

# PARAMETROS DE DISEÑO DE UN HIDROCICLON PARA CLASIFICAR CAFÉ PERGAMINO

Iván Darío Aristizábal Tórres<sup>1</sup>; Carlos A. Salazar Molina<sup>2</sup>  
Carlos E. Oliveros Tascón<sup>3</sup>

## RESUMEN

*El hidrociclón es una alternativa tecnológica más eficiente, ecológica, fácil de usar que los dispositivos tradicionalmente utilizados para lavar, limpiar y clasificar el café. Se conoce información para escalar este dispositivo cuando se utiliza con suspensiones de partículas finas (diámetro característico menor a 150 micras). Se conoce poca información para escalarlo para partículas grandes como el café (diámetro característico de 8 mm). En este trabajo se publican los resultados obtenidos en el estudio del escalamiento del hidrociclón para café partiendo del enfoque semi-teórico del teorema de Buckingham se establecieron seis grupos adimensionales:  $R_e = f(D/D_w, D_u/D_o, D_u/d^*, h_{1v}/D_w, \phi_v)$ . Se tomaron datos experimentales realizando 60 pruebas en las que se combinaron cuatro caudales de agua, tres diámetros de ápice y cinco flujos de café alimentado; se evaluaron las variables de operación caída de presión, caudal de suspensión y concentración en volumen con el propósito de encontrar relaciones entre éstas.*

*Las relaciones obtenidas experimentalmente son: el caudal de suspensión varía en forma potencial con la caída de presión, el consumo de agua disminuye potencialmente con el aumento de la concentración, la concentración varía linealmente con el flujo de café y es inversamente proporcional al caudal de agua.*

<sup>1</sup> Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

<sup>2</sup> Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Apartado 568.

<sup>3</sup> Investigador Científico III, Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas. Apartado 2427.

*El Re disminuyó potencialmente con  $D/D_u$ ,  $h_{lv}/D_u$ ,  $\phi_v$  y aumento linealmente con  $D_u/D_o$ ,  $D_u/d^*$ . Las relaciones halladas entre los grupos adimensionales permiten el escalamiento de hidrociclones con similitud geométrica al evaluado.*

**Palabras clave:** *coffea arabica, clasificación hidráulica de café, hidrociclón, clasificación de café.*

### ABSTRACT

*The hydrocyclone is a technological option more efficient, ecological and easy to use than the traditional devices used in Colombia for washing, cleaning and sorting wet coffee. The hydrocyclon has being used in mining and some food processing operations with suspensions with small particles (characteristic diameter < 150 micres). Scaling procedure based on empirical works has been proposed for these applications.*

*Information focused on scaling of hydrocyclone with large particles (characteristic diameter of 8 mm) has not been found. Theoretical and experimental results on scaling procedure of hydrocyclone for cleaning and sorting of wet coffee beans, based on the Buckingham theorem approach, are published in this paper. Six dimensionless groups ( $Re = f(D/D_u, D_u/D_o, D_u/d^*, h_{lv}/D_u, \phi_v)$ ) were proposed. Experimental data, from 60 tests, were obtained by combining four water flows, three apex diameters and five coffee beans mass flows. Pressure drop, suspension mass flow and suspension concentration ( $v/v$ ) were considered.*

*Relationships obtained from the dimensional analysis are: Suspension mass flow behaves following a potencial pattern with pressure drop; water consumption decreases in a potencial pattern when concentration increases; suspension concentration varies linearly with the flow mass of coffee beans and inversely with water flow rate.*

*Reynolds's number potentially decreases with  $D/D_w$ ,  $h_{lv}/D_w$  and  $\phi_v$  and linearly increases with  $D_u/D_o$  and  $D_u/d^*$ . Dimensionless relationships obtained can be used for scaling purpose of hydrocyclones with geometric similitude with the prototype evaluated.*

**Key-words:** *Coffea arabica, hydraulic classification, hydrocyclone, coffee classification.*

## INTRODUCCION

En el proceso de beneficio húmedo del café tradicionalmente se ha utilizado el canal de correteo (CC) y el canal semisumergido (CSS) para lavar el café y retirar los granos vanos y las impurezas con el fin de obtener cafés de alta calidad física. El CC y el CSS, cuando son adecuadamente utilizados, permiten separar cafés tipo Federación de cafés de calidad inferior ó corrientes (Centro Nacional de Investigaciones del Café - CENICAFE, 1991).

Sin embargo, tanto en el CC como en el CSS se observan importantes limitantes como el relativo alto consumo específico de agua cuando no hay recirculación (más de 15 litros de agua por kg de café pergamino seco beneficiado) y porcentajes altos de café bueno (19%) separados junto con las pasillas (Márquez, 1987 y Villabona, 1994). En consecuencia, se dificulta y encarece el manejo ecológico de los efluentes, se extiende el tiempo de operación (por el repase) y se ocasionan importantes pérdidas económicas al caficultor.

El hidrociclón es utilizado en la minería y en otras agroindustrias diferentes al café para separar partículas con diferencias en tamaño, densidad y comportamiento

hidrodinámico, utilizando la mayor aceleración que genera.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en el estudio de las relaciones principales entre las variables geométricas y de operación para el escalamiento de hidrociclones en la clasificación de café pergamino húmedo (53% base húmeda).

## REVISIÓN DE LITERATURA

Bouso (1985), Londoño y Pérez (1988), y Sánchez (1988), definen el hidrociclón como un separador estático basado en la separación centrífuga. Para producir el movimiento rotacional el hidrociclón emplea la energía de presión de un fluido, la cual genera una fuerza debida a la aceleración centrífuga permitiendo incrementar la velocidad de asentamiento de las partículas alimentadas en la suspensión (Bouso, 1985; Wills, 1987 y Sánchez, 1988 ). Los autores revisados (Bustamante, 1989 y 1992; Duque y Martínez, 1988; Londoño y Pérez, 1988; Salazar, 1993; Sánchez, 1988 y Sarquis, 1981) muestran en sus trabajos el desarrollo de ecuaciones y expresiones empíricas en las cuales se consideran dos tipos de variables que intervienen en el funcionamiento de un hidrociclón, geométricas y de operación.

