

*FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. LEIOA*

---

# TRABAJO FIN DE GRADO INGENIERÍA QUÍMICA

## CARACTERIZACIÓN DE MICROHIDROCICLONES

---

**Alumno/a** *Güenechea Villabeitia, Lexuri*  
**Fecha** *Febrero 2016*

**Director/a**  
Dr. Roberto Aguado

**Curso Académico**  
2015/16

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	GEOMETRÍA Y DISEÑO DE HIDROCICLONES .....	1
1.2.	FUNCIONAMIENTO DEL HIDROCICLÓN .....	3
1.3.	EFEECTO FISH-HOOK.....	10
1.4.	VENTAJAS Y APLICACIONES .....	11
2.	OBJETIVOS.....	14
3.	EXPERIMENTAL .....	15
3.1.	PLANTA PILOTO .....	15
3.2.	MATERIAL Y METODOLOGÍA .....	18
3.3.	MUESTREO Y ANÁLISIS.....	20
4.	RESULTADOS HCM-50.....	23
4.1.	EFEECTO DE LA PRESIÓN.....	23
4.2.	EFEECTO DEL DIÁMETRO DEL SPIGOT.....	26
4.3.	EFEECTO DEL TAMAÑO DEL VORTEX .....	27
4.4.	EFEECTO DE LA LONGITUD DEL CONO .....	28
4.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
5.	CONCLUSIONES.....	35
6.	NOMENCLATURA.....	36
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	38
	ANEXO .....	i

## 1. INTRODUCCIÓN

Aunque la primera patente de un hidrociclón se remonta al siglo XIX (Bretnai, 1891) no es hasta principios de 1940 cuando los hidrociclones empiezan a emplearse a nivel industrial. Su facilidad de operación, bajo mantenimiento, coste y sencillez en el diseño hacen que los hidrociclones desempeñen un papel importantísimo en los procesos de separación.

Los hidrociclones son dispositivos estáticos en los que una mezcla de partículas suspendidas en un líquido es sometida a una fuerza centrífuga por acción de su propia energía cinética, siendo el principio básico de separación la sedimentación centrífuga. Debido a que la densidad de las partículas es mayor que la del agua en la que están suspendidas, las partículas salen despedidas hacia la pared del hidrociclón, frenándose por acción del rozamiento y cayendo al fondo del hidrociclón.

Hasta el año 1950 el empleo de hidrociclones se limitaba a la separación sólido-líquido de la industria minera. Entre 1950 y el año 2000 se desarrolló esta tecnología, focalizando su explotación a la separación líquido-líquido, propia de la extracción marina de crudos petrolíferos.

Actualmente los hidrociclones son ampliamente usados en moliendas en circuito cerrado, (Casali y cols., 1998), deslamado (Yalamanchili y Miller, 1995), clarificación de líquidos (Puprasert y cols., 2004), desarenado (Murray, 1980), y en operaciones de espesamiento (Woodfield y Bickert, 2004; Yang y cols., 2004), pudiendo afirmarse que es la técnica predominante a la hora de eliminar partículas sólidas de líquidos. Muchas de las operaciones de reciclaje requieren esta separación, y con afán de ampliar esta tecnología a aplicaciones medioambientales y a nivel nanotecnológico, el desarrollo de hidrociclones vuelve a ser un punto de investigación interesante.

Con el fin de entender la dinámica del hidrociclón se detallarán sus componentes y se analizará su funcionamiento.

### 1.1. GEOMETRÍA Y DISEÑO DE HIDROCICLONES

El diseño del hidrociclón depende tanto de la naturaleza de la separación a realizar como de la calidad requerida (Puprasert, 2002). La estructura de un hidrociclón convencional se divide en dos secciones principales: una cilíndrica y una cónica. La sección cilíndrica incluye el cuerpo de alimentación y el propio cuerpo cilíndrico, y la sección cónica incluye el cuerpo cónico y el ápex. Sobre la sección cilíndrica se sitúa el vortex finder, o comúnmente denominado vortex, que es en sí un rebosadero que da salida a la corriente superior, el overflow. Bajo la sección cónica se incluye el spigot, el desbordamiento que da salida a la corriente inferior, el underflow. La Figura 1 incluye un detalle de los elementos que conforman el hidrociclón.

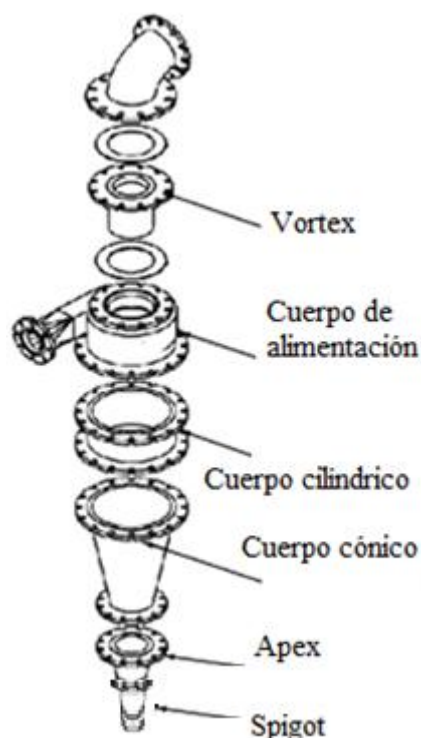


Figura 1.- Componentes generales de un hidrociclón (Bosman, 2003).

La geometría del hidrociclón determina la eficacia de separación del mismo, esto es, la efectividad del hidrociclón viene determinada principalmente por sus características geométricas. Son muchos los aspectos que determinan la eficacia del hidrociclón entre los cuales se destacan el diámetro y longitud del cuerpo cilíndrico del hidrociclón, el tamaño, longitud y posición del vortex, el tamaño del spigot y el ángulo de cono, entre otros (Svarovsky, 1984).

La clasificación de los hidrociclones depende principalmente del tamaño del cuerpo cilíndrico del hidrociclón. Con objeto de catalogar los hidrociclones, NOVATTIA DESARROLLOS S.L emplea la siguiente nomenclatura: se denomina hidrociclón a los ciclones cuyo diámetro de cuerpo cilíndrico es superior a 100 mm. Cuando el cuerpo cilíndrico está comprendido entre 10 y 100 mm se denominan microciclones y para diámetros de cuerpo cilíndrico inferiores a 10 mm los hidrociclones pasan a llamarse nanociclones. Los ensayos realizados en este trabajo se realizaron con hidrociclones de diámetro de cuerpo cónico de 50 mm, con lo que se catalogan como microciclones.

Bouso (1990) clasifica los hidrociclones según su geometría en dos grandes grupos: los hidrociclones cilíndricos y los hidrociclones cónicos.

Se entiende por hidrociclón convencional un hidrociclón de tipo cónico. Estos, a su vez, pueden subclasificarse en función del ángulo del cuerpo cónico, diferenciándose así entre hidrociclones de cono pronunciado y los hidrociclones de cono tendido. Los primeros son hidrociclones cuyo ángulo de cono es inferior a  $20^\circ$ , lo que hace que su cuerpo cónico sea más alargado. Este tipo de diseño suele acompañarse de toberas de rebose y alimentación pequeñas y partes cilíndricas de longitud mayor que el diámetro. Con esta geometría, la distancia entre el vortex y el vértice de la parte cónica es mayor que en los hidrociclones cilíndricos y de cono tendido, se consiguen tiempos de residencia mayores y la eficacia en la separación es mayor. Por ello, estos hidrociclones se emplean en la clasificación de partículas

finas, obteniendo diámetros de corte entre 2 y 30 micras. A nivel industrial estos hidrociclones tienen diámetros de hasta 250 mm y trabajan a presiones entre 1,5 y 4 bares.

Los hidrociclones de cono tendido tienen, en general, ángulos de cuerpo cónico comprendidos entre 20° y 45°. Sus cuerpos cilíndricos tienen diámetros desde 250 mm hasta 2000 mm y suelen operar entre 0,5 y 150 bares de presión. Alcanzan diámetros de corte entre 3 y 150 micras, siendo empleados en la clasificación de partículas tanto por su tamaño como por densidad, lo que se conoce como clasificación selectiva.

Los hidrociclones cilíndricos son en sí hidrociclones de cono tendido extremos, con un ángulo de cono crítico correspondiente a 180°. Esta geometría de fondo plano diferencia tres tipos de descarga, a saber, descarga central, de fondo plano o periférica. Estos últimos provocan una descarga muy diluida ya que la extracción del underflow se realiza tangencialmente en la sección inferior de la pared cilíndrica. Así, la eficiencia de separación en estos hidrociclones es bastante limitada, con lo que suelen colocarse en serie en baterías de dos ciclones, donde el underflow procedente del hidrociclón cilíndrico se emplea como alimentación de otro hidrociclón cónico, tal como incluye la patente de la empresa LAROX.

## **1.2. FUNCIONAMIENTO DEL HIDROCICLÓN**

En un hidrociclón el lodo entra tangencialmente desde la parte superior dando lugar a la formación de un vórtice en el cuerpo del hidrociclón. Por acción de la fuerza centrífuga, las partículas y el fluido son acelerados, dándose la separación de las mismas en la dirección radial. Las partículas más densas migran hacia la pared que conforma el cuerpo del hidrociclón, mientras que las menos densas migran hacia el eje central.

A medida que las partículas más densas se aproximan al spigot, la aglomeración de las mismas produce cierta obturación en esta zona, generando una pérdida de carga considerable.

De esta manera, la pérdida de carga correspondiente a la salida situada en la parte superior del hidrociclón es menor que la de la parte inferior, con lo que se genera un segundo vórtice por el cual las partículas menos densas y el fluido ascienden hasta alcanzar el vortex.

Así, el flujo en el cuerpo del hidrociclón se caracteriza por dos vórtices de direcciones opuestas. El flujo denso, que arrastra las partículas más densas, tiende a circular a lo largo del remolino principal hasta la salida situada en la parte inferior del hidrociclón, formando la corriente de underflow, mientras que el flujo menos denso circula a lo largo del remolino secundario, en sentido opuesto, hasta el vortex, creando así la corriente de overflow.

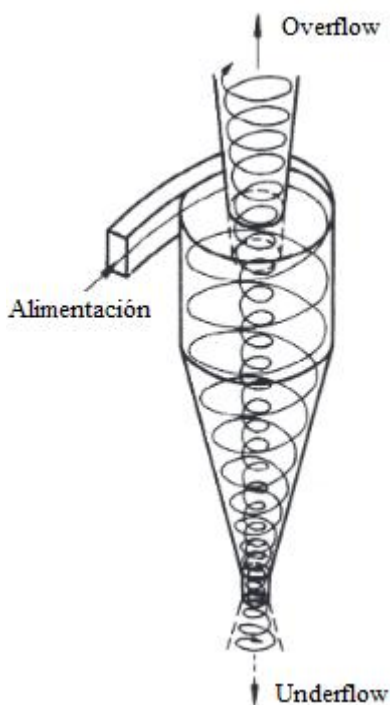


Figura 2.- Esquema de vórtices generados en el hidrociclón (Minkov, 2013).

A diferencia de otros equipos de separación centrífuga, los hidrociclones no tienen elementos dinámicos. La separación se produce por la transformación de la energía estática del fluido (presión) en energía dinámica (velocidad) (Puprasert, 2002).

En el hidrociclón las partículas están expuestas a dos fuerzas de acción opuesta; externamente se ven sometidas a la acción de la fuerza centrífuga, mientras que internamente están sometidas a una fuerza que puede equipararse a la de arrastre. La fuerza centrífuga, cuya intensidad depende básicamente del tamaño y la forma del hidrociclón, así como de la densidad de las partículas, arrastra las partículas densas hacia la pared de hidrociclón, hacia el vórtice principal, mientras que la fuerza de arrastre dirige las partículas de menor sedimentabilidad hacia el vórtice secundario (Aldrich, 2015).

El balance de fuerzas aplicable a una partícula esférica de diámetro  $d$  en la posición radial  $r$  del hidrociclón se recoge en las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 que acompañan a la Figura 3.

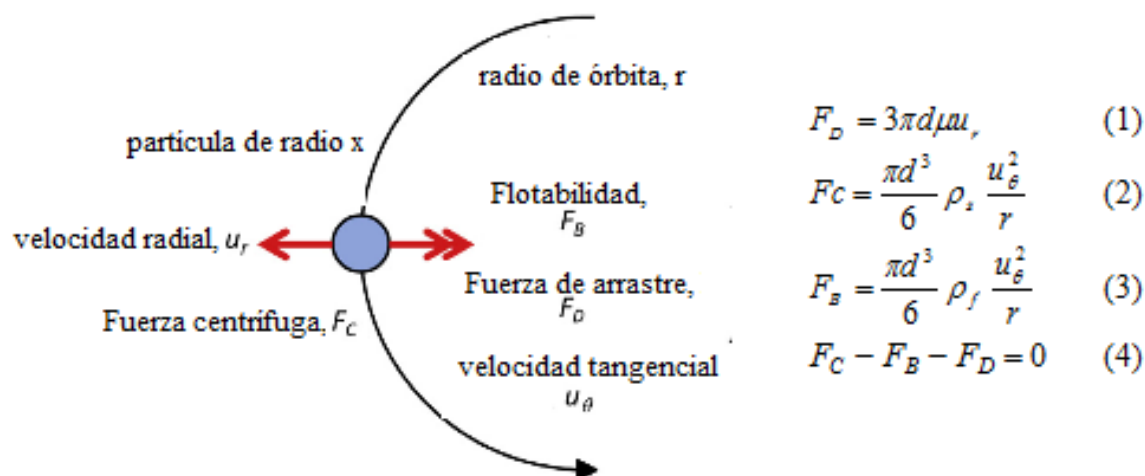


Figura 3.- Balance de fuerzas aplicado a una partícula esférica en el seno de un hidrociclón. (Aldrich, 2015)

En el equilibrio, la fuerza centrífuga equivale a la suma de la flotabilidad y el arrastre, tal como indica la Ecuación 4.

El parámetro determinante de la eficacia de separación del hidrociclón es la velocidad. En general la velocidad en el seno de un hidrociclón se representa en tres ejes, tal como muestra la Figura 4. Se puede afirmar que la velocidad tangencial es el componente más importante, a excepción de la región central próxima al eje, donde la velocidad axial es elevada.

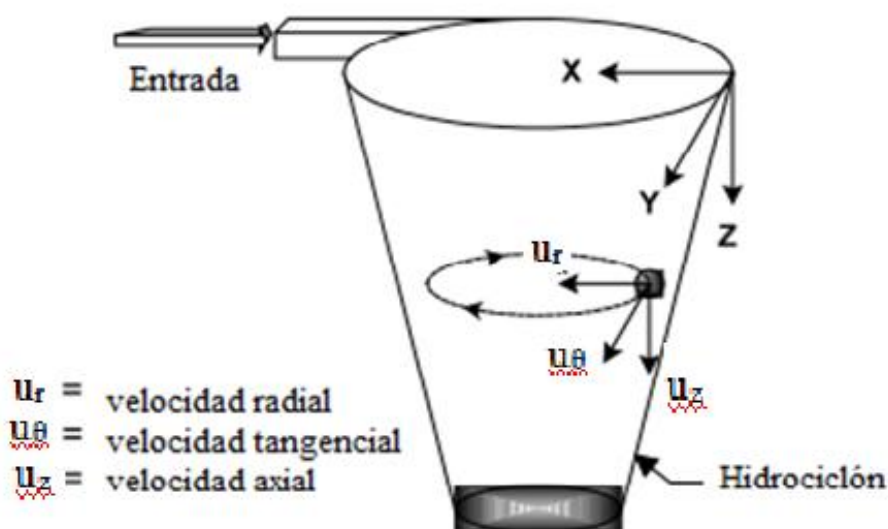


Figura 4.- Componentes de velocidad en el hidrociclón.

El valor de la velocidad tangencial determina el valor de la aceleración, de acuerdo con la Ecuación 5, además de la fuerza del efecto centrífugo y la eficacia de la separación (Puprasert, 2002).

$$a_t = \frac{u_\theta^2}{r} \quad (5)$$

Según la ley de Helmholtz, el momento angular de un fluido ideal en rotación puede describirse como una relación lineal entre la velocidad y el radio, de acuerdo con la Ecuación 6.

$$V \cdot r = cte \quad (6)$$

Este modelo es aplicable al vórtice principal, mientras que en el vórtice secundario el modelo a aplicar viene descrito por la Ecuación 7.

$$\frac{V}{r} = cte \quad (7)$$

Las Figuras 5a y 5b representan el perfil de velocidades del vórtice principal y el vórtice secundario, respectivamente, mientras que la Figura 5c representa el perfil de velocidades para el vórtice combinado.

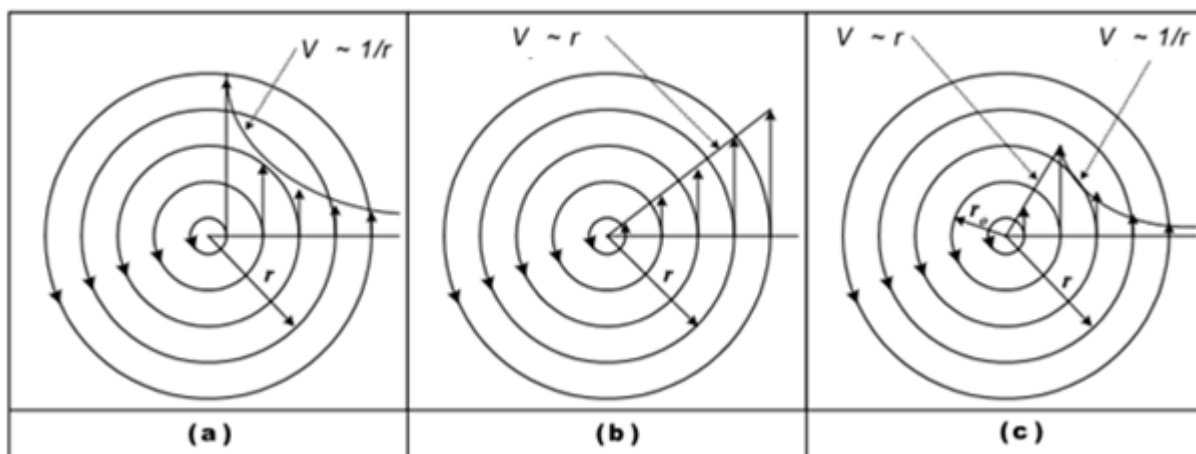


Figura 5.- Perfil de velocidades en los tres tipos de vórtices. a) vórtice principal, b) vórtice secundario, c) vórtice combinado (Puprasat, 2004).

El valor del campo de la aceleración, el cual crea la fuerza de separación en el hidrociclón, depende directamente del valor de la velocidad tangencial. En consecuencia, con el fin de optimizar la separación, las partículas deben depositarse alrededor de la sección con mayor velocidad tangencial en la mayor medida posible. Por ello, un hidrociclón diseñado para efectuar una separación difícil debe disponer de un ángulo cónico pequeño y ser lo más largo posible, con el fin de mantener las partículas en esta sección el mayor tiempo posible (Puprasat, 2004).

Otro parámetro determinante a la hora de trabajar con hidrociclones es el tipo de descarga, que es un parámetro aleatorio que se relaciona directamente con la capacidad del hidrociclón. Dependiendo de las condiciones de operación y de la alimentación, la corriente de underflow puede descargar de tres maneras distintas, tal como se muestra en la Figura 6.



