

# Comparación de dispositivos de flujo centrífugo en el enriquecimiento de concentrado de metales pesados

Recibido: julio de 2011  
Arbitrado: octubre de 2011

Hernán Javier Gómez Zambrano\*

## Resumen

En este artículo se presenta los resultados de la investigación experimental en laboratorio para determinar la eficiencia de dispositivos de flujo centrífugo en la concentración de metales pesados. Los dispositivos estudiados fueron el separador de tubo curvo, la espiral concentradora y el hidrociclón. Se realizó un diseño experimental factorial aleatorizado para determinar el número de ensayos a realizar y su orden de ejecución. En laboratorio se construyó un montaje físico el cual permitió recircular la mezcla compuesta de agua, metal pulverizado y sedimentos, a través de los dispositivos. Con los datos experimentales se obtuvo correlaciones matemáticas aplicando regresión lineal múltiple, las cuales permitieron comparar las variables de respuesta entre los dispositivos separadores estudiados.

## Palabras clave

Tubo curvo, espiral concentradora, hidrociclón, concentración.

## Summary

This article presents the results of experimental research in laboratory to deter-

mine the efficiency of devices of centrifugal flow in the concentration of heavy metals. The devices studied were the curved pipe, spiral concentrator and the hydrocyclone separator. A randomized factorial experimental design was conducted to determine the number of tests carried out and their order of execution. Laboratory built a physical assembly which allowed recirculation of the mixture composed of water, sediments and powdered heavy metals, through the devices. With the experimental data obtained mathematical correlations using multiple linear regression, which allowed compare the variables of response between the separators devices studied.

## Keywords

Curved pipe, concentrator spiral, hydrocyclone, concentration.

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo reporta los resultados de la investigación llevada a cabo para determinar la eficiencia de los dispositivos de flujo centrífugo para concentrar metales pesados y su posterior comparación entre sí. Los metales pesados son caracterizados por tener un número atómico mayor a 20 y una gravedad específica mayor a 5. Los dispositivos separadores estudiados fueron el separador de tubo curvo, la espiral concentradora y el hidrociclón, de cada uno de

\* Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Magíster en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. Docente de Tiempo Completo, de los cursos de Hidráulica, Mecánica de Fluidos, Plantas de Tratamiento de Agua Potable; Hidrología e Hidrosanitaria. Universidad de Nariño. hgomez@udenar.edu.co. yaco\_ing@yahoo.com.mx

ellos se construyó pequeños prototipos para las mediciones. Para preparar la mezcla se utilizó agua, plomo pulverizado y sedimentos naturales, donde el tamaño de las partículas de metal tenía el mismo tamaño de los sedimentos.

Las canaletas en espiral han sido estudiadas empleando métodos matemáticos como la simulación numérica y el balance de fuerzas internas del flujo sobre una partícula sólida y por otro lado observación empírica. Dentro de los métodos matemáticos es de destacar los trabajos de Mishra [1], Stokes [2], Shen [3] y Matthews [4]. El método del balance de fuerzas es reportado por Kapur [5], Kapur [6], Siamee [7] y Das [8]. Las observaciones empíricas sobre espirales son reportadas por Holland-Batt [9], Holland-Batt [10], Holland-Batt [11] y Holland-Batt [12].

El hidrociclón estudiado en la presente investigación consiste en un hidrociclón de fondo plano, donde su cuerpo principal es un cilindro. El flujo a través de un hidrociclón de fondo plano ha sido estudiado por Trawinski, [13], [14] y [15], quien profundiza su estudio más enfocado a la clasificación de sólidos inmersos en agua que a la separación de metales contenidos en matrices de sedimentos. Los hidrociclones de fondo plano, mejor llamados por su inventor Trawinski, ciclones CBC (Circulating Bed Cyclone), [16], fueron propuestos con el fin de ampliar el campo de trabajo de los hidrociclones hacia tamaños de corte mayores, por encima de las 150 micras. Etayo [17] propone unos parámetros adimensionales para estudiar los hidrociclones con aplicación a la remoción de cenizas en mezclas de carbón y agua, algunos de ellos son utilizados en la presente investigación.

El separador de tubo curvo estudiado en la presente investigación consiste en un tubo de sección transversal cuadrada, el cual se curva en un ángulo de  $270^\circ$ . A pesar de que el flujo a través de un tubo curvo ha sido estudiado por algunos investigadores como, Ookawara [18], Gao [19], Gauthier [20] y Yamamoto [21], su uso como separador de metales pesados aún es desconocido.

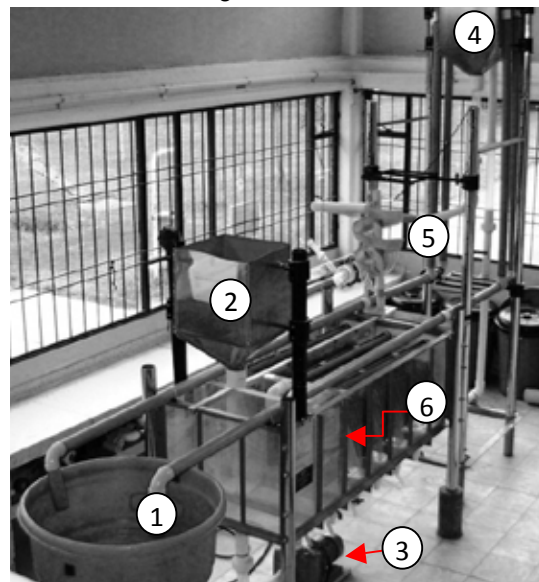
A pesar de que los separadores de flujo centrífugo han sido usados para concentrar metales pesados contenidos en una matriz de sedimentos, un análisis comparativo entre ellos bajo las mismas condiciones de flujo, sólidos y metal pesado no se conoce, razón que llevó a realizar la presente investigación.