**VARIABLES GEOMÉTRICAS.** Las principales variables geométricas o de diseño (Figura 1) de un hidrociclón son:

- Diámetro del hidrociclón (D): es el diámetro de la sección o cámara cilíndrica de alimentación. Considerada la variable de mayor importancia que controla los radios de órbita y la fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas (Londoño y Pérez, 1988),

- Diámetro de alimentación ( $D_i$ ): es el diámetro de entrada de la corriente de alimentación. Regula la velocidad de inyección del momento de rotación (Sánchez, 1988), para una sección rectangular el diámetro de entrada equivalente es:

$$D_i = \sqrt{4 \frac{bh}{\pi}}$$

Algunos autores coinciden en limitar  $D_i$  en el siguiente rango:

$$\frac{D}{7} \leq D_i \leq \frac{D}{6}$$

- Diámetro localizador del vórtice ( $D_o$ ): es el diámetro interior de la descarga superior, controla tanto la separación como el flujo en el

hidrociclón:

$$\frac{D}{8} \leq D_o \leq \frac{D}{5}$$

- Diámetro del ápice ( $D_u$ ): es el diámetro interior de la descarga inferior. Su tamaño debe ser tal que no obstruya la evacuación de los sólidos. Bradley, citado por Londoño y Pérez (1988), plantea el siguiente rango:

$$\frac{D}{10} \leq D_u \leq \frac{D}{5}$$

- Relación  $D_u/D_o$ : Bustamante (1989) propone el siguiente rango para lograr las condiciones normales de operación:

$$0.34 \leq \frac{D_u}{D_o} \leq 0.9$$

- Altura del localizador del vórtice ( $h_{lv}$ ): distancia que penetra el  $D_o$  dentro del hidrociclón. Su función es evitar el corto circuito de las corrientes de alimentación y el flujo superior. Bradley y Rietema citados por Bustamante (1989), proponen:

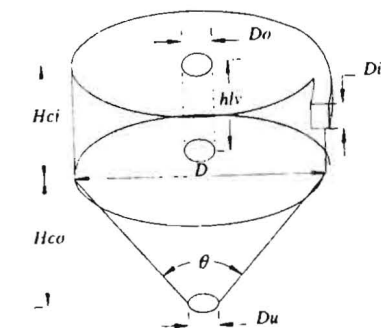
$$0.33D \leq h_{lv} \leq 0.4D$$

- Altura de la sección cilíndrica ( $H_{ci}$ ): longitud del cuerpo cilíndrico

del hidrociclón, permite el inicio del fenómeno de separación y define el tiempo de residencia.

- Altura de la sección cónica ( $H_{co}$ ): longitud del cono del hidrociclón.

- Ángulo de cono ( $\theta$ ): ángulo que define la conicidad del hidrociclón. Conicidades mayores de  $45^\circ$  se emplean para separación de sólidos de acuerdo a la gravedad específica (Bustamante, 1992).



**Figura 1.** Variables de diseño de un hidrociclón.

**Variables de operación.** Las principales variables de operación que intervienen en el funcionamiento de l hidrociclón son:

- Caída de presión ( $\Delta P$ ) y caudal de suspensión ( $Q_s$ ): a mayor caudal se origina mayor pérdida de presión en el hidrociclón, Bustamante (1989) relaciona el caudal de la alimentación con la  $\Delta P$  mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = K * (\Delta P)^n$$

Mullar y Jull, citados por Wills (1987), desarrollaron las siguiente expresión que sirve para diseños preliminares:

$$Q_s = 0.0094 * \sqrt{\Delta P} * D_i$$

donde:

$\Delta P$  : caída de presión [kPa]

$Q_s$  : caudal de suspensión [ $m^3/h$ ]

- Densidad ( $\rho$ ): es necesario que exista diferencia de densidades entre el sólido y el medio fluido para que haya separación. La densidad de la suspensión se calcula conociendo la densidad de los sólidos ( $\rho_s$ ) y del fluido ( $\rho_l$ ) para una concentración en volumen ( $\Phi_v$ ) esta dada por:

$$\rho_{susp} = \frac{\Phi_v}{100} (\rho_s - \rho_l) + \rho_l$$

- Concentración de sólidos: con altas concentraciones de sólidos las condiciones de sedimentación obstaculizada son mayores y las velocidades de sedimentación se desvían de la ley de Stokes

(Sánchez, 1988). Generalmente se expresa la concentración en volumen ( $\Phi_v$ ) como la relación entre el volumen de sólidos presentes en la suspensión ( $V_s$ ) y el volumen de la suspensión ( $V_m$ ) (12):

$$\frac{\Phi_{v_s}}{V_m}$$

- Viscosidad del fluido: En suspensiones muy concentradas se debe considerar la viscosidad de la mezcla ( $\mu_s$ ) ya que ésta es mucho mayor que la viscosidad de la fase continua ( $\mu_o$ ). La ecuación de Franken y Acrivos, citada por Metzner (1985), representa teóricamente el comportamiento de la viscosidad relativa de una suspensión para concentraciones altas con muy buena aceptación:

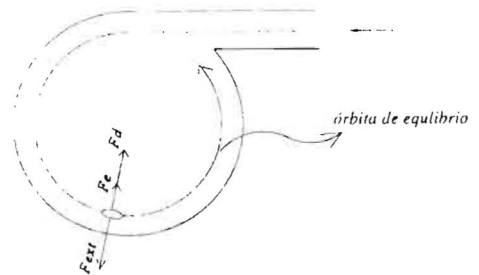
$$\mu_s = \frac{9}{8} \left[ \frac{(\Phi_v / \Phi_{vmax})^{1/3}}{1 - (\Phi_v / \Phi_{vmax})^{1/3}} \right] * \mu_o$$

- Tamaño de la partícula: este tiene efecto sobre la velocidad tangencial y la aceleración, partículas con igual densidad en el mismo fluido alcanzan una velocidad terminal mayor cuando su tamaño es superior (Bustamante, 1992; Sánchez, 1988, Sánchez y Bustamante, 1992).

- Forma: tiene efecto sobre la clasificación debido a la fricción

entre partículas y los efectos sobre el fluido. Partículas de forma laminar se comportan hidrodinámicamente diferente a partículas de forma esférica aunque sean de igual densidad (Bustamante, 1992). En un hidrociclón las partículas muy planas tienden a ser evacuadas por el sobreflujo aunque sean relativamente gruesas (Wills, 1987).