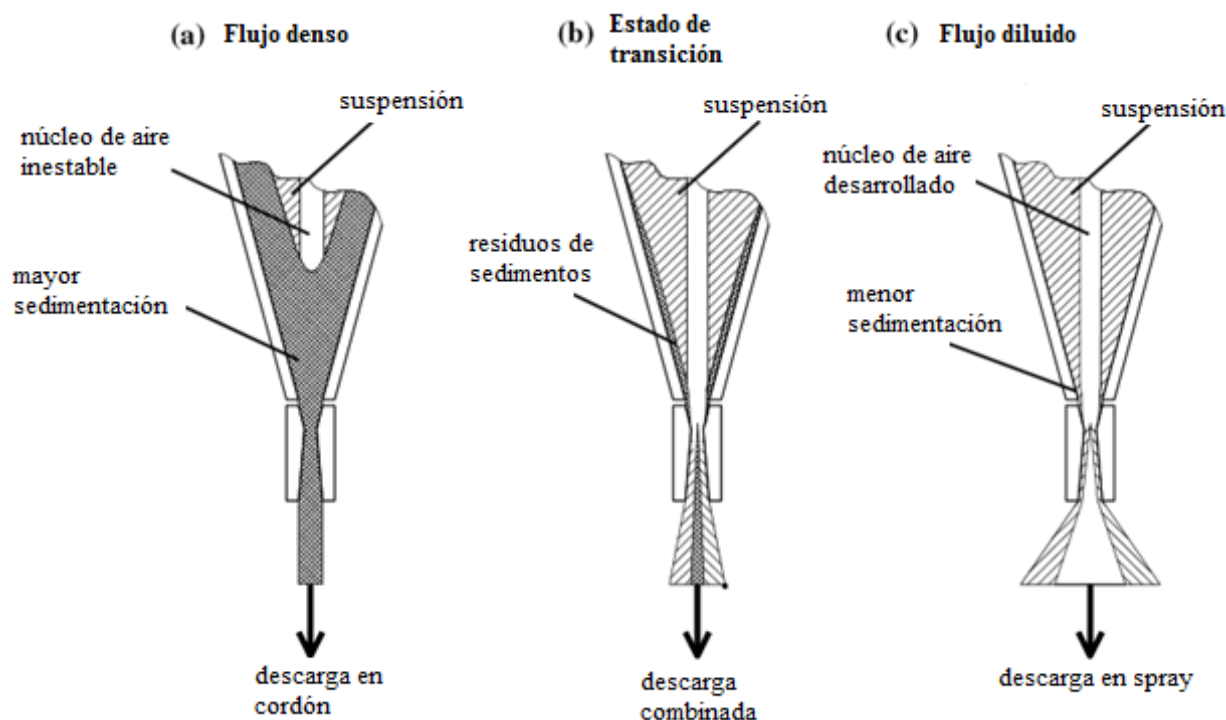


Figura 6.- Condición de descarga del underflow (Neese y cols, 2004).

La Figura 6.a muestra una descarga de tipo cordón. Este tipo de descarga es propia de separaciones de flujo denso. Las partículas se acumulan en torno al ápex y se produce un colapso en el núcleo de aire. La Figura 6.c muestra una descarga de tipo spray o paraguas, propia de la separación de partículas en un flujo diluido. Esta descarga es signo de un núcleo de aire más estable y desarrollado que en el caso anterior, aunque si la descarga es muy abierta puede asociarse al empleo de un spigot demasiado grande, que conlleva un bypass elevado. Por ello, la descarga de tipo spray es deseada cuando se trabaja con granulometrías muy finas o con presiones medias o elevadas. La Figura 6.b muestra una descarga de tipo mixta o combinada, dónde se pasa de cordón a spray de manera intermitente. Este tipo de descarga está asociada a un diámetro de spigot límite o a una presión ligeramente baja.

Así, según la descarga que se esté dando puede definirse el estado del hidrociclón y queda claro que el tipo de descarga depende principalmente de la concentración de la alimentación; a concentraciones bajas el tipo de descarga predominante es la spray, mientras que a altas concentraciones se produce la acumulación de partículas en torno al ápex, se colapsa el núcleo de aire y, por tanto, la descarga es de tipo cordón.

Conocidas las bases de la técnica y las variables principales responsables del funcionamiento del hidrociclón puede procederse a su caracterización, que consiste principalmente en determinar el diámetro de corte que ofrece y las condiciones de operación del mismo. Para ello, se determinan la curva de capacidad y la curva de eficacia del hidrociclón.

La curva de capacidad se determina al representar la pérdida de carga frente al caudal de alimentación y permite establecer las condiciones de trabajo del hidrociclón. La Figura 7 muestra una típica curva de capacidad.

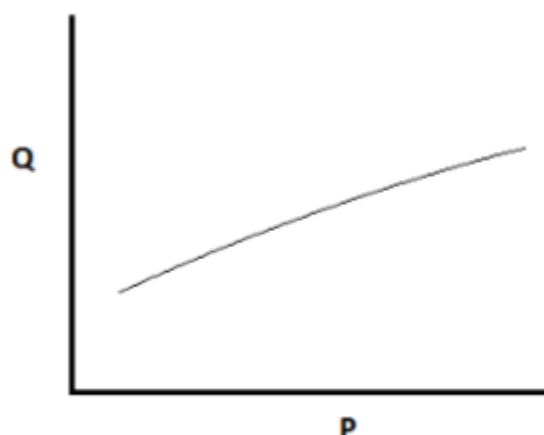


Figura 7.- Curva de capacidad

La curva de eficacia determina la fracción de material de diámetro específico que se encuentra en una de las corrientes de salida respecto a la alimentación, estableciendo así el rendimiento del hidrociclón, por ello es que también sea conocida como curva de rendimiento, eficacia o curva de Tromp. Esta curva puede estar referida al overflow o al underflow, siendo más común encontrarla referida al underflow. Con el fin de enfatizar los tamaños de partícula pequeños, suele representarse en escala logarítmica, y se caracteriza por tener una forma de tipo S, tal como se muestra en la Figura 8. Además, la eficacia se calcula referida a un diámetro de partícula concreto, pudiéndose calcular a partir de la Ecuación 8, donde  $m_U$  y  $m_F$  hacen referencia a los caudales máxicos de underflow y alimentación, respectivamente, y  $x_U$  y  $x_F$  hacen referencia a la fracción de partículas de diámetro establecido en el underflow y la alimentación (Pasquier, 2000).

$$\eta_d = \frac{m_U \cdot x_U}{m_F \cdot x_F} \quad (8)$$

Cuando las partículas son de pequeño tamaño, una fracción de partículas evita la clasificación, esto es, la curva de eficacia no alcanza el cero sino que tiende asintóticamente hacia un determinado valor. A este valor se le conoce como bypass. En las ocasiones en las que la curva de eficacia tenga bypass puede ser interesante calcular la curva de eficacia corregida, de acuerdo con la Ecuación 9, donde  $B_p$  corresponde al bypass.

$$\eta_c = \frac{\eta_d - B_p}{1 - B_p} \quad (9)$$

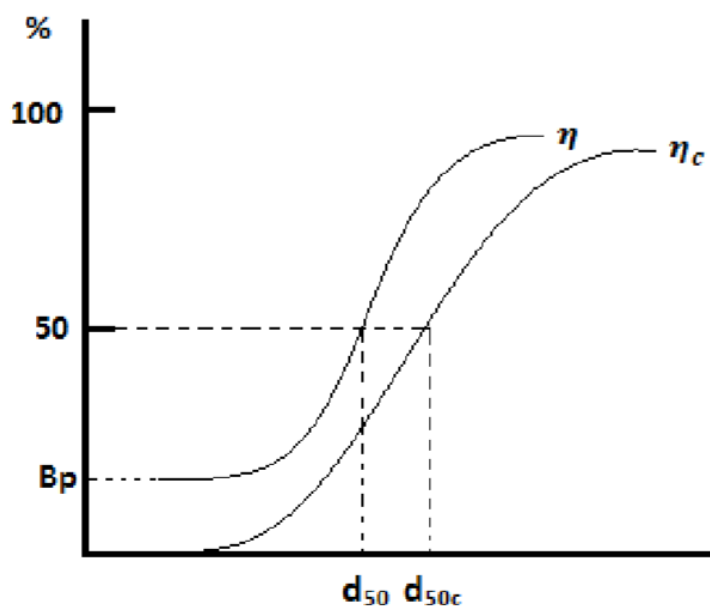


Figura 8.- Forma habitual de la curva de eficacia y eficacia corregida respecto al underflow.

La curva de eficacia permite la obtención de otro parámetro característico de la eficacia de los hidrociclones: el diámetro de corte. Habitualmente se conoce como  $d_{50}$  e indica el tamaño de partícula que tiene las mismas posibilidades de salir por el rebose (overflow) que por la descarga (underflow). La forma de calcular este diámetro experimentalmente es a través de las curvas de eficacia, concretamente se usa la de underflow aunque en las dos curvas se obtendría el mismo valor. En el presente trabajo se realizará una interpolación lineal para obtener el diámetro en el que la eficacia es del 50%.

Otro parámetro interesante en la caracterización de hidrociclones es el diámetro de partícula,  $dp_{90}$ , que indica el tamaño para el que el 90% de las partículas de ese tamaño salen por el overflow. Se obtiene mediante granulometría de las corrientes de entrada y salida del hidrociclón y suele darse referido a la corriente de overflow principalmente y da una idea de la calidad de la corriente de overflow.

Conocidos los parámetros que caracterizan el hidrociclón puede procederse a evaluar como los componentes geométricos del hidrociclón afectan a la eficacia de separación del mismo.

La variable más importante en el diseño del hidrociclón es el diámetro del cuerpo cilíndrico del hidrociclón ya que dimensiona su tamaño. Cuanto mayor es el diámetro del hidrociclón, mayor es su capacidad. Sin embargo, la eficacia del hidrociclón es mayor cuanto menor es el diámetro de su cuerpo ya que cuanto menor es el tamaño, mayor es la fuerza centrífuga que se genera.

En cuanto a la longitud del cuerpo cilíndrico, cuánto mayor es la longitud mayor es la longitud efectiva del remolino principal que se genera en el seno del hidrociclón y por tanto la eficacia de separación aumenta, tal como se comentará más adelante.

Según Svarovsky (1983) son dos los parámetros esenciales en el dimensionado del vortex del hidrociclón: el diámetro y la longitud del vortex.

Cuanto menor es el diámetro del vortex del hidrociclón la pérdida de carga de la salida superior aumenta, lo que conlleva a su vez una disminución del  $d_{50}$ , aumentando así la eficacia. La longitud del vortex es otro parámetro a considerar ya que determina la posibilidad

de arrastre de partículas densas hacia el vórtice secundario. Si el vortex no tiene una longitud mínima las partículas gruesas no llegan a alcanzar el vórtice primario, son arrastradas directamente por el vórtice secundario provocando un corto circuito en la parte superior del hidrociclón, lo que conlleva un aumento del  $d_{50}$  y una disminución de la eficacia de separación. Por otro lado, si el vortex es demasiado alargado puede alcanzar la zona cónica. En esta situación puede darse que las partículas gruesas alcancen el vórtice secundario y sean arrastradas junto con el overflow, haciendo que la eficacia disminuya. Así, la longitud óptima del vortex depende del tamaño y de la distribución de las partículas de la alimentación, con lo que son los ensayos experimentales los que determinan la longitud óptima del vortex para cada caso.

En cuanto al spigot es su diámetro el que limita, entre otras cosas, el tipo de descarga. El tipo de descarga óptima depende de las condiciones de régimen que deseen establecerse de acuerdo con las características de la alimentación, tal como se ha indicado. Disminuir el diámetro del spigot provoca que la descarga se asemeje más a la de tipo cordón, ya que se consiguen condiciones de régimen denso. Aumentar el diámetro del spigot provoca que la situación del régimen sea más diluida, con lo que el tipo de descarga se asemeja más a la de tipo spray. Un diámetro de spigot límite provoca un régimen de transición al cuál se asocia la descarga de tipo mixta. Por otro lado, un aumento del diámetro del spigot implica una disminución de la pérdida de carga en esta salida, consiguiéndose así una disminución del diámetro de corte.

La longitud del cuerpo cónico del hidrociclón puede definirse mediante el ángulo generado por la sección cónica. Cuanto mayor es el ángulo de cono menor es la longitud del cuerpo cónico del hidrociclón, lo que hace que la distancia entre el vortex y el ápex disminuya. De esta manera, el tiempo de residencia en el hidrociclón es menor, por lo que un aumento en el ángulo del cono implica una disminución de la eficacia de separación.

Definidos los parámetros geométricos característicos del hidrociclón es de mención que los hidrociclones son dispositivos muy versátiles y por tanto admiten modificaciones en su diseño. Una variante del hidrociclón estándar es el hidrociclón con inyección axial de agua, propuesta por Farghaly y cols (2010). El objetivo de las inyecciones controladas de agua es reducir el arrastre de partículas finas hacia el underflow, creando un flujo radial que se dirige hacia el centro del hidrociclón. Las inyecciones controladas de agua redirigen las partículas menos densas hacia el vortex secundario, logrando una mayor separación y mejorando la eficacia. Este es un diseño más complejo que el del hidrociclón estándar que requiere un estudio minucioso de la altura a la que han de realizarse las inyecciones.

### **1.3. EFECTO FISH-HOOK**

En ocasiones las partículas finas que debieran alcanzar el vórtice secundario son arrastradas por las propias partículas densas o por la estela de estas hacia el vórtice primario, obteniendo así una fracción de partículas que evita la clasificación. Este efecto se conoce como el efecto fish-hook (anzuelo de pesca) y cuyo nombre proviene de la forma que adopta la curva de eficacia en esta situación. Este efecto es más común en hidrociclones de pequeño tamaño y ha sido nombrado en la literatura desde la década de los 80 junto con las diferentes teorías que justifican este efecto (Zhu y cols, 2014).

Uno de los primeros estudios atribuía el efecto fish-hook a la limitación en la medición de partículas inferiores a 38  $\mu\text{m}$ . Bourgeois y Majumder descartaron esta limitación de las técnicas de medición mediante estudios estadísticos y atribuyeron el efecto fish-hook a la variación de la concentración de la alimentación (Finch y cols, 1983).

Actualmente, los estudios de Kraipech y cols. (2005) son los más aceptados ya que engloban y coinciden con otras teorías. En estos se determina que la causa del efecto fish-hook es el arrastre de partículas finas por la estela de partículas gruesas ya que esto justifica la distribución normal de partículas que se genera en la zona del fish-hook. Así, cuanto menor es el tamaño de partícula, mayor es el efecto del arrastre. La Figura 9 presenta dos curvas de eficacia en las que se muestra el efecto fish-hook. La región del fish-hook corresponde a la sección de diámetros de partículas inferiores, donde la eficacia presenta un mínimo.

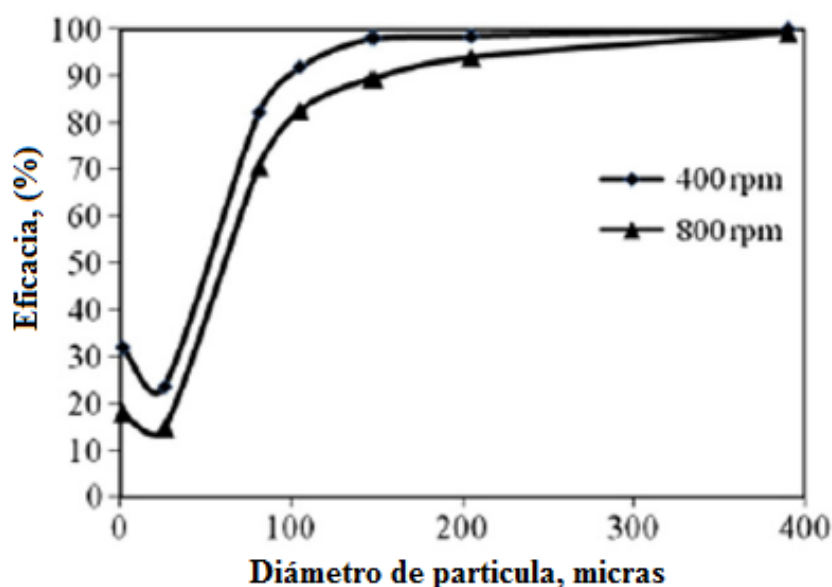


Figura 9.- Curvas de eficacia que presentan el efecto fish-hook (Nageswararao, 2000).

#### 1.4. VENTAJAS Y APLICACIONES

La separación de partículas sólidas dispersas en una suspensión es una operación de separación básica requerida en diversos campos. Entre los dispositivos comúnmente empleados se destacan los filtros, las centrífugas y los hidrociclones. Los sistemas de filtración básicos son lentos y las centrífugas requieren grandes cantidades de energía para alcanzar las altas velocidades rotacionales a las que trabajan. Los hidrociclones son una alternativa económica ya que la poca energía que ha de suministrárseles es principalmente para superar la caída de presión que se genera (Sripriya, 2007).

Svarovsky, en su libro *Solid-Liquid Separation* (1977), define las siguientes ventajas de los hidrociclones frente a otros sistemas de separación:

- Son sistemas de diseño sencillo, de elementos estáticos y coste de adquisición e instalación bajo, que requieren poco mantenimiento.
- Son muy versátiles, pueden emplearse en diversas aplicaciones tales como concentrado de lodos, clarificación y desgasificación de líquidos, lavado y clasificación de sólidos o separación de dos líquidos inmiscibles, entre otras.

- En comparación a otros sistemas de separación son relativamente pequeños, lo que se traduce en un tiempo de residencia menor y menor espacio destinado a su emplazamiento.
- En el seno del hidrociclón se genera una gran fuerza de cizallamiento que rompe los posibles aglomerados existentes en el flujo.

Por otra parte estos dispositivos presentan algunas desventajas:

- Son sistemas limitados en varios aspectos tales como la eficacia de separación en términos de curva de eficiencia, poder de clarificación o rango de operación de corte. Estas limitaciones pueden paliarse mediante disposiciones en etapas, aunque conllevan costes adicionales de energía e inversión.
- Dependiendo del material del que estén compuestos, son susceptibles a la abrasión en mayor o menor medida. El empleo de hidrociclones de poliuretano, por ejemplo, reduce el efecto abrasivo.
- Una vez instalados y en operación, son sistemas bastante inflexibles ya que su eficacia depende fuertemente del caudal y concentración de la alimentación, así como de la inestabilidad de la misma.
- Las fuerzas de cizallamiento que pueden suponer una ventaja a la hora de romper aglomerados se convierten en una desventaja si desea combinarse la floculación en la separación, ya que rompen los flóculos generados.

En cuanto a las aplicaciones, como ya se ha mencionado anteriormente, los hidrociclones pueden considerarse la técnica predominante a la hora de eliminar partículas sólidas de líquidos a nivel industrial, siendo ampliamente empleados en procesos clásicos de clarificación, espesamiento, deslamado etc. En este apartado se incluye una breve descripción de algunos de los novedosos procesos en los que los hidrociclones están siendo empleados para tener así una ligera idea de la gran expansión que está aplicación típica de la industria minera está experimentando en los últimos años.

A parte de la industria minera, el tratamiento de aguas es una de las operaciones en las que los hidrociclones resultan más efectivos. En este tipo de operaciones el origen y el tipo de agua a tratar es el parámetro que determina la operación a efectuarse y, dada la versatilidad de los hidrociclones, estos pueden ser empleados para el tratamiento de aguas de orígenes muy diferentes.

Una de las aplicaciones más actuales que pueden hallarse en este mismo campo ha sido estudiada por Bayo y cols. (2015) y es la estabilización de lodos activos procedentes de aguas urbanas. Estas aguas se caracterizan por tener una cantidad importante de materia biodegradable y metales pesados. Se plantea una separación mediante hidrociclones en la que previo tamizado, el overflow del hidrociclón es recirculado a la operación de tamizado. En este mismo campo, Rastogi y cols. (2008) estudiaron el empleo de cenizas de carbón para absorber los colorantes presentes en aguas residuales, aguas procedentes sobre todo de la industria textil. En esta aplicación, los hidrociclones permiten realizar la absorción en modo continuo y suponen una ventaja frente a los filtros y a las centrífugas.

