



Propiedades Físicas y Térmicas de las Nuevas Variedades

Disciplina de Poscosecha

Eduardo Duque Dussán
24.04.2023

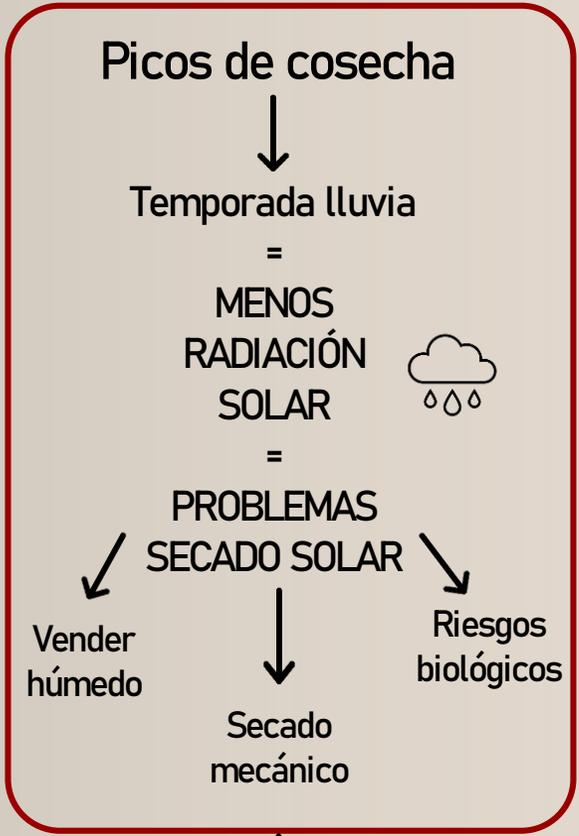


Contenido

- Contexto
- Propiedades relevantes
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones

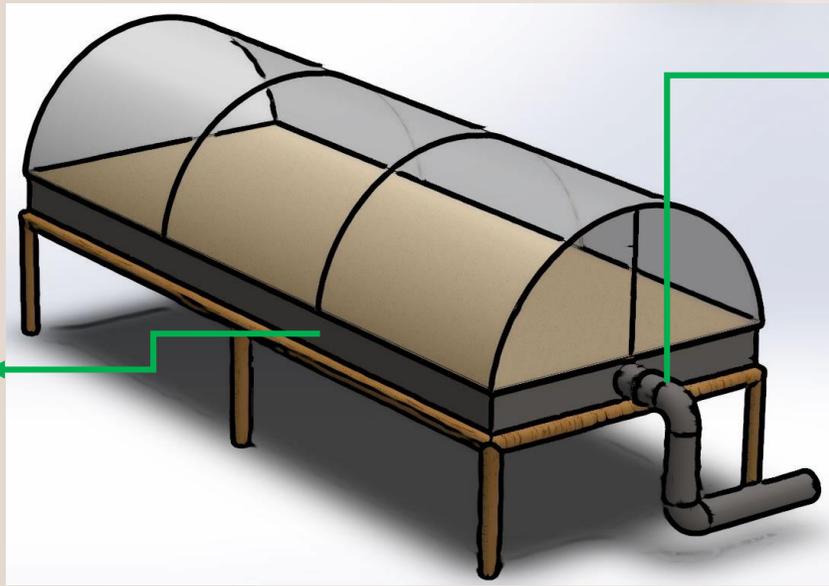


Contexto



541000 Familias cafeteras → ~96.3% "Pequeños" productores (0.1-5ha) → Secado solar fuente primaria o secundaria

- Diseñar un secador solar híbrido para café
- Reduzca el tiempo de secado ✓
 - Capacidad de secado 24/7 ✓
 - Incremente la rentabilidad del caficultor ✓



(Bravo-Monroy 2019)
(Barjolle et al. 2017)
(Ramírez-Builes, Jaramillo-Robledo, and Arcila-Pulgarín 2013)
(Duque-Orrago et al. 2001)

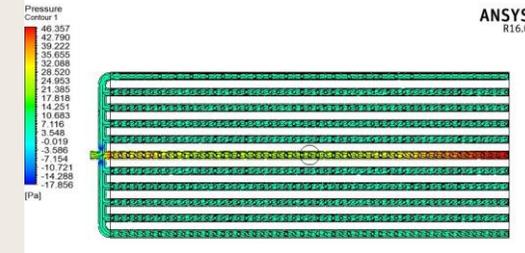
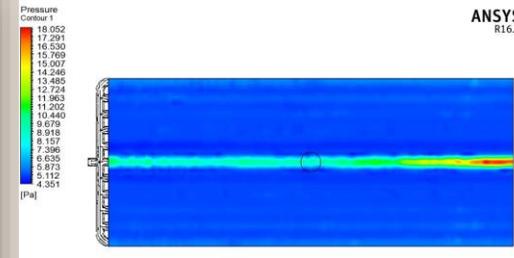


Especificaciones de diseño

- Reducir el tiempo de secado en un 50% comparado con el secado solar tradicional.
- Diseñar un equipo simple y robusto: Que pueda adaptarse a las tecnologías existentes.
- Requerimientos mínimos de mantenimiento.

Contexto

Generación de conceptos

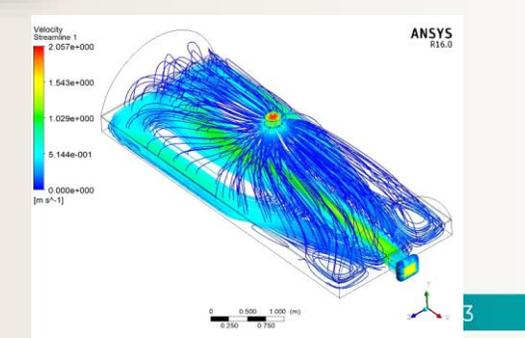
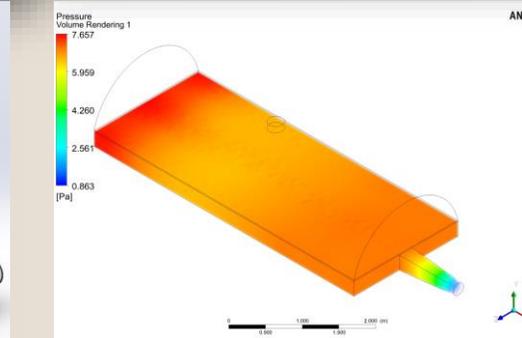
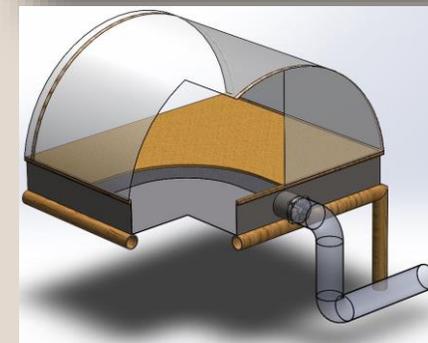
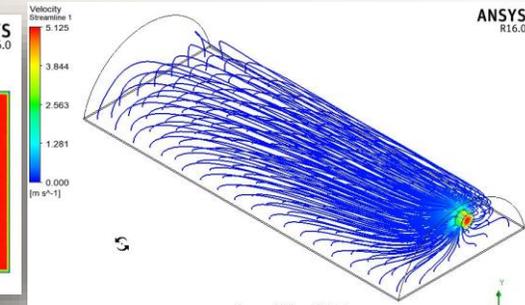
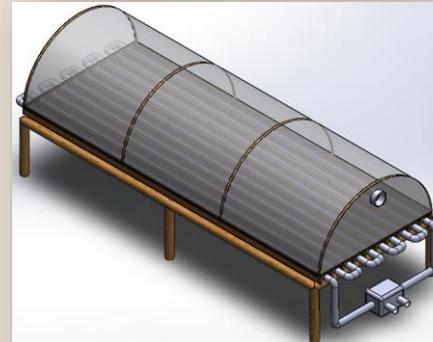


3 Conceptos

Sistema de tubería

Cámara plenum presión negativa

Cámara plenum presión positiva



¿Cómo sabemos que el concepto X es mejor que el Y o el Z?

- Que cumpla con las especificaciones de diseño.
- Que funcione.

¿Cómo sabemos que funciona?