**Conceptos básicos.** La trayectoria de una partícula que se mueve en el seno de un fluido dentro de un hidrociclón, se puede predecir asumiendo que la partícula se mueve en una sola dirección (radial) en un plano horizontal, dicha partícula en una órbita de equilibrio estará sujeta a la acción de tres fuerzas (Sánchez 1988 y Wills 1987), como lo indica la Figura 2.



**Figura 2.** Fuerzas que actúan sobre una partícula orbitando en un hidrociclón.

- Fuerza externa ( $F_{ext}$ ): corresponde a la fuerza centrífuga ( $F_c$ ), debida a la aceleración centrífuga originada en la velocidad tangencial del flujo y depende de la distancia «r» de la partícula al centro del hidrociclón:

$$F_c = m * a_c = m * \frac{V_{tg}^2}{r}$$

- Fuerza de empuje ( $F_e$ ): es debida a la diferencia de presión sobre la partícula causada por el giro en el campo centrífugo; esta fuerza está dirigida en dirección radial hacia el centro del hidrociclón, por lo cual se toma como una fuerza radial ( $F_r$ ) sobre la partícula,:

$$F_e = F_r = \left(m \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \frac{V_{tg}^2}{r}$$

- Fuerza de resistencia o Fuerza de arrastre ( $F_d$ ): es la fuerza de resistencia que opone el fluido al movimiento de la partícula. Esta fuerza se origina en el hidrociclón debido a la diferencia de presión entre el vórtice y el centro del ciclón:

$$F_d = C_d \rho_f V^2 A$$

Donde V es la Velocidad radial relativa del fluido, el coeficiente  $C_d$  normalmente es expresado en función del número de Reynolds ( $R_e$ ) y del factor de forma de la partícula.

Para un cuerpo en movimiento libre se tiene:

$$\sum F = m \left(\frac{dV}{dt}\right)$$

Reemplazando las ecuaciones 12, 13 y 14 en 15 y despejando la velocidad terminal radial corregida para partículas sedimentando en una suspensión, según Sarquis (1981) se obtiene:

$$V_{tc} = \sqrt{\frac{4 \rho_s d}{3 \rho_m C_d} \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right) V_{\text{overr}} * F}$$

Donde F es el factor de Steinov, expresado en función de la porosidad:

$$F = \left[ \frac{V_f}{V_f + V_s} \right]^2 * EXP^{-1.82[1 - (\frac{V_f}{V_f + V_s})]}$$

- Relaciones de isodromía: Partículas isódromas o equidistantes, son las partículas que tienen la misma velocidad terminal en el mismo fluido y campo de fuerzas (Gaviria, García y Sánchez, 1992 ; Wills, 1987). Si se tienen dos partículas de densidades  $\rho_a$  y  $\rho_b$  y diámetros  $D_a$  y  $D_b$  respectivamente, que están sedimentando en un campo centrífugo exactamente a la misma

velocidad, sus velocidades terminales deben ser las mismas y por consiguiente:

$$\frac{D_a}{D_b} = \left[ \frac{(\rho_b - \rho_m)}{(\rho_a - \rho_m)} \right]^n$$

Con:  $n = 1$ , para régimen turbulento  
 $n = 1/2$ , para régimen laminar  
 $1/2 < n < 1$ , para régimen de transición

Se ha definido también la relación de separación (RE) como la relación del tamaño máximo de la partícula liviana ( $D_{a_{max}}$ ) y el tamaño mínimo de la partícula pesada ( $D_{b_{min}}$ ) (7):

$$RE = \frac{D_{a_{max}}}{D_{b_{min}}}$$

Habrá clasificación si se cumple la condición siguiente:

$$\frac{D_{a_{max}}}{D_{b_{min}}} < \left[ \frac{\rho_b - \rho_m}{\rho_a - \rho_m} \right]^n$$

Tamaño de corte ( $d_{50}$ ). En un hidrociclón las partículas con diámetros mayores al  $d_{50}$  serán evacuadas por el bajo flujo y las partículas con diámetros menores al

$d_{50}$  serán evacuadas por el sobreflujo. Plitt, citado por Wills (1987), ha desarrollado un modelo matemático que da buenos pronósticos acerca del rendimiento de hidrociclones de gran diámetro, la ecuación es:

$$d_{50} = \frac{14.2 * D^{0.46} * D_i^{0.6} * D_o^{1.21} * EXP^{0.063\Phi_v}}{D_u^{0.71} * H_t^{0.38} * Q^{0.45} * (\rho_s - \rho_f)^{0.5}}$$

donde:

- D : Diámetro del hidrociclón [cm]
- $D_i$  : « de alimentación [cm]
- $D_o$  : « localizador del vórtice [cm]
- $D_u$  : « ápice [cm]
- $\Phi_v$  : Porcentaje volumétrico de sólidos en la alimentación
- Ht : Altura del hidrociclón [cm]
- Q : Caudal de la alimentación [ $m^3/hr$ ]
- $\rho_s$  : Densidad de los sólidos [ $g/cm^3$ ]
- $\rho_f$  : Densidad del fluido [ $g/cm^3$ ]
- $d_{50}$  : Diámetro de separación [ $\mu m$ ]

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue adelantada en el laboratorio de experimentación en beneficio del café del Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE), localizado en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas. Para las pruebas se empleó café, variedad Colombia



despulpado con mucílago fermentado y clasificado previamente por tamaño en zaranda cilíndrica. El hidrociclón se diseñó de acuerdo a las recomendaciones encontradas en la literatura para separación por densidad de partículas gruesas y de acuerdo a resultados previos obtenidos con un prototipo preliminar (Aristizábal, 1995) como se explica más adelante. Las especificaciones (en cm) del equipo

construido en lámina de acrílico transparente calibre 5 mm (Figura 3) son:

- D: 35,0
- $D_i$ : 5,17
- $D_o$ : 6,30
- $D_u$ : 3,82
- $h_{iv}$ : 12,0
- $H_{ci}$ : 21,0
- $H_{co}$ : 21,0
- $\theta$ : 74,6°



**Figura 3.** Hidrociclón construido en acrílico

El dispositivo experimental (Figura 4) contó con los siguientes elementos:

- tanque de recirculación del agua,
- motobombas sumergibles de 0,37 kW y 0,56 kW de potencia,
- sistema de conducción formado por tubería y accesorios de PVC

de 7,62; 6,35; 5,08 y 3,81 cm de diámetro,

- sistema regulador de alimentación de café conformado por una tolva, un tornillo sinfín, un motor eléctrico trifásico de 1,34 kW de potencia y un control para motor AC, 1,34 kW de potencia, 220 voltios.

