



Análisis y modelamiento de la granulometría en la cáscara del café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo*

Norbey de la Cruz Tobón Arroyave**, Andrés Felipe Cerón Cárdenas***, Luis Fernando Garcés Giraldo****

Analysis and modeling of coffee's peel granulometry (*Coffea arabica* L.), Castillo variety

Análise e modelamento da granulometria da casca do café (*Coffea arabica* L.) variedade Castillo

RESUMEN

Introducción. La cascara de café es el principal subproducto de la industria cafetera en Colombia y no es aprovechada según su potencial bioactivo representado en carotenoides, ácido gálico, antocianinas y antioxidantes, de alto valor para la industria alimentaria y farmacéutica. De allí la importancia de conocer su granulometría con el fin de realizar procesos de extracción. **Objetivo.** Analizar y modelar la granulometría de la cascara del

café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo. **Materiales y métodos.** La materia prima utilizada en esta investigación fue cascara de café (*Coffea arabica* L.) de la variedad Castillo, la cual se adquirió en fincas del suroeste antioqueño; los árboles de café tenían en promedio 10 años y fue seleccionada en la travesía del año 2015; el secado y adecuación de la materia prima se llevó a cabo en una de las fincas ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia, Colombia; el análisis granulométrico por tamizado se realizó en los laboratorios de la Corporación Universitaria

* Artículo original derivado del trabajo de investigación: "Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo", para optar al título de maestría en Innovación Alimentaria y Nutrición, Corporación Universitaria Lasallista, 2015. ** Ingeniero agrícola; especialista en Alimentación y Nutrición; estudiante de Maestría en Innovación Alimentaria y Nutrición de la Corporación Universitaria Lasallista. *** Ingeniero agroindustrial; estudiante Maestría de Innovación en Alimentaria y Nutrición de la Corporación Universitaria Lasallista. **** Doctor en Filosofía de la Universidad Pontificia Bolivariana. Vicerrector de Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista. Caldas-Antioquia, Colombia.

Lasallista. Se utilizó un molino de cuchillas mediante el cual se evaluó un rango de tiempos de molienda entre 1 y 4 minutos. La distribución de partícula se estudió con los modelos de Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) y Rosin-Rammler (R-R). Ambos modelos fueron linealizados para obtener las constantes de la ecuación y los coeficientes de correlación para poder compararlos. **Resultados.** La función de distribución

de Rosin-Rammler es la que mejor representa la distribución granulométrica de la cáscara de café con un r^2 igual al 0,99 en contraste con la función de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann con un r^2 menor que va disminuyendo a medida que se aumenta el tiempo de molido.

Palabras clave: granulometría, cascara, *Coffea arabica L.*

ABSTRACT

Introduction. Coffee's peel is the main sub product of coffee industry in Colombia and is not sufficiently used to exploit its bioactive potential, represented by its carotenoids, gallic acid, anthocyanins and antioxidants, all of them with great value for food and pharmaceutical industries. It is, therefore, important to study its granulometry in order to develop extraction processes. **Objective.** Analyze and make a model of coffee's peel granulometry (*Coffea arabica L.*), Castillo variety. **Materials and methods.** The raw material used in this research work was coffee peel (*Coffea arabica L.*), Castillo variety, acquired in farms from the Antioquian South West region. The coffee plants had an average of ten years of age and the selection was made in the 2015 harvest. The drying and the adequacy

of the raw material took place in one of the farms, in Caldas, Antioquia, Colombia. The granulometry analysis by sieving was performed at Corporación Universitaria Lasallista's laboratories. A cutter mill was used and a grinding time lapse between 1 and 4 minutes was assessed. The particles distribution was studied with the Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) and Rosin-Rammler (R-R) models. Both models were linearized in order to obtain the equation constants and the correlation coefficients to be compared. **Results.** The Rosin-Rammler's distribution function is the one that best represents the granulometric distribution of coffee peel, with a r^2 equal to 0,99 in contrast to the distribution function of Gates-Gaudin-Schuhmann, with a lower r^2 that decreases as grinding time increases.

Key words: granulometry, peel, *Coffea arabica L.*

RESUMO

Introdução. A casca de café é o principal subproduto da indústria cafeeicultora na Colômbia e não é aproveitada segundo seu potencial bioativo representado em carotenoides, ácido gálico, antocianinas e antioxidantes, de alto valor para a indústria alimentaria e farmacêutica. Daí a importância de conhecer sua granulometria com o fim de realizar processos de extração. **Objetivo.** Analisar e modelar a granulometria da casca do café (*Coffea arabica L.*) variedade Castillo. **Materiais e métodos.** A matéria prima utilizada nesta investigação foi casca de café (*Coffea arabica L.*) da variedade Castillo, a qual se adquiriu em sítios do sudoeste antioqueño; as árvores de café tinham em média 10 anos e foi selecionada na travessa do ano de 2015; o secado e adequação da matéria prima se levou a cabo num dos

sítios localizado no município de Caldas, Antioquia, Colômbia; a análise granulométrico por tamizado se realizou nos laboratórios da Corporación Universitaria Lasallista. Se utilizou um moinho de lâminas mediante o qual se avaliou um faixa de tempos de moagem entre 1 e 4 minutos. A distribuição de partícula se estudou com os modelos de Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) e Rosin-Rammler (R-R). Ambos modelos foram alinhados para obter as constantes da equação e os coeficientes de correlação para poder os comparar. **Resultados.** A função de distribuição de Rosin-Rammler é a que melhor representa a distribuição granulométrica da casca de café com um r^2 igual a 0,99 em contraste com a função de distribuição de Gates-Gaudin-Schuhmann com um r^2 menor que vão diminuindo a medida que se aumenta o tempo de moído.