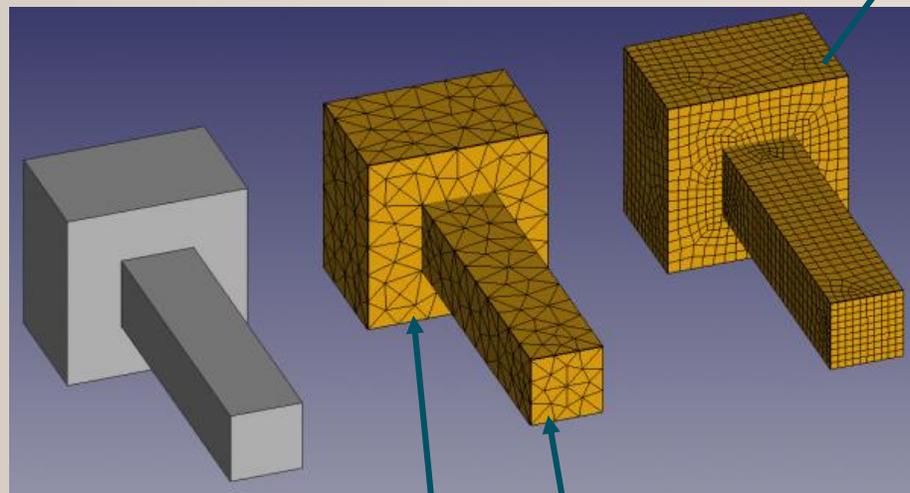
- A través de simulaciones de **Dinámica Computacional de Fluidos** (CFD) mediante el **método de los volúmenes finitos** (MVF)
- Modelamiento matemático.

Contexto



¿Qué es CFD?

Rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para analizar problemas de flujo de fluidos.



Nodo Elemento

Malla (volúmenes)
Oblicuidad
Calidad Ortogonal

Discretización:
Conservación del flujo
FVM

Navier-Stokes Equations

3 - dimensional - unsteady

Glenn
Research
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time: t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

Continuity: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$

X - Momentum: $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$

Y - Momentum: $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$

Z - Momentum: $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$

Energy: $\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0,$$

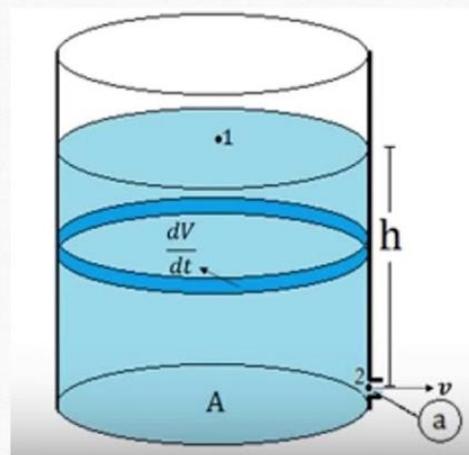
Q vector variables conservadas
F vector de flujos
V volumen de control
A área superficial de V

Contexto

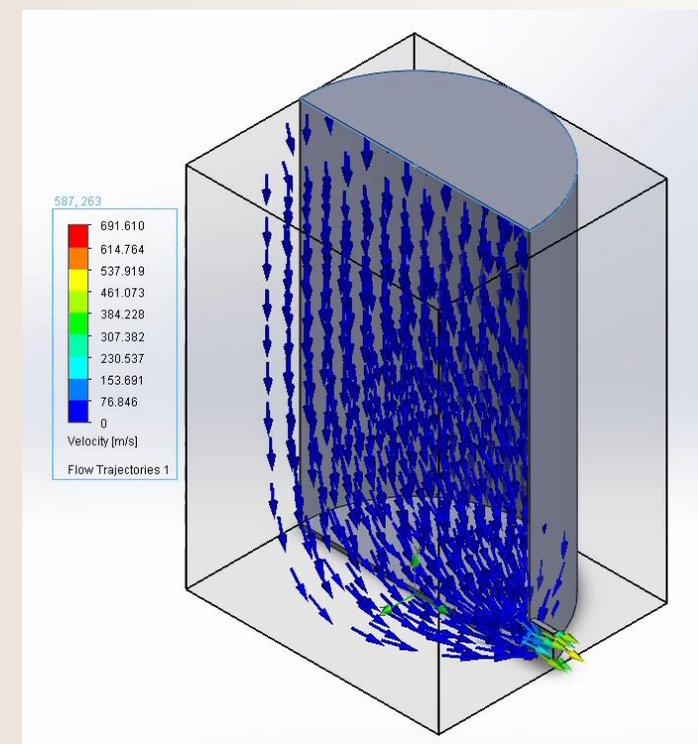
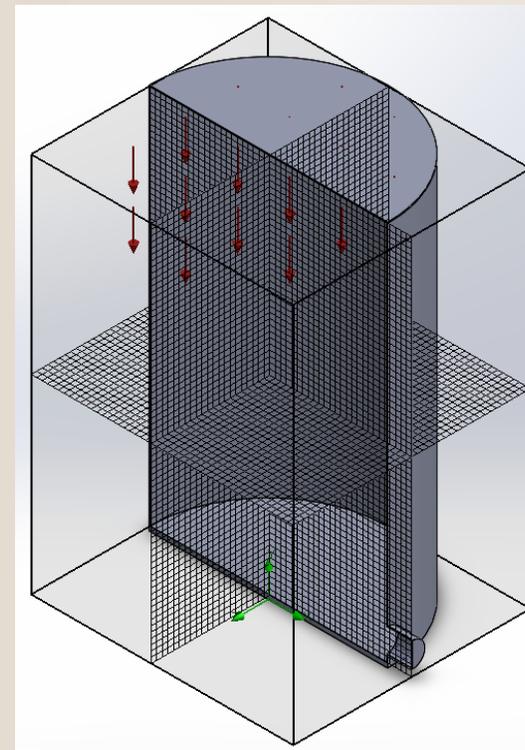


Ejemplo

Tiempo de vaciado de un tanque por efectos de la gravedad



$$\frac{dV}{dt} = -va$$
$$\frac{Adh}{dt} = -a\sqrt{2gh}$$
$$\frac{A}{a} \frac{dh}{-\sqrt{2gh}} = dt$$
$$\frac{A}{a\sqrt{2g}} \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{-\sqrt{h}} = \int_{t_2}^{t_1} dt$$



Torricelli

Fricción

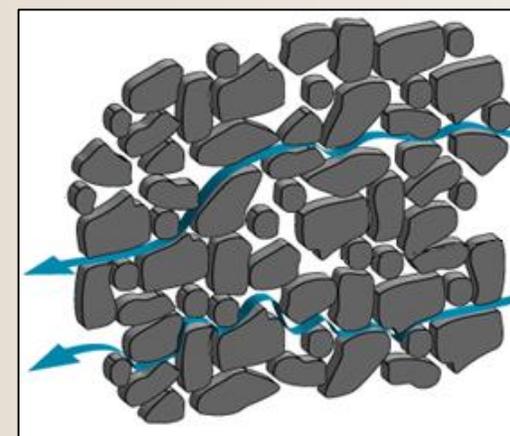
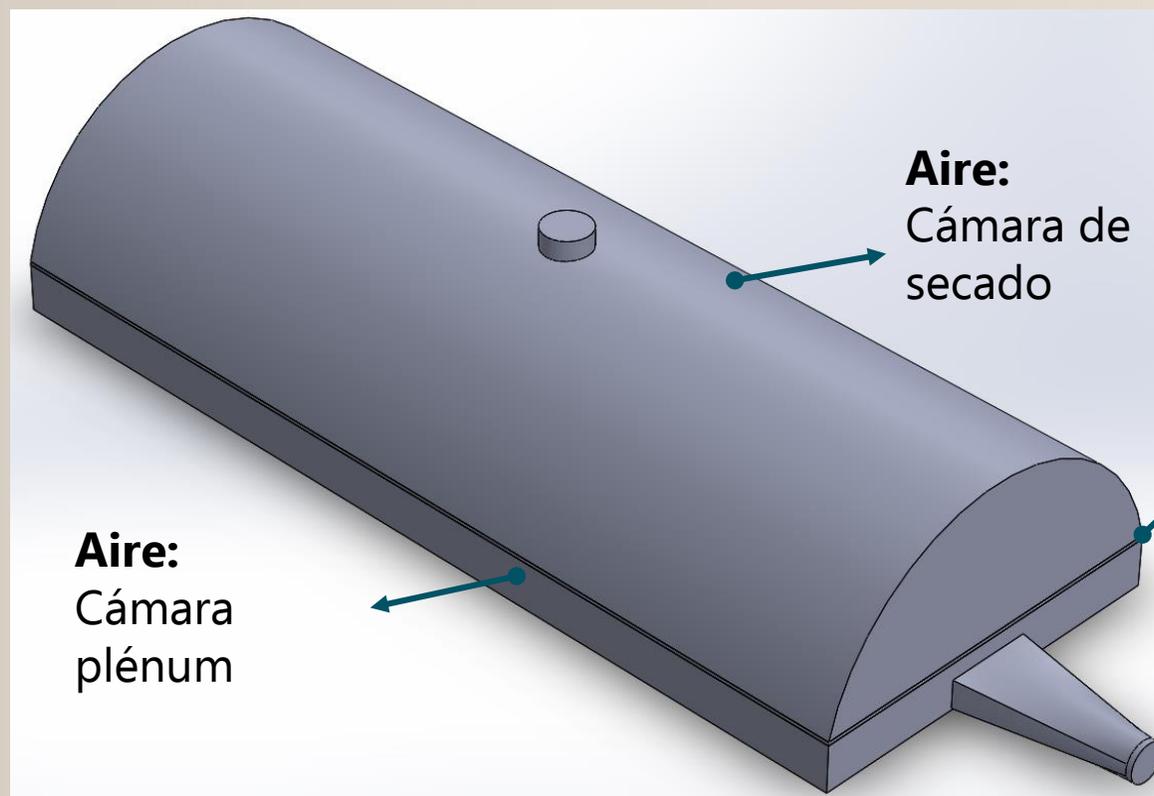
Material

Contexto



¿Cómo construimos el modelo de CFD del secador?