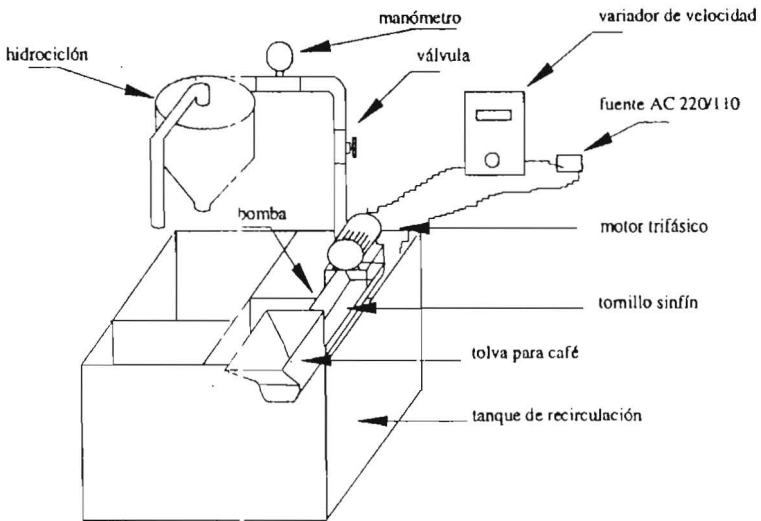


Figura 4. Montaje experimental

Los elementos de medición utilizados fueron:

- balanzas electrónicas Mettler PE 360, con rango 0..360 g, sensibilidad de 0,001 g y Mettler PC 24, rango 0.24 kg , sensibilidad 1 g,
- cronómetro digital Cassio de sensibilidad 0,01s,
- calibrador pie de rey Digi-Kanon, rango 0..150mm, sensibilidad 0,01mm,
- recipientes plásticos de 10, 20, 60 y 100 litros de capacidad,
- cilindro graduado de 2000 ml,
- termómetro de mercurio, rango 0..100°C.
- manómetro, rango de presión (0 - 103,37 kPa).

**Determinación de propiedades físicas.** En este estudio se requirió conocer dos propiedades físicas del café: la densidad real y el diámetro característico. Para ello se realizaron más de 800 mediciones de las dimensiones ortogonales y la densidad real de granos sanos, granos brocados y pasillas, tomados completamente al azar.

Los valores promedios de densidad y diámetro característico para los diferentes granos fueron comparados con el estadístico t al 1% y con ellos se establecieron las relaciones de isodromía, ecuación 18 y las relaciones de separación, ecuación 19 entre los granos sanos (material "pesado") y los granos brocados y pasillas (material "liviano").

**Diseño del equipo.** Utilizando los datos caudal de suspensión y presión obtenidos en un prototipo preliminar y empleando las ecuaciones citadas en la literatura para separación por medios densos en hidrociclones con los parámetros determinados para café, se realizó el diseño del equipo.

**Determinación de las relaciones entre las variables geométricas y las variables de operación para el escalamiento de hidrociclones.**

Con el proposito de encontrar relaciones fundamentales entre las principales variables geométricas y de operación, necesarias para escalar hidrociclones que clasifiquen café pergamino, se hizo un análisis dimensional del fenómeno de clasificación. El análisis dimensional permitió plantear los grupos adimensionales más importantes que intervienen en el fenómeno y para encontrar las correlaciones entre estos grupos se

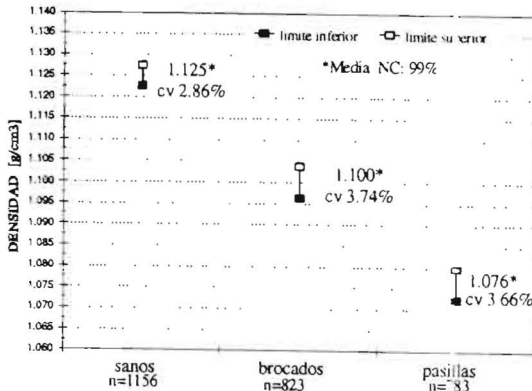
hicieron pruebas con el hidrociclón variando el diámetro del ápice, el flujo de café alimentado y el caudal de bombeo.

Establecidos los números adimensionales obtenidos del análisis teórico, se procedió a realizar 60 pruebas con el equipo con tres repeticiones. Este se operó combinando tres diámetros del ápice (3,83; 2,93; 1,81 cm), cinco flujos de café en la alimentación (20, 30, 40, 50, 60 kg/min) y cuatro caudales de agua (112, 149, 235, 279 l/min) utilizando 50 kg de café pergamino

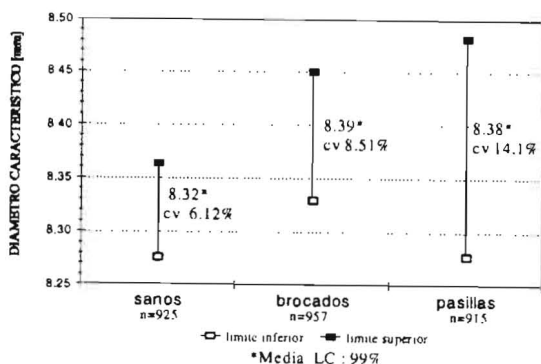
humedo. En cada prueba se midió la caída de presión y se determinó el caudal de suspensión, el flujo de café procesado, la concentración por volumen y el consumo específico de agua.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Determinación de propiedades físicas.** Los granos sanos, brocados, las pasillas difieren al 1% en su densidad promedio (ver Figura 5). En la variable diámetro característico no se observó diferencias al 1% (Figura 6).



**Figura 5.** Comparación de la densidad real del café sano, brocado y pasillos.



**Figura 6.** Comparación del diámetro característico del café sano, brocado y pasillas.

Con los resultados de densidad y diámetro característico promedios se calcularon las relaciones de separación (RS) y de isodromía (RI) mostradas en la Tabla 1:

ción (RS) y de isodromía (RI) mostradas en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Relaciones de Isodromía y separación.