## I. MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.1 Montaje físico de laboratorio

Se realizó un montaje de laboratorio de tipo recirculatorio, como se indica en la fotografía de la figura 1.

Las partes que componen el montaje son: 1) un tanque de succión para suministro de agua limpia; 2) una tolva para suministro del caudal sólido, en esta tolva se colocó la mezcla de arena y partículas de metal, la cual se suministró al sistema por medio de un orificio circular calibrado; 3) una bomba centrífuga de rotor semiabierto inatascable, para bombear aguas negras; 4) un tanque de cabeza constante, el cual suministra la mezcla hacia el dispositivo; 5) sección de colocación del dispositivo a ensayar; 6) un sedimentador de alta tasa con dos tanques independientes paralelos, para recibir la mezcla de agua y sólidos, el cual atrapa los sólidos y deja pasar el agua limpia hacia el tanque de succión, el caudal de agua se mide por separado al final de cada sedimentador por medio de vertederos triangulares.



**Figura 1. Geometría general del montaje de laboratorio.**

## 1.2 Diseño experimental

Teniendo en cuenta el número de factores independientes, se realizó un diseño factorial diferente para cada uno de los dispositivos. Para la espiral y el tubo curvo se realizó un diseño factorial fraccionado  $3 \times 2^{k-1}$  con cuatro puntos al centro, para el hidrociclón se hizo un diseño factorial  $2^k$  completo con cuatro puntos al centro, Gutiérrez [22]. Obteniéndose para el hidrociclón,  $(2^4 + 4) = 20$  tratamientos; para el tubo curvo,  $(3 \times 2^{3-1}) + 4 = 16$  tratamientos y para la canaleta en espiral,  $(3 \times 2^{3-1} + 4) = 16$  tratamientos. Para un total de 52 tratamientos para toda la investigación.

## 1.3 Procedimiento experimental

Para cada uno de los tratamientos se siguió el siguiente procedimiento experimental.

- Se preparó la mezcla de arena y metal garantizando las proporciones cercanas al 5% de metal en peso y se colocó en la tolva de suministro de sólidos.
- Se arrancó la bomba para el suministro de agua limpia hasta garantizar que el flujo alcance la condición de equilibrio en el tiempo, esto se controló con los vertederos al final de desarenador.
- Se suministró el caudal sólido por medio del orificio calibrado, (en dicho instante inicia el ensayo).
- Se grabó los dispositivos de medición por medio de cámara de video, en su orden, la temperatura con termómetro digital y las alturas sobre el vertedero de salida de agua limpia. Estos valores se grabaron durante la ejecución del ensayo y su valor numérico se tomó del video.

- Se recuperó el material sólido del sedimentador por separado, correspondiente a la descarga y el rebose. Se secó al horno por 24 horas a una temperatura de 120 °C y se pesó. Se realizó la granulometría a las dos muestras y se determinó la concentración de metal tanto a la muestra del rebose como de la descarga, usando el principio de Arquímedes y un método químico de absorción atómica realizado por el laboratorio especializado de la Universidad de Nariño.

## 1.4 Variable de respuesta

Teniendo en cuenta la similitud que tienen los tres dispositivos de separación, los cuales están compuestos por una entrada, la cual se denomina alimentación; una salida para la recuperación de metal pesado o concentrado la cual se denomina descarga y una salida principal para la salida del material desechado o "colas", la cual se denomina rebose. Las variables de respuesta son similares para los dispositivos y corresponden a la remoción de metal pesado por la descarga ( $R_M$ ), la remoción de sedimento por la descarga ( $R_s$ ) y la concentración de metal por la descarga del separador  $C_{MD}$ , las cuales se describen a continuación:

- Remoción de sedimento por la descarga,  $R_s$

Definida como la relación de pesos del sedimento entre la descarga  $W_{sD}$  y el peso total de sedimentos en la alimentación  $W_{sA}$ , dada en Ec. (1).

$$R_s = \frac{W_{sD}}{W_{sA}} = \frac{\gamma_s V_{sD}}{\gamma_s V_{sA}} = \frac{(V_{sD})/t}{(V_{sA})/t} = \frac{(Q_{sDV})}{(Q_{sAV})} \quad (1)$$

Donde,  $t$  es el tiempo de duración del ensayo,  $V_{sD}$  es el volumen de sólidos en la descarga,  $V_{sA}$  es el volumen de sólidos en la alimentación,  $Q_{sDV}$  es el caudal volumétrico de sólidos en la descarga,  $Q_{sAV}$  es el caudal volumétrico de sólidos en la alimentación.

- Remoción de metal pesado por la descarga,  $R_M$

Definida como la relación de pesos de metal entre la descarga  $W_{MD}$  y el peso de metal en la alimentación  $W_{MA}$ , expresada en Ec. (2).

$$R_M = \frac{W_{MD}}{W_{MA}} = \frac{(\gamma_M V_{MD})/t}{(\gamma_M V_{MA})/t} = \frac{Q_{MDV}}{Q_{MAV}} \quad (2)$$

Donde,  $V_{MD}$  es el volumen de metal pesado en la descarga,  $V_{MA}$  es el volumen de metal pesado en la alimentación,  $Q_{MDV}$  es el caudal volumétrico de metal pesado en la descarga,  $Q_{MAV}$  es el caudal volumétrico de metal pesado en la alimentación.