Palavras chave: granulometria, cascara, *Coffea arabica L.*

INTRODUCCIÓN

El café se clasifica en la familia Rubiaceae; y su género es *Coffea* según (Murthy & Naidu, 2012). En Colombia se siembran las variedades de la especie (*Coffea arabica* L.), principalmente, Caturra, Castillo, Típica, Borbón, Maragogype y Tabi, las cuales se usan en 19 departamentos del territorio colombiano con fines comerciales (Montilla Pérez et al., 2008). El fruto de café o cereza de café está constituido de afuera hacia adentro por la cáscara, conocida como epicarpio; una capa mucilaginosa llamada mesocarpio que es una gruesa capa de células esponjosas que conforman la pulpa del café, su espesor aproximado es de unos 5 mm, (Bressani, 1979); el endocarpio corresponde al pergamino que es una cascarilla que cubre la semilla, (Mussatto, Machado, Martins, & Teixeira, 2011). También encontramos el espermoderma que es una película plateada que recubre la semilla, el endospermo que correspondería a la propia semilla y el embrión que se encuentra en la cara convexa de la semilla. La semilla de café presenta una superficie plana y se encuentran dos unidades dentro del fruto de café (Suri & Crozier, 2012). El estado adecuado de formación de propiedades físicas y químicas del fruto de café se alcanza en aproximadamente 231 días después de floración, que es el momento ideal para cosechar el fruto (Marín López, Arcila Pulgarín, Montoya Restrepo, & Oliveros Tascón, 2003). La cáscara de café representa uno de los mayores subproductos de la industria con un 29 % en base seca (Montilla Pérez et al., 2008).

Buena parte de este subproducto es arrojado a las fuentes de agua donde ocasiona una fuerte contaminación hídrica con consecuencias negativas para la flora, la fauna, al igual que para el hombre que aguas abajo la utiliza para su consumo. El interés actual por la cáscara de café es debido a sus componentes químicos, pues está constituida por un 3 % de cafeína y un 1,5 a 4 % de compuestos bioactivos (componentes fenólicos principalmente, destacándose los ácidos clorogénicos y los ácidos hidroxicinámicos) (Murthy & Naidu, 2010); estos componentes actualmente son

valorados por sus propiedades antioxidantes, y se relacionan con el mantenimiento de las defensas antioxidantes endógenas, la integridad y la funcionalidad de las membranas celulares evitando la peroxidación de las lipoproteínas de membrana y de las proteínas estructurales (Mussatto et al., 2011).

Para lograr un mejor aprovechamiento industrial de este subproducto, que contribuya a mitigar el impacto ambiental y con fines de aprovechar sus compuestos bioactivos, se hace necesario iniciar procesos de investigación en diferentes líneas, entre los cuales, el análisis de la granulometría y la composición química son los primeros estudios clave para sus operaciones unitarias; por ello, el objetivo de la presente investigación fue analizar la granulometría de la cáscara de café (*Coffea arabica* L.), variedad Castillo. El tamaño de partícula (granulometría) es una característica física de sólidos, muy significativa que, además, puede determinarse fácilmente mediante el uso de métodos de bajo costo; de allí que el análisis de las propiedades físicas de la cáscara de café sea de gran importancia para sus diversas operaciones unitarias de transporte, manejo, y almacenamiento; especialmente para aquellas actividades que estén relacionadas con el manejo y análisis de sus compuestos bioactivos en el laboratorio a causa de sus propiedades de cohesión y segregación; es así como entre mayor sea el tamaño de partícula menor es el área de contacto entre el solvente y la pulpa de café, y la extracción podría ser subextraída. Por otra parte, si el lecho de partículas es demasiado fino, se puede hacer una sobreextracción o presentarse los fenómenos de formación de grumos lo que dificultaría su análisis posterior y/o manejo. Se deduce por lo afirmado anteriormente que el tamaño de partículas tiene una marcada influencia en los procesos de extracción de los componentes bioactivos de la cáscara de café, los cuales se favorecen o no en función del tamaño de partícula y de su forma.

En este sentido, es importante resaltar que los resultados de un análisis granulométrico pueden ser generalizados y correlacionados por expresiones matemáticas denominadas “funciones de

distribución de tamaños” (García, Cuerda Correa, & Díaz Díez, 2004) que relacionan el tamaño de partícula (apertura de malla), con un porcentaje en peso, que generalmente es el acumulado retenido o el pasante. Existen muchas funciones pero las más utilizadas en el análisis de granulometría son las de Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) y Rosin-Rammler (R-R). (Gimenes & Mendes, 2000; Vítěz & Travníček, 2011; Fujiwara, Dohi, Otsuka, Yamashita, & Sako, 2012; Bitra et al., 2009). A continuación se describen brevemente los fundamentos teóricos de los modelos antes mencionados.