Estudios menos específicos como los de Yang (2013) dan una idea de la repercusión que los hidrociclones pueden llegar a tener en el tratamiento de aguas y de las posibilidades que pueden ofrecer en operaciones de clarificación y espesamiento por sí solos o en combinación con otros sistemas. Una de estas posibilidades es combinar los hidrociclones con destilación en membranas para el procesado de aguas de laboratorio ricas en nitrógeno (Bader y cols.,

2005). Otra aplicación incluye la mejora de sistemas de riego por goteo para el tratamiento de aguas (Yurdem y cols., 2010). Lee (2015) propone el empleo de hidrociclones para la separación de materia orgánica de aguas residuales urbanas. Debido a la baja densidad de la materia orgánica, el empleo de un hidrociclón de baja presión (LPH) es suficiente.

Cabe destacar también que un cambio en la geometría del hidrociclón puede darle mayor versatilidad. Basándose en esto, Puprasert (2004) propone el empleo de hidrociclones de diámetros distintos en el pretratamiento de aguas. Un primer hidrociclón de diámetro nominal grande separa las partículas más gruesas y evita el atasco que estas producen. A continuación se dispone en serie un hidrociclón de diámetro menor que actúa como sistema de separación de alta eficacia. En este segundo hidrociclón cabe la posibilidad de instalar un recipiente cilíndrico denominado “grit pot” a la salida del underflow que concentra el underflow, reduciendo así su volumen. Cuando el hidrociclón está equipado de grit pot su eficacia disminuye y el tamaño de corte aumenta más bruscamente, aunque supone una ventaja en comparación con los clásicos tanques de sedimentación ya que puede paliarse la disminución de la eficacia aumentando la presión.

Otros campos de interés en los que los hidrociclones son aplicables incluyen el reciclaje y tecnologías medioambientales. Sierra y cols. (2010) proponen el empleo de hidrociclones para la eliminación de metales pesados de cenizas de piritas (por ejemplo, As, Cd, Cu, Hg; Pb y Zn). Schwier y Anderson (2009) proponen el empleo de hidrociclones para la recuperación de suelos contaminados por petróleo o aceites y metales pesados. Otras aplicaciones medioambientales más específicas son, entre otras, el refuerzo del efecto de la separación en la eliminación de azufre del fuel gas (Bokotko, 2005) y la eliminación en condiciones de baja presión de nanopartículas mediante hidrociclones de flujo axial (Tsai, 2004).

## 2. OBJETIVOS

En este trabajo se realizará un estudio del efecto de las condiciones de proceso y geometría del hidrociclón sobre la clasificación de pulpa caolinífera con microciclones.

Los usos del caolín son muy numerosos y variados hasta el punto que el empleo de esta importante materia prima llega a cubrir más de un centenar de aplicaciones en productos industriales muy diferentes entre sí tales como el papel, los cerámicos o productos agroquímicos, entre otros. Un caolín comercial de alta calidad apenas deberá tener partículas superiores a las 20  $\mu\text{m}$ , lo que supone una riqueza en caolinita por encima del 80%.

Los hidrociclones pueden ser empleados para realizar una clasificación selectiva del caolín. Basándose en la diferencia en el tamaño del grano, la separación se produce por un simple proceso mecánico, obteniéndose así el caolín refinado.

El presente trabajo tiene dos objetivos principales. Por una parte estudiar el efecto de la presión en la calidad de separación de los hidrociclones y por otra determinar la influencia de los parámetros geométricos principales en la eficacia del hidrociclón.

Para ello se fijaron una serie de objetivos parciales. El primero de ellos es tener un buen manejo y control de la planta piloto en la que se realizan los ensayos. Por otro lado se pretende corroborar que la puesta en marcha y la metodología de muestreo preestablecida por la empresa es aplicable a los ensayos de microciclado. Asimismo, resulta indispensable desarrollar una metodología para el tratamiento de las muestras. Por último se fija como objetivo elaborar una serie de ensayos que contribuyan a desarrollar una metodología para el análisis y tratamiento de los datos y poder así determinar los dos objetivos principales fijados.



### 3. EXPERIMENTAL

La planta piloto utilizada ha sido desarrollada para estudiar el comportamiento de hidrociclones en la clasificación de arenas ultrafinas. Con el fin de caracterizar y optimizar los hidrociclones, se estudian la influencia de distintos parámetros geométricos de los mismos para poder desarrollar nuevos y más eficientes prototipos.

#### 3.1. PLANTA PILOTO

La planta piloto en la que se realizaron los ensayos pertenece a la empresa NOVATTIA DESARROLLOS S.L. Esta planta está compuesta principalmente por la estructura fija que la sostiene, el tanque de homogeneización, el sistema de bombeo, los hidrociclones HCM-50A/B, el cuadro eléctrico, los conductos para el transporte y la valvulería.

La Figura 10 incluye un diagrama de flujo de la planta. El depósito de preparación (TK-1) agita la alimentación que se manda a la tolva (TK-2) y desde allí se bombea hasta el hidrociclón empleando la bomba correspondiente (BK-039 o BK065, dependiendo de si se está trabajando con el hidrociclón HCM-50A o HCM-50B), pasando primero por un medidor de caudal y un medidor de presión. En el hidrociclón se efectúa la separación donde overflow y underflow se recogen en el depósito de recogida de muestra (TK-3) y a continuación se devuelven conjuntamente al depósito de preparación. Así, en relación a las arenas ultrafinas, la planta opera en circuito cerrado.

La planta piloto se controla y supervisa mediante un software propio. Se introducen en el ordenador los puntos consigna de las condiciones de operación, y se envían a los variadores de frecuencia que actúan sobre los elementos del sistema.

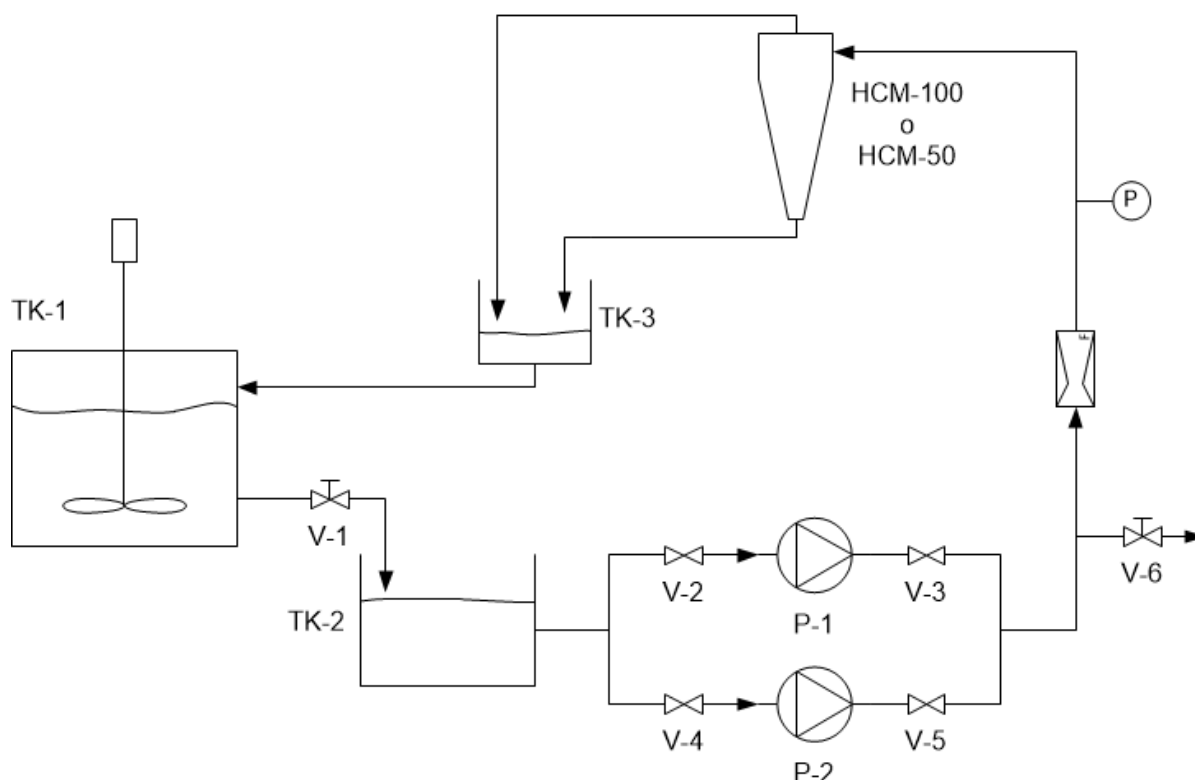


Figura 10.- Diagrama de flujo de la planta.

La Tabla 1 incluye la nomenclatura de los equipos empleados.

Tabla 1.- Nomenclatura de los equipos principales que componen la planta piloto.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Equipo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Equipo</b>
TK-1	Depósito de preparación	V6	Válvula de manguito DN25
TK-2	Tolva de alimentación	F	Medidor de caudal
TK-3	Depósito tomamuestra	P	Transmisor de presión
V1	Válvula de manguito DN100	HCM-50A	Hidrociclón de cono corto
V2,V3,V4, V5	Válvulas de guillotina	HCM-50B	Hidrociclón de cono largo
BK-065, BK-039	Bombas de desplazamiento positivo		

La estructura de la planta consta de perfiles de aluminio anodizado. Tiene un montaje sencillo, sin soldaduras, pudiéndose así reubicar la planta si fuese necesario.

El depósito de preparación es un tanque octogonal cerrado de acero inoxidable de 1,2 m de altura. Su volumen máximo es de 670L y está dotado exteriormente de un nivel que permite conocer el volumen de alimentación disponible en todo momento.

En la parte superior de este depósito se encuentra el agitador que es accionado mediante variador de frecuencia. Este agitador tiene una potencia de 0,75kW y una velocidad de eje que va desde 50 a 350 rpm. Dada la abrasividad de las arenas, el eje del agitador está ebonitado. En la parte inferior del depósito se encuentra la válvula DN-50, cuyo accionamiento es manual, y sirve para vaciar el depósito.

La válvula DN-100 es una válvula de manguito de accionamiento manual. Se sitúa a la salida del depósito de preparación hacia la tolva de alimentación y permite regular el nivel en esta última.

La tolva de alimentación es también de acero inoxidable, de geometría cuadrada y consta de dos salidas inferiores; una correspondiente a la bomba BK-065 y otra a la bomba BK-039. Las salidas están provistas de válvulas de guillotina de acción manual. Además, la planta piloto está dispuesta de una válvula DN25 para recoger muestra de la alimentación (válvula tomamuestra) y una válvula de seguridad rompedora de vacío, que actúa como un regulador

automático de alivio de depresión y evita que se produzca el vacío en el interior del hidrociclón.

El sistema de bombeo está compuesto principalmente por las bombas BK-065 y BK-039. Son bombas de desplazamiento positivo que son accionadas mediante variadores de frecuencia. Mediante un movimiento mecánico, se llena y se vacía alternativamente el espacio que ocupa el fluido, creando así la succión y la descarga.

La bomba BK039 es una bomba pequeña, con una potencia instalada de 2,2 kW y presión de entre 0 y 10 bares. Su caudal nominal es de 2 m<sup>3</sup>/h. La bomba BK065 tiene una potencia instalada de 7,5kW, un caudal nominal de 35 m<sup>3</sup>/h y presión máxima recomendable de 4 bares.

En cuanto a los medidores, el caudalímetro es un medidor electromagnético con recubrimiento interno de goma dura mientras que el transmisor de presión es de tipo piezorresistivo con membrana de metal soldada resistente al agrietamiento por tensión de corrosión. Estos medidores monitorizan los valores correspondientes y envían la señal al sistema de control, desde el cual se hace el seguimiento.

Los hidrociclones empleados, HCM-50A y HCM-50B, han sido desarrollados por NOVATTIA DESARROLLOS S.L. Están fabricados en material antiabrasivo VULKOLLAN y corresponden a un cuerpo cilíndrico de 50 mm de diámetro. La nomenclatura A y B hace referencia al ángulo de cono del hidrociclón. El modelo HCM-50A es un hidrociclón de ángulo de cono grande, con lo que su conicidad es mayor y su cuerpo más corto. El modelo HCM-50B es un hidrociclón de ángulo de cono pequeño, con conicidad menor y su cuerpo más alargado. El módulo de ensayos permite colocar las dos unidades por separado con sus respectivas llaves de corte para optimizar el tiempo entre ensayos.

Para el caso del hidrociclón HCM-50B (de cuerpo alargado) se emplea la bomba BK065, ya que permite bombear un mayor caudal. La bomba BK039, la pequeña, se empleará para el hidrociclón HCM-50A.

Los elementos de control de los equipos de la planta piloto se sitúan en el cuadro eléctrico. Dispone además de un ventilador con indicador de encendido, el interruptor general y los interruptores específicos para las bombas y el agitador, el conector USB y la seta de paro de emergencia. De esta forma, mediante un software, la planta permite controlar y visualizar algunas de las variables enviando señales a los equipos.

En la Figura 11 se incluye una ilustración del panel principal de control empleado en la planta piloto. Ha sido desarrollado en el Departamento de Electricidad y Electrónica de la UPV/EHU. El sistema está completamente automatizado y se controla íntegramente desde el panel principal, permitiendo fijar las revoluciones por minuto de los tres equipos principales: el agitador (stirrer), la bomba grande (BK065) y la bomba pequeña (BK039).

En la Figura 11 se señala con el 1 el campo dónde se modifican las revoluciones de los equipos; con el 2 se señala el campo encargado de enviar la señal y con el 3 se visualiza y modifica el estado de los equipos (si están en funcionamiento o no).

En la parte superior derecha se muestran los valores de caudal y presión, cuya evolución puede observarse en los dos gráficos inferiores. Estos gráficos son el mejor distintivo de que la planta ha alcanzado el estado estacionario y pueden tomarse muestras.

Además, el menú principal incluye la posibilidad de guardar los archivos de cada ensayo (4) y el botón correspondiente a las alarmas (5) que indican las posibles anomalías que puedan estar dándose.

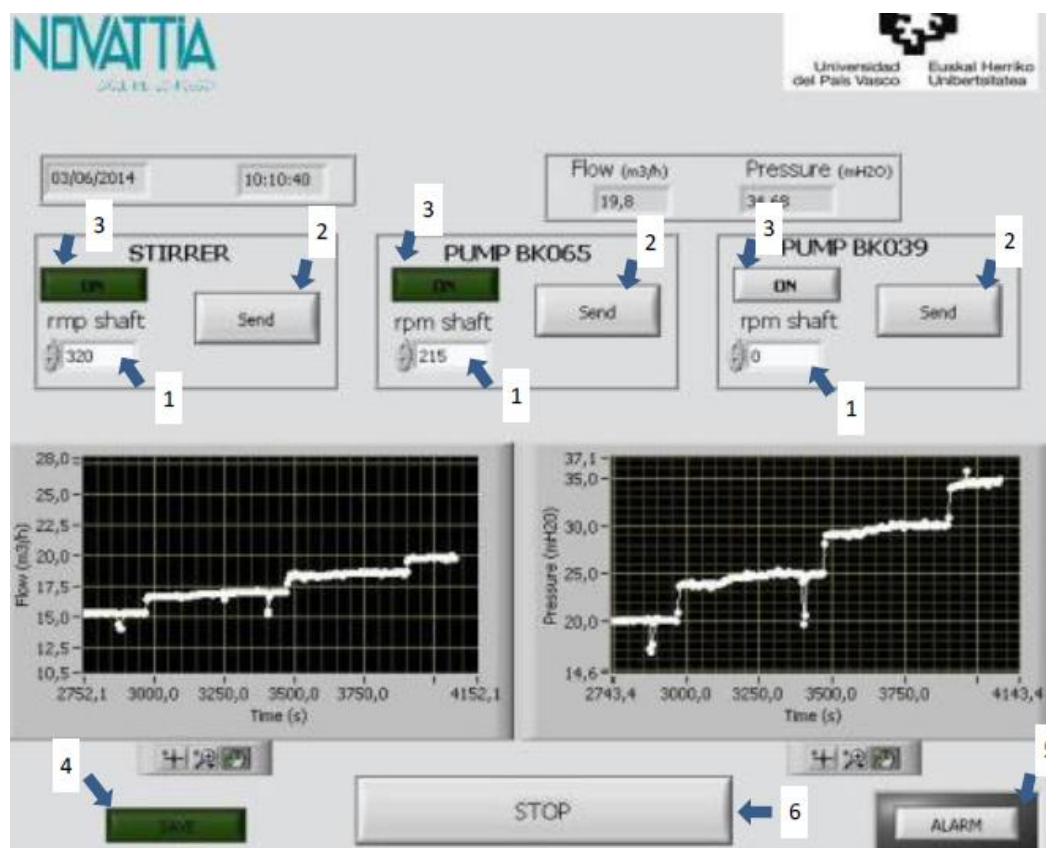


Figura 11.- Menú principal de la planta piloto.

### 3.2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

Se denomina caolín a la arcilla blanca blanda que está compuesta principalmente por el mineral caolinita (mineral arcilloso). El caolín se forma por las alteraciones hidrotérmicas que se dan en la meteorización de otras arcillas o feldespatos. Su extracción se lleva a cabo principalmente en el Reino Unido, Francia, la República Checoslovaca y Estados Unidos.

Los usos del caolín son múltiples, debido a sus propiedades tales como blancura, inercia frente a los agentes químicos, ausencia de toxicidad, fino tamaño de partícula, gran superficie específica, elevado poder cubriente, alta refractariedad, capacidades absorbentes y adherentes, etc. Esto, unido a su abundancia y amplia distribución mundial, hacen del caolín una de las materias primas no metálicas de mayor consumo e importancia industrial.

Además de su vital importancia en la industria de las cerámicas, se usa mucho como blanco de carga en la fabricación de caucho, papel, pinturas y telas, además de ser un constituyente de algunos medicamentos.

La Figura 12 representa la distribución del tamaño de partículas de la alimentación obtenidas por granulometría de difracción laser.

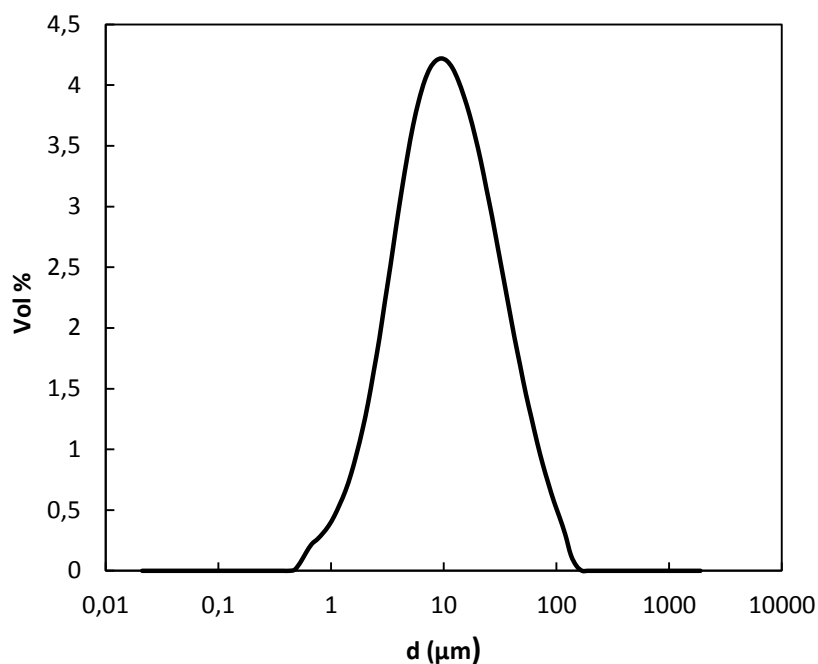


Figura 12.- Distribución de tamaño de partículas de la alimentación (caolín).