- Concentración de metal en la descarga,  $C_{MD}$

Esta variable de respuesta está definida como la relación del peso de metal recuperado por el separador en la descarga  $W_{MD}$  y el peso total de metal más sedimento recuperado en la descarga  $W_{sMD}$ , dada en Ec. (3).

$$C_{MD} = \frac{W_{MD}}{W_{sMD}} \quad (3)$$

Introduciendo  $R_M$  y  $R_s$  en Ec. (3) se logra una expresión para  $C_{MD}$ , dada en Ec. (4).

$$C_{MD} = \frac{R_M C_{MA}}{R_s (1 - C_{MA}) + R_M C_{MA}} \quad (4)$$

Donde,  $C_{MA}$  es la concentración de metal en la alimentación, valor que debe ser conocido y relaciona el peso de metal en la alimentación  $W_{MA}$  y el peso total de sedimento y metal en la alimentación,  $W_{sMA}$ ;  $C_{MA} = W_{MA}/W_{sMA}$ .

### 1.5 Factores independientes

Teniendo en cuenta que son muchas las variables que influyen en el fenómeno de la separación hidráulica de partículas en flujo centrífugo, se recurre al método del análisis dimensional usando el teorema de PI o de Buckingham, el cual permite agrupar las variables dimensionales en parámetros adimensionales, reduciendo el número de factores a estudiar. En este sentido se conformó los parámetros adimensionales y se seleccionó aquellos que sean independientes entre sí, esto con el fin de aplicar estrictamente el método del diseño de experimentos.

### 1.6 Factores independientes para la canaleta en espiral

El perfil de la sección transversal de la canaleta en espiral usado en la presente investigación es el tipo FGL, (Fine Grade Low), reportado por Hollant-Batt [10]. Para la canaleta en espiral se seleccionaron los siguientes parámetros adimensionales:

- Número de Dean del flujo de mezcla,  $De_m$ .

- Relación de radios,  $R_R$ .

- Diámetro adimensional de partícula,  $d^*$ , según Cheng [23].

El número de Dean se expresa en Ec. (5).

$$De_m = \left( \frac{4Q_m}{v_m} \right) \left( \frac{A^{0.5}}{P^{3/2}} \right) \sqrt{\frac{2}{R_c}} \quad (5)$$

Donde,  $Q_m$  es el caudal volumétrico de la mezcla, dado como  $Q_m = Q_{sA} + Q_{MA} + Q_{LA}$ ;  $Q_{sA}$  es el caudal volumétrico de sedimentos en la alimentación,  $Q_{MA}$  es el caudal volumétrico de metal pesado en la alimentación y  $Q_{LA}$  es el caudal volumétrico de agua en la alimentación;  $R_c$  es el radio de curvatura de la canaleta en planta tomado como el radio promedio entre el radio máximo  $R_{max}$  de la superficie del agua y su correspondiente radio mínimo  $R_{min}$ ,  $A$  es el área de la sección transversal mojada de la canaleta;  $P$  es el perímetro mojado de la sección transversal de la canaleta y  $n_m$  es la viscosidad cinemática de la mezcla, dada por Cheng [24] y se calcula con Ec. (6).

$$v_m = \frac{2\nu}{2 - 3C} \quad (6)$$

Donde,  $C$  es la concentración volumétrica de sólidos en el agua dada como  $C = (Q_{sA} + Q_{MA})/Q_m$  y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua a temperatura ambiente.

El valor de  $R_R$  se calcula con Ec. (7).

$$R_R = \frac{R_o}{R_{max}} \quad (7)$$

Donde,  $R_o$  es el radio de localización de los orificios de drenaje o captación de metal pesado medido desde el eje del tubo central.

El diámetro adimensional de partícula se calcula con Ec. (8).

$$d_* = \left( \frac{\Delta g}{v^2} \right)^{\left( \frac{1}{3} \right)} d_{50} \quad (8)$$

Donde,  $d_{50}$  es el tamaño de los sólidos por debajo del cual se encuentra el 50 % de material que pasa;  $D$  es el parámetro adimensional de densidades dado en Ec. (9).

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (9)$$

Donde,  $r_s$  es la densidad de los sedimentos y  $r_w$  es la densidad del agua a temperatura ambiente. En la figura 2 se representa gráficamente el significado de las variables.

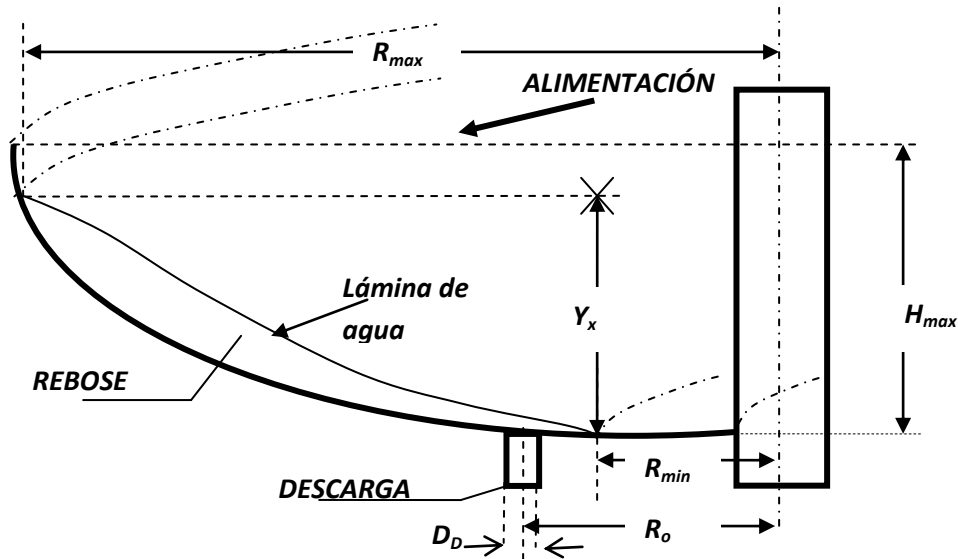


Figura 2.- Esquema de la sección transversal de la canaleta en espiral.