Se tiene en cuenta SOLO el volumen de fluido (aire)



Cámara plenum:
Volumen que homogeniza la presión estática de aire.

Tamaños y formas diferentes

$$\varepsilon = \frac{V_{vacío}}{V_{total}}$$

$$\varepsilon = f(\rho_b, \rho_k)$$

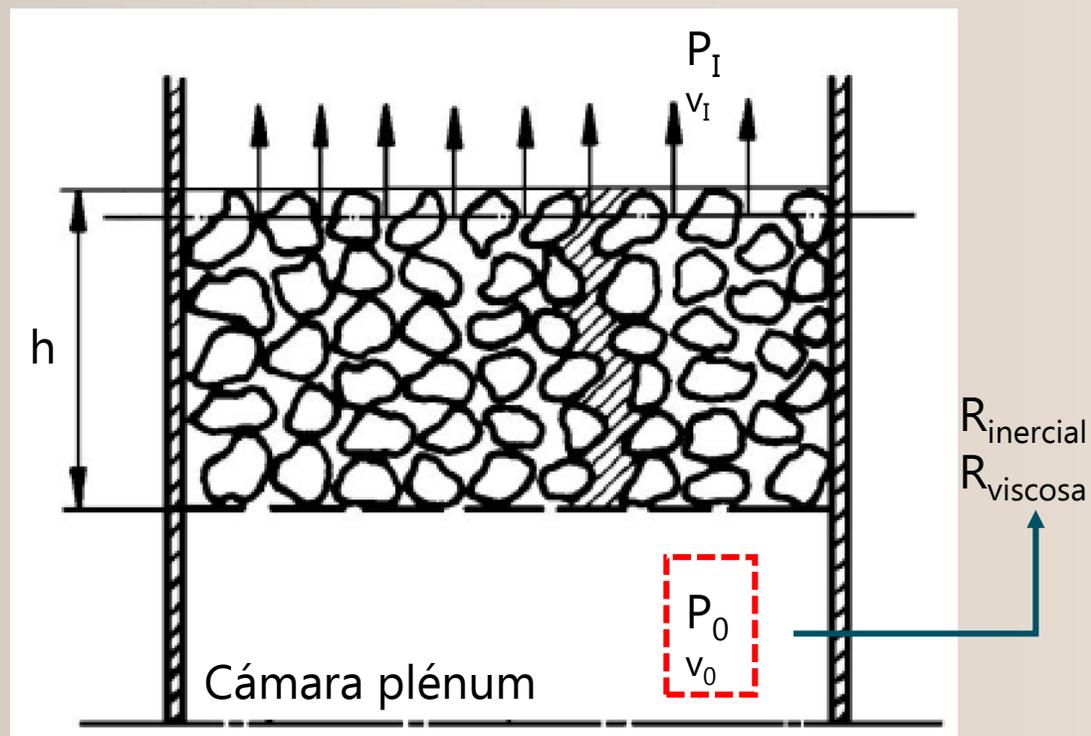
$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_k}$$

Var. Col
Caturra
Otras

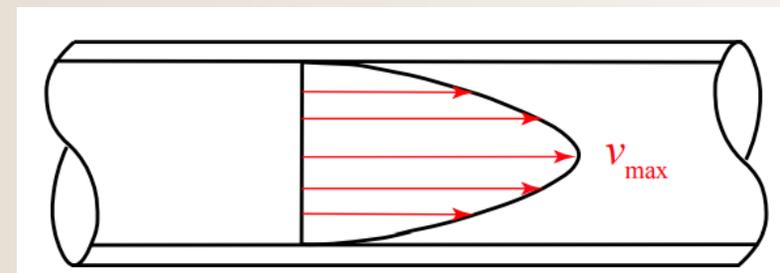
Contexto



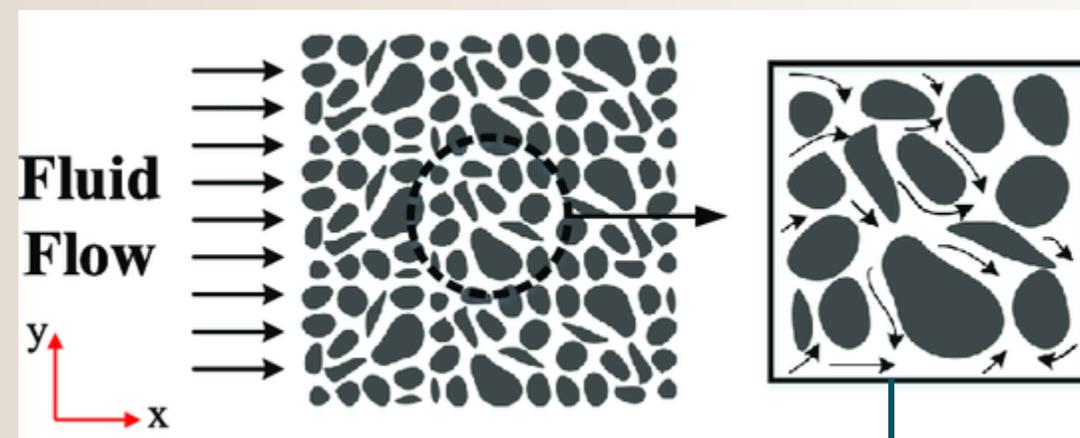
Medio poroso



Para definir el medio poroso en fase inicial de diseño se usaron las densidades publicadas



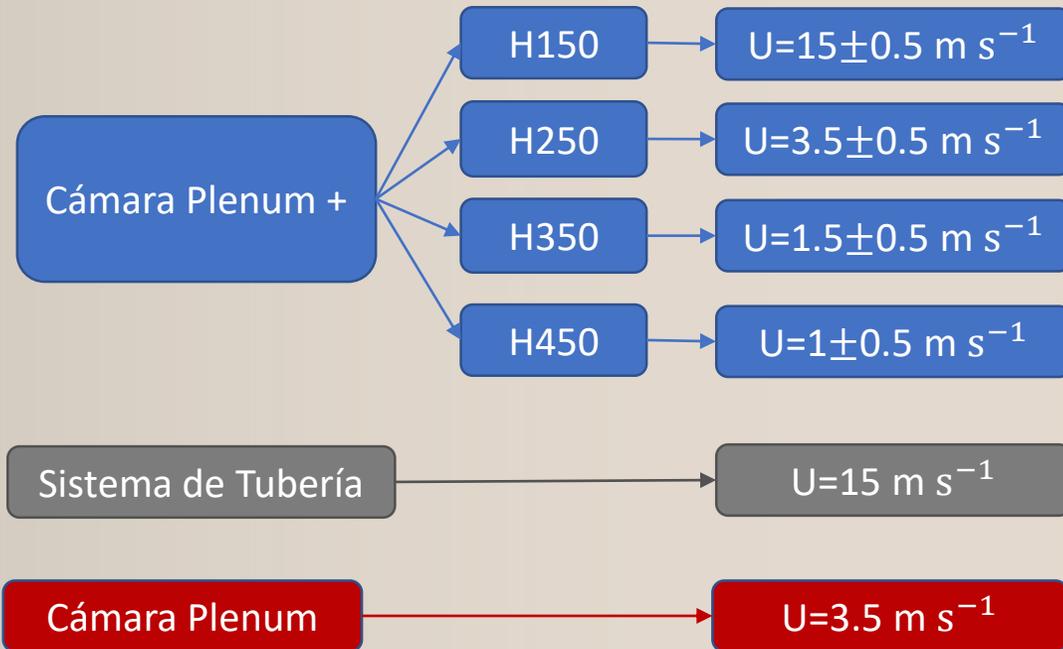
\neq



- Aceleraciones locales.
- Fricción superficial.