Se realizan ensayos en los hidrociclones HCM-50A y HCM-50B variando los spigots y vortex de los mismos, con lo que en primer lugar se ha de seleccionar el hidrociclón con el que se quiera trabajar y su bomba correspondiente de trabajo, dotándole del spigot y vortex del ensayo correspondiente.

Una vez seleccionada la configuración del hidrociclón con la que se va a trabajar, se pone en marcha la planta piloto. Para ello, se accionan los interruptores del cuadro general, se enciende el ordenador y se ejecuta el programa de control.

En primer lugar se seleccionan las condiciones de trabajo del agitador (en torno a 350 rpm) y se esperan unos 5 minutos hasta que la mezcla se homogeneice. A continuación se introducen las revoluciones correspondientes a los ensayos que deseen realizarse en la bomba con la que se trabaja. Los ensayos se realizan a las presiones de 10, 20, 30 y 40 mca. Se espera a que se alcance el estado estacionario y se procede a recoger muestra de overflow, underflow y de alimentación.

Todas las muestras se recogen en botes de dos litros. Overflow y underflow se recogen a las presiones de 10, 20, 30 y 40 mca, mientras que la alimentación tan sólo se recoge a la presión de 20 mca.

La Tabla 2 incluye una descripción de los ensayos realizados. La referencia de cada ensayo atiende a la nomenclatura interna de la empresa. La referencia numérica 10 y 11 hace referencia al tamaño de vortex empleado (10 o 14 mm) y se conoce como ciclo. Las letras A y B hacen referencia al tipo de hidrociclón en el que se realiza el ensayo (A cono corto, B cono largo) y la referencia final 1 o 2 indica el tamaño del spigot empleado (3 o 6 mm).

Tabla 2.- Ensayos realizados en la planta piloto.

Referencia de ensayo	Diámetro del vortex (mm)	Orificio del spigot (mm)	Tipo de cono
10.A.1	10	3	A
10.B.1	10	3	B
10.A.2	10	6	A
10.B.2	10	6	B
11.A.1	14	3	A
11.B.1	14	3	B
11.A.2	14	6	A
11.B.2	14	6	B

### 3.3. MUESTREO Y ANÁLISIS

Para realizar un correcto muestreo y no afectar a la concentración del depósito de preparación, es necesario emplear el mismo tiempo de recogida de muestra de ambas corrientes, ya que los caudales son diferentes (Svarovski, 1984). Sin embargo, basar el muestreo en una medida de tiempo tiene asociado un error más importante que si se basa el muestreo en la medida de los volúmenes. Por lo tanto, se especifica el volumen de muestra de overflow que se desea y se calcula el volumen de underflow mediante el correspondiente balance de materia, que se especifica más adelante en las Ecuaciones 13 y 14. El volumen óptimo de overflow corresponde al menor volumen de muestra que permite obtener una muestra representativa de underflow, ya que así se simplifica y acelera el tratamiento de muestras

El overflow es la muestra que se recoge en primer lugar y la que mayor volumen de muestra precisa. El underflow se recoge en segundo lugar y requiere un volumen considerablemente menor que el overflow. La alimentación se recoge una vez han sido tomadas las muestras de overflow y underflow correspondientes a los ensayos de 20 mca, a esta misma presión.

La curva de eficacia referida al underflow anteriormente definida en la Ecuación 8 puede expresarse en función del caudal y la concentración, tal como muestra la Ecuación 10.

$$\eta_u(d) = \frac{Q_u \cdot C_u \cdot x_u(d)}{Q_f \cdot C_f \cdot x_f(d)} \cdot 100 \quad (10)$$

donde  $Q_u$  y  $Q_f$  son los caudales volumétricos de underflow y alimentación,  $C_u$  y  $C_f$  son las concentraciones de sólido en el underflow y en la alimentación y  $x_u(d)$  y  $x_f(d)$  son la fracción de partículas de diámetro  $d$  en el underflow y en la alimentación.

Del mismo modo, la eficacia puede ser referida al overflow a partir del underflow, de acuerdo con la Ecuación 11:

$$\eta_o(d) = 100 - \eta_u(d) \quad (11)$$

Donde  $\eta_o$  y  $\eta_u$  son las curvas de eficacia de overflow y underflow respectivamente.

Por tanto, la obtención de la curva de eficacia requiere la obtención de los parámetros que muestra la Ecuación 10.

El caudal de alimentación se obtiene directamente gracias al caudalímetro del módulo de ensayos. Las concentraciones de las corrientes se calculan a partir de las muestras tomadas en los ensayos. Aplicando la técnica correspondiente a cada una de las muestras se obtiene la masa de caolín (en adelante borra) y agua en cada muestra, pudiéndose así determinar la concentración de las muestras de acuerdo con la Ecuación 12.

$$C = \frac{m_{borra}}{V_{borra} + V_{agua}} \quad (12)$$

Conocidas las concentraciones de las muestras y el caudal de alimentación, realizando el correspondiente balance de materia (Ecuaciones 13 y 14) pueden, por tanto, determinarse los caudales de las corrientes de overflow y underflow.

$$F = U + O \quad (13)$$

$$F \cdot C_f = U \cdot C_u + O \cdot C_o \quad (14)$$

Dada la naturaleza de las muestras obtenidas, se emplean diferentes técnicas para cada una de las muestras de las distintas corrientes.

Las muestras de underflow proceden de la corriente inferior del hidrociclón. Son muestras cuya concentración es mayor que la de las de overflow y alimentación, así como lo es también el tamaño de los sólidos que la componen. Son relativamente densas con lo que un secado directo permite eliminar el agua de la muestra y obtener así la masa de borra. La finalidad del secado es eliminar la humedad existente en la muestra para la determinación de la masa de borra. De esta manera, se pesa en bote que contiene la muestra de underflow, se pesa un recipiente apto para la estufa, se traspasa la muestra a dicho recipiente y se introduce en la estufa, pesándose también el bote vacío sin muestra. La temperatura óptima de secado se fija en torno a 90 °C ya que un secado estándar a 105°C puede provocar borbotones que provoquen pérdida de la muestra. Así, mediante una simple diferencia de pesada puede determinarse la masa de borra, lo que permite conocer la concentración y caudales de las muestras, de acuerdo con las Ecuaciones 12, 13 y 14.

Las alimentaciones se obtienen a partir de la válvula tomamuestra DN-25, aunque en ensayos más avanzados se toma muestra de alimentación también desde la válvula DN-100 que alimenta la tolva, cómo se explicará más adelante. Son muestras con una concentración y tamaño medio de sólidos intermedia entre underflow y overflow. Por ello se aplican filtraciones y centrifugaciones antes del secado en estas muestras.

Las filtraciones se realizan mediante una bomba de vacío. Se monta el equipo de filtración (bomba de vacío, kitasato, embudo büschner y filtro), se pesa el bote lleno de muestra, se pone la muestra a filtrar, se pesa el bote vacío y se espera a que se filtre. La torta húmeda se recoge en un recipiente apto para estufa y al igual que en el caso de los underflows, se obtiene la masa de borra seca por diferencia de pesada.

En las centrifugaciones se emplea un equipo Digitor-C de la empresa ORTOALRESA. Se procede de manera similar que en los casos anteriores, salvo que en esta ocasión la muestra es centrifugada. Para ello, se pesa el bote lleno de muestra, se distribuye el contenido por igual en recipientes aptos para la centrifuga y se centrifuga 10 minutos a 3100 rpm. Este tiempo y velocidad es suficiente para separar el sólido del agua. Los recipientes deben tener aproximadamente la misma cantidad de muestra con el fin de evitar desequilibrios en la

centrífuga. Se desechan parte de las fases acuosas y se vuelcan las fases densas en un recipiente apto para estufa.

Las muestras de overflow proceden de la corriente que sale por la parte superior del hidrociclón. Son muestras con una concentración y tamaño de sólidos menor a la alimentación y pueden filtrarse o centrifugarse. Dado el volumen de muestra que representa un overflow, las filtraciones requieren de un tiempo de filtración en torno a dos horas mientras que las centrifugaciones requieren 10 minutos. Por ello, los overflows se centrifugan aunque sería posible filtrarlos en caso de haber algún problema con la centrifuga.

Una vez obtenida la masa de borra de cada una de las corrientes, se reserva una cantidad de cada muestra para obtener su distribución de partículas. Esto se realiza mediante granulometría de difracción laser que fueron llevadas a cabo un MASTERSIZER 2000. Este equipo utiliza la difracción láser para medir el tamaño de partícula, obteniéndose como resultado el diámetro de partícula equivalente al mismo volumen de esfera o el diámetro de la esfera de la misma superficie. La técnica de la difracción láser se basa en que las partículas dispersan la luz en todas las direcciones con un patrón de intensidad, que es dependiente del tamaño de partícula. Cuando un haz de luz incide sobre una partícula se produce la dispersión de la luz hacia el frente. El equipo mide esta dispersión y en función de ésta determina el tamaño de la partícula. Así, cuando un haz de luz incide sobre una partícula grande, la dispersión producida es de una intensidad grande pero de ángulo pequeño, mientras que la dispersión producida sobre una partícula pequeña es de menor intensidad pero de mayor ángulo.



## 4. RESULTADOS HCM-50

El análisis de los parámetros obtenidos en cada ensayo permite determinar la influencia de la presión y de distintos parámetros geométricos en la eficacia de separación del hidrociclón.

A continuación se muestra a modo de ejemplo un análisis completo de los resultados obtenidos en el ensayo 10.A.1, que corresponde al ensayo efectuado en el hidrociclón de longitud de cono corto HCM-50A con un vortex de 10 mm y spigot de 3 mm de diámetro.

La presión es una de las condiciones de operación más relevantes en el diseño de hidrociclones. Para analizar cómo afecta la presión en la eficacia de separación del hidrociclón se incluye primeramente un análisis de los parámetros característicos de estudio de un hidrociclón, a saber, su curva de capacidad, el diámetro de corte, la calidad de la corriente de overflow y las curvas de eficacia referidas al underflow a las distintas presiones de ensayo.

Con el fin de determinar la influencia de los distintos parámetros geométricos en la eficacia de separación del hidrociclón, se compara el ensayo 10.A.1 con los ensayos 10.A.2, 11.A.1 y 10.B.1, que corresponden a ensayos con geometría homóloga a excepción del spigot, vortex y cono empleado, respectivamente.

### 4.1. EFECTO DE LA PRESIÓN

La representación del caudal de alimentación en función de la pérdida de carga permite obtener la curva de capacidad, tal como muestra la Figura 13. La Tabla 3 incluye un resumen de los caudales y concentraciones obtenidos a las presiones de ensayo de 10, 20, 30 y 40 mca, así como el tipo de descarga. La Figura 14 representa la evolución del diámetro de corte  $d_{50}$  respecto a la presión, mientras que la Figura 15 muestra la evolución de la calidad de la corriente de overflow que corresponde al  $dp_{90}$  granulométrico. Por último, la Figura 16 muestra las curvas de eficacia referidas al underflow a las distintas presiones de ensayo.

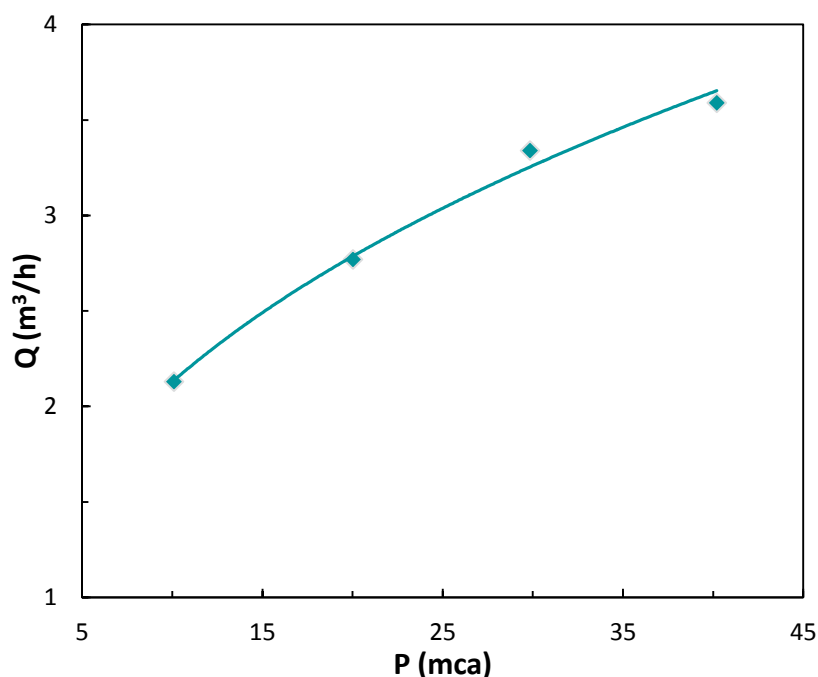


Figura 13.- Curva de capacidad. Vortex 10 mm, spigot 3 mm. Cono A.

En la Figura 13 puede apreciarse que un aumento de la presión de ensayo implica un aumento de la pérdida de carga generada en el hidrociclón, consiguiéndose así caudales superiores.

Tabla 3.- Resultados obtenidos en el ensayo 10.A.1.

<b>Ref Ensayo</b>	<b>P (mca)</b>	<b>Q<sub>f</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>u</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>o</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>C<sub>al</sub> (g/L)</b>	<b>C<sub>ov</sub> (g/L)</b>	<b>C<sub>un</sub> (g/L)</b>	<b>Tipo de descarga</b>
10.A.1.1	10,09	2,13	0,02	2,11	33,26	25,7	726,8	Cordón
10.A.1.2	20,02	2,77	0,04	2,73	33,26	24,1	726,9	Cordón
10.A.1.3	29,84	3,34	0,05	3,29	33,26	23,2	766,8	Cordón
10.A.1.4	40,2	3,59	0,08	3,51	33,26	22,7	510,7	Cordón

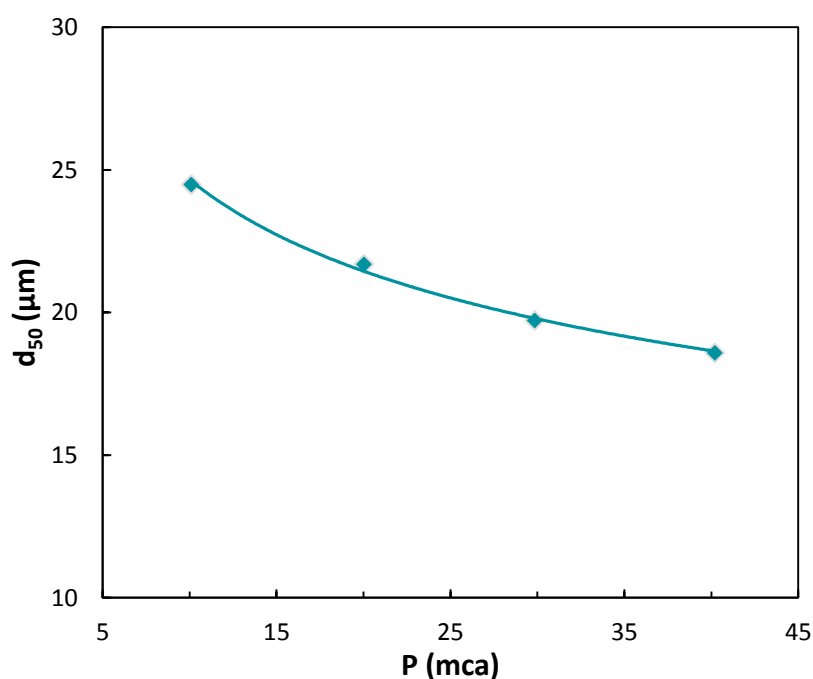


Figura 14.- Evolución del diámetro de corte,  $d_{50}$ . Vortex 10 mm, spigot 3 mm. Cono A.

En la Figura 14 puede observarse que a medida que aumenta la presión el diámetro de corte disminuye, lo que implica un aumento en la eficacia de separación, tal como sugiere Cilliers (1997).

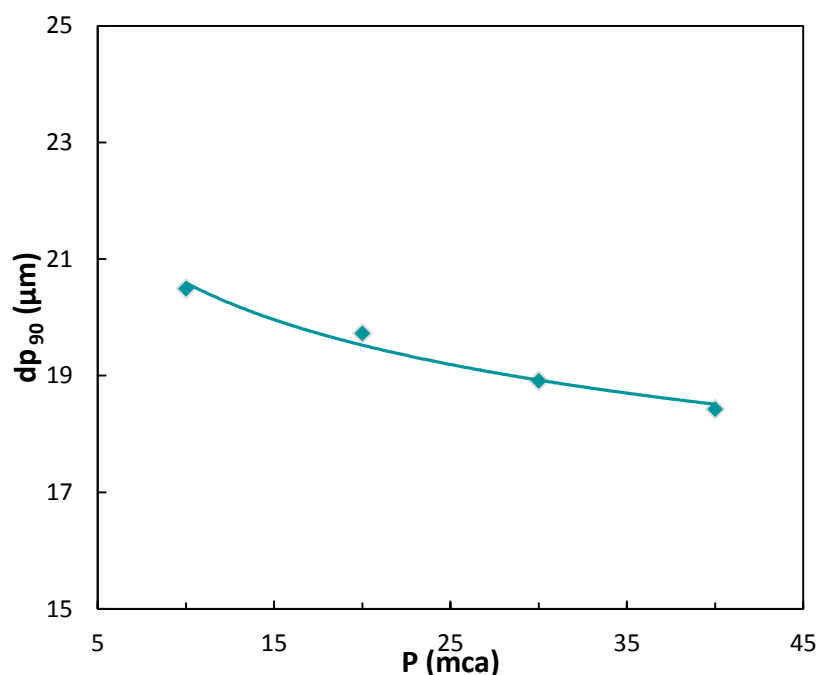


Figura 15.- Evolución de la calidad de la corriente de overflow,  $dp_{90}$ . Vortex 10 mm, spigot 3 mm. Cono A.

En la Figura 15 puede observarse que cuanto mayor es la presión de ensayo menor es el tamaño de las partículas que se obtienen en la corriente de overflow, signo de que la eficacia de separación aumenta, de acuerdo con lo que el diámetro de corte sugiere. Asimismo, la Figura 16 muestra la curva de eficacia referida al underflow a las distintas presiones de ensayo. Avalando esta misma tendencia, se observa como un aumento de la presión de ensayo provoca un desplazamiento hacia la izquierda de la curva de eficacia, lo que indica nuevamente que un aumento de la presión mejora la eficacia de separación, de acuerdo con lo expuesto por Cilliers (1997).