- Factores independientes para el hidrociclón

Se seleccionaron los siguientes factores:

1. Número de Dean del flujo de la mezcla de agua,  $De_m$ .
2. Número de Restricción,  $N_R$ , propuesto por Etayo.
3. Longitud Normalizada,  $L_N$ , propuesto por Etayo.
4. Diámetro adimensional de partícula,  $d^*$ , con Ec. (8)
5. El número de Dean es dado en Ec. (10).

$$De_m = \frac{4(Q_m)}{\pi D_A V_m} \sqrt{\frac{D_A}{D_C}} \quad (10)$$

Donde;  $D_A$  es el diámetro del tubo de alimentación,  $D_o$  es el diámetro del cuerpo del hidrociclón.  $N_R$  es dado en Ec. (11) y  $L_N$  en Ec. (12).

$$N_R = \frac{D_R^2 + D_D^2}{D_A^2} \quad (11)$$

$$L_N = \frac{h_c}{D_C} \quad (12)$$

Donde,  $D_R$  es el diámetro del tubo de rebose,  $D_D$  es el diámetro de la descarga y  $h_c$  es la altura libre del hidrociclón de fondo plano. Las variables utilizadas se indican gráficamente en la figura 3.

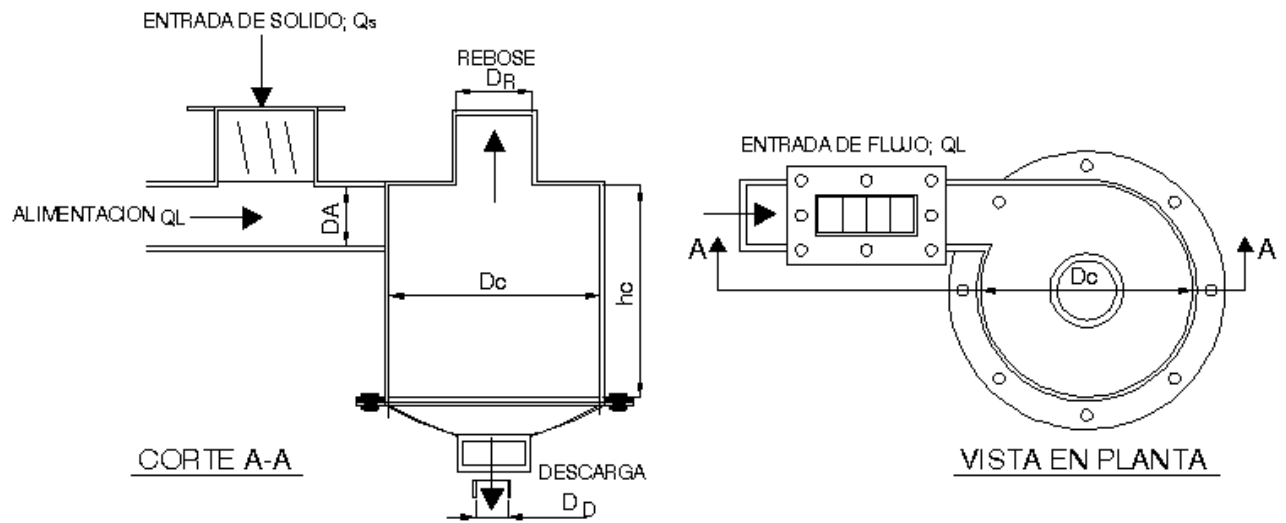


Figura 3. Geometría del hidrociclón.

- Factores independientes del separador de tubo curvo

Las variables utilizadas se indican gráficamente en la figura 4.

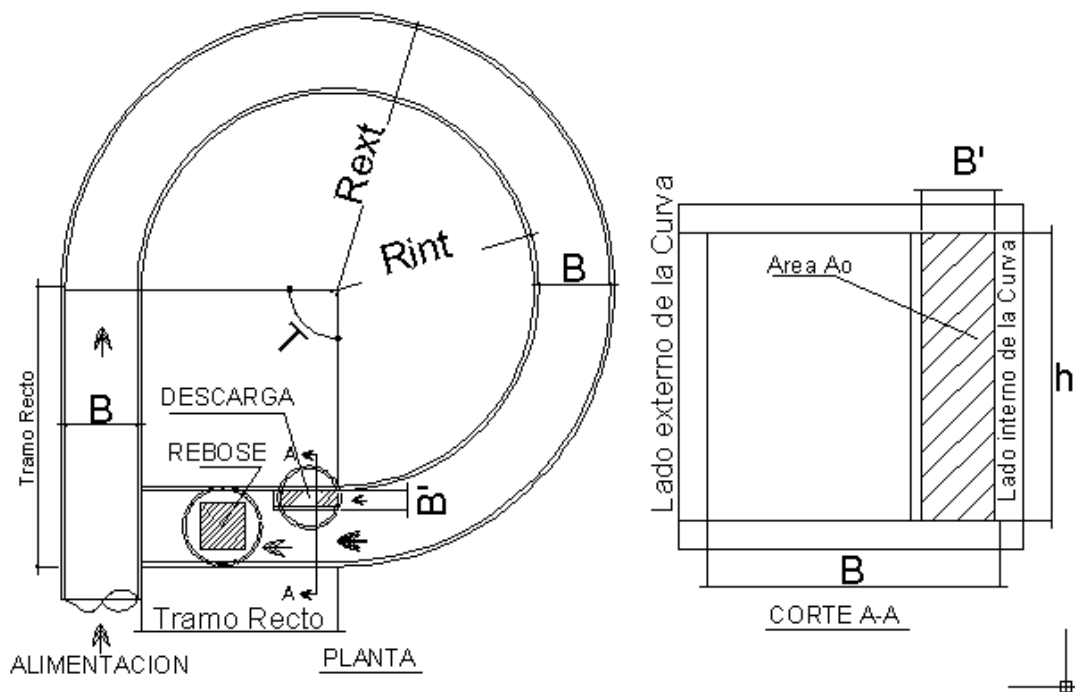


Figura 4. Esquema de la sección transversal del separador de tubo curvo.

