - P3		-0.0125	0.14036
P1 - P4		-0.1125	0.14036
P1 - P5		0.0625	0.14036
P1 - P6		0.0875	0.14036
P2 - P3		-0.05	0.14036
P2 - P4	*	-0.15	0.14036
P2 - P5		0.025	0.14036
P2 - P6		0.05	0.14036
P3 - P4		-0.1	0.14036
P3 - P5		0.075	0.14036
P3 - P6		0.1	0.14036
P4 - P5	*	0.175	0.14036
P4 - P6	*	0.2	0.14036
P5 - P6		0.025	0.14036

\* indica una diferencia significativa.

**Análisis de Varianza para Cuerpo**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A:Proce</b>	2.08385	5	0.416771	7.38	<b>0.0000</b>
B:Var	0.133333	1	0.133333	2.36	0.1278
C:Alma	0.0520833	1	0.0520833	0.92	0.3395
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.0979167	5	0.0195833	0.35	0.8833
AC	0.104167	5	0.0208333	0.37	0.8689
BC	0.000520833	1	0.000520833	0.01	0.9237
ABC	0.258854	5	0.0517708	0.92	0.4740
RESIDUOS	5.425	96	0.0565104		
TOTAL (CORREGIDO)	8.15573	119			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Cuerpo por Proceso de secado**

Método: 95.0 porcentaje LSD

Proce	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
P2	20	7.225	0.0531556	X
P6	20	7.3125	0.0531556	XX
P5	20	7.375	0.0531556	XX
P1	20	7.45	0.0531556	XX
P3	20	7.4875	0.0531556	X
P4	20	7.6375	0.0531556	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P1 - P2	*	<b>0.225</b>	0.149218
P1 - P3		-0.0375	0.149218
P1 - P4	*	<b>-0.1875</b>	0.149218
P1 - P5		0.075	0.149218
P1 - P6		0.1375	0.149218
P2 - P3	*	<b>-0.2625</b>	0.149218
P2 - P4	*	<b>-0.4125</b>	0.149218
P2 - P5	*	<b>-0.15</b>	0.149218
P2 - P6		-0.0875	0.149218
P3 - P4	*	<b>-0.15</b>	0.149218
P3 - P5		0.1125	0.149218
P3 - P6	*	<b>0.175</b>	0.149218
P4 - P5	*	<b>0.2625</b>	0.149218
P4 - P6	*	<b>0.325</b>	0.149218
P5 - P6		0.0625	0.149218

\* indica una diferencia significativa.

**Análisis de Varianza para Balance**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Proce	0.829687	5	0.165937	4.24	0.0016
B:Var	0.0421875	1	0.0421875	1.08	0.3017
C:Alma	0.008333333	1	0.008333333	0.21	0.6455
INTERACCIONES					
AB	0.0546875	5	0.0109375	0.28	0.9233
AC	0.0916667	5	0.0183333	0.47	0.7988
BC	0.0333333	1	0.0333333	0.85	0.3583
ABC	0.116667	5	0.0233333	0.60	0.7028
RESIDUOS	3.75625	96	0.0391276		
TOTAL (CORREGIDO)	4.93281	119			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Balance por Proceso de secado**

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Proce</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P6	20	7.35	0.044231	X
P5	20	7.3875	0.044231	XX
P2	20	7.3875	0.044231	XX
P1	20	7.45	0.044231	XX
P3	20	7.4875	0.044231	XX
P4	20	7.6	0.044231	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
P1 - P2		0.0625	0.124165
P1 - P3		-0.0375	0.124165
P1 - P4	*	-0.15	0.124165
P1 - P5		0.0625	0.124165
P1 - P6		0.1	0.124165
P2 - P3		-0.1	0.124165
P2 - P4	*	-0.2125	0.124165
P2 - P5		0	0.124165
P2 - P6		0.0375	0.124165
P3 - P4		-0.1125	0.124165
P3 - P5		0.1	0.124165
P3 - P6	*	0.1375	0.124165
P4 - P5	*	0.2125	0.124165
P4 - P6	*	0.25	0.124165
P5 - P6		0.0375	0.124165

\* indica una diferencia significativa.

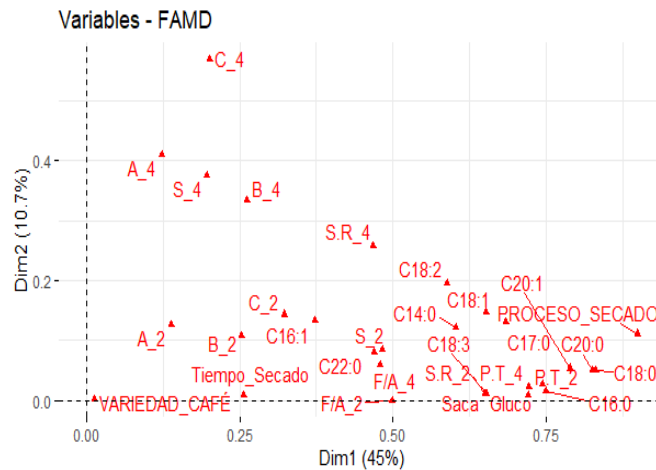
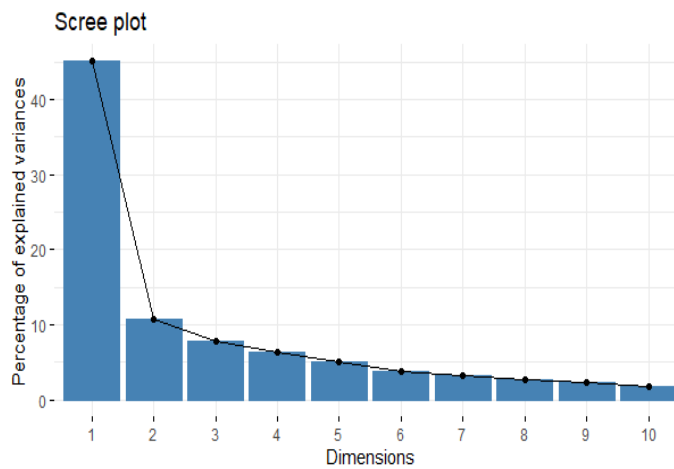


## Análisis factorial de datos mixtos (AFDM)

\*The results are available in the following objects:

name	description			
1 "\$seig"	"eigenvalues and inertia"			
2 "\$svar"	"Results for the variables"			
3 "\$sind"	"results for the individuals"			
4 "\$quali.var"	"Results for the qualitative variables"			
5 "\$quanti.var"	"Results for the quantitative variables"			
	eigenvalue	variance.percent	cumulative.variance	percent
Dim.1	15.305804	45.017072		45.01707
Dim.2	3.647394	10.727629		55.74470
Dim.3	2.634765	7.749309		63.49401
Dim.4	2.168217	6.377109		69.87112
Dim.5	1.729987	5.088198		74.95932
Dim.6	1.311248	3.856612		78.81593

FAMD results for variables





## Anexo B. Registro de variables ambientales y pérdida de peso al interior de la marquesina.



Dispositivo construido para contener el sensor de temperatura y humedad relativa al interior de la marquesina.



Montaje experimental para realización de pruebas de secado solar en marquesina. Registro de temperatura (superficie del grano, superficie del plástico, aire al interior de la marquesina), humedad relativa, irradiancia solar y velocidad del aire. Método Gravimet para registro de pérdida de peso en el café.