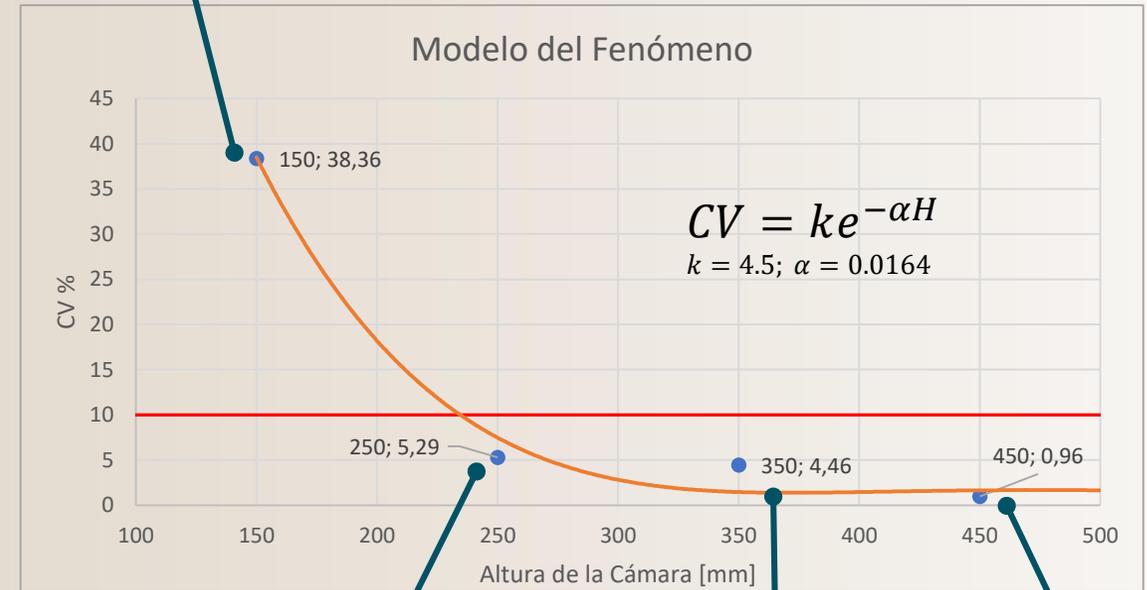
Contexto

Cámara plénium



Altura ideal 250mm.
 $V=0.25m*5m*2m=2.5m^3$

$P_{avg} = 6.97Pa$



$P_{avg} = 15.51Pa$

$P_{avg} = 9.44Pa$

$P_{avg} = 6.23Pa$

Contexto

Diseño detallado



Diseño
Actualización datos



Received: 29 March 2022 | Revised: 21 June 2022 | Accepted: 23 August 2022
DOI: 10.1111/ffe.14161

ORIGINAL ARTICLE
Journal of Food Process Engineering | WILEY

Improving the drying performance of parchment coffee due to the newly redesigned drying chamber

Eduardo Duque-Dussán¹ | Jan Banout²

¹Department of Sustainable Technologies, Faculty of Tropical Agrisciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague-Suchbát, Czech Republic
²Internal Grant Agency of the Faculty of Tropical Agrisciences, Czech University of Life Sciences Prague, Grant/Award Number: 20223109

Abstract
The Colombian coffee growers face many complications when using traditional open-sun drying techniques such as post-harvest process delays or incomplete grain dryness because of climate conditions. Therefore, local workshops began fabricating low-capacity dryers simulating the industrial equipment working principles. One of the most commercialized units is a triple tray rectangular-shaped dryer with a 31.25 kg capacity of dry parchment coffee per batch, providing the issue with an acceptable solution. However, it was redesigned into a circular shape holding a lower grain bed thickness and a vertical air inlet with a diffusive tray. Both units were simulated using the Thompson and the Michigan State University grain drying mathematical models to obtain their theoretical drying time. Then, a computational fluid dynamics simulation was conducted, attaining the unit's drying air behavior, the circular dryer exhibited notable drying times reduction and even air distribution, optimizing the dryer's performance, representing a benefit for the coffee-growing farmers.

MODELING OF FORCED AND NATURAL CONVECTION DRYING PROCESS OF A COFFEE SEED

Eduardo Duque-Dussán¹, Andrés Villada-Dussán¹, Hynek Roubík¹, Jan Banout²

¹ Department of Sustainable Technologies, Faculty of Tropical Agrisciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamycka 129, Prague-Suchbát 16500, Czech Republic.
² Exponent Failure Analysis Associates Inc, USA.
Correspondence: banout@flz.czu.cz

ASABE Research

HIGHLIGHTS

- The forced and natural convection drying processes of a single coffee grain can be predicted.
- The moisture distribution profiles depict the drying phenomena and water concentration zones.
- With accurate predictive drying curves, coffee growers can ensure high-quality coffee beans.

ABSTRACT. Different coffee drying technologies face complex tasks in ensuring an acceptable final seed moisture content. This research performed a Finite Element Analysis (FEA) study, simulating a single coffee bean's drying process as a transient mass diffusion model under mechanical and natural convection conditions, so the drying behavior and data of both case scenarios can be foreseen and controlled by a predictive Finite Element Model (FEM). A wet bean was 3D-scanned and digitized as the FEA simulation geometry; the water diffusion between the grain and the atmosphere was defined by a diffusion coefficient subject to the drying air temperature and the grain's moisture content. Three cases were studied: mechanical grain drying at three different temperatures (50, 45, and 40°C) in a forced convection environment; variable natural convection drying under environmental conditions (wet and dry season); and constant natural convection (wet and dry season), including the variation in day/night temperature and relative humidity. The results agree well with the data found in the literature, obtaining the graphical moisture distribution of the phenomena, predictive drying curves, diffusion coefficients, and isotherms. Both simulated drying scenarios provide essential information for coffee growers to improve and control their drying processes, thus obtaining high-quality grains, reducing contamination by microorganisms, and ensuring the integrity of their products.

Keywords. Coffea arabica, Coffee Drying, Coffee Seed, Finite Element Model, Moisture Diffusion.

Received: 2 December 2022 | Revised: 5 January 2023 | Accepted: 28 January 2023
DOI: 10.1111/ffe.14300

ORIGINAL ARTICLE
Journal of Food Process Engineering | WILEY

Thermophysical properties of parchment coffee: New Colombian varieties

Eduardo Duque-Dussán¹ | Juan R. Sanz-Uribe² | Carmen Dussán-Lubert³ | Jan Banout¹

¹Department of Sustainable Technologies, Faculty of Tropical Agrisciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague-Suchbát, Czech Republic
²Postharvest Discipline, National Coffee Research Center—CENICAFÉ, Caldas, Colombia
³Department of Mathematics, Universidad de Caldas, Caldas, Colombia

Abstract
The thermophysical properties of coffee have a special partaking during the drying process since a material-dependent heat and mass transfer occurs between the bean and the drying air. Conditional to the thermophysical properties of the parchment coffee, the drying can be more or less efficient, affecting the final quality and seed safety. Several coffee varieties have been studied; however, the National Coffee Research Center of Colombia has developed new highly productive coffee varieties resistant to different diseases: Cenicafé 1 and Castillo[®]. Nevertheless, the thermophysical properties of these specific varieties were not yet investigated; moreover, the availability of information related to these properties of different coffee varieties in the literature is relatively scarce. Thus, this study targeted to determine the parchment coffee thermophysical properties of these new varieties at five different moisture contents % (wb): 53%, 42%, 32%, 22% and 11%, using optimized techniques and methods to ensure high accuracy and exactness. It was found that the new varieties have larger, heavier, and denser beans; it was also seen that the bulk thermal conductivity and the bulk-specific heat are higher in these varieties than in the older ones. It was also revealed that the length, width, thickness, and surface area did not change as the moisture was removed, whereas the bulk density, kernel density, mass, bulk-specific heat, and bulk thermal conductivity decreased as the moisture was reduced. Displaying better thermophysical properties will improve the drying and roasting processes; hence, a better final product can be expected from these varieties.

Diseño "perfecto"

Propiedades relevantes



Variedad Cenicafé 1

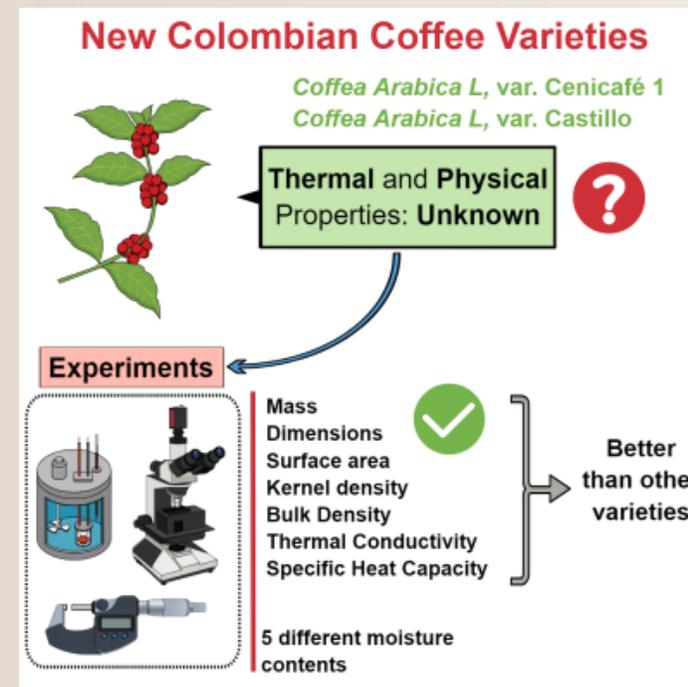
Variedad Castillo centro

Propiedades físicas:

- Masa.
- Densidad aparente (granel).
- Densidad real (grano).
- Área superficial (pergamino).
- Dimensiones ortogonales.