Para el separador de tubo curvo se seleccionaron los siguientes parámetros:

1. Número de Dean de la mezcla,  $De_m$ .
2. Número de área,  $N_A$ .
3. Diámetro adimensional de partícula,  $d^*$ , con Ec.(8).

El Número de Dean es dado en Ec. (13).

$$De_m = \frac{(Q_m)(4R_{HA})}{(13)BhV_m} \sqrt{\frac{(4R_{HA})}{2R_t}}$$

Donde,  $R_{HA}$  es el radio hidráulico de la sección transversal del tubo en la alimentación,  $R_t$  es el radio de curvatura del tubo curvo en planta calculado como el promedio del radio interno  $R_{int}$  y el radio externo  $R_{ext}$ , B

es la base de la sección transversal y h es la altura de la sección transversal.  $N_A$  es dado en Ec. (14).

$$N_A = \frac{A_o}{A} = \frac{B'h}{Bh} = \frac{B'}{B} \quad (14)$$

Donde, B' es la base de la sección transversal por donde se evacua el metal pesado.

La variables manipulables en laboratorio fueron  $Q_{LA}$  y  $d_{50}$ , para todos los dispositivos, y de acuerdo a la geometría de cada dispositivo la variable correspondiente. En la tabla 1 se indican los rangos de valores usados en los ensayos.

**Tabla 1. Valores máximos (+), medios (0) y mínimos (-), de las variables manipuladas en laboratorio.**

Dispositivo®	Espiral			Hidrociclón			Tubo Curvo		
	+	0	-	+	0	-	+	0	-
QL (L/s)	0.743	0.425	0.101	1.642	1.355	1.07	4.133	2.936	1.638
d50 (mm)	0.537	0.315	0.232	0.549	0.258	0.208	0.526	0.324	0.233
Ro (mm)	123	95	66						
hc (mm)				380	230	80			
DD (mm)				30	22	18			
B' (mm)							24	15	11

En la tabla 2 se indican los valores de las variables geométricas de los dispositivos ensayados.

**Tabla 2. Valores de las variables geométricas constantes de los separadores.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Paso (mm)	DD (mm)	Rmax (mm)	Hmax (mm)	Dc (mm)	DA (mm)	DR (mm)	360-T (°)	B (mm)	Rext (mm)	Rint (mm)	h (mm)
Espiral	185	7.6	150	74								
Hidrociclón					150	42	53.5					
Tubo Curvo								270	50	193	143	50

En la tabla 2 el paso es la distancia vertical entre espira y espira,  $D_D$  es el diámetro de los orificios por donde se capta el metal

pesado,  $H_{max}$  es la altura máxima desde el punto más bajo de la sección trasversal hasta el borde de la canaleta, Kapur [5]. 360-T es el ángulo de curvatura del tubo curvo.

## II. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El análisis de los datos experimentales consistió en la aplicación de regresión lineal múltiple (RLM), de la cual se obtuvo para cada dispositivo y cada variable de respuesta, una ecuación en función de los

parámetros independientes, esto debido a que en laboratorio no fue posible evaluar los dispositivos bajo los mismos valores de las variables manipulables en laboratorio indicadas en la tabla 1, por lo tanto fue necesario obtener las correlaciones para luego hacer la posterior comparación de los separadores bajo las mismas condiciones. Los datos usados se tomaron de Gómez [25].



## 2.1 Correlaciones matemáticas para las variables de respuesta

Las correlaciones matemáticas se indican en la tabla 3, producto de aplicar RLM a los datos experimentales.

Tabla 3.- Correlaciones matemáticas para las variables de respuesta.

Dispositivo	Ecuación	No
Espiral	$R_M = 10^{0,441888} De_m^{-0,0101084} R_R^{+0,828866} d_*^{-0,479994}$	(15)
	$R_S = 10^{1,28123} De_m^{-0,353698} R_R^{+4,58489} d_*^{-0,265344}$	(16)
Hidrociclón	$R_M = 10^{-0,00813958} De^{-0,00028714} N_R^{+0,02198657} L_N^{+0,00251255} d_*^{0,00996}$	(17)
	$R_S = 10^{0,218877} De_m^{-0,0903508} N_R^{+0,332466} L_N^{+0,0456994} d_*^{0,060388}$	(18)
Tubo Curvo	$R_M = 10^{0,773734} De^{-0,19562} N_A^{0,0744402} d_*^{0,0265732}$	(19)
	$R_S = 10^{2,14229} De^{-0,633848} N_A^{0,293024} d_*^{0,40324}$	(20)

## 2.2 Validación de resultados

Para validar la calidad de los datos experimentales se recurrió al error proporcionado entre lo medido y lo calculado de cada experimento,  $E_i$ , con Ec. (21).

$$E = \left| \frac{\text{med} - \text{cal}}{\text{med}} \right| 100 \quad (21)$$

Donde, med es el valor medido y cal es el valor calculado con ecuaciones deducidas por RLM. Con base al valor  $E_i$ , se procedió a corregir ciertos ensayos, si el error era muy grande se repitió nuevamente el ensayo para descartar errores de medición, en este sentido se repitieron varios de los experimentos, en algunos no fue posible disminuir dicho

error. Para evaluar el error de predicción de las correlaciones, se utilizó el criterio de error promedio  $\bar{E}$ , el coeficiente de correlación  $R^2$  y el valor-P (p-value) del análisis de varianza ANOVA. El error promedio se calculó con Ec. (22).