Modelo Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S)

El modelo compara o relaciona los valores del porcentaje acumulado pasante $F(x)$ con el tamaño de partícula o apertura de malla de la serie empleada (Gimenes & Mendes, 2000). La ecuación del modelo matemático propuesto es:

$$F_{(x)} = 100 \left[\frac{x}{x_0} \right]^a \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$F(x)$ = porcentaje en peso acumulado pasante por malla.

X = tamaño de partícula en micrones.

X_0 = módulo de tamaño.

a = módulo de distribución.

Modelo Rosin-Rammler (R-R)

El modelo Rosin-Rammler (R-R) compara o relaciona los valores del porcentaje acumulado pasante $F(x)$ con el tamaño de partícula o apertura de malla de la serie empleada (Vítěz & Travníček, 2011). La ecuación del modelo matemático propuesto es:

$$F_{(x)} = 100 \left\{ 1 - \exp \left[- \left[\frac{x}{x_r} \right]^m \right] \right\} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$F_{(x)}$ = porcentaje acumulado pasante.

X_r = módulo de tamaño.

m = es el módulo de distribución.

m, X_r son constantes.

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue analizar y modelar la distribución de la granulometría de la cáscara de café (*Coffea arabica L.*), variedad Castillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El secado y adecuación de la materia prima se llevó a cabo en una finca ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia, Colombia; el análisis químico proximal y el análisis granulométrico por tamizado se realizaron en los laboratorios de la Corporación Universitaria Lasallista, también en Caldas, Antioquia.

Materia prima

La materia prima utilizada en esta investigación fue cáscara de café (*Coffea arabica L.*), variedad Castillo; los árboles de café tenían en promedio 10 años y fueron seleccionados en la travesía del año 2015 en los meses de marzo y abril, en algunas fincas del suroeste antioqueño a una altura sobre el nivel del mar de 1700 metros.

Tratamiento de la materia prima

El secado de la cáscara de café se llevó a cabo en un secador de bandejas; la pulpa seca fue molida en un molino de cuchillas marca Ika y se realizó el tamizado en una máquina Rotap Tyler, conforme a la norma técnica colombiana NTC 2441 (ICONTEC, 1996) con algunas variaciones en la serie de tamices (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 200 y fondo serie A. S. T. M. E.). Al material de estudio (cáscara de café) se le controló el proceso de cosecha con el objetivo de obtener solo cerezas maduras, descartando de la muestra: cerezas verdes, pintonas, sobremaduras y/o secas; seguidamente se les retiró el exceso de residuos (madera, piedras, otros materiales vegetales, entre otros) y el mucilago adheridos a la cáscara mediante un lavado con agua hasta completar de cada finca 2 Kg de cáscara de café; igualmente se realizó una desinfección de la cáscara con hipoclorito de sodio diluido en agua a una concentración de 50 ppm.

Finalmente en una finca cafetera del municipio de Caldas, Antioquia, se llevó a cabo el secado de la cáscara de café en un secador de bandejas, a una temperatura de 50 °C con una velocidad de aire de 2 m/s durante 12 horas con el fin de llevar la materia prima a una humedad del 10 a 12 % para su análisis posterior.

Composición químico-proximal de la cáscara de café

El análisis de la composición químico-proximal de la cáscara de café se realizó siguiendo los métodos descritos para el análisis químico-proximal de alimentos del laboratorio de bromatología de la Corporación Universitaria Lasallista (Corporación Universitaria Lasallista, 2014), los cuales acogen los métodos de análisis oficiales de la AOAC (AOAC, 2005), sobre las cuales se aplican los siguientes principios: humedad, materia seca, proteína bruta, grasa, extracto no nitrogenado, fibra cruda y ceniza.

Molienda y tamizado de la cáscara de café

Las moliendas se efectuaron a diferentes tiempos de exposición (1, 2, 3 y 4 minutos), luego se siguió el procedimiento establecido en la norma

del Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) NTC 2441 (ICONTEC, 1996) para análisis granulométrico del café tostado y molido, con algunas modificaciones en los tamices. Se tomó una muestra de 100 gramos la cual se ubicó en la parte superior de los tamices (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 200 y fondo) ensamblados de forma descendente; el tamizado se realizó durante diez minutos, y con los pesos inicial y final de cada tamiz se determinó el tamaño promedio de la muestra, relacionando la cantidad retenida acumulada en cada tamiz de cáscara de café con la abertura del mismo.

Modelación distribución de partículas de cáscara de café

Se aplicaron dos modelos matemáticos para el estudio de la distribución de partículas: las ecuaciones de Rossin-Rammler (R-R) (Guevara Barreto, 2005) y Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) (Moa, 2009). Los valores de abertura del tamiz (diámetro) y los de porcentaje acumulado se aplicaron a los anteriores modelos de manera linealizada, para calcular el coeficiente de uniformidad (n), la constante (b) y el coeficiente de correlación de la regresión lineal (r^2).