Propiedades térmicas:

- Calor específico C_p .
- Conductividad térmica K .



Evaluadas en 5 diferentes contenidos de humedad (53, 42, 32, 22, 12% (bh))

Propiedades relevantes – Primarias (físicas)

Densidad aparente (granel) ρ_b

La **densidad aparente** ρ_b se refiere a la densidad (m kg^{-3}) de una mezcla que consiste en un sólido granular.

¿Cómo afecta al secado?

- Porosidad.
- Cama de secado.



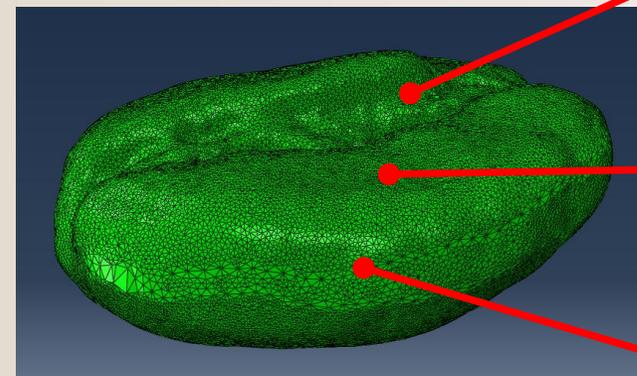
Propiedades relevantes – Primarias (físicas)

Densidad real (grano) ρ_k

La **densidad real** ρ_k se refiere a la masa por unidad de volumen (m kg^{-3}) de un grano individual.

¿Cómo afecta al secado?

- Porosidad.
- Difusión.
- Conductividad térmica.



Material isotrópico

Encogimiento despreciado

$$D = f(T, M, \rho)$$

Propiedades relevantes – Primarias (físicas)

Área superficial del grano

Concentración de agua normalizada (M)

$$M = \frac{c}{s}$$

Es la medida del área total que ocupa la superficie del grano

Balanza de masa a estado estable: Ecuación de potencial químico

$$\vec{j} = -s\vec{D} \cdot \left[\frac{\partial M}{\partial \vec{x}} + k_s \frac{\partial}{\partial x} (\ln(T - T^z)) + k_p \frac{\partial p}{\partial x} \right]$$

¿Cómo afecta al secado?

• Área de contacto entre grano y grano.

Flujo de concentración y difusión: Primera ley de difusión de Fick

• Área de contacto con el aire de secado.

$$\vec{j} = -D \frac{dc}{dx}$$

Donde:

c : Concentración de masa

s : Solubilidad

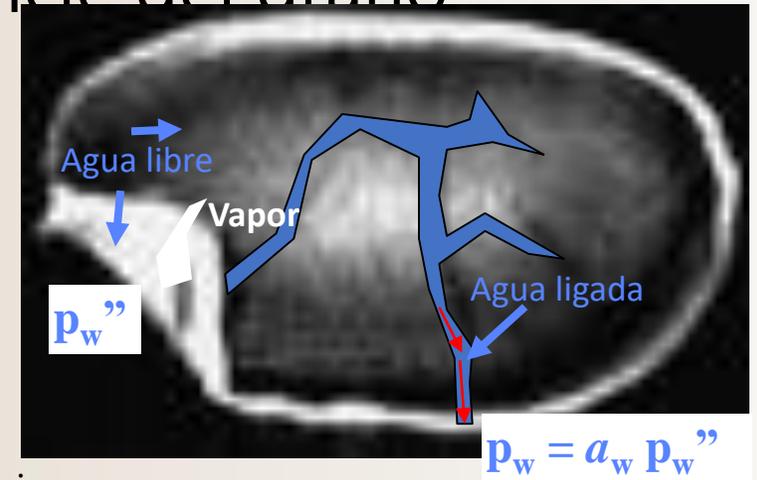
\vec{j} : Vector de concentración de flujo

p : Esfuerzo de presión

D : Vector de difusión

k_p : Constante de difusión presión-dependiente

T : Temperatura (z Temp|abs zero)



Conceptos básicos

X_s Contenido de humedad [kg agua / kg material seco]

a_w Actividad de agua

p_w''' Presión de vapor de agua saturada

p_w Presión del vapor de agua en la superficie

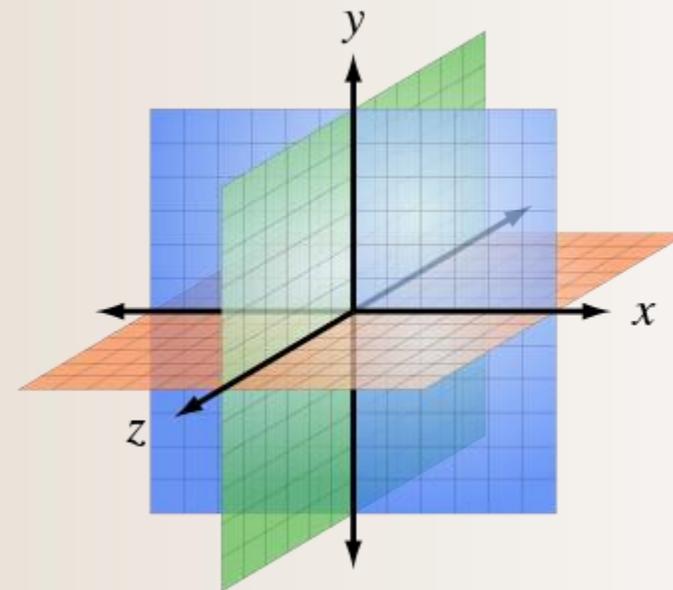
Propiedades relevantes – Secundarias (físicas)

Dimensiones ortogonales (mm)

Es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad (Largo, ancho y alto).

¿Cómo afecta al secado?

- Área superficial.

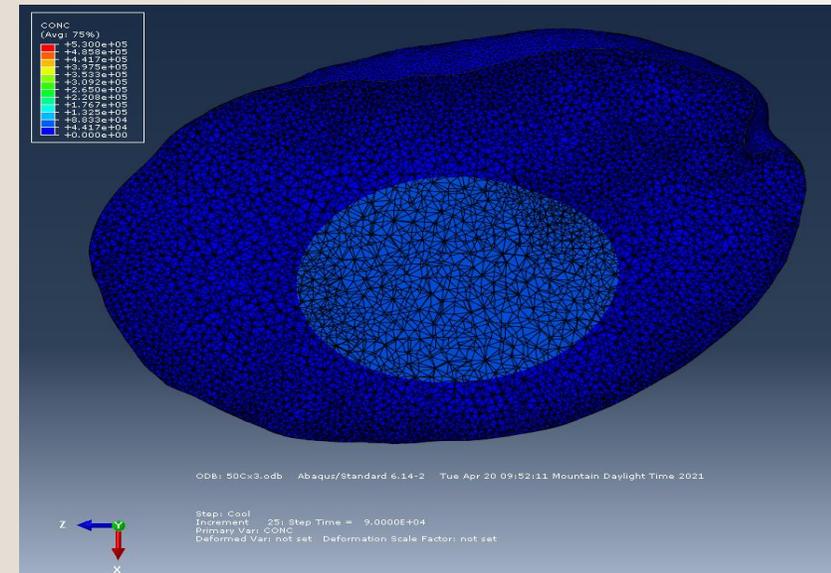


Propiedades relevantes – Secundarias (físicas)

Masa del grano (g)

¿Cómo afecta al secado?

- Densidad real.



Propiedades relevantes – Primarias (térmicas)

Calor específico ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

Es la cantidad de energía que hay que aplicar a una unidad de masa, para aumentar su temperatura en un grado.

¿Cómo afecta al secado?

- Acumulación de calor.
- Eficiencia térmica

$$C_{p_agua} = 4180 \text{ J kg K}$$

$$C_{p_arena} = 830 \text{ J kg K}$$



Propiedades relevantes – Primarias (térmicas)

Conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)

Es la capacidad intrínseca de un material para conducir calor.