Material		Dmax (mm)	Dmin (mm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	RS	RI
pesado	CS	---	8,28	1,125		
liviano	CB	8,45	---	1,100	1,020	1,236
	P	8,48	---	1,076	1,024	1,598

CS: café sano, CB: café brocado, P: pasillas  
 Dmax: Diámetro máximo, Dmin: Diámetro mínimo.

Para los dos materiales "livianos" (café brocado y pasillas) comparados con el material "pesado" (café sano), con las densidades promedio, se cumple la condición expresada por la ecuación 20:  $RS < RI$ , lo cual indica que en un hidrociclón es posible teóricamente clasificar por densidad una mezcla compuesta por estos materiales.

**Diseño del equipo.** En un primer prototipo fueron medidos los caudales de suspensión agua-café para diferentes valores de caída de

presión (columnas 1 y 2 de la Tabla 2). Utilizando la ecuación 8 fue calculado el diámetro de entrada  $D_i$ , con la ecuación 1 se determinó para este diámetro su sección rectangular (bxh) equivalente (columnas 3, 4 y 5). Entre los valores de  $D_{min}$  y  $D_{max}$ , calculados con la ecuación 2 se eligió un valor con criterio de mayor capacidad, los valores calculados corresponden a la columna 6. Aplicando las ecuaciones 3 y 4 se calcularon los diámetros del localizador del vórtice  $D_o$  y del ápice  $D_u$  respectivamente,

**Tabla 2.** Dimensiones alternativas para hidrociclón.

$Q_s$ [l/min]	$\Delta P$ [kPa]	$b \cdot h$ [cm <sup>2</sup> ]	b [cm]	h [cm]	D [m]	$D_o$ [cm]	$D_u$ [cm]	$D_u/D_o$	hlv [cm]	Hci [cm]	Hco [cm]	Angulo [°]
266,2	20,7	20,2	3,0	6,7	0,30	5,458	3,020	0,55	10	20,2	20,2	67,5
273,3	25,5	18,7	3,5	5,3	0,30	5,458	3,020	0,55	10	16,0	20,0	68,0
270,0	13,8	25,1	3,0	8,4	0,34	6,607	3,815	0,58	8	25,1	36,0	45,5
355,7	24,1	25,0	3,5	7,1	0,35	6,607	3,815	0,58	12	21,4	22,0	70,7
327,5	22,7	23,7	3,0	7,9	0,35	6,607	3,505	0,53	12	23,7	38,0	45,0
266,2	20,7	20,2	3,0	7,0	0,35	6,302	3,825	0,61	12	21,0	21,0	73,2
359,2	24,1	25,3	3,0	8,4	0,35	6,607	3,815	0,58	12	25,3	37,0	45,7
266,3	20,7	20,2	3,5	5,8	0,35	6,607	3,815	0,58	12	17,3	20,0	75,9
266,2	20,7	20,2	3,0	7,0	0,35	6,302	3,020	0,48	12	21,0	21,0	74,6
266,2	20,7	20,2	3,0	6,7	0,36	6,607	4,369	0,66	13	20,2	20,2	76,1
266,2	20,7	20,2	4,0	5,1	0,36	6,607	3,815	0,58	12	15,2	20,0	77,6
380,7	22,0	28,0	3,0	9,3	0,40	6,607	4,369	0,48	14	28,0	43,0	45,0
410,4	21,4	30,7	3,5	8,8	0,40	6,607	4,369	0,48	12	26,3	27,0	66,8
407,0	22,4	29,7	3,5	8,5	0,40	8,042	3,815	0,47	14	25,5	44,0	44,7
355,7	24,1	25,0	3,5	7,1	0,40	6,607	4,369	0,48	14	21,4	22,0	78,0

columnas 7 y 8. En la columna 9 se muestran los valores obtenidos para la relación  $D_u/D_o$ , ecuación (5).

La altura del localizador del vórtice  $h_{iv}$  (columna 10) fue calculada mediante la ecuación 6. La altura de la sección cilíndrica ( $H_{ci}$ ), columna 11, se eligió como el triple de  $h_{iv}$ . La altura de la sección cónica ( $H_{co}$ ), columna 12, se escogió entre el valor mínimo igual  $H_{ci}$  y el valor máximo que corresponde a un ángulo de cono ( $\theta$ ) de 45 grados. El

ángulo de cono, columna 13, elegido fue mayor de 45 grados (según Bustamante, 1989) para separación de sólidos de acuerdo a la gravedad específica y calculado en función de  $(D-D_u)/2$  y de  $H_{co}$ .

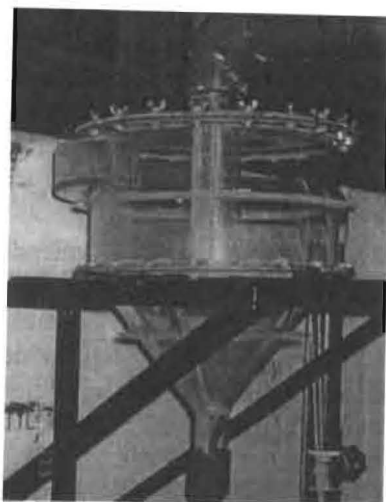
Teniendo en cuenta que se cumple con las restricciones y criterios técnicos recomendados por los diferentes autores consultados se seleccionaron las dimensiones (en cm):

D	b	h	$D_u$	$D_o$	$h_{iv}$	$H_{ci}$	$H_{co}$	$\theta$	$H_t$
35	3	7	3,825	6,302	12	21	21	74,6°	42

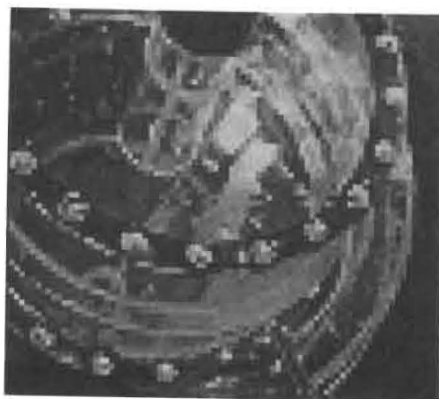
El hidrociclón diseñado y construido en acrílico con las dimensiones elegidas se muestra en la Figura 7. La forma de la alimentación se diseñó del tipo envolvente (sentido contrario a las manecillas del reloj), con ángulo de desarrollo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Se utilizó una transición de sección rectangular a sección circular al inicio de la entrada en envolvente (Figura 8).