Tabla 1. Análisis químico proximal cáscara de café (*Coffea arabica* L.) (g/100g) en porcentajes

Variables	Cáscara*	Coefficiente de variación (%)
Humedad	12,20±0,15	1,23 %
Materia seca	87,80±0,0	-
Cenizas (bh)	5,75±0,053	0,92 %
Cenizas (bs)	7,51±0,379	5,05 %
Extracto etéreo	1,35±0,054	3,97 %
Fibra cruda	27,49±0,935	3,40 %
Proteína cruda N *6,25	11,49±0,120	1,04 %

*Valores promedio (n = 10) ± desviación estándar
Fuente: elaborada por el autor, 2015

Análisis estadístico de la granulometría de la cáscara de café

Se calcularon para cada uno de los modelos empíricos de las ecuaciones linealizadas de Rossin-Rammler (R-R) (Guevara Barreto, 2005), y

Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) (Moa, 2009)) los parámetros o constantes de las ecuaciones correspondientes. Todos los resultados se expresaron como media más o menos la desviación estándar. Los análisis de regresión fueron realizados con ayuda del programa Excel;

mientras que el análisis de resultados se realizó con el programa Statgraphics Centurión, versión XV, por medio del cual se efectuó el análisis de varianza (ANOVA).

RESULTADOS

Composición químico-proximal de la cáscara de café

En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos para cada una de las variables analizadas en el laboratorio de bromatología de la Corporación Universitaria Lasallista.

De los resultados obtenidos que se muestran en la tabla 1, se destaca el alto porcentaje de proteína y de fibra cruda; respecto del coeficiente de variación estuvo por debajo del 5,05 %, lo que indica la baja dispersión de los resultados promedios obtenidos.

Análisis granulometría de la cáscara de café

En la tabla 2 se muestran los resultados de los pesos obtenidos para cada uno de los ensayos realizados. Se ha calculado el porcentaje de retenido como peso retenido para cada tamiz/peso total)*100; el porcentaje retenido acumulado, como $X1=x1$; $X2=x1+x2$; $X3=x1+x2+x3$;... $X10=100 \%$ = $x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10$, y el porcentaje de acumulado pasante como $100 - \%$ en peso retenido acumulado (Guevara Barreto, 2005). Para simplificar, en la tabla 2 aparecen sólo los cálculos antes mencionados para cáscara de café a un tiempo de molido de un (1) minuto; para el resto de tiempos el procedimiento es el mismo.

El mayor porcentaje de retenido se presenta en las mallas #20, #30 #40 y #50: el resto de mallas presentan porcentajes menores que varían entre el 1 y el 7 %. Se observa, además, que a medida que se aumenta el tiempo de molido de la cáscara de café el porcentaje de masa retenida en las mallas de mayor diámetro va disminuyendo y se va acumulando hacia las de menor diámetro, es decir, el material se vuelve más fino.

Análisis gráfico de la granulometría de la cáscara de café

Los gráficos 1, 2, 3, y 4 corresponden a los cuatro (4) ensayos realizados de granulometría de cáscara de café a tiempos de 1, 2, 3 y 4 minutos, respectivamente; igualmente se observan los modelos ajustados por regresión lineal de Rosin-Rammler (R-R) y Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S), y la ecuación de la línea recta para cada uno de los modelos.

Según el gráfico 1 (a) para un tiempo de un minuto de molido se puede observar la curva característica; la mayor parte de retenidos se encuentran en el rango de 0,1 mm y 1 mm. La función de distribución de partículas que representa de mejor manera los resultados obtenidos para un molido durante un minuto es el modelo de Rosin-Rammler (R-R) con un coeficiente de correlación de r^2 de 0,9783 (b) en comparación con el de Gates-Gaudin-Schuhmann con un r^2 de 0,9436 (c).

Según el gráfico 2 (a) de granulometría de cáscara de café para un tiempo de dos (2) minutos de molido se puede observar la curva característica: la mayor parte de retenidos se encuentran en el rango de 0,1 mm y 1 mm. La función de distribución de partículas que representa de mejor manera los resultados obtenidos para un molido durante dos minutos es el modelo de Rosin-Rammler (R-R) con un coeficiente de correlación de r^2 de 0,9948 (b) en comparación con el de Gates-Gaudin-Schuhmann con un r^2 de 0,9356 (c).

Según el gráfico 3 (a) de granulometría de cáscara de café para un tiempo de tres (3) minutos de molido se puede observar la curva característica: la mayor parte de retenidos se encuentran en el rango de 0,1 mm y 1 mm. La función de distribución de partículas que representa de mejor manera los resultados obtenidos para un molido durante tres minutos es el modelo de Rosin-Rammler (R-R) con un coeficiente de correlación de r^2 de 0,9941 (b) en comparación con el de Gates-Gaudin-Schuhmann con un r^2 de 0,9259 (c).

Tabla 2. Valores obtenidos en el laboratorio y cálculo de porcentaje retenido, porcentaje retenido acumulado y porcentaje pasante acumulado de la granulometría para cáscara de café

Número tamiz	Diámetro Dp (mm)	Tiempo 1 min. masa retenida (g)	Tiempo 2 min. masa retenida (g)	Tiempo 3 min. masa retenida (g)	Tiempo 4 min. masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
10	2,000	7,00	1,00	1,00	1,00	7,0000	7,00	93,00
20	0,850	50,00	24,00	20,00	18,00	50,0000	57,00	43,00
30	0,600	15,00	25,00	25,00	25,00	15,0000	72,00	28,00
40	0,430	7,00	14,00	15,00	15,00	7,0000	79,00	21,00
50	0,300	6,00	10,00	11,00	11,00	6,0000	85,00	15,00
60	0,250	3,00	5,00	6,00	6,00	3,0000	88,00	12,00
70	0,210	3,00	5,00	5,00	7,00	3,0000	91,00	9,00
80	0,180	2,00	3,00	6,00	3,00	2,0000	93,00	7,00
100	0,150	2,00	2,00	2,00	2,00	2,0000	95,00	5,00
200	0,075	4,00	8,00	6,00	9,00	4,0000	99,00	1,00
Fondo		1,00	3,00	3,00	3,00	1,0000	100,00	0,00
MASA TOTAL		100	100	100	100	100		