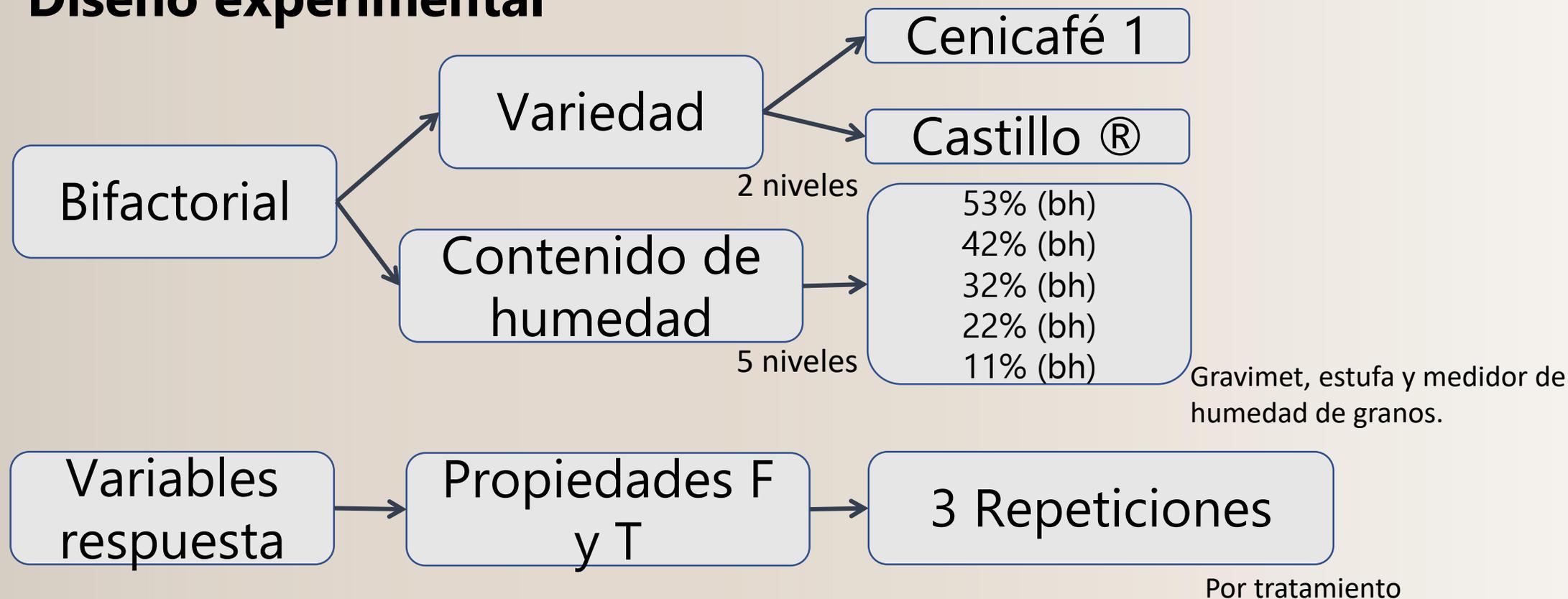
¿Cómo afecta al secado?

- Acumulación de calor.
- Eficiencia térmica.
- Transferencia de calor.



Sección transversal de un grano de café tomada con microscopía digital (Ramírez-Martínez et. al. 2013)

Diseño experimental



Metodología



Densidad aparente (granel kg m^{-3}) ρ_b

Cilindro calibrado de 1l
Granos de café en caída libre
ISO 6669:1995.



Metodología



Densidad real (grano kg m^{-3}) ρ_k

Método de la parafina Mohsenin, (1970,1980)

- Densidad parafina (Pp): masa en volumen conocido.
- Medir masa de un grano (mg).
- Suspender el grano de un hilo y sumergir en parafina.
- Medir la masa del sistema (m_{gp}).
- Masa de parafina que recubre el grano (m_p) = m_{gp}-m_g
- Masa de Beaker con 50ml de etanol (m_{ba}).
- Sumerja el grano suspendido en el etanol y registre la masa (m_t)
- Masa de etanol desplazado (m_{ed}) = m_t-m_{ba}

$$V_{ed} = V_{gp} = \frac{m_{ed}}{\rho_{et}}$$

$$V_{gp} = V_g + V_p$$

$$V_{gp} = \frac{m_g}{\rho_g} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

$$\rho_g = \frac{m_g \rho_p}{V_{gp} \rho_p - m_p}$$

Metodología

Área superficial del grano (mm²)

Se retiró el pergamino.

Se ubicó en un portaobjetos.

Base del portaobjetos RGB(53, 90, 255)

Iluminación led bilateral (12 W, 50–70 lm W⁻¹)

Foto

Análisis de imagen



Metodología



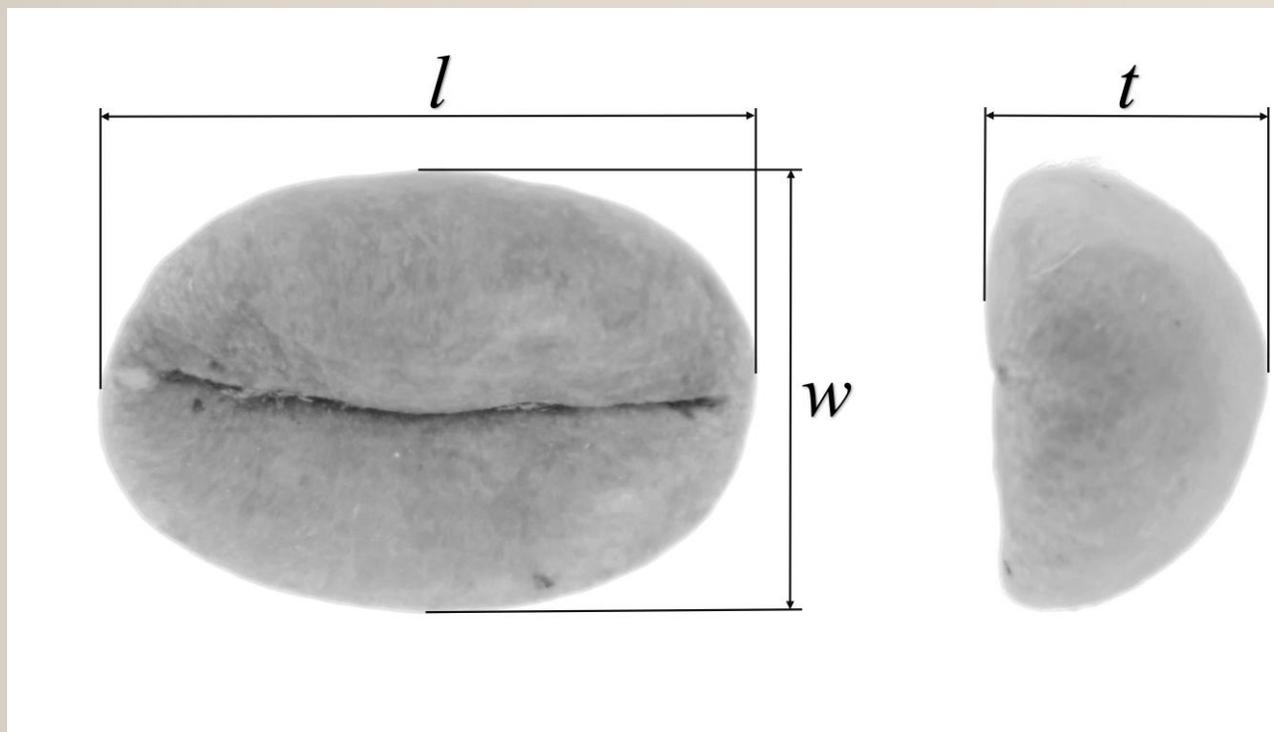
Área superficial del grano (mm²)



Metodología



Dimensiones ortogonales (mm)



Calibrador digital

Metodología

Calor específico (kJ kg⁻¹ K⁻¹)

Método de las mezclas

- 100g café calentado indirectamente 80°C (10min).
- Mezcla sumergida en un calorímetro con 500g de agua a T ambiente (registrada).
- Monitorear la T de la mezcla hasta equilibrio térmico.