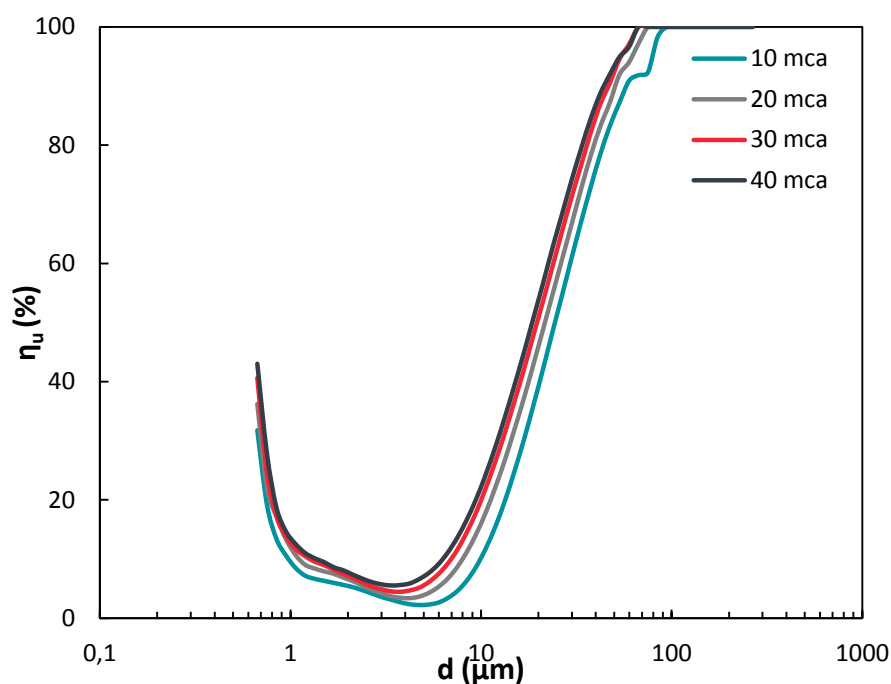


Figura 16.- Curva de eficacia a las distintas presiones de ensayo. Vortex 10 mm, spigot 3 mm. Cono A.

## 4.2. EFECTO DEL DIÁMETRO DEL SPIGOT

La Figura 17 incluye una comparativa de las curvas de capacidad obtenidas entre los ensayos 10.A.1 y 10.A.2. Ambos ensayos se efectuaron en el hidrociclón de cono corto HCM-50A con un vortex de 10 mm. Difieren entre sí en el diámetro del spigot empleado. Para el primero se empleó un diámetro de spigot pequeño de 3 mm mientras que para el segundo se empleó un diámetro de spigot grande de 6 mm.

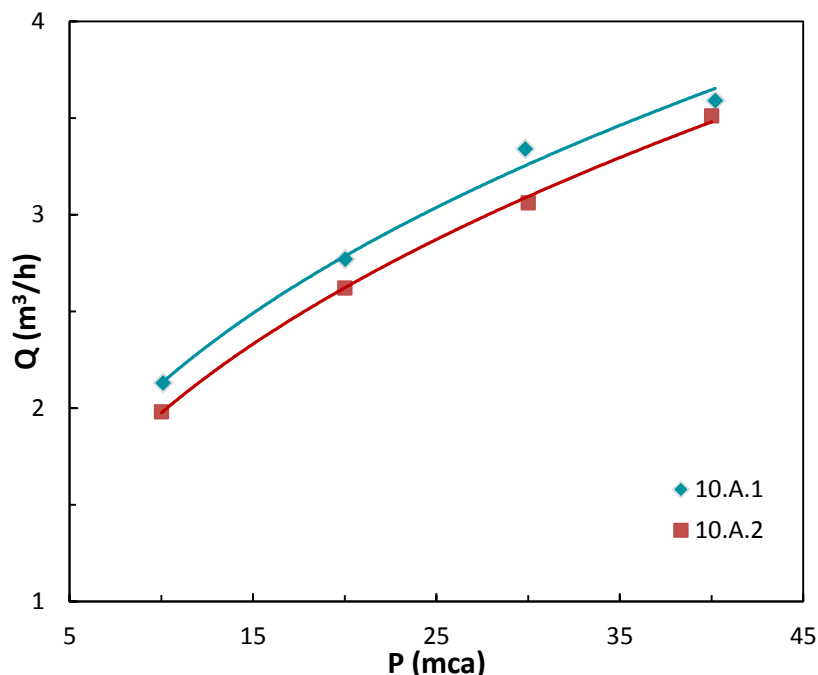


Figura 17.-Comparativa de las curvas de capacidad. Vortex 10 mm. Cono A.

La serie de color azul representada en la Figura 17 hace referencia al ensayo efectuado con el spigot de 3 mm y la roja hace lo propio con el spigot de 6 mm. En principio cuanto mayor es el diámetro del agujero del spigot empleado mayor es la capacidad del hidrociclón, tal como sugiere Cilliers (1997). Sin embargo se ha observado que el tipo de descarga tiene mayor influencia en la curva de capacidad que el diámetro del spigot empleado. Una descarga de tipo cordón genera un núcleo de aire menos desarrollado, y por tanto la capacidad es mayor. La descarga con el spigot de 3 mm es una descarga de tipo cordón, mientras que la descarga con el spigot de 6 mm es de tipo spray, lo que justifica que la capacidad con el spigot más pequeño sea mayor.

La Figura 18 incluye una comparativa entre las curvas de eficacia a las distintas presiones de los ensayos 10.A.1 y 10.A.2 representados por las líneas azules y rojas, ensayos correspondientes a los spigots de 3 y 6 mm, respectivamente. Puede observarse que para una misma geometría y variando el diámetro del spigot empleado, la eficacia de separación es superior con el spigot de mayor tamaño a cualquiera de las presiones de ensayo. Para diámetros de partícula inferiores a una micra puede apreciarse que las eficacias a distintos spigot tienden a equipararse. Esto se debe a que esta región corresponde a la zona en la que se produce el fish-hook, donde las partículas finas son arrastradas por la estela que generan las partículas gruesas.

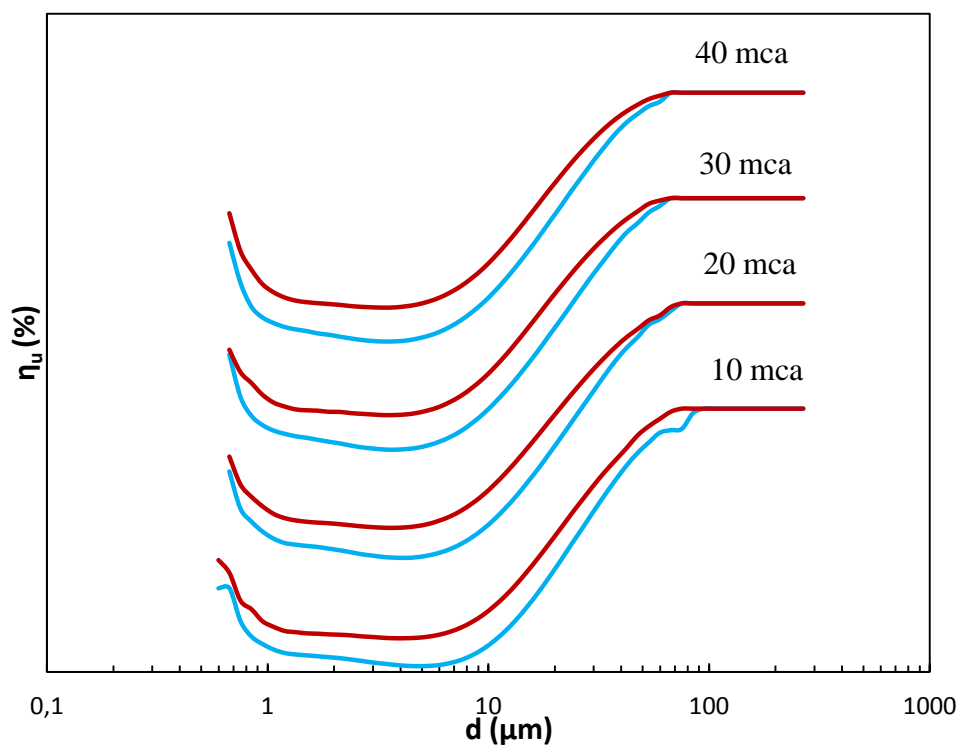


Figura 18.-Efecto del spigot. Vortex 10 mm, como A.

#### 4.3. EFECTO DEL TAMAÑO DEL VORTEX

El estudio de la influencia del diámetro del vortex en la eficacia de separación se realiza mediante la comparativa de los ensayos 10.A.1 y 11.A.1, ensayos con geometría idéntica a excepción de los vortex empleados, siendo estos de 10 mm y de 14 mm respectivamente.

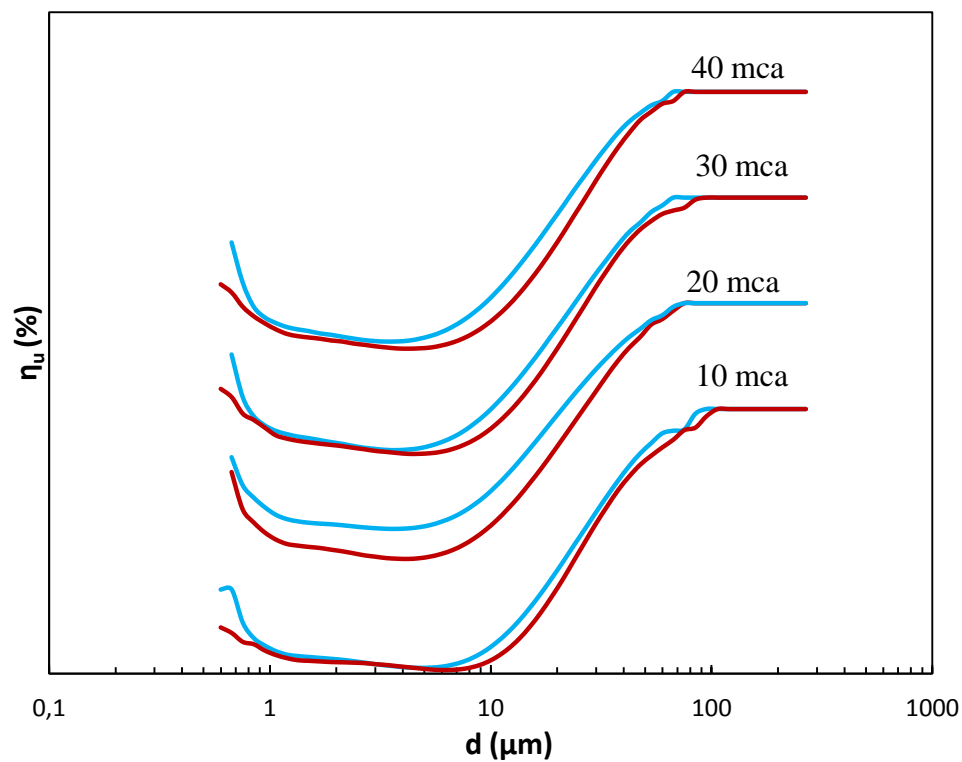


Figura 19.- Efecto del tamaño del vortex. Spigot 3 mm, como A.

Las series azules que se muestran en la Figura 19 hacen referencia a los ensayos efectuados con vortex de 10 mm mientras que las rojas hacen referencia a los ensayos efectuados con el vortex de 14 mm. Puede apreciarse que a cualquiera de las presiones de ensayo las curvas de eficacia correspondientes al vortex de 10 mm están más desplazadas hacia la izquierda, por lo que la eficacia de separación es mayor con el vortex de diámetro inferior. Asimismo puede observarse que las series correspondientes a los ensayos 10.A.1 representadas en color azul presentan una mayor influencia del efecto fish-hook, si bien este está presente en ambos ensayos.

#### 4.4. EFECTO DE LA LONGITUD DEL CONO

La comparativa entre los ensayos 10.A.1 y 10.B.1 permite determinar la influencia del tipo de cono empleado en la eficacia de separación. Los ensayos se realizaron en los microhidrociclones HCM-50A y HCM-50B, donde el primero hace referencia a una longitud de cuerpo cónico corta (ángulo de cono pequeño) y el segundo a una larga (mayor ángulo de cono). La Figura 20 incluye la comparativa de las curvas de eficacia de dichos ensayos, donde los ensayos propios al HCM-50A y al HCM-50B vienen representados por las series azules y rojas, respectivamente.

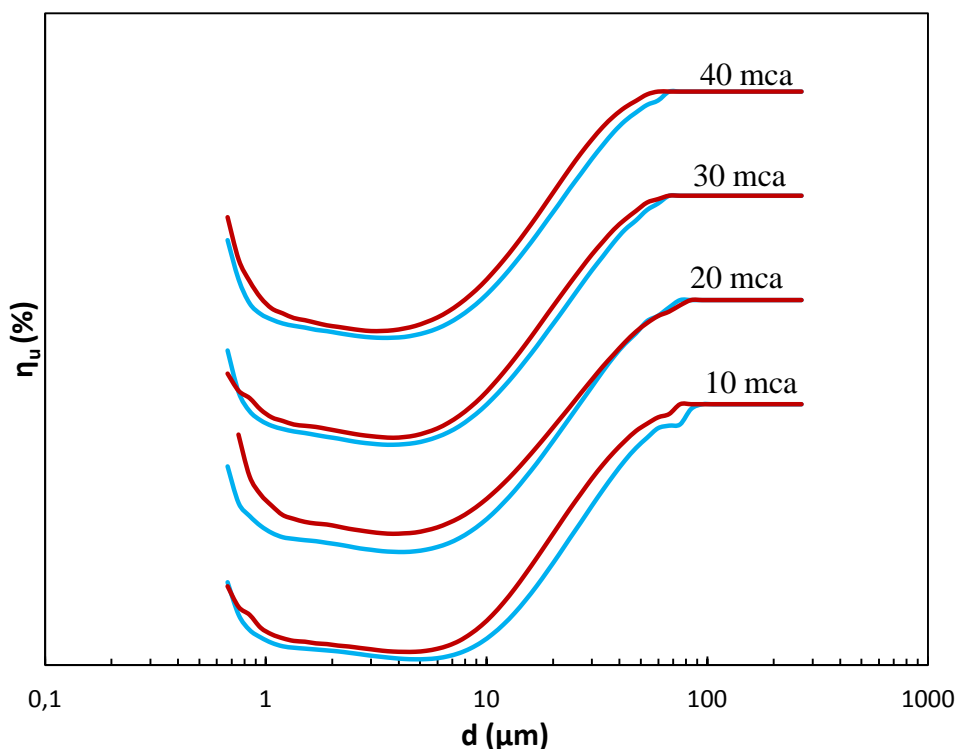


Figura 20.- Efecto de la longitud del cono. Vortex 14 mm, spigot 3 mm.

En la Figura 20 puede observarse que la eficacia lograda con el hidrociclón de cono largo es superior a todas las presiones de ensayo. Esto es lógico si se entiende que cuanto mayor es la longitud del cono mayor es el tiempo de residencia y la longitud del remolino generado en el seno del hidrociclón. Las partículas tienen más opciones de salir por underflow y por tanto mayor es la eficacia de separación, de acuerdo con lo expuesto por Finch (1983).

Aunque no se recoge en esta memoria este mismo análisis se ha realizado para todos los ensayos. El Anexo I se recogen por una parte las curvas de eficacia individuales obtenidas en cada ensayo, pudiéndose así analizar el efecto de la presión sobre las distintas geometrías de

hidrociclón presentadas. Además se incluye la comparativa de las curvas de eficacia obtenidas entre ensayos análogos, determinándose así el efecto que los distintos parámetros geométricos a estudio tienen sobre la eficacia de separación del hidrociclón.

#### **4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con el fin de corroborar que la influencia de la presión, el tamaño del spigot y del vortex y el tipo de cono muestran la misma tendencia que la observada con el ensayo 10.A.1, se incluye la Tabla 4, que contiene los caudales y concentraciones de cada una de las corrientes (alimentación, overflow y underflow) a las distintas presiones de ensayo, así como el diámetro de corte obtenido y el tipo de descarga. Puede observarse que la referencia de cada ensayo se divide en 4 dígitos. Los tres primeros atienden a la nomenclatura planteada en la Tabla 2, mientras que el cuarto hace referencia a la presión a la que se realiza el ensayo, a saber (1) presión de 10 mca, (2) presión de 20 mca, (3) presión de 30 mca y (4) presión de 40 mca. Tabla 4 no incluye los datos de diámetro de corte del ensayo 11.B.2.4, correspondiente a un vortex de 14 mm y agujero de spigot de 6 mm en el HCM-50B a la presión de ensayo de 40 mca. El análisis granulométrico de la corriente de overflow determinó que la muestra tomada se trataba en realidad de una alimentación con lo que se decidió descartar los resultados obtenidos de este ensayo a la presión de 40 mca. Por otra parte, el tipo de descarga especificada en esta misma tabla está referenciada para algunos ensayos con un asterisco, dejando así constancia de que el tipo de descarga no corresponde íntegramente a la especificada en la Tabla 4, como se comentará posteriormente.

Tabla 4.- Resumen de resultados

<b>Ref</b> <b>Ensayo</b>	<b>P</b> <b>(mca)</b>	<b>Q<sub>f</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>u</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>o</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>C<sub>al</sub></b> <b>(g/L)</b>	<b>C<sub>ov</sub></b> <b>(g/L)</b>	<b>C<sub>un</sub></b> <b>(g/L)</b>	<b>d<sub>50</sub></b> <b>(μm)</b>	<b>Tipo de</b> <b>descarga</b>
10.A.1.1	10,09	2,13	0,02	2,11	33,26	25,7	726,8	24,486	Cordón
10.A.1.2	20,02	2,77	0,04	2,73	33,26	24,1	726,9	21,692	Cordón
10.A.1.3	29,84	3,34	0,05	3,29	33,26	23,2	766,8	19,722	Cordón
10.A.1.4	40,20	3,59	0,08	3,51	33,26	22,7	510,7	18,587	Cordón
10.A.2.1	10,00	1,98	0,21	1,77	33,63	24,2	113,0	19,316	Spray
10.A.2.2	20,00	2,62	0,34	2,28	33,63	22,6	107,6	16,882	Spray
10.A.2.3	30,00	3,06	0,21	2,52	33,63	21,8	94,7	15,202	Spray
10.A.2.4	40,00	3,51	0,25	2,19	33,63	21,0	100,9	14,373	Spray
10.B.1.1	10,04	2,61	0,10	2,51	36,10	24,4	326,9	19,939	Mixta*
10.B.1.2	20,17	3,57	0,11	3,46	36,10	23,0	432,2	17,439	Mixta*
10.B.1.3	30,30	4,17	0,13	4,04	36,10	22,3	452,5	17,266	Mixta*
10.B.1.4	40,33	4,33	0,14	4,19	36,10	21,8	461,7	16,224	Mixta*
10.B.2.1	10,00	2,37	0,31	2,12	34,47	22,7	115,1	17,112	Spray
10.B.2.2	20,00	3,45	0,40	3,06	34,47	21,2	134,9	15,141	Spray
10.B.2.3	30,00	3,94	0,49	3,48	34,47	20,3	135,6	14,523	Spray
10.B.2.4	40,00	4,41	0,56	3,82	35,47	19,6	135,7	13,455	Spray
11.A.1.1	9,99	2,65	0,03	2,62	34,70	26,6	817,5	26,816	Cordón
11.A.1.2	20,07	3,68	0,03	3,65	35,70	28,3	811,6	29,696	Cordón
11.A.1.3	30,15	4,17	0,05	4,12	36,70	24,3	878,5	22,697	Cordón
11.A.1.4	40,13	4,67	0,05	4,62	37,70	24,5	915,3	22,596	Cordón
11.A.2.1	9,93	2,63	0,03	2,60	34,70	26,7	736,9	26,453	Mixta*
11.A.2.2	20,02	3,71	0,12	3,59	34,70	25,0	330,2	22,936	Mixta*
11.A.2.3	30,10	4,23	0,14	4,09	34,70	24,2	345,6	20,814	Mixta*
11.A.2.4	40,18	4,69	0,16	4,53	34,70	23,4	356,0	19,778	Spray
11.B.1.1	10,04	2,98	0,07	2,91	37,60	25,0	587,1	20,850	Cordón
11.B.1.2	20,02	4,23	0,06	4,17	37,60	24,9	857,5	20,773	Cordón
11.B.1.3	30,25	4,99	0,07	4,92	37,60	24,3	906,6	20,371	Cordón
11.B.2.1	9,99	2,95	0,15	2,80	33,40	24,6	192,7	22,335	Cordón
11.B.2.2	20,22	4,19	0,24	3,95	33,40	23,9	187,0	21,111	Mixta-Spray
11.B.2.3	30,05	4,83	0,18	4,65	33,40	26,2	224,3	23,397	Spray
11.B.2.4	40,08	5,38	0,24	5,14	33,40	22,5	263,1	---	Spray

Del mismo modo la Figura 21 representa las curvas de capacidad obtenidas en los hidrociclones en los diferentes ensayos.