Una de las variables de operación más importantes es la concentración de la suspensión ( $\phi_v$ ). Se realizaron tres pruebas de laboratorio con el propósito de establecer la máxima concentración en volumen que

alcanzan los granos de café pergamino en agua. El procedimiento fue el siguiente: a una masa de café pergamino lavado (sin agua superficial) se le agregó agua hasta alcanzar la saturación de está con las partículas de café. Se determinó el volumen de agua ocupado en la masa de café. La densidad promedia del café se tomó de mediciones previas como  $1.140 \text{ g/cm}^3$ . Con la masa y la densidad del café se determinó su volumen. A partir del volumen de café y el volumen de la mezcla agua más café, utilizando la ecuación 10 se calculó la máxima concentración por volumen de 62%.



**Figura 7.** Vista frontal del hidrociclón



**Figura 8.** Detalle de la alimentación al hidrociclón.



En la Tabla 3 se muestran los cálculos teóricos de la densidad de la suspensión y su respectiva relación agua-café para concentraciones en volumen  $\phi_v$  entre 47% (relación agua-café 1:1) y 62% (máxima concentración obtenida). En la misma Tabla 3 se muestran los cálculos del caudal de suspensión  $Q_s$  requerido y los diámetros de corte

$d_{50}$  que se podrían obtener para dichas concentraciones en función de las variables geométricas  $D$ ,  $D_i$ ,  $D_o$ ,  $D_u$ ,  $H_t$  elegidas y de las variables de operación caudal y concentración de suspensión, caída de presión  $\Delta P$ , densidad promedia del café ( $1.140 \text{ g/cm}^3$ ) y densidad de la suspensión, ecuación 9), obtenidos aplicando la ecuación 21.

**Tabla 3.** Cálculos teóricos para el diseño del hidrociclón.

$\phi_v$ [%]	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]]	$Q_s$ [m <sup>3</sup> /h]	$\Delta P$ [kPa]	$d_{50}$ [mm]
62	1,086	15,97	20,7	10,4
60	1,083	16,40	25,5	8,8
58	1,081	16,20	13,8	7,7
57	1,079	21,34	24,1	6,3
55	1,076	19,65	22,7	5,6
54	1,075	15,97	20,7	5,7
53	1,074	21,55	24,1	4,7
52	1,072	15,98	20,7	4,9
51	1,071	15,97	20,7	4,6
50	1,069	22,84	22,0	3,6
47	1,065	24,62	21,4	2,8

A partir de la información ofrecida por los fabricantes se seleccionaron las motobombas BARNES SC-53 de 0.37 kW (½ HP) y BARNES SC-75 de 0.56 kW (0.75 HP) de potencia, con el fin de utilizar los caudales escogidos a las presiones estimadas.

**Determinación de las relaciones entre las variables geométricas y las variables de operación para el escalamiento de hidrociclones.** El teorema de Buckingham plantea que el número de grupos adimensionales independientes que pueden emplearse para describir un

fenómeno físico desconocido que incluye «n» variables en las que intervienen «m» magnitudes es igual a «n-m» (Streeter y Wyle, 1987).

En el caso particular del fenómeno de clasificación de café en un hidrociclón, suponiendo flujo uniforme y permanente, es posible seleccionar las siguientes variables independientes significativas:

- $V_s$ : velocidad de la suspensión en la descarga inferior [ $LT^{-1}$ ].
- $\mu_s$ : viscosidad de la suspensión en la descarga inferior [ $LM^{-1}T^{-1}$ ].
- $\rho_s$ : densidad de la suspensión evacuada por el ápice [ $ML^{-3}$ ].
- $\Phi_v$ : concentración de la suspensión evacuada por el ápice [ $L^3L^{-3}$ ].
- D: diámetro del hidrociclón [L].
- $D_u$ : diámetro del ápice [L].
- $D_o$ : diámetro del localizador del vórtice [L].
- $h_{lv}$ : altura del localizador del vórtice [L].
- $d_*$ : diámetro característico del grano de café [L].

Dado que en estas nueve variables intervienen tres magnitudes fundamentales, se pueden obtener  $9 - 3 = 6$  grupos adimensionales. En base al método de Buckingham estos parámetros tienen la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= V_s * \mu_s^{A1} * \rho_s^{B1} * D_u^{C1} \\ \Pi_2 &= D * \mu_s^{A2} * \rho_s^{B2} * D_u^{C2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_3 &= D_o * \mu_s^{A3} * \rho_s^{B3} * D_u^{C3} \\ \Pi_4 &= h_{lv} * \mu_s^{A4} * \rho_s^{B4} * D_u^{C4} \\ \Pi_5 &= d_* * \mu_s^{A5} * \rho_s^{B5} * D_u^{C5} \\ \Pi_6 &= \Phi_v * \mu_s^{A6} * \rho_s^{B6} * D_u^{C6} \end{aligned}$$

Resolviendo las ecuaciones simultaneas en  $A1, B1, C1$ , etc. se obtienen los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= (V_s * \rho_s * Rh) / \mu_s \\ \Pi_2 &= D / D_u \Pi_5 = D_u / d_* \\ \Pi_3 &= D_o / D_o \Pi_6 = \Phi_v \\ \Pi_4 &= h_{lv} / D_u \end{aligned}$$

De acuerdo al análisis dimensional debe existir una relación tal que :

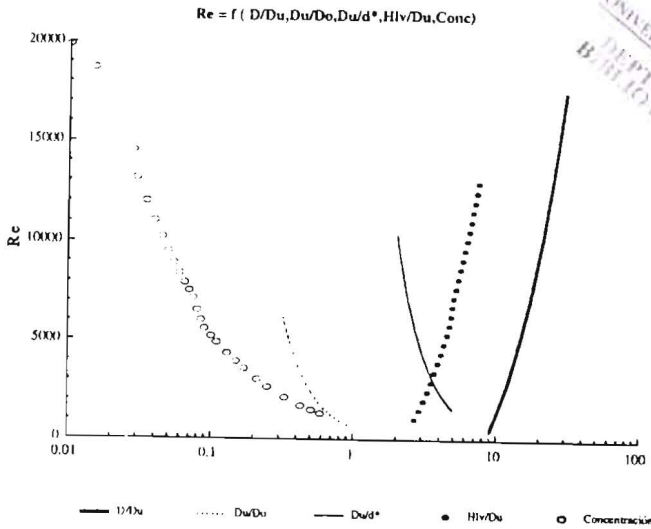
$$\Pi_1 = f*(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6)$$