Fuente: elaborada por el autor, 2015

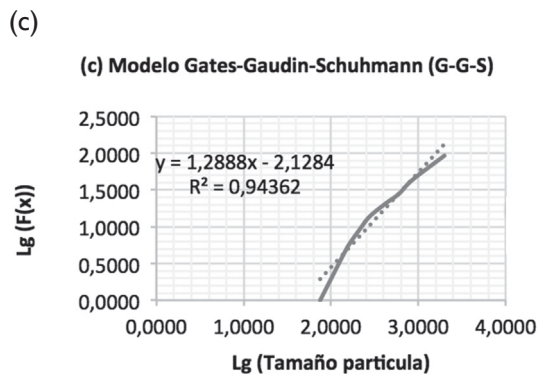
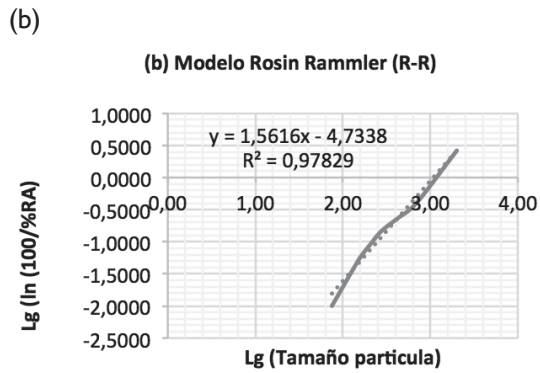
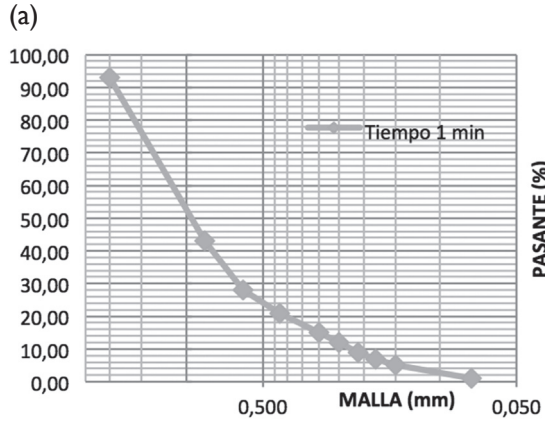


Gráfico 1 (a) % peso retenido frente a diámetro de partícula, (b) modelo ajustado Rosin- Rammler (R-R), (c) modelo ajustado Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S). Tiempo 1 minuto.
Fuente: elaborada por el autor, 2015

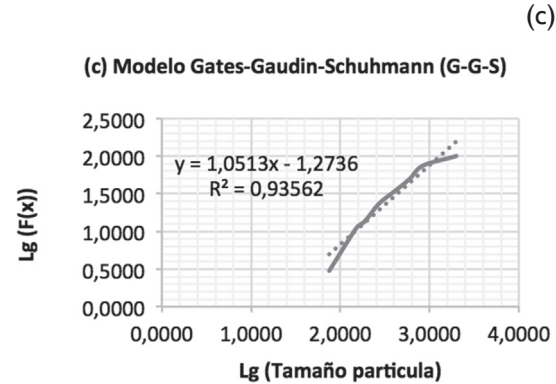
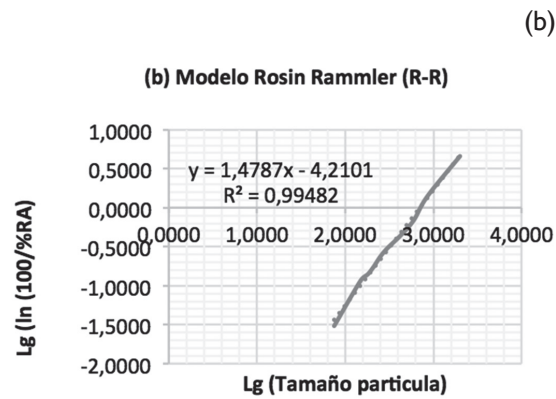
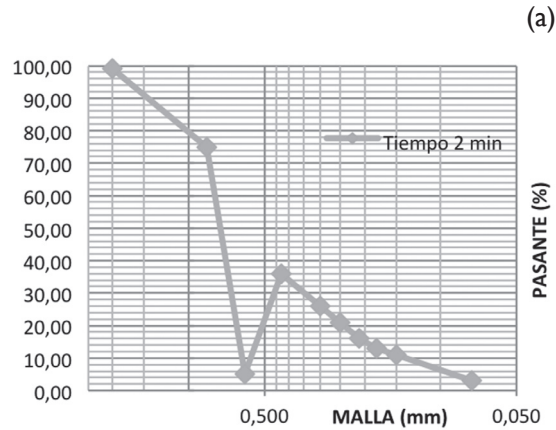