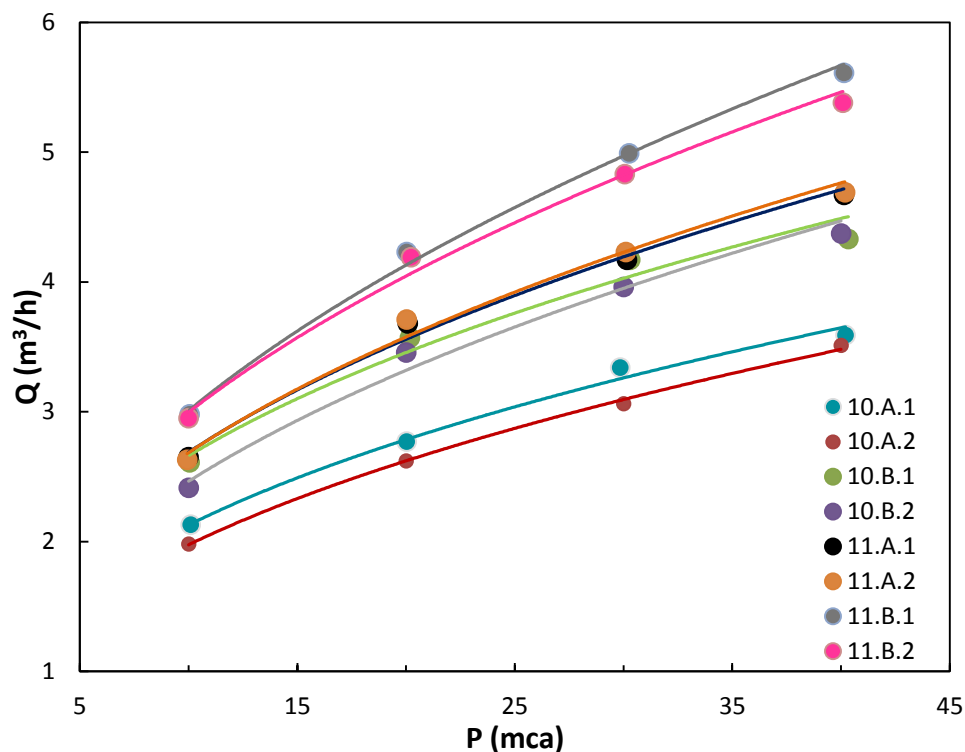


Figura 21.- Curvas de capacidad obtenidas en los ensayos.

Para los ensayos efectuados en el HCM-50A puede observarse que al igual que en el análisis realizado para el ensayo 10.A.1 se obtiene mayor capacidad con el spigot de menor tamaño, lo que era de esperar si se atiende al tipo de descarga.

En el HCM-50B puede observarse también esta misma tendencia, pero en esta ocasión las curvas son más parejas. Conviene mencionar que la descarga observada en el ensayo 10.B.1 no es propiamente una descarga mixta, que supone un estado intermedio entre cordón y spray, sino más bien una descarga que fluctúa entre cordón y spray aleatoriamente y con independencia de la presión, por lo que las curvas de capacidad sean más semejantes en este hidrociclón.

La Figura 22 muestra la evolución del diámetro de corte en función de la presión para cada ensayo y la Figura 23 indica la evolución de calidad de la corriente de overflow, esto es, el  $dp_{90}$  granulométrico.

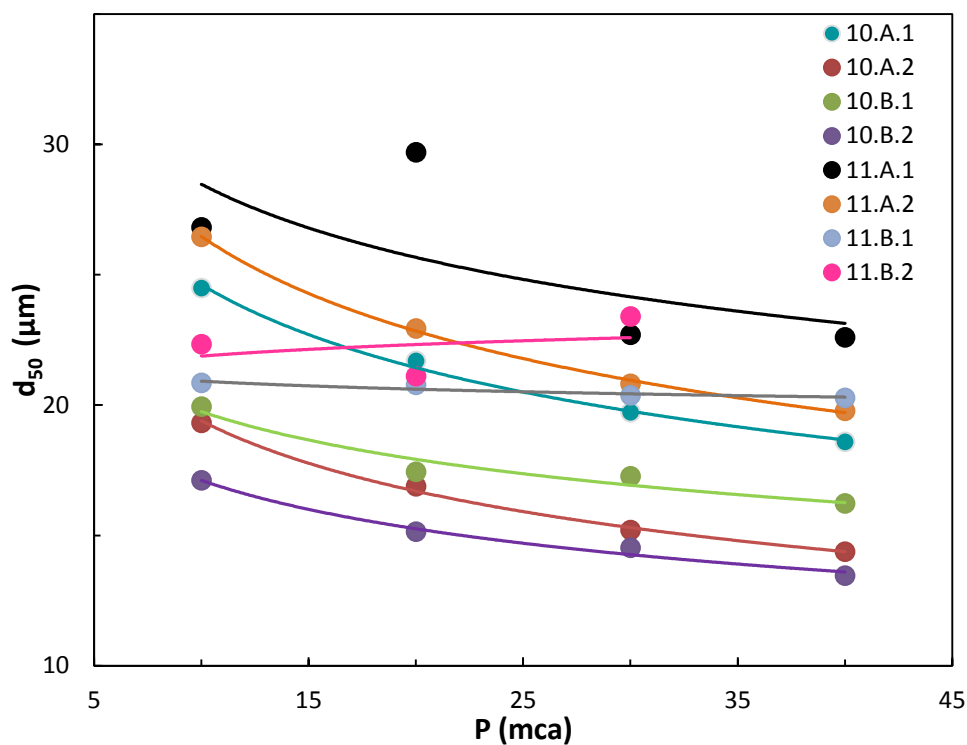


Figura 22.- Evolución del diámetro de corte respecto a la presión.

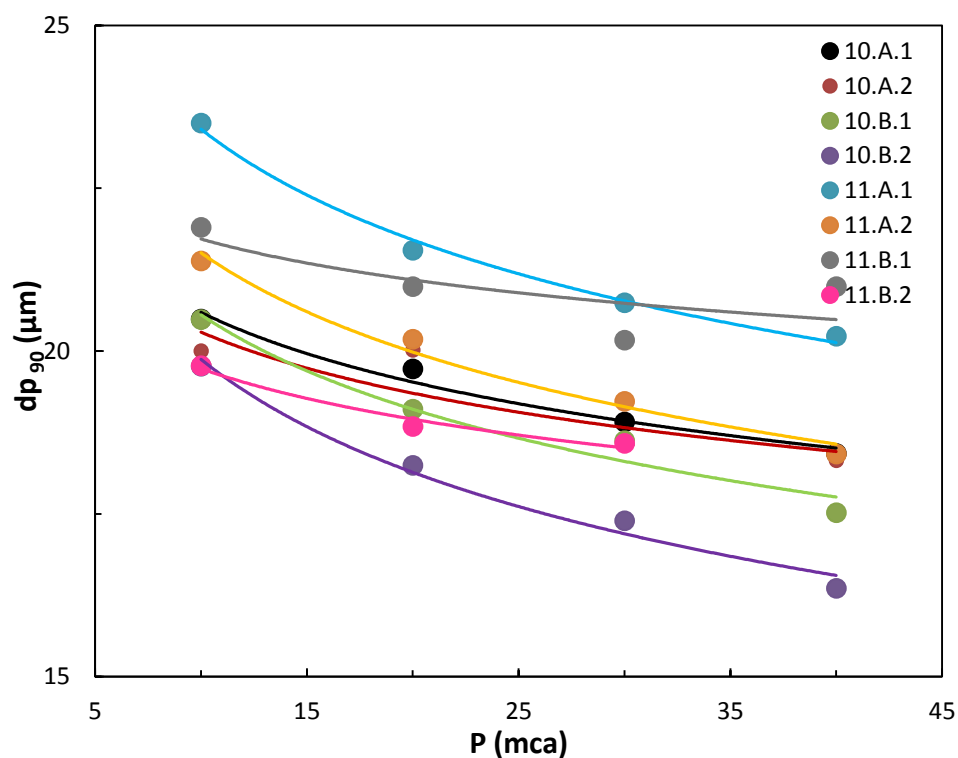


Figura 23.- Evolución del  $dp_{90}$  respecto a la presión.

A la vista de estos resultados puede afirmarse de los ensayos que conforman el ciclo 10 (correspondientes a un vortex de 10 mm) que independientemente del cono y del spigot empleado, un aumento de la presión de ensayo supone una disminución del diámetro de corte, lo que indica un aumento en la eficacia de separación. Esto es apreciable en la Figura 22 correspondiente a la evolución del diámetro de corte en función de la presión. La Figura 16 y

las Figuras 1.A, 2.A, 3.A incluidas en el Anexo I de este informe presentan las curvas de eficacia respecto al underflow para este ciclo y avalan esta misma tendencia. Por otra parte la región situada a la izquierda de la rectas que conforman las curvas de eficacia es la región en la que se produce el efecto fish-hook (diámetros de partícula inferiores a 5 micras). Este efecto es más visible en los ensayos correspondientes al ciclo 11 como puede observarse en las Figuras 4.A, 5.A, 6.A y 7.A del Anexo I.

Todos los ensayos correspondientes al ciclo 11 (vortex de 14 mm) efectuados en el hidrociclón HCM-50A cumplen la tendencia anteriormente descrita; un aumento de la presión supone una mejora de la eficacia, si bien es de mención que en esta ocasión la transición entre curvas es más abrupta. Con el vortex de 10 mm puede observarse una transición de las curvas de eficacia más paulatina para el rango de presiones al que se trabaja.

En cuanto a los ensayos que conforman el ciclo 11 efectuados en el HCM-50B puede decirse que no cumplen estrictamente esta tendencia. Los ensayos de esta configuración con spigot de 3 mm muestran en principio que la eficacia de separación no se ve afectada por la presión de ensayo, tal como puede observarse en la Figura 6.A, donde las distintas curvas de eficacia se solapan. Para el spigot de 6 mm tampoco puede afirmarse rotundamente que un aumento de la presión suponga un aumento de la eficacia de separación, ya que las curvas de eficacia se entrecruzan en varias ocasiones, cosa que puede apreciarse en la Figura 7.A.

El análisis entre dos ensayos consecutivos de un mismo ciclo e hidrociclón permite determinar la influencia del tamaño del spigot. Para el ciclo 10 puede afirmarse que en ambos conos un aumento en el diámetro del spigot supone un aumento en la eficacia, tal como puede apreciarse en la Figura 22 que refleja un menor diámetro de corte para el spigot de 6 mm a todas las presiones de ensayo en ambos hidrociclones. Para el ciclo 11 puede afirmarse que en el caso del HCM-50A al aumentar el diámetro del spigot el  $d_{50}$  disminuye y por tanto la eficacia de separación aumenta. En el HCM-50B esta tendencia no es tan clara, por una parte puede decirse que se obtiene mayor diámetro de corte con el spigot de mayor tamaño, tal como se aprecia en la Figura 22, aunque si se analizan la Figura 10A correspondiente a la comparativa de las curvas de eficacia referidas al underflow entre los spigots de 3 y 6 mm puede decirse que la eficacia lograda para ambos spigot es bastante pareja.

De la comparativa entre ensayos similares correspondientes a ciclos distintos se puede analizar la influencia del tamaño del vortex en la eficacia de separación. Para una misma geometría a excepción del diámetro de vortex empleado, puede afirmarse que el vortex de 10 mm diámetro supone una mejora en la eficacia de separación en comparativa al vortex de 14 mm. Además, puede afirmarse que la influencia del vortex es mayor en el hidrociclón HCM-50A, ya que la diferencia entre el diámetro de corte de ensayos equiparables de distintos ciclos es mayor en el caso del hidrociclón de cono corto, tal como puede observarse en las Figuras 11.A, 12.A y 13.A incluidas en el Anexo I.

La comparativa entre conos permite determinar que la eficacia de separación obtenida en el HCM-50B es superior a la obtenida en el HCM-50A para cualquier geometría semejante de ensayo. Para el ciclo 10 puede afirmarse que en el spigot de 3 mm la diferencia en la eficacia de separación entre los conos es mayor que con el spigot de 6 mm. Por otra parte, esta diferencia en la eficacia de separación entre los distintos conos se hace menos perceptible a medida que aumenta la presión. En el ciclo 11 se observa nuevamente que la eficacia obtenida en el cono largo es superior para los ensayos realizados con el spigot de 3 mm, mientras que los ensayos pertenecientes a este ciclo con spigot de 6 mm muestran eficacias de separación

próximas entre los distintos conos empleados, de acuerdo con lo expuesto en las Figuras 14.A, 15.A y 16.A.

Para finalizar, los resultados obtenidos de las características granulométricas del overflow son signo de la eficacia de separación y, a excepción de los resultados obtenidos en el ensayo 11.B.2, concuerdan con lo hasta ahora expuesto: a mayor presión menor  $dp_{90}$ , tal como muestra la Figura 23. Asimismo, cuanto mayor es el diámetro del spigot y más largo es el cono empleado, menor es el  $dp_{90}$ , lo que indica una mejora de la eficacia de separación,

## 5. CONCLUSIONES

Del presente Trabajo puede concluirse primeramente que los ensayos planteados así como la metodología de tratamiento de muestras y datos resultan válidos.

Respecto a las condiciones de ensayo puede concluirse que un aumento de la presión implica una disminución del diámetro de corte  $d_{50}$ , así como una mejora de la calidad de la corriente de overflow, el tamaño de las partículas que sale por el rebose es menor (menor  $dp_{90}$ ). Además, las curvas de eficacia referidas al underflow se desplazan hacia la izquierda, signo también de que la eficacia de separación aumenta. En el hidrociclón de cono largo con vórtex de 14 mm y spigot de 3 mm puede observarse que la eficacia de separación no se ve afectada por la presión de ensayo, lo que puede ser indicativo de que a la menor presión de ensayo correspondiente a 10 mca se alcanza la separación máxima posible para esta geometría en concreto.

En cuanto a la geometría de los elementos que componen el hidrociclón, respecto al spigot puede afirmarse que un aumento en el diámetro del spigot supone, en general, una mejora de la eficacia de separación.

El tipo de descarga es un parámetro aleatorio que se ve afectado por la concentración y el diámetro del spigot, entre otros. Se han registrado descargas fluctuantes entre los estados de cordón y spray, lo que sugiere que para la geometría propuesta en estos ensayos el tamaño del spigot empleado es límite. Para corroborar nítidamente lo propuestp por Cilliers (1997), quien afirma que un aumento en el tamaño del spigot supone una mejora de la eficacia del hidrociclón, habrían de plantearse ensayos en los que se consiga una descarga semejante.

Por otro lado se ha observado claramente que una disminución del tamaño del vortex mejora la eficacia de separación independientemente del cono empleado. Además, la mejora de la eficacia que se produce al reducir el vortex es notablemente superior a la que puede conseguirse aumentando el tamaño del spigot. Asimismo, el vortex no influye de manera directa en el tipo de descarga, pudiéndose así evitar la controversia expuesta anteriormente entre tamaño del spigot y tipo de descarga. Por tanto se concluye que para un número de ensayos limitado con requerimiento de aumentar la eficacia de separación es preferible disminuir el tamaño del vortex que aumentar el tamaño del spigot, si bien el cambio físico en planta resulta más tedioso.

La curva de capacidad está relacionada a su vez con el tipo de descarga. Se ha podido observar que una descarga de tipo cordón genera un núcleo de aire menos desarrollado, las partículas se aglomeran en torno al ápex, obstruyen el orificio del spigot y por tanto la pérdida de carga generada en el seno del hidrociclón aumenta, aumentando así la capacidad.

En todos los ensayos propuestos ha podido observarse que se produce el efecto fish-hook. Nageswararao (2000) menciona que este efecto es característico de hidrociclones de pequeño tamaño, aumentando este efecto a medida que se reduce el tamaño del hidrociclón. Por ello cabe esperar que esta misma tendencia esté presente en la caracterización de hidrociclones que NOVATTIA DESARROLLOS S.L. pretende llevar a cabo en una fase próxima del proyecto.

Para finalizar se concluye que cuanto mayor es la longitud del cuerpo cónico del hidrociclón mayor es la eficacia de separación que se obtiene, esto es, la eficacia de separación aumenta a medida que disminuye el ángulo de cono.

## 6. NOMENCLATURA

$a_t$	Aceleración tangencial, $L \cdot t^{-2}$
$B_p$	Bypass, L
$C$	Concentración, $M \cdot L^{-3}$
$C_{al}$	Concentración de la corriente de alimentación, $M \cdot L^{-3}$
$C_{ov}$	Concentración de la corriente de overflow, $M \cdot L^{-3}$
$C_{un}$	Concentración de la corriente de underflow, $M \cdot L^{-3}$
$d$	Diámetro de partícula, L
$d_{50}$	Diámetro de corte, L
$dp_{90}$	Diámetro de partícula, L
$\rho_d$	Densidad de partícula, $M \cdot L^{-3}$
$\rho_f$	Densidad del fluido, $M \cdot L^{-3}$
$F$	Alimentación, M
$F_C$	Fuerza centrífuga, $M \cdot L \cdot t^{-2}$
$F_D$	Fuerza de arrastre, $M \cdot L \cdot t^{-2}$
$F_S$	Fuerza de flotación, $M \cdot L \cdot t^{-2}$
HCM-50A	Hidrociclón de cono corto
HCM-50B	Hidrociclón de cono largo
$m_F$	Caudal másico de alimentación, $M \cdot t^{-1}$
$m_U$	Caudal másico de underflow, $M \cdot t^{-1}$
$n_c$	Eficacia, $L \cdot L^{-1}$
$n_d$	Eficacia corregida, $L \cdot L^{-1}$
$n_o$	Eficacia referida al overflow, $L \cdot L^{-1}$
$n_u$	Eficacia referida al underflow, $L \cdot L^{-1}$
$O$	Overflow, M
$P$	Presión, $M \cdot t^{-2} \cdot L^{-1}$
$Q$	Caudal, $L^3 \cdot t^{-1}$

$Q_f$	Caudal de alimentación, $L^3 \cdot t^{-1}$
$Q_o$	Caudal de volumétrico overflow, $L^3 \cdot t^{-1}$
$Q_u$	Caudal volumétrico de underflow, $L^3 \cdot t^{-1}$
$r$	Radio de órbita, L
$U$	Underflow, M
$u_r$	Velocidad radial, $L \cdot t^{-1}$
$u_\theta$	Velocidad tangencial, $L \cdot t^{-1}$
$u_z$	Velocidad axial, $L \cdot t^{-1}$
$V$	Velocidad, $L \cdot t^{-1}$
$V_{\text{agua}}$	Volumen de agua, $L^3$
$V_{\text{borra}}$	Volumen de borra, $L^3$
$x_F$	Fracción de partículas de diámetro $d$ en la alimentación
$x_U$	Fracción de partículas de diámetro $d$ en el underflow

## 7. BIBLIOGRAFÍA

A. Casali, G. Vallebuona, M. Bustos, G. Gonzalez, P. Gimenez, A soft-sensor for solid concentration in hydrocyclone overflow, *Miner. Eng.* 11 (1998) 375–383. doi:10.1016/S0892-6875(98)00015-6.