$$Q = m c_p (\Delta T)$$

$$Q_{H_2O} = -Q_{cafe}$$

$$Q_{H_2O} = m_a c_{H_2O} (T_{eq} - T_{ai})$$

$$Q_{cafe} = m_c c_c (T_{eq} - T_{cf})$$

$$c_c = -\frac{m_a c_{H_2O} (T_{eq} - T_{ai})}{m_c (T_{eq} - T_{cf})}$$

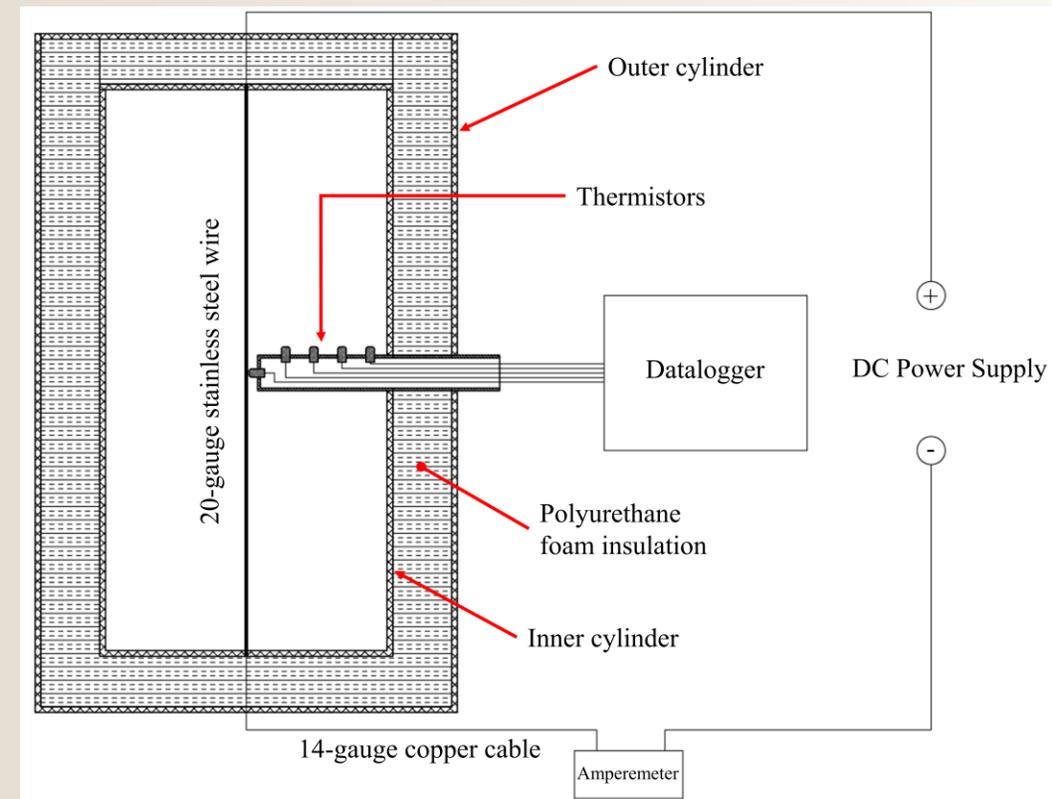


Metodología

Conductividad térmica (kJ kg⁻¹ K⁻¹)

Conductímetro

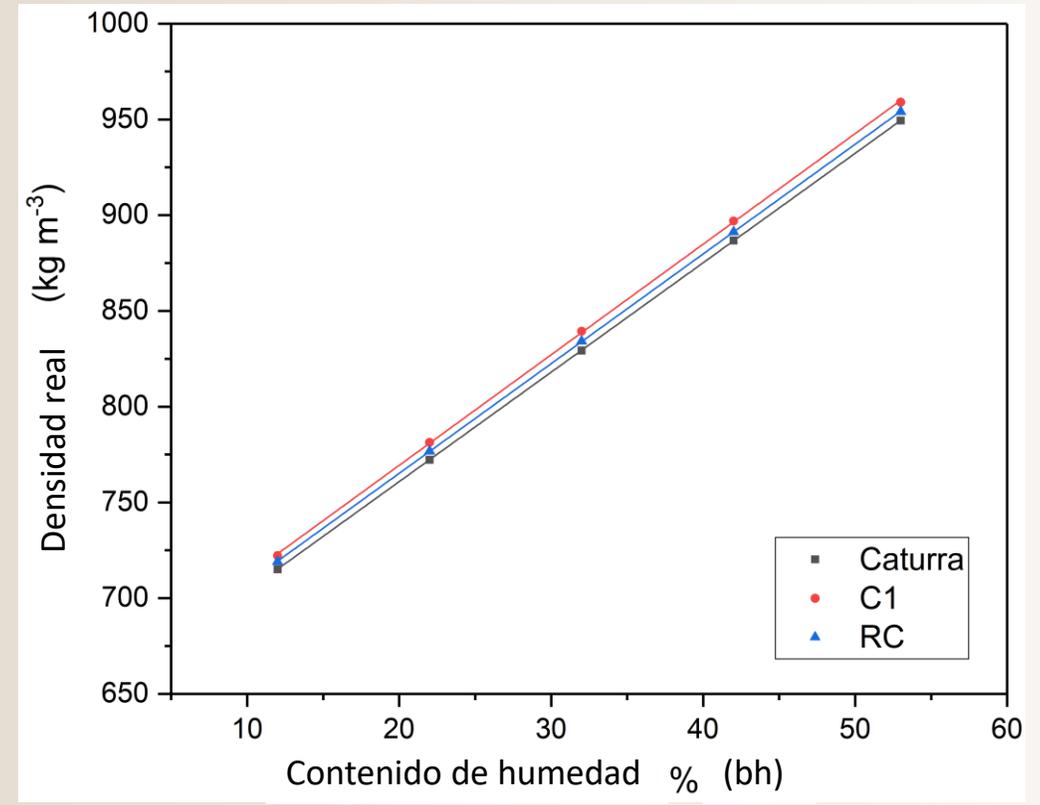
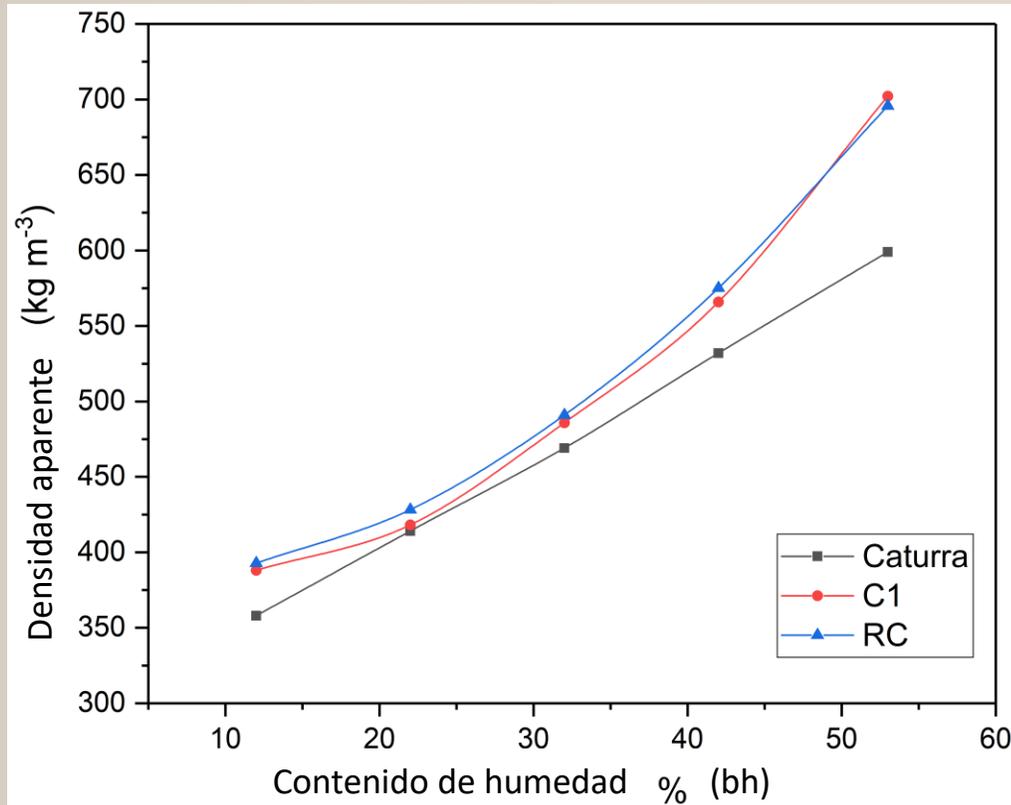
$$K = \left[\frac{V \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}{4\pi L (T_2 - T_1)} \right]$$