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{ND} (E_i)}{ND} \quad (22)$$

Donde ND es el número de experimentos. En la figura 5, se indica la representación gráfica de los valores de  $C_{MD}$ , calculados con Ec. (4) y los medidos. En la tabla 4 se indica los valores de los estadísticos incluidos.

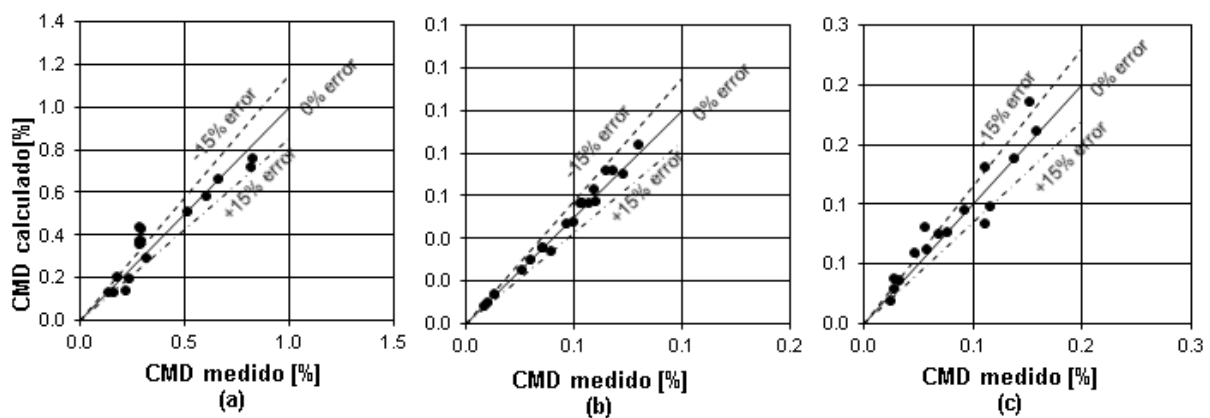


Figura 5. Variación gráfica de los valores medidos y calculados de la concentración de metal en la descarga ( $C_{MD}$ ). (a) Espiral, (b) hidrociclón, (c) Tubo curvo.



**Tabla 4. Estadísticos de las correlaciones propuestas**

Ecuación	$\bar{E}$	R2	P-value
Ec. (15)	23.54%	47.59%	0.045
Ec. (16)	43.59%	88.00%	0.000
Ec. (17)	0.24%	45.55%	0.046
Ec. (18)	5.47%	37.00%	0.119
Ec. (19)	14.16%	15.17%	0.558
Ec. (20)	13.96%	74.40%	0.001
Ec. (4) Espiral	19.02%	-	-
Ec. (4) Hidrociclón	4.72%	-	-
Ec. (4) Tubo Curvo	14.56%	-	-

A pesar de que algunos estadísticos para  $R_s$  y  $R_m$  dan valores por fuera de lo deseado, los errores para la concentración en la descarga son menores al 30%, valor permisible para transporte de sedimentos.

### 2.3 Efecto de los factores independientes sobre las variables de respuesta

Según las correlaciones matemáticas deducidas en la presente investigación podemos analizar el efecto de cada uno de los factores sobre las variables de respuesta. Para una mayor comprensión de los resultados, se graficó las variables de respuesta contra el número de Dean, como se indica en la figura 6, haciendo el siguiente análisis para cada uno de los dispositivos.

- Separador de canaleta en espiral. Para analizar la Ec. (4) se representa en la misma gráfica las variables de respuesta, como se indica en la figura 6, en la cual se observa que al aumentar el  $De_m$ , los valores de las variables de respuesta  $R_{pb}$  y  $R_s$ , disminuyen, pero  $C_{MD}$  aumenta. El cambio en el número de Dean tiene un efecto inverso sobre las variables de respuesta  $R_m$  y  $R_s$  que el que tiene sobre  $C_{MD}$ . En la figura 6 para la espiral se mantuvo constantes los valores de  $R_r=0.4316$  y  $d_s=11.47$ ,

los cuales corresponden a las condiciones de operación para alcanzar la mayor concentración por la descarga de 75.93%.

La canaleta en espiral se considera un muy buen concentrador de metal pesado, por encima del 60%, aunque la recuperación de metal pesado es baja alrededor de 40%. Si se amplía el área de captación en sentido radial hacia la parte externa de la curva, se logra recuperar mayor cantidad de metal pesado pero se disminuye un poco la concentración de metal pesado en la descarga. Esto es lógico ya que al aumentar dicha área más partículas de arena son drenadas por la descarga, lo que hace que  $C_{MD}$  disminuya.

- Separador hidrociclón. Se observa en la figura 6 que al aumentar el  $De_m$ , los valores de las variables de respuesta  $R_m$  y  $R_s$ , disminuyen, pero  $C_{MD}$  aumenta. El cambio en el número de Dean tiene poco efecto sobre  $R_m$  pero un efecto significativo sobre  $R_s$ , lo cual es favorable para el proceso de separación. En la figura 6 para el hidrociclón se mantuvo constantes los valores de  $N_r=2.12$ ,  $L_N=0.53$  y  $d_s=10.29$ , los cuales corresponden a las condiciones de operación para alcanzar la mayor concentración por la descarga de 8.37%.