El primer parámetro,  $\Pi_1$  es el número de Reynolds ( $R_e$ ) del flujo de suspensión en la descarga inferior del hidrociclón, en el que  $D_u$  ha sido reemplazado por el radio hidráulico (Rh). Por tanto se tiene:

$$(V_s * \rho_s * Rh) / \mu_s = f*(D/D_u, D_u/D_o, h_{lv}/D_u, D_u/d_*, \Phi_v)$$

La Figura 9 ilustra la relación entre las variables geométricas y las variables de operación, mediante los principales grupos adimensionales encontrados. El número de Reynolds ( $R_e$ ) está correlacionado con los demás grupos adimensionales mediante los modelos matemáticos mostrados en la Tabla 4.

Para cualquier geometría  $D/D_u$  el aumento de la concentración de la suspensión disminuyó el  $R_e$  debido al incremento de la viscosidad.



**Figura 9.** Relación entre las variables geométricas y las variables de operación.

**Tabla 4.** Modelos matemáticos obtenidos para Reynolds.

Función	Rango	R <sup>2</sup>	E.E.-
$R_e = -6096.92 + 814.56(D/D_u)$	$8 < D/D_u < 30$	0,9203	1 786,42
$R_e = 616.73(D_u/D_o)^{-2.02625}$	$0.3 < D_u/D_o < 1$	0,8469	0,4718
$R_e = 43540.64(D_u/d_*)^{-2.06937}$	$2 < D_u/d_* < 6$	0,8500	0,46687
$R_e = -6095.99 + 2376.15(h_{lv}/D_u)$	$3 < h_{lv}/D_u < 8$	0,9204	1 784,74
$R_e = 887.97(\Phi_v)^{-0.869187}$	$0.03 < \Phi_v < 0.60$	0,6487	0,5647

- Error estándar

Cuando la relación  $D_u/D_0$  tiende a valores pequeños, es decir  $D_u \ll D_0$ , el flujo de suspensión por el ápice tiende a cero, el equipo se obstruye y el café es evacuado por el localizador sin ser clasificado. Cuando la relación  $D_u/D_0$  se acerca a la unidad el flujo de suspensión por el localizador es mínimo o nulo (cuando se disminuye el caudal bombeado), condición en la que el equipo separa impurezas grandes, pulpa, y granos vanos. Los granos brocados no alcanzan a separarse debido a que las fuerzas de empuje y arrastre no superan la mayor fuerza centrífuga que actúa sobre ellos, haciendo que se evacuen por el ápice junto con los granos sanos. La relación obtenida entre  $Re$  y  $D_u/d^*$ , manifiesta que el régimen de flujo en el hidrociclón tiende a turbulento cuando el tamaño de las partículas disminuye. En el caso de café con mucho contenido de pasillas e impurezas, el equipo limpia mejor debido a que el diámetro característico en promedio disminuye, aumentando la velocidad de sedimentación y la fuerza de arrastre de estas partículas siendo evacuadas por el localizador.

La Figura 9 permite el escalamiento de un hidrociclón con similitud geométrica al hidrociclón utilizado en esta investigación; si se estima la densidad y viscosidad de

la suspensión agua-café en función de la concentración (Ecuaciones 9 y 11), la velocidad media de entrada en función del caudal y el diámetro de entrada. Las demás dimensiones se calculan siguiendo el procedimiento de diseño descrito anteriormente.

En la Figura 10 se gráfica la correlación obtenida para el hidrociclón, que relaciona el caudal de suspensión con la caída de presión entre 0 y 30 kPa, con un coeficiente de determinación de 0,91 y un error estándar de 0,100342. La expresión obtenida similar a la planteada por Bustamante, ecuación 7, permite predecir el caudal de suspensión, con buena aproximación, que puede manejar un hidrociclón como el probado, cuando la caída de presión a la entrada de éste varía entre 5 y 25 kPa.

La expresión obtenida experimentalmente que relaciona las variables consumo específico de agua y concentración por volumen, con un coeficiente de determinación de 0,99 y error estándar de 0,0332, se muestra en la Figura 11.

En ella se observa que un hidrociclón que opere con una concentración de café entre 10 y 30% por volumen tendría un

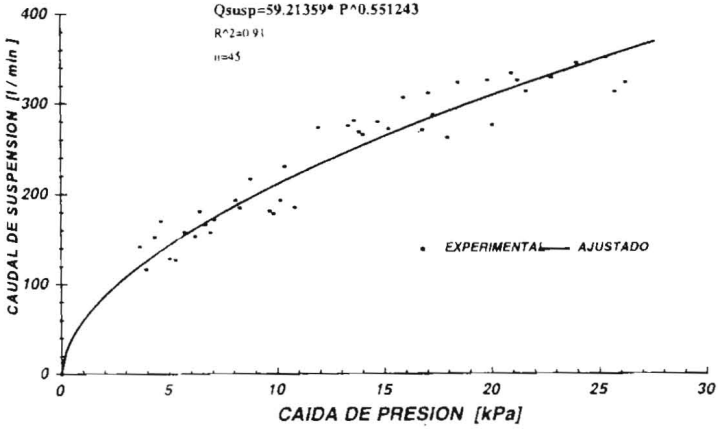


Figura 10. Correlación entre el caudal de suspensión y la caída de presión.

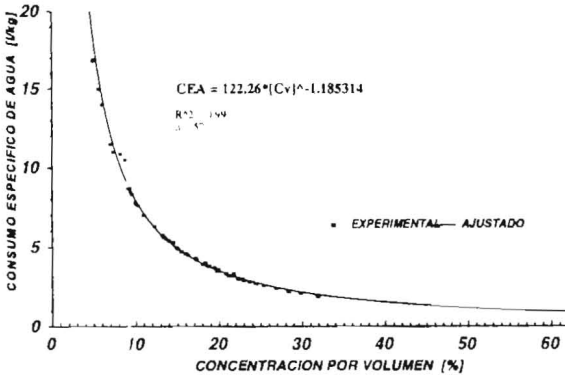


Figura 11. Correlación entre el consumo de agua y la concentración

consumo de agua entre 8 y 2,2 l/kg. Este consumo de agua es instantáneo (sin recirculación), pues el consumo de agua real se obtiene determinando el volumen mínimo de agua recirculada que se puede utilizar para clasificar determinada cantidad de café.