1.2V
4.33A
T= 86°C

Resultados

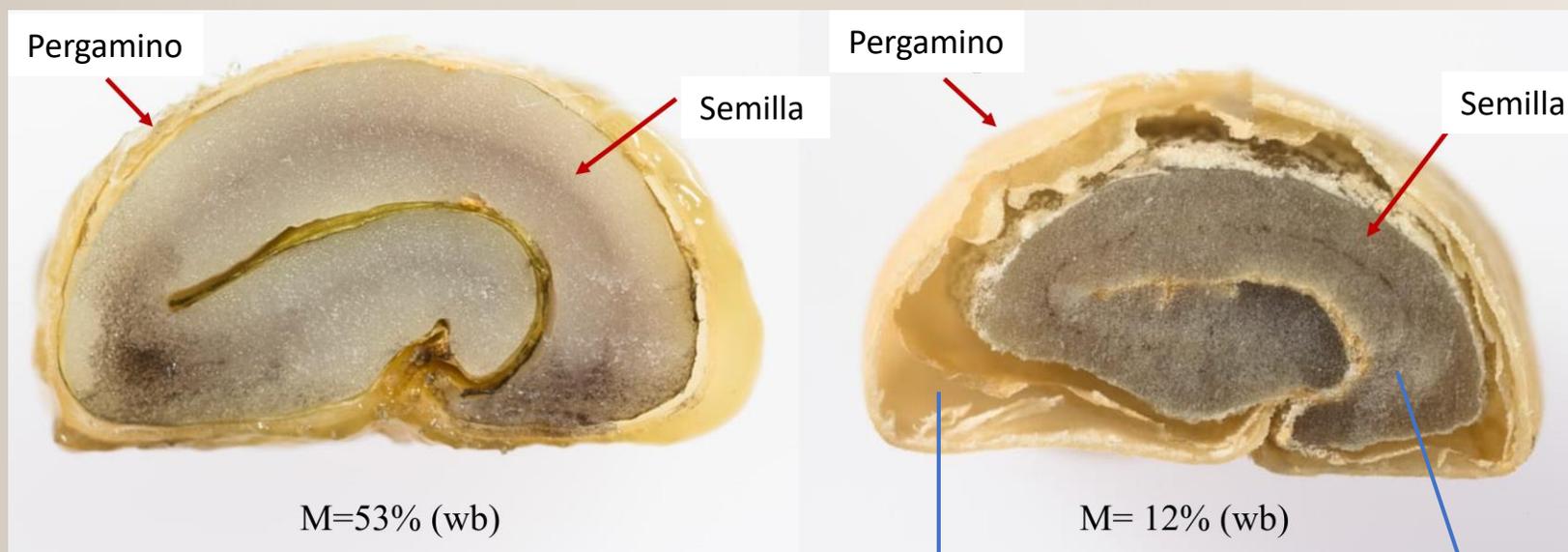
Densidad aparente (granel) ρ_b y real (grano) ρ_k



$\varepsilon_{C1} = 0.38$, $\varepsilon_{RC} = 0.36$, $\varepsilon_{cat} = 0.34$. Facilita el secado.

Resultados

Área superficial (mm²)



Cámara de aire

Encogimiento 7-10%

Variety	Moisture content % (wb)	Mean
C1	53	315.95
	42	275.71
	32	279.34
	22	277.65
	12	289.35
RC	53	286.73
	42	303.05
	32	288.37
	22	295.35
	12	293.05

- La variedad no influyó el As
- El contenido de humedad no influyó el As
- No hubo interacción entre Variedad y contenido de humedad en el As

Resultados

Masa (g) y dimensiones (mm)

Mass (g)	Variety	Moisture content % (wb)	Mean	
0.4975	C1	53	0.4975	
		42	0.4297	
		32	0.3430	
		22	0.3036	
	RC	C1	12	0.3096
			53	0.4696
			42	0.3787
			32	0.3214
		RC	22	0.3083
			12	0.2651

Variable	Variety	Moisture content % (wb)	Mean
Length (mm)	C1	53	13.06
		42	12.80
		32	12.56
		22	12.39
		12	12.41
		53	13.42
	RC	42	13.27
		32	13.02
		22	13.26
		12	12.69

Variable	Variety	Moisture content % (wb)	Mean
Width (mm)	C1	53	9.36
		42	8.93
		32	9.08
		22	9.09
		12	9.12
		53	9.46
	RC	42	9.38
		32	9.13
		22	9.32
		12	9.22

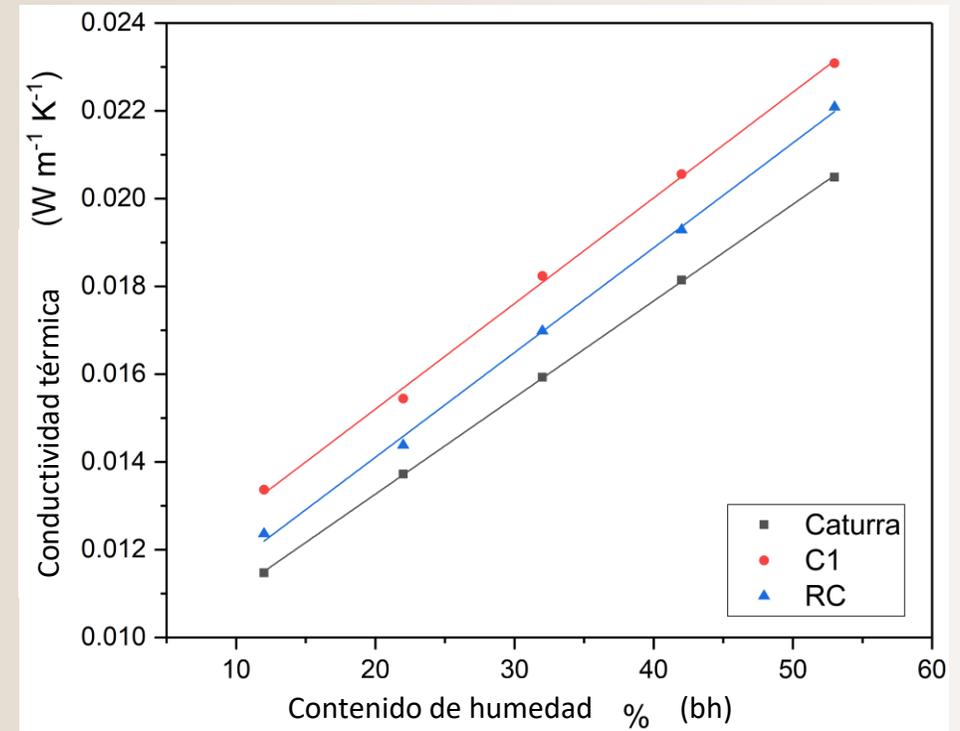
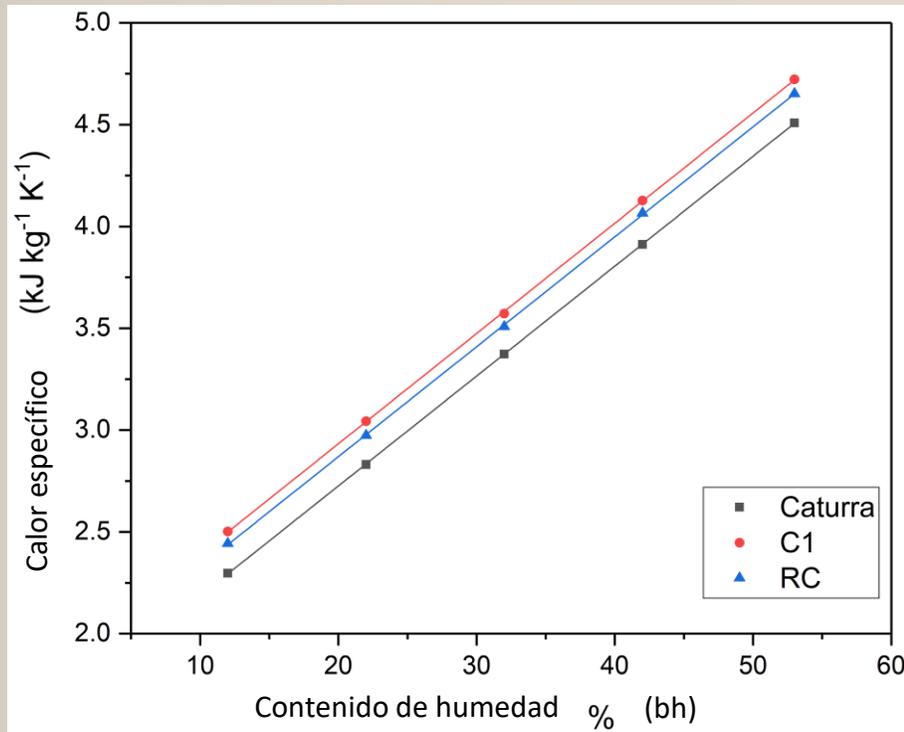
Variable	Variety	Moisture content % (wb)	Mean
Thickness (mm)	C1	53	5.68
		42	5.45
		32	5.57
		22	5.47
		12	5.68
		53	5.45
	RC	42	5.57
		32	5.47
		22	5.68
		12	5.45

- C1 tuvo una masa mayor que RC independientemente del contenido de humedad.
- La masa promedio disminuyó al disminuir el contenido de humedad

- La longitud y el ancho de RC fue en promedio mayor independientemente del contenido de humedad.

Resultados

Calor específico ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) y conductividad térmica ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)



Conclusiones



- **Mejores propiedades físicas y térmicas que las variedades ya publicadas.**
- **El proceso de secado se verá mejorado para estas variedades.**
- **Los modelos matemáticos de secado pueden actualizarse.**
- **Se puede obtener una simulación realista del fenómeno de secado (CFD, modelos matemáticos, difusión y transferencia de calor).**

Mas información: Duque-Dussán, E., Sanz-Uribe, J. R., Dussán-Lubert, C., & Banout, J. (2023). **Thermophysical properties of parchment coffee: New Colombian varieties.** Journal of Food Process Engineering, 46(4), e14300.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.14300>



Gracias

cenicafe@cafedecolombia.com 



www.cenicafe.org



agroclima.cenicafe.org



biblioteca.cenicafe.org



Cenicafé FNC



@cenicafe



cenicafé



CenicaféFNC