Gráfico 2 (a) % peso retenido frente a diámetro de partícula, (b) modelo ajustado Rosin- Rammler (R-R), (c) modelo ajustado Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S). Tiempo 2 minutos
Fuente: elaborado por el autor, 2015

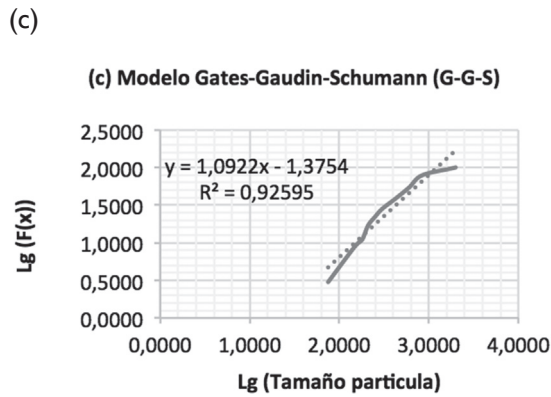
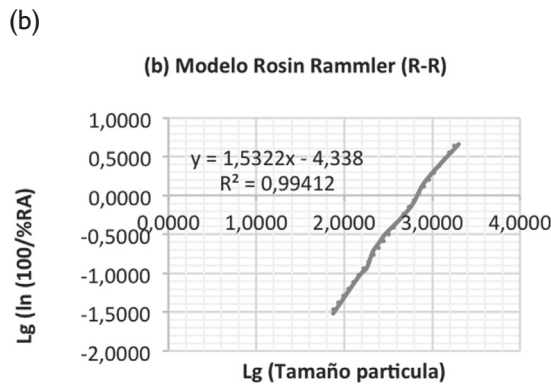
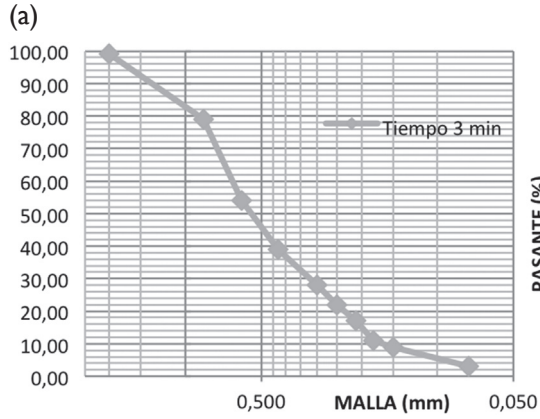


Gráfico 3 (a) % peso retenido frente a diámetro de partícula, (b) modelo ajustado Rosin- Rammler (R-R), (c) modelo ajustado Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S). Tiempo 3 minutos
Fuente: elaborada por el autor, 2015

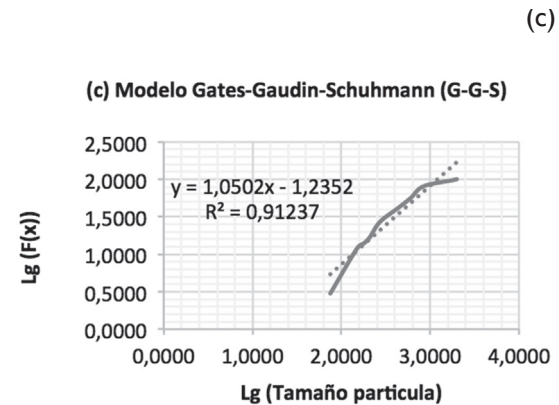
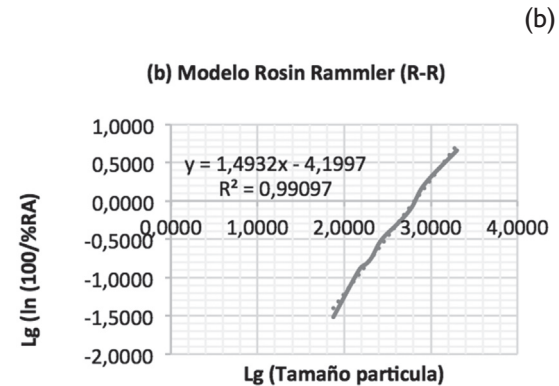
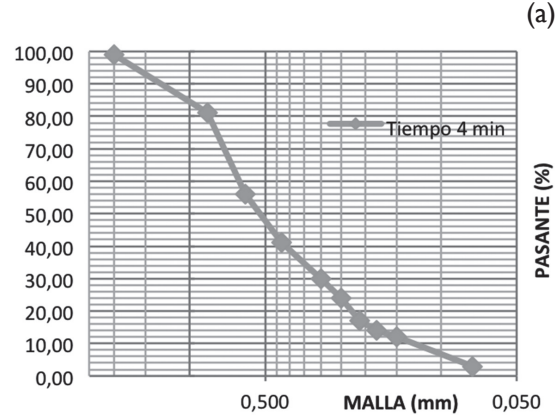


Gráfico 4 (a) % peso retenido frente a diámetro de partícula, (b) modelo ajustado Rosin- Rammler (R-R), (c) modelo ajustado Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S). Tiempo 4 minutos
Fuente: elaborada por el autor, 2015

Según el gráfico 4 (a) de granulometría de cáscara de café para un tiempo de cuatro (4) minutos de molido se puede observar la curva característica; la mayor parte de retenidos se encuentran en el rango de 0,1mm y 1 mm. La función de distribución de partículas que representa de mejor manera los resultados obtenidos para un molido durante cuatro minutos es el modelo de Rosin-Rammler (R-R) con un coeficiente de correlación de r^2 de 0,9910 (b) en comparación con el de Gates-Gaudin-Schuhmann con un r^2 de 0,9124 (c).