C. Aldrich, Chapter One - Hydrocyclones, in: S. Tarleton (Ed.), *Prog. Filtr. Sep.*, Academic Press, Oxford, 2015: pp. 1–24. (2015).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012384746100001X>

C. Puprasert, G. Hebrard, L. Lopez, Y. Aurelle, Potential of using Hydrocyclone and Hydrocyclone equipped with Grit pot as a pre-treatment in run-off water treatment, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 43 (2004) 67–83. doi:10.1016/S0255-2701(02)00154-X.

C. Sierra, J.R. Gallego, E. Afif, J.M. Menendez-Aguado, F. Gonzalez-Coto, Analysis of soil washing effectiveness to remediate a brownfield polluted with pyrite ashes, *Journal of Hazardous Materials* 180 (2010) 602–608

C.J. Tsai, D.R. Chen, H.M. Chein, S.C. Chen, J.L. Roth, Y.-D. Hsu, P. Biswas, W.Li, Theoretical and experimental study of an axial flow cyclone for fine particle removal in vacuum conditions, *Aerosol Science* 35 (2004) 1105–1118

D. Schwier, E.U. Hartge, J. Werther, G. Gruhn, Global sensitivity analysis in the flowsheet simulation of solids processes, *Chemical Engineering and Processing* 49 (2010) 9–21.

D. Woodfield, G. Bickert, Separation of flocs in hydrocyclones—significance of floc breakage and floc hydrodynamics, *Int. J. Miner. Process.* 73 (2004) 239–249. doi:10.1016/S0301-7516(03)00076-0.

G. Zhu, J.-L. Liow, Experimental study of particle separation and the fishhook effect in a mini-hydrocyclone, *Chem. Eng. Sci.* 111 (2014) 94–105. doi:10.1016/j.ces.2014.02.017.

H.H. Murray, H.M. Haydn, Chapter 5 Kaolin Applications, in: *Dev. Clay Sci.*, Elsevier, 2006: pp. 85–109. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572435206020058>.

H. Wang, Y. Zhang, J. Wang, H. Liu, Cyclonic Separation Technology: Researches and Developments, *Chin. J. Chem. Eng.* 20 (2012) 212–219

H. Yurdem, V. Demir, A. Degirmencioglu, Development of a mathematical model to predict clean water head losses in hydrocyclone filters in drip irrigation systems using dimensional analysis, *Biosystems Engineering* 105 (2010) 495–506.

J.A. Finch, Modelling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves, *Powder Technol.* 36 (1983) 127–129. doi:10.1016/0032-5910(83)80018-7.

J. Bayo, J. López-Castellanos, R. Martínez-García, A. Alcolea, C. Lardín, Hydrocyclone as a cleaning device for anaerobic sludge digesters in a wastewater treatment plant, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) 550–557. doi:10.1016/j.jclepro.2014.10.064



J.J. Cilliers, S.T.L. Harrison, The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions, *Chem. Eng. J.* 65 (1997) 21–26.

J. Lee, Practical applications of low-pressure hydrocyclone (LPH) for feed waste and fecal solid removal in a recirculating aquaculture system, *Aquac. Eng.* 69 (2015) 37–42. doi:10.1016/j.aquaeng.2015.08.003.

K. Rastogi, J.N. Sahu, B.C. Meikap, M.N. Biswas, Removal of methylene blue from wastewater using fly ash as an adsorbent by hydrocyclone, *Journal of Hazardous Materials* 158 (2008) 531–540.

L. Svarovsky, *Solid-liquid separation*, 3rd ed., Butterworth & Co., London, 1977.

L. Svarovsky, *Hydrocyclone*, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK, 1984.

M.G. Farghaly, V. Golyk, G.A. Ibrahim, M.M. Ahmed, T. Neesse, Controlled wash water injection to the hydrocyclone underflow, *Miner. Eng.* 23 (2010) 321–325.

M.R. Yalamanchili, J.D. Miller, Removal of insoluble slimes from potash ore by air-sparged hydrocyclone flotation, *Miner. Eng.* 8 (1995) 169–177. doi:10.1016/0892-6875(94)00111-O.

M.S.H. Bader, A hybrid liquid-phase precipitation (LPP) process in conjunction with membrane distillation (MD) for the treatment of the INEEL sodium-bearing liquid waste, *Journal of Hazardous Materials* 121 (2005) 89–108.

Nageswararao K. A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers. *Chemical Engineering Journal* 80 .2000. 251–256 p

R. Anderson, E. Rasor, F. Van Ryn, Particle size separation via soil washing to obtain volume reduction, *Journal of Hazardous Materials* 66 (1999) 89–98.

R.P. Bokotko, J. Hupka, J.D. Miller, Flue gas treatment for SO<sub>2</sub> removal with air-sparged hydrocyclone technology, *Environmental Science & Technology* 39 (2005) 1184–1189.

R Spripriya. M:D Kaulaskar. Studies on the performance of a hydrocyclone and modeling for flow characterization in presence and absence of air core, *Chem. Sci.* 62 (2007)6391-6402

Q. Yang, Z. Li, W. Lv, H. Wang, On the laboratory and field studies of removing fine particles suspended in wastewater using mini-hydrocyclone, *Sep. Purif. Technol.* 110 (2013) 93.

W. Kraipech, A. Nowakowski, T. Dyakowski, A. Suksangpanomrung, An investigation of the effect of the particle–fluid and particle–particle interactions on the flow within a hydrocyclone, *Chem. Eng. J.* 111 (2005) 189–197. doi:10.1016/j.cej.2005.02.022.

## ANEXO I

Resumen de resultados de los ensayos especificados en la Tabla 2. Análisis del efecto de la presión en la eficacia de separación. Figuras 1.A, 2.A, 3.A, 4.A, 5A, 6.A y 7.A.

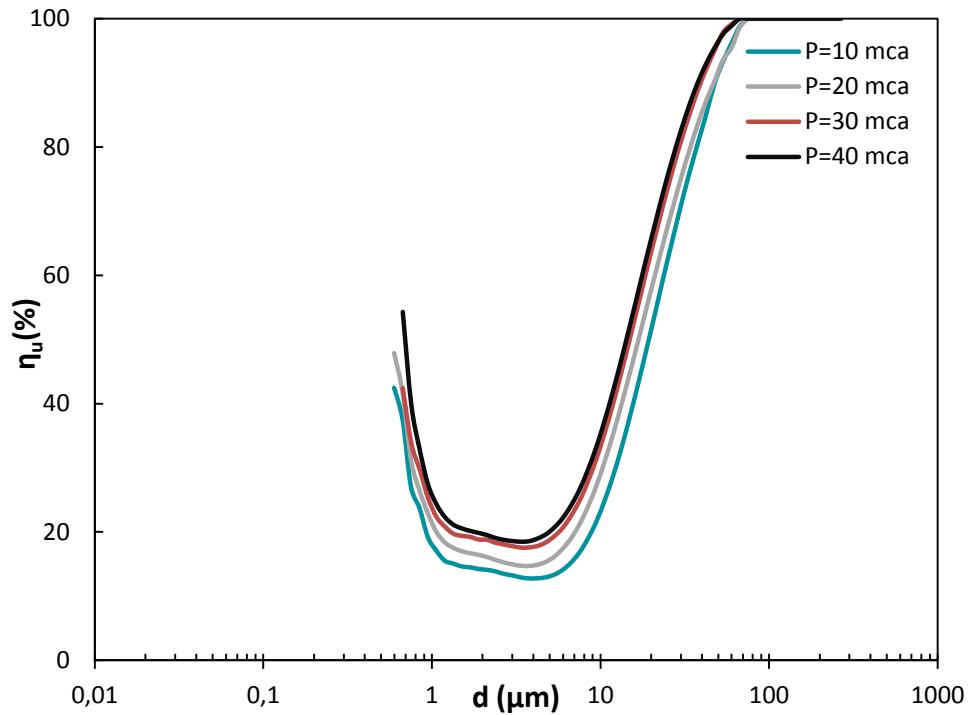


Figura 1.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 10 mm, spigot 6 mm. Cono A.

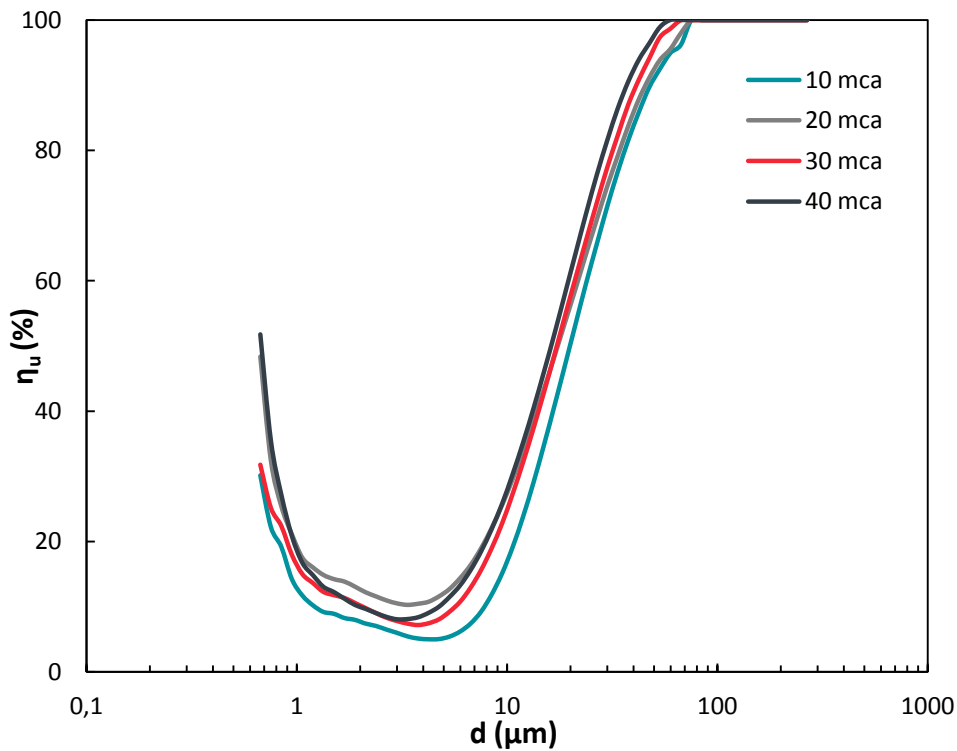


Figura 2.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 10 mm, spigot 3 mm. Cono B.

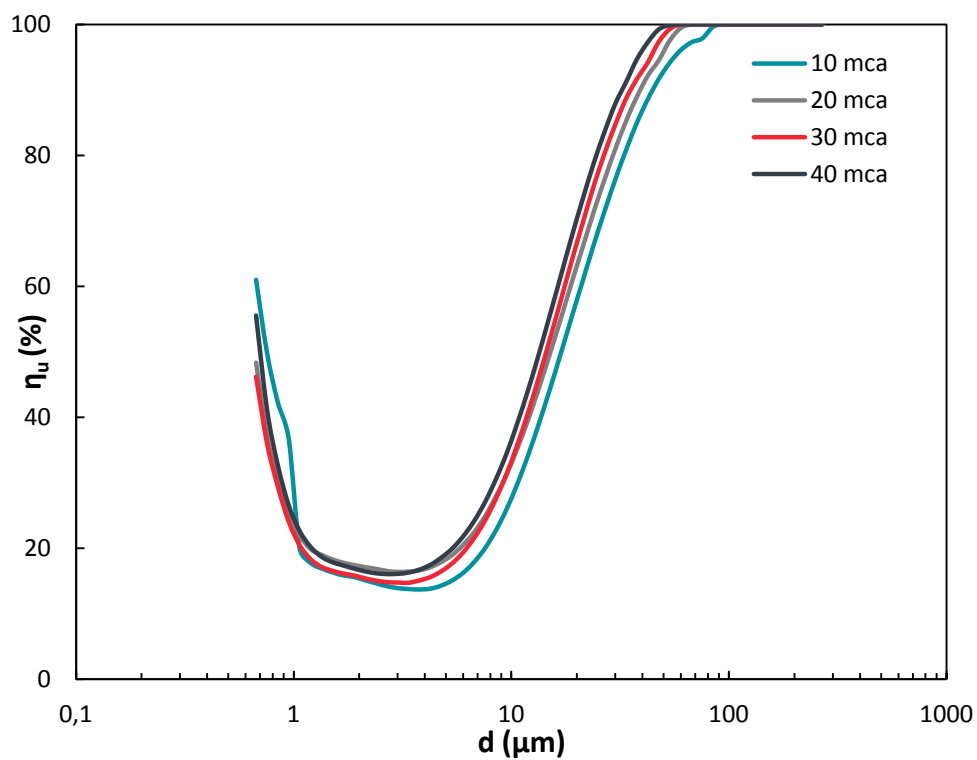


Figura 3.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 10 mm, spigot 6 mm. Cono B.

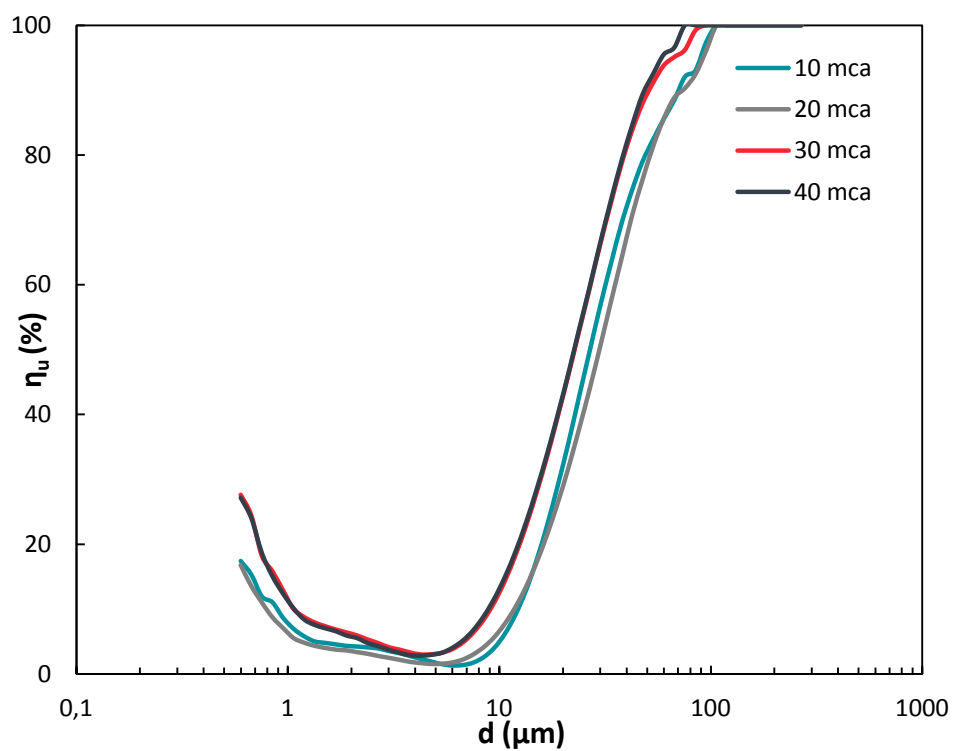


Figura 4.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 14 mm, spigot 3 mm. Cono A.

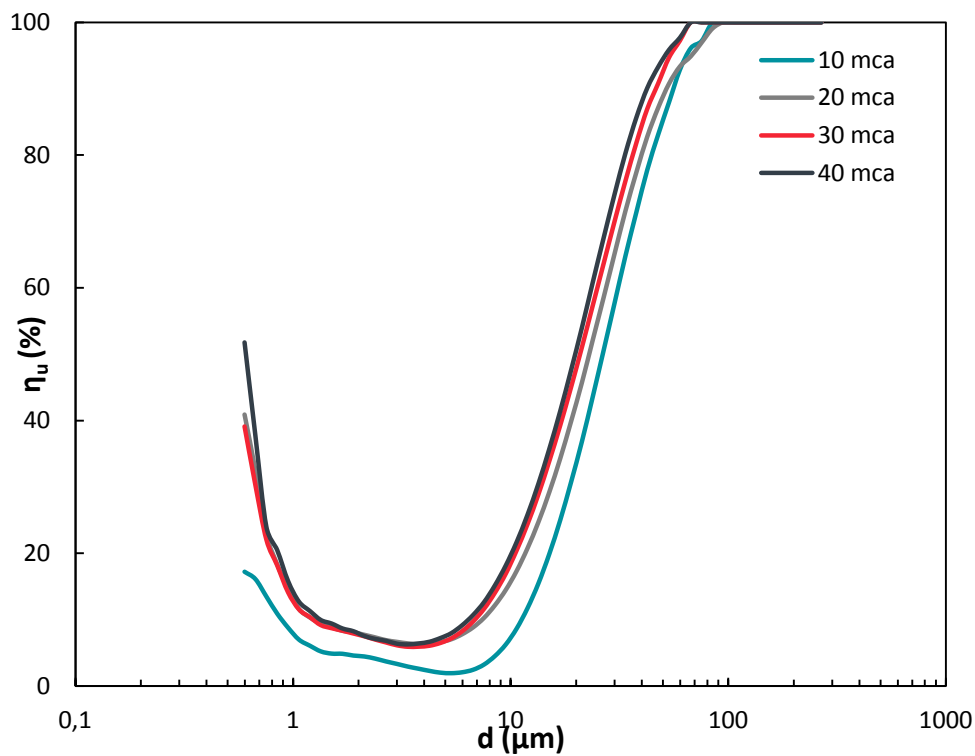


Figura 5.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 14 mm, spigot 6 mm. Cono A.

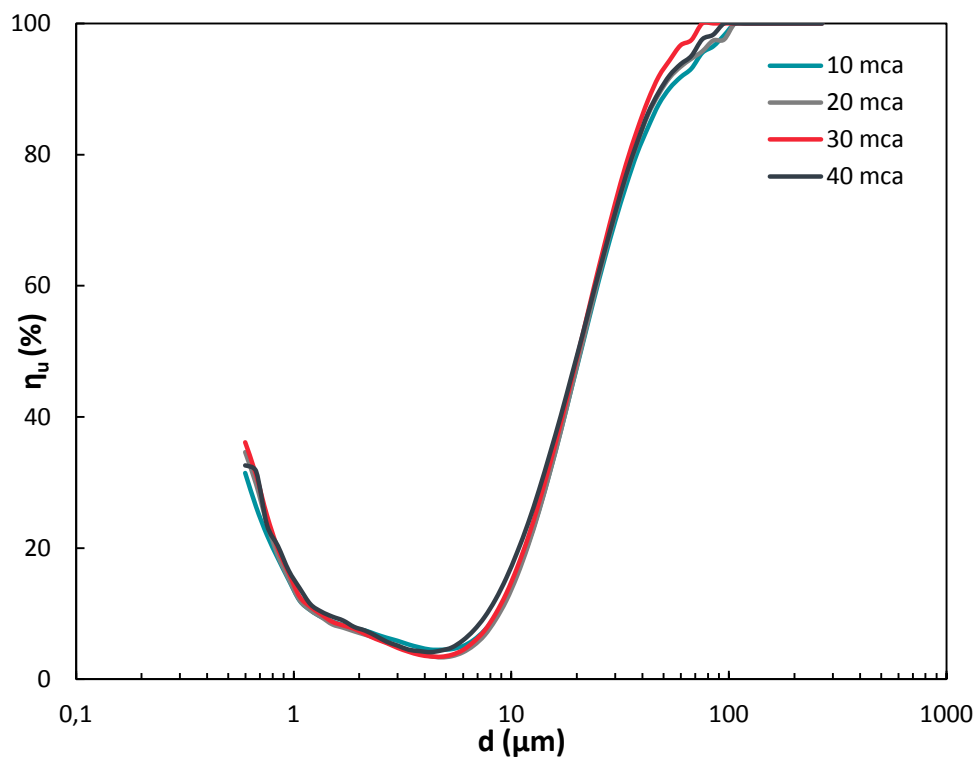


Figura 6.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 14 mm, spigot 3 mm. Cono B.