En la Figura 12 se ilustran las relaciones lineales encontradas entre

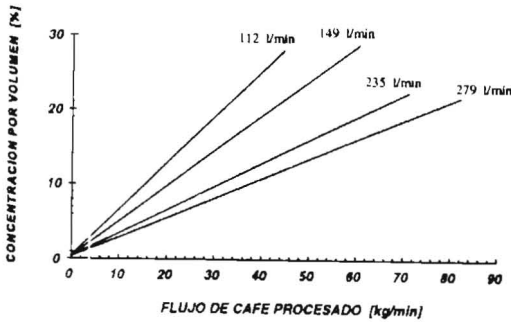
la concentración ( $\Phi_v$ ) y el flujo de café (FC) para los cuatro caudales promedios de agua probados. ( $\Phi_v = A + B \cdot (FC)$ ). las constantes A, B obtenidas por regresión lineal para cada caudal de agua utilizado se muestran en la Tabla 5). Las relaciones encontradas son válidas para flujos de café fermentado entre 10 y 80 kg/min alimentados al tanque de bombeo.

**Tabla 5.** Coeficientes A y B para la relación concentración y flujo de café obtenidos para diferentes caudales de agua.

$Q_{\text{agua}}$	A	B	$R^2$	Error estándar	obs
112	0,5109	0,6180	0,9558	1,7220	15
149	0,4209	0,4699	0,9582	0,2397	15
235	0,4202	0,3103	0,9979	0,6515	15
279	0,3309	0,2617	0,9896	0,5762	15

La Figura 12 predice en que proporción deben ser incrementados el flujo de café y el caudal de agua utilizados por un hidrociclón, para mantener determinada concentración

( $\Phi_v$ ), ó determinado consumo de agua, (ver Figura 11) cuando se requiere aumentar la capacidad del equipo sin alterar su desempeño.



**Figura 12.** Relación entre el flujo de café procesado y la concentración para cuatro caudales diferentes.

## CONCLUSIONES

Los granos de café sanos, brocados y pasillas presentan diferencias significativas en densidad, pero no en diámetro característico, que permiten su separación en un hidrociclón.

La eficiencia de clasificación de café en un hidrociclón depende de las condiciones de operación del equipo y de la distribución de densidades que presenta cada

material dentro de la masa total.

En un hidrociclón el caudal de la suspensión agua-café aumenta con la caída de presión en forma potencial y el consumo de agua (l/kg) disminuye potencialmente con el aumento de la concentración en volumen.

La concentración en volumen de una suspensión agua-café ( $\Phi_v$ ) en un hidrociclón es directamente proporcional al flujo de café (FC)

que se alimenta al tanque de bombeo e inversamente proporcional al caudal de agua bombeado. En un hidrociclón con las características de diseño y operación evaluadas en este trabajo es posible obtener consumos de agua (sin recirculación de agua) menores a 10 litros por kilogramo de café pergamino seco procesado.

El número de Reynolds es el principal grupo adimensional encontrado que influye en el fenómeno de clasificación de café en un hidrociclón.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARISTIZABAL T., I.D. Diseño, construcción y evaluación de un hidrociclón para lavar y clasificar café fermentado. Medellín, 1995. 195 p. : il. Tesis (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- BUSTAMANTE, M.O. Efecto de la geometría de un hidrociclón sobre las condiciones normales de operación. Medellín, 1989. 139 p. : il. Tesis (Magíster Ciencias de la Ingeniería). Universidad de Concepción.
- \_\_\_\_\_ Concentración de minerales, módulo 6. En: Programa modular procesamiento de minerales auro-argentíferos. Universidad Nacional, Cimex-Mineralco-Sena. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1992. p.84.
- DUQUE R., J.M. y MARTINEZ H., A.E. Análisis y evaluación de alternativas de hidrociclones a nivel de laboratorio. Medellín, 1988. 85 p.:il. Tesis (Ingeniero de Minas y Metalurgia). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DEL CAFE. CENICAFE. Fundamentos del beneficio del café. Chinchiná: Cenicafé, 1991. 236 p.:il.
- GAVIRIA C., A.C. ; GARCIA C., J.O. y SANCHEZ Z., L.E. Fundamentos y generalidades, módulo 1. En: Programa Modular Procesamiento de Minerales auro-argentíferos. Universidad Nacional, Facultad de Minas, CIMEX, Minerales de Colombia S.A., Mineralco, SENA. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1992. p.190.
- LODOÑO R., G.E. y PEREZ G., J.E. Hidrociclones: alternativa en la separación sólido-líquido. Medellín, 1988. 253 p.:il. Tesis (Ingeniero Químico). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería.
- MARQUEZ G., S.M. Evaluación y optimización de la operación de un tanque sifón para el clasificado del café cereza. Chinchiná: CENICAFE, 1987. 30 p.



- METZNER, A.B. Rheology of suspensions in Polymeric Liquids. *En: Journal of Rheology*. Vol. 29, No. 6 (1985); p. 739-775.
- SALAZAR, C. Clasificación hidráulica de café mediante un hidrociclón. Medellín, 1993. Anteproyecto de Tesis Magíster (Posgrado en Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- SANCHEZ Z, Luis Emilio. Operaciones unitarias en preparación de minerales. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas, 1988.
- SANCHEZ Z, L.E. y BUSTAMANTE, M.O. Clasificación, módulo 3. *En: Programa Modular Procesamiento de Minerales auro-argentíferos*. Universidad Nacional-Cimex-Mineralco-Sena. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1992. 123 p.:il.
- SARQUIS V., J. Modelo de sedimentación discontinua de partículas en flujo laminar. *En: Apuntes de Ingeniería*. No. 4 (1981); p. 69-87.
- VILLABONA G., S. Estudio de la clasificación del café brocado en el canal de correteo. Informe Científico. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1994. 36 p.
- WILLS B., A. Tecnología de procesamiento de minerales: tratamiento de menas y recuperación de minerales. México: s.n., 1987. 517 p. :il.