El anterior análisis sobre la granulometría de la cáscara de café permite afirmar que la función que mejor se ajusta a los resultados obtenidos de granulometría a un tiempo de 1, 2, 3, y 4 minutos de molido es el modelo de Rosin-Rammler (R-R). A medida que se aumenta el

tiempo de molido, es decir, que la granulometría de la cáscara de café se vuelve más fina, el modelo de Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) pierde su capacidad de representar linealmente los datos de granulometría.

Parámetros de los modelos empíricos de Rosin-Rammler (R-R) y Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S)

En la tabla 3 se pueden observar los datos de las constantes encontrados por linealización de los modelos matemáticos de Rosin-Rammler (R-R) y Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S), el coeficiente de correlación de la regresión lineal del modelo y el cálculo del módulo de tamaño. Las letras que aparecen al lado del valor del módulo de tamaño indican diferencias entre promedios, según la prueba de LSD de Fisher a un 95 % de confianza.

Tabla 3. Parámetros de los modelos empíricos de Rosin-Rammler (R-R) y Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S)

Categoría	Modelos y/o función de distribución	Intercepto	Pendiente (m=a)	r^2	Módulo Tamaño (μm) ($X_r=X_o$)
Tiempo 1 minuto	Rosin-Rammler	-4,7338	1,5616	0,9783	1074,92a
	Gates-Gaudin-Schuhmann	-2,1284	1,2888	0,9436	1596,94b
Tiempo 2 minuto	Rosin-Rammler	-4,2101	1,4787	0,9948	703,34c
	Gates-Gaudin-Schuhmann	-1,2736	1,0513	0,9356	1299,75d
Tiempo 3 minuto	Rosin-Rammler	-4,3380	1,5322	0,9941	677,99e
	Gates-Gaudin-Schuhmann	-1,3754	1,0913	0,9259	1231,57f
Tiempo 4 minuto	Rosin-Rammler	-4,1997	1,4932	0,9910	649,46g
	Gates-Gaudin-Schuhmann	-1,2352	1,0502	0,9124	1203,80h

X_r, X_o , módulo de tamaño en μm , el cual indica el tamaño teórico máximo de partículas en la muestra; m, a , módulo de distribución
Fuente: elaborada por el autor, 2015

DISCUSIÓN

En las diferentes fuentes bibliográficas consultadas no se logró la identificación de estudios de granulometría de cáscara de café; sin embargo, se encontró que para investigaciones relacionadas con el estudio de los componentes orgánicos presentes en la cáscara de café,

los investigadores, normalmente, someten el material de estudio (cáscara de café) a procesos de reducción de tamaño que varían ampliamente en los equipos utilizados como: molinos de laboratorio, licuadoras, trituración manual, entre otros. (Anabella, Joachin, & Brossini, 2009). En general los autores que han realizado estudios referentes a sus componentes bioactivos en

cáscara de café no reportan el tratamiento de reducción de tamaño realizado a las muestras estudiadas; como ejemplo de ello están Ramírez Martínez (1988), Torres Mancera, Córdova López, & Rodríguez Serrano (2011) y Bressani (1979). En consecuencia, a la fecha no se encontraron estudios dedicados exclusivamente al análisis granulométrico de la cáscara de café.

Es importante, sin embargo, resaltar que los estudios de granulometría de materiales son muy significativos en los procesos industriales de extracción de compuestos: para el diseño de equipos, para mejorar procesos de trituración y para el mejoramiento del consumo energético, entre otros (Basurto Contreras, 2011) y (Álvarez Rodríguez, 2006).

La mayoría de estudios de granulometría se enfocan en analizar la distribución de partículas mediante un ensayo granulométrico a través de la realización de una gráfica que muestra la relación entre el diámetro de partícula y el % de pasante acumulada, para lo cual se suele graficar en escala logarítmica el eje de las x, que corresponde al diámetro de partículas, y en el eje de las y, en escala cartesiana, el porcentaje pasante; con base en esta gráfica, el investigador, por interpolación, encuentra el diámetro promedio y el diámetro de los diferentes percentiles según su interés; sin embargo, este método presenta algunas imprecisiones, ya que depende del factor humano. Para compensar esta falta de precisión se suelen realizar los análisis granulométricos mediante funciones de distribución de partículas, que pueden ser generalizadas y cuantificadas por expresiones matemáticas mucho más precisas en la representación de la distribución de tamaño de partículas.

Por ejemplo, el ingeniero químico Guevara Barreto (2005) investigó sobre la caracterización granulométrica del café tostado y molido de Colombia, para lo cual empleó el modelo linealizado de Rosin-Rammler, y encontró que la representación granulométrica del café tostado y molido mediante esta función es aceptable. De otra parte Álvarez Rodríguez (2006) se enfocó

en encontrar las ecuaciones para maximizar las operaciones en planta, con el fin de lograr una disminución del consumo energético en la operación unitaria de trituración; finalmente es de destacar que Bitra et al. (2009) estudiaron estos mismos modelos en el maíz con el fin de encontrar los que mejor representan la distribución de partícula.