El hidrociclón se considera un excelente recuperador de metal pesado con un valor de  $R_m$  por encima del 99%, pero no un muy buen concentrador ya que  $C_{MD}$  alcanza solamente un 8.37%. Quizá sea interesante ensayar el hidrociclón para tamaño de sedimento y metal por debajo del diámetro de corte del hidrociclón, en dicho caso se podría tener concentraciones mucho mayores, entre más fino sea el sedimento la remoción de este será menor y el enriquecimiento de concentrado será mayor.

- Separador de tubo curvo. Para analizar la ecuación (4), se procede de manera similar que para la espiral y el hidrociclón, observándose que al aumentar el  $De_m$ , los valores de las variables de respuesta  $R_m$  y  $R_s$ , disminuyen, pero  $C_{MD}$  aumenta. Es interesante observar en la figura 6, que el cambio en el número de Dean tiene mayor efecto en el sedimento que en el metal pesado, esto es favorable para efectos de separación ya que al aumentar  $De_m$  la mayor parte del sedimento saldría por el rebose. Como el valor de  $C_{MD}$  es la única variable de respuesta que aumenta cuando aumenta

$De_m$ , indica que este separador de flujo centrífugo es muy apropiado para enriquecimiento de concentrado de un metal pesado y que no es muy apropiado para remover sedimentos contenidos en agua, ya que se tendría que disminuir el caudal para poder lograr mayor eficiencia de remoción, lo cual implica tener estructuras de mayor dimensión, lo que no hace mucha diferencia

con otros separadores de flujo lineal o transversal. En la figura 6 para el tubo curvo se mantuvo constante los valores de  $NA=22.00\%$  y  $d_* = 12.9$ , los cuales corresponden a las condiciones de operación para alcanzar la mayor concentración por la descarga de 18.56%.

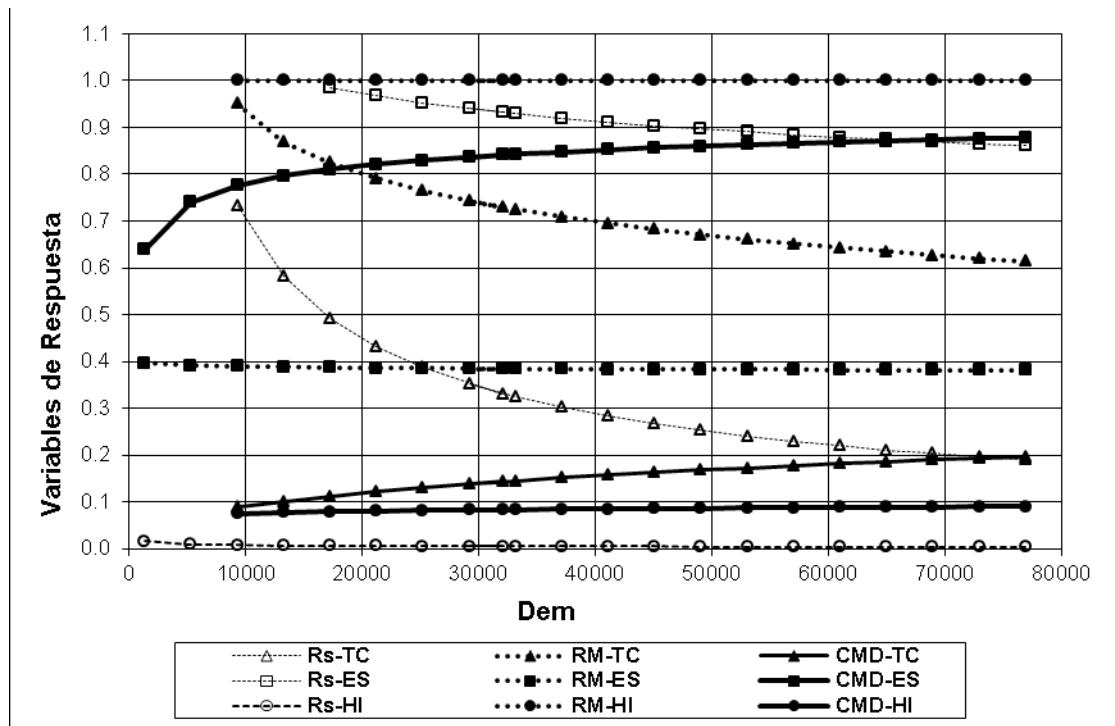


Figura 6. Cambio en las variables de respuesta con variación del número de Dean. (TC: Tubo curvo, ES: espiral y HI: hidrociclón).

## CONCLUSIONES

Se encontró que la ecuación de la concentración de metal por la descarga, Ec. (4), propuesta en esta investigación es apropiada para explicar el fenómeno, ya que los errores de predicción son bajos con respecto a los valores experimentales, siendo de 19.02, 4.72 y 14.56, para la canaleta en espiral, el hidrociclón y el tubo curvo, respectivamente.

Que el número de Dean tiene una influencia directamente proporcional en la variable de respuesta  $C_{MD}$ , lo cual es favorable para el proceso de enriquecimiento de concentrado ya que permite procesar mayor volumen de pulpa en menor tiempo, con solo aumentar el caudal.

Que en términos de porcentaje de enriquecimiento de concentrado, la espiral concentradora proporciona el valor más alto llegando hasta un 90%, seguida del separador de tubo curvo con 20% y por último el hidrociclón con un 10%. Lo cual comprueba la hipótesis principal planteada en la investigación, en la cual se estipuló que el flujo a superficie libre proporciona las condiciones más favorables para el enriquecimiento de concentrado de metales pesados que el flujo a presión.

Que la recuperación de metal contenido en la pulpa es mayor para el hidrociclón el

cual está por encima del 99%, al menos en el tamaño que se ensayó el plomo pulverizado. La espiral concentradora arrojó una recuperación de metal cercana al 40 % y el tubo curvo muy susceptible al cambio en el número de Dean llegó a una recuperación de metal del 20%.