Por lo anteriormente expuesto, el presente estudio se convierte en un gran aporte para la industria cafetera y de alimentos que pretenda dar valor agregado a este subproducto, ya que se logró encontrar un modelo matemático que representa la distribución del tamaño de partículas de la cáscara de café (Rosin-Rammler) con un r^2 mayor a 0,99, lo que permitirá desarrollar hacia el futuro operaciones unitarias más eficientes con este subproducto.

CONCLUSIONES

Estadísticamente se encontró diferencia significativa entre un modelo y otro. El modelo que mejor representa la distribución de partículas de la granulometría de cáscara de café es el modelo de Rosin-Rammler (R-R) con un coeficiente de correlación r^2 igual al 0,99; en contraste, el modelo de Gates-Gaudin-Schuhmann pierde capacidad para correlacionar la granulometría de cáscara de café, a medida que aumenta el tiempo de molido con un r^2 que va disminuyendo.

Estadísticamente se encontró también diferencia significativa respecto al módulo de tamaño entre promedios con respecto al tiempo, es decir, a mayor tiempo de molido el diámetro máximo de partículas disminuye.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Universitaria Lasallista, especialmente a la Vicerrectoría de Investigación y al Laboratorio de Química, por el apoyo a la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC international. *AOAC Official Methods*, 18.
- Álvarez Rodríguez, B. (2006). Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaño de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método Bond. *Psicothema*, 18, 342–347. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17295951>
- Anabella, V., Joachin, G., & Brossini, R. (2009). Fibra pulp Coffee. *Revista de La Universidad Del Valle de Guatemala*, 19, 58–65.
- Basurto Contreras, C. (2011). Modelo “Cebaco” aplicado al control de procesos en el circuito de Molienda-Clasificación en una planta concentradora de minerales mediante el software LabVIEW.
- Bitra, V.S., Womac, A. R., Yang, Y.T., Miu, P.I., Igathinathane, C., & Sokhansanj, S. (2009). Mathematical model parameters for describing the particle size spectra of knife-milled corn stover. *Biosystems Engineering*, 104(3), 369–383. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.08.007>
- Bressani, R. (1979). *Coffee pulp: composición, tecnología and utilization*.
- Corporación Universitaria Lasallista. (2014). *Guías de bromatología*, Caldas: CUL.
- Fujiwara, M., Dohi, M., Otsuka, T., Yamashita, K., & Sako, K. (2012). Evaluation of Models for Predicting Spray Mist Diameter for Scaling-Up of the Fluidized Bed Granulation Process. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 60(11), 1380–1386. <http://doi.org/10.1248/cpb.c12-00432>
- García, M., Cuerda Correa, E. M., & Díaz Díez, M. (2004). Application of the Rosin-Rammler and Gates-Gaudin-Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. *Materials Characterization*, 52(2), 159–164. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.04.007>
- Gimenes, M. L., & Mendes, E. S. (2000). Linearização do modelo log-normal para distribuição de tamanho de partículas. *Acta Scientiarum*, 22(5), 1235–1239.
- Guevara Barreto, R. A. (2005). Caracterización granulométrica del café colombiano tostado y molido. *Avance Técnico Cenicafé*, 56(1), 5–18.
- ICONTEC. (1996). Método para la determinación del tamaño de partícula (NTC 2441).
- Marín López, S. M., Arcila Pulgarín, J., Montoya Restrepo, E. C., & Oliveros Tascón, C. E. (2003). Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Revista Avance Técnico Cenicafé*, 54(3), 208–225.
- Moa, D. (2009). Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de la alterita. *Tecnología Química*, 1, 83–91.
- Montilla Pérez, J., Arcila Pulgarín, J., Aristizábal Loaiza, M., Montoya Restrepo, E. C., Oliveros Tascón, C. E., Puerta Quintero, G. I., & Cadena Gómez, G. (2008). Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. *Revista Avance Técnico Cenicafé*, 370, 8.
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2010). Recovery of Phenolic Antioxidants and Functional Compounds from Coffee Industry By-Products. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3), 897–903. <http://doi.org/10.1007/s11947-010-0363-z>
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition. *Resources, Conservation & Recycling*, 66, 45–58. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Mussatto, S. I., Machado, E. M., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661–672. <http://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Ramírez Martínez, J. R. (1988). Phenolic compounds in coffee pulp: quantitative determination by HPLC. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 43, 10.
- Suri, R., & Crozier, A. (2012). Free phenolic acids in human urine after drinking coffee rich in chlorogenic acids. *Tropical Agricultural*, 40(2), 221–232.
- Torres Mancera, M. T., Córdova López, J., & Rodríguez Serrano, G. (2011). Enzymatic Extraction of Hydroxycinnamic Acids from Coffee Pulp. *Food Technology Biotechnology*, 49(3), 369–373.
- Vítěz, T., & Travníček, P. (2011). Particle Size Distribution of a Waste Sand From a Waste Water Treatment Plant With Use of Rosin-Rammler and Gates-Gaudin. *Acta Universitatis Agriculturae Et ...*, LIX(3), 197–202. Retrieved from <http://acta.mendelu.cz/pdf/actaun201159030197.pdf>