Cada dispositivo adquiere importancia dependiendo en qué etapa del proceso de enriquecimiento se lo coloque, si el interés inicial es recuperar (en lo posible) el 100% de metal de una pulpa, el dispositivo más recomendado para ir primero en el proceso es el hidrociclón, seguido del tubo curvo y luego la espiral concentradora, que es la que haría el trabajo de separar la arena del metal con mayor eficiencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. K. Mishra, A. Tripathy, "A preliminary study of particle separation in spiral concentrators using DEM", *International Journal of Mineral Processing*, 94. (2010). p 192-195.
- [2] Y.M. Stokes, S. K. Wilson, B. R. Duffy. "Thin-Film Flow in Open Helically-Wound Channels", *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, The University of Sydney, Sydney, Australia 13-17 December. 2004. (no paginado).
- [3] Y. M. Shen, C Ng, H. Q Ni. "3D numerical model of non-isotropic turbulent buoyant helical flow and heat transfer in a curved open channel". *International Journal of Heat and mass Transfer*, 46. 2003. p 2087-2093.
- [4] B. W. Matthews, C. A. Fletcher, T.C. Partridge. "Computations of curved free surface water flow on spiral concentrators". *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 125. No. 11. November. 1999. p 1126-1139.
- [5] P.C. Kapur, T.C. Meloy. "Spirals Observed", *Int. J. Miner. Process*, 53 (1998). p 15-28.
- [6] P.C. Kapur, T.C. Meloy. "Industrial modeling of spirals for optimal configuration and design: spiral geometry, fluid flow and forces on particles". *Powder Technology*, 102. 1999. p 244-252.
- [7] J. Siame. *Physical beneficiation of PGM tailings by gravity separation and elutriation techniques*, submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Magister Technologiae: Engineering: Chemical, Tshwane University of Technology, 2008. p 29.
- [8] S.K. Das, K.M. Godiwalla. "Mathematical modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral", *Int. J. Miner. Process*, 84. 2007. p 118-132.
- [9] A.B. Holland-Batt. "Spiral Separation: theory and simulation". *Trans. Instn. Min. Metall.* (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.), 98, January-Abril. 1989. p C46-C60.
- [10] A. B. Holland-Batt, P.N. Holtham. "Particle and fluid motion on spiral separators". *Minerals engineering*, vol. 4. N° 4. 1991. p 457-482.
- [11] A. B. Holland-Batt. "Some Design Considerations For Spiral Separator", *Minerals engineering*, Vol 8. N° 11. 1995. p 1381-1395.
- [12] A. B. Holland-Batt. "A method for the prediction of the primary flow on large diameter spiral troughs", *Minerals Engineering*, 22. 2009. p 352-356.
- [13] H. Trawinski. "Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones". Adaptación: Juan Luis Bouso Aragonés. *ERAL, Equipos y Procesos*, S.A. Fecha de consulta mayo del 2010. Disponible: [http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/AplyFun_Prac_Hidrociclones.pdf)
- [14] J. Bouso. "Nuevos tipos de hidrociclones". *ERAL, ERAL, Equipos y Procesos*, S.A. Fecha de consulta: mayo del 2010, Disponible: [http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Nuevos\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/Nuevos_Hidrociclones.pdf).
- [15] J. Bouso. "El Hidrociclón: I,II, III". *ERAL, ERAL, Equipos y Procesos*, S.A. 20 - Mayo 1998 - Americas Mining. Fecha de consulta: mayo del 2010, Disponible: <http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Modulo6.htm>.
- [16] J. Bouso. "Hidrociclones de fondo plano". *ERAL, Equipos y Procesos*, S.A., Fecha de consulta: mayo del 2010, Disponible: [http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-3/Hidrociclones\\_Fondo\\_Plano.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-3/Hidrociclones_Fondo_Plano.pdf).
- [17] J. Etayo, J. Barraza. "Correlaciones matemáticas para la obtención de rendimiento de producción, remoción de cenizas y partición de agua usando un hidrociclón solo agua". *Dyna*, N° 157. 2009. p 181-193.
- [18] S. Ookawara, R. Higashi, D. Street, K Ogawa. "Feasibility Study on Concentration of Slurry and Classification of Contained Particles by Microchannel". *Chemical Engineering Journal*, vol. 101. 2004. p 171-178.
- [19] H. Gao, L. Guo, X. Zhang. "Liquid-Solid Separation Phenomena of Two-phase Turbulent Flow in Curved Pipes". *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 45. 2002. p 4995-5005.
- [20] G. Gauthier, P. Gondret, H. Thome', and M. Rabaud. "Centrifugal Instabilities in a Curved Rectangular Duct of Small Aspect Ratio", *Physics of Fluids*, vol. 13. Number 10. October. 2001. p 2831-2834.
- [21] K. Yamamoto, M. M. Alam, J. Yasuhara, A. Aribowo. "Flow Through a Rotating Helical Pipe With Circular Cross-section". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21. 2000. p 213-220.
- [22] H Gutiérrez, R. De La Vara. *Análisis y Diseño de Experimentos*, Edit. McGrawHill, México D.F. 2008. p126-220.
- [23] N. Cheng. "Simplified settling velocity formula for sediment particle", *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 123. No 2. February. 1997. p 149-152.
- [24] Cheng N.S., "Effect of concentration on settling velocity of sediment particles". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 123, No 8, August. 1997. p 728-731.
- [25] H. Gómez, *Determinación del efecto del flujo secundario en la eficiencia de separación de metales pesados de una mezcla de material aluvial y agua*, Informe del Proyecto de Investigación VIPRI, Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. Colombia. 2010. No publicado.