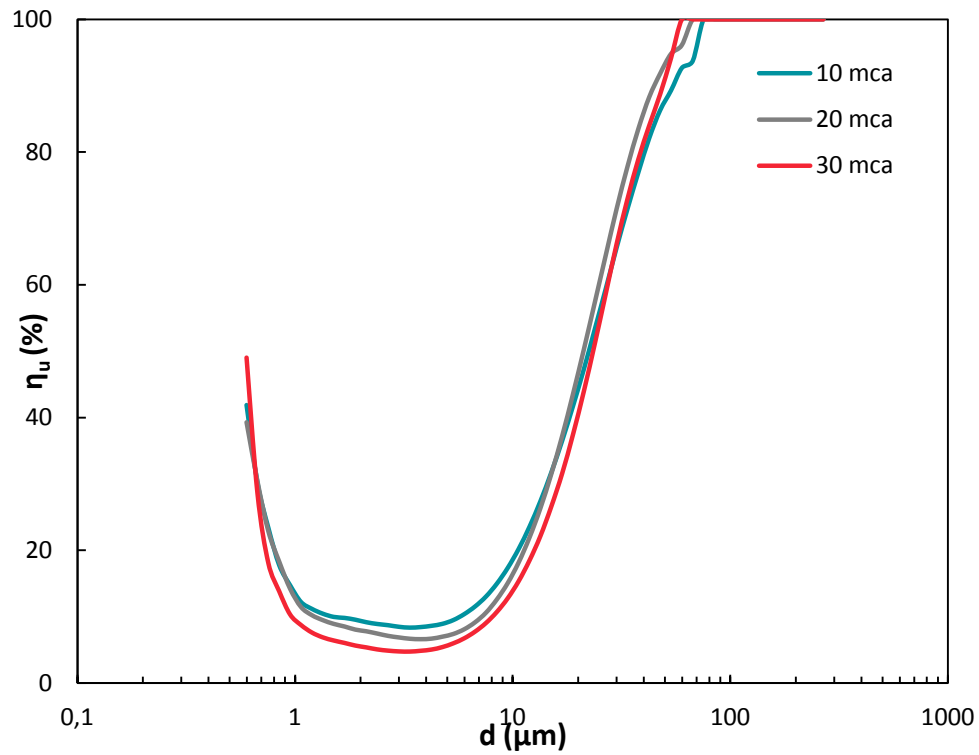


Figura 7.A.- Curva de eficacia respecto al underflow. Vortex 14 mm, spigot 6 mm. Cono B.

Análisis del efecto del diámetro del spigot en la eficacia de separación. Figuras 8.A, 9.A y 10.A.

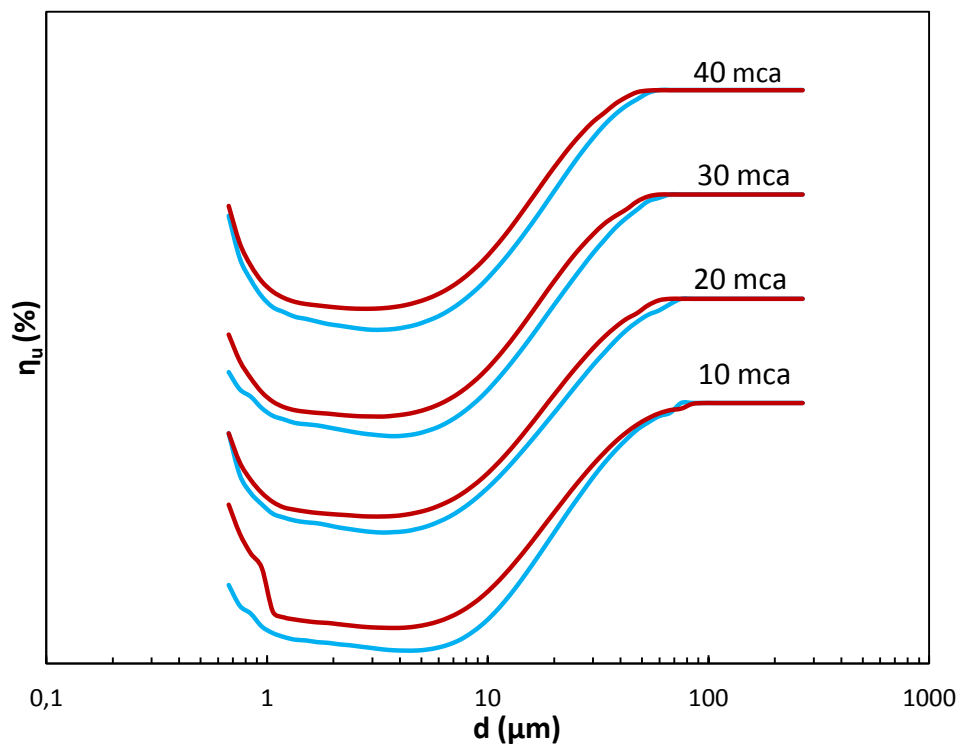


Figura 8.A.-Efecto del spigot empleado. Vortex 10 mm, Cono B.

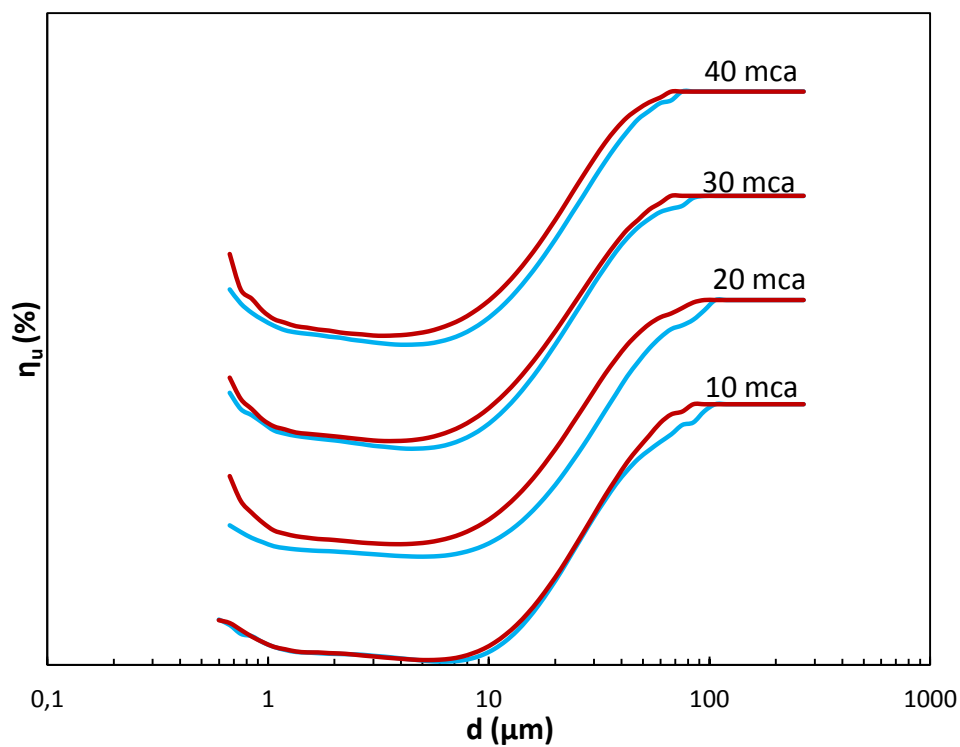


Figura 9.A.-Efecto del spigot empleado. Vortex 14 mm, Cono A.

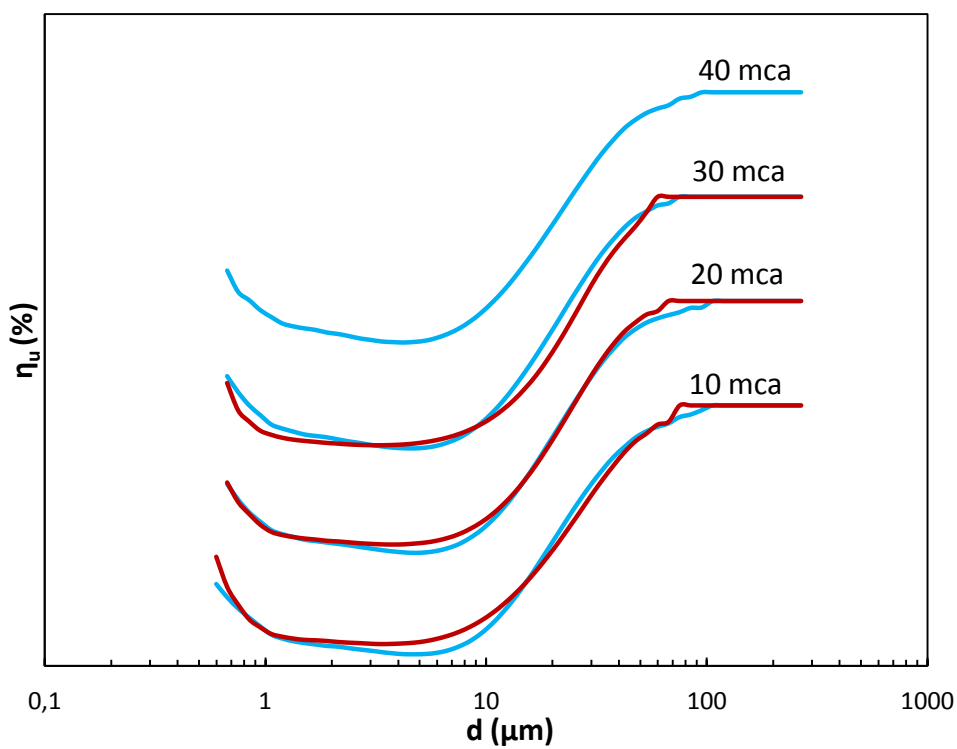


Figura 10.A.-Efecto del spigot empleado. Vortex 14 mm, Cono B.

Análisis del efecto del diámetro del vortex en la eficacia de separación. Figuras 11.A, 12.A y 13.A.

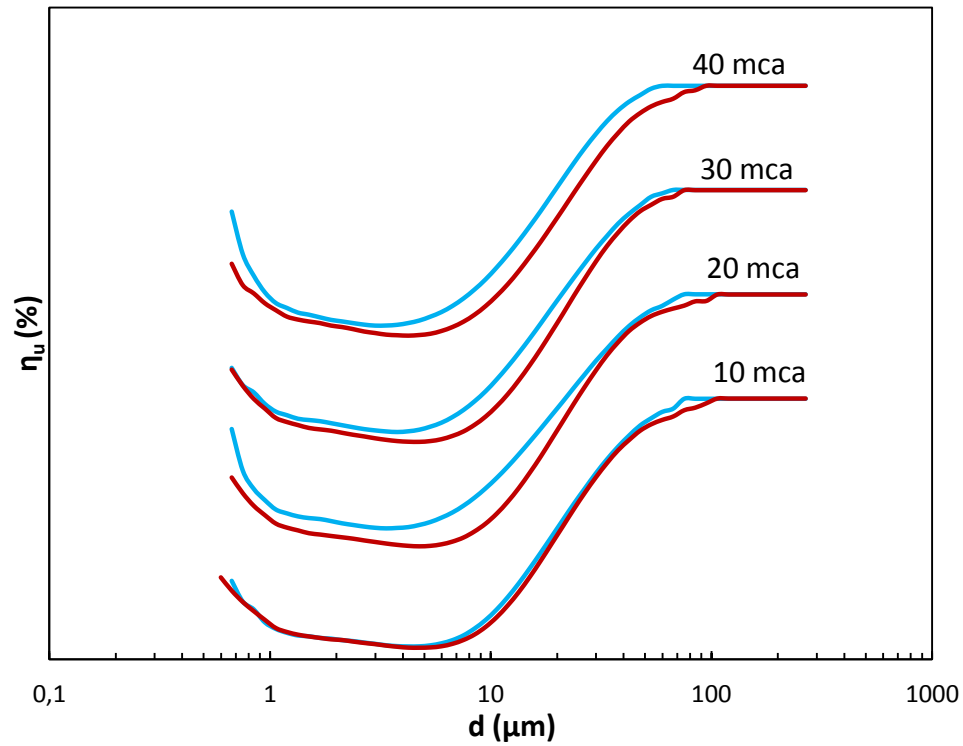


Figura 11.A.-Efecto del vortex empleado. Spigot 3mm, Cono B.

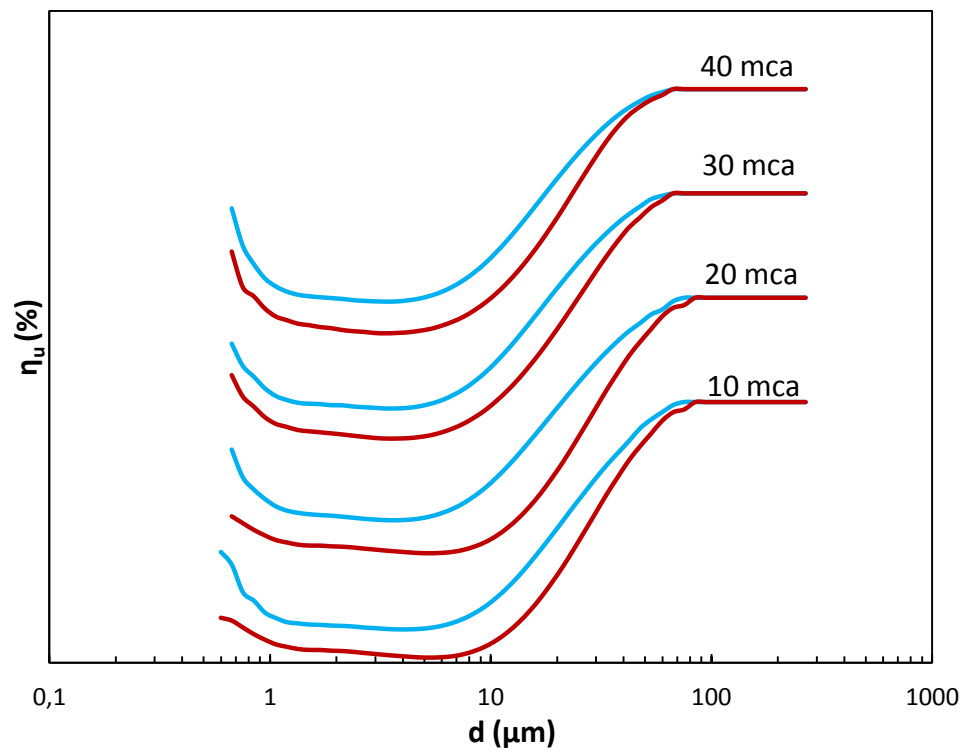


Figura 12.A.-Efecto del vortex empleado. Spigot 6 mm, Cono A.

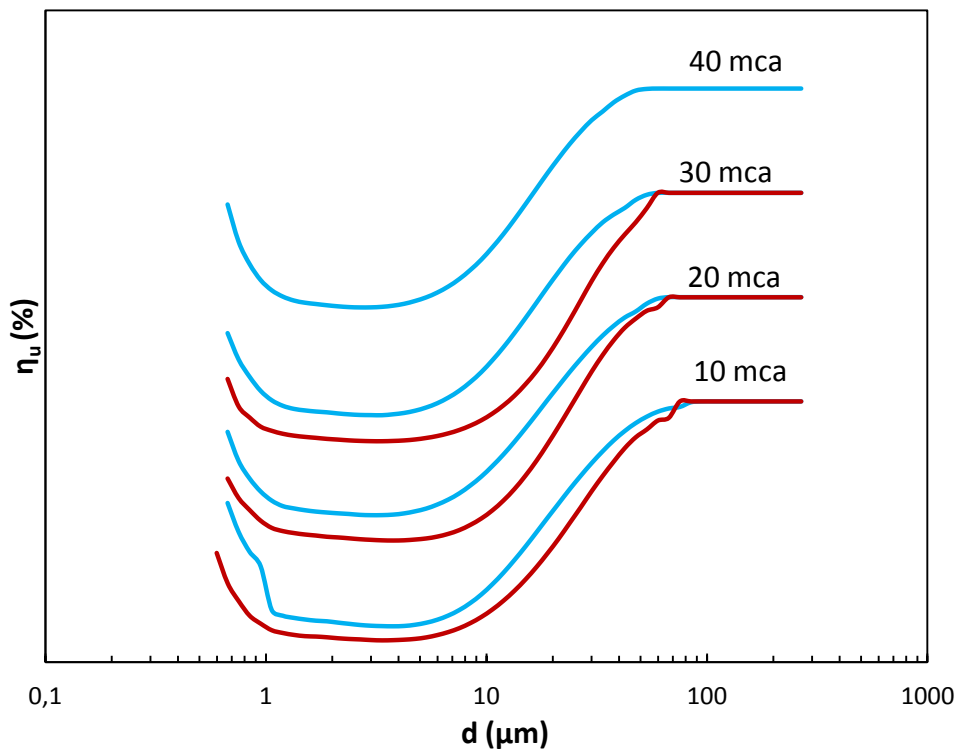


Figura 13.A.-Efecto del vortex empleado. Spigot 6 mm, Cono B.

Análisis del efecto de la longitud del cono empleado en la eficacia de separación. Figuras 14.A, 15.A y 16.A.

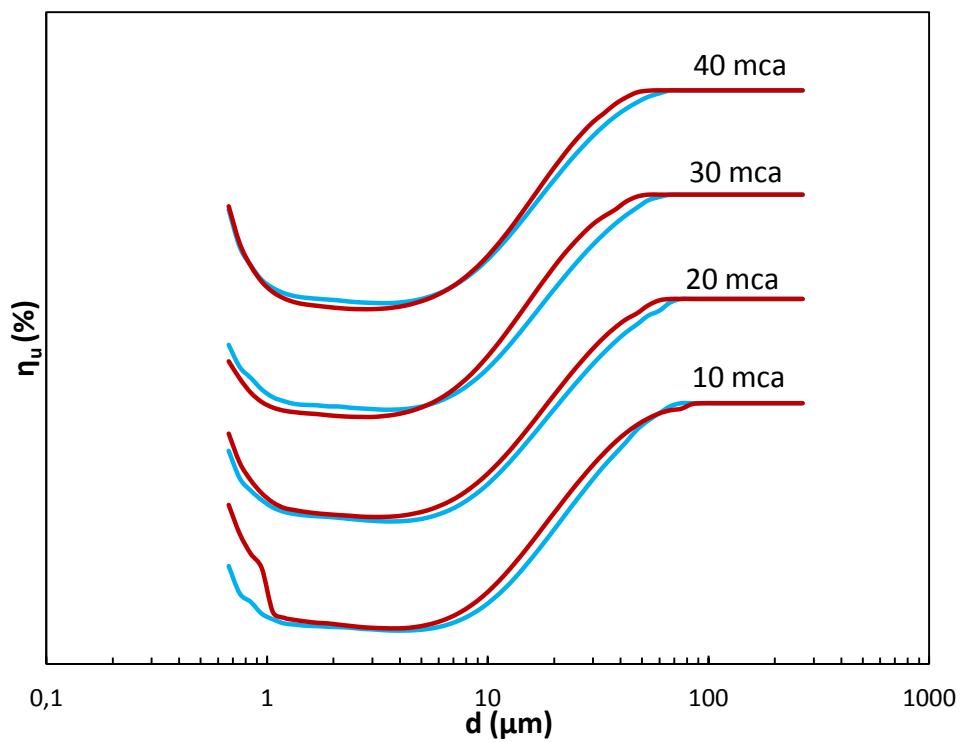


Figura 14.A.-Efecto de la longitud del cono empleado. Vortex 10 mm, spigot 6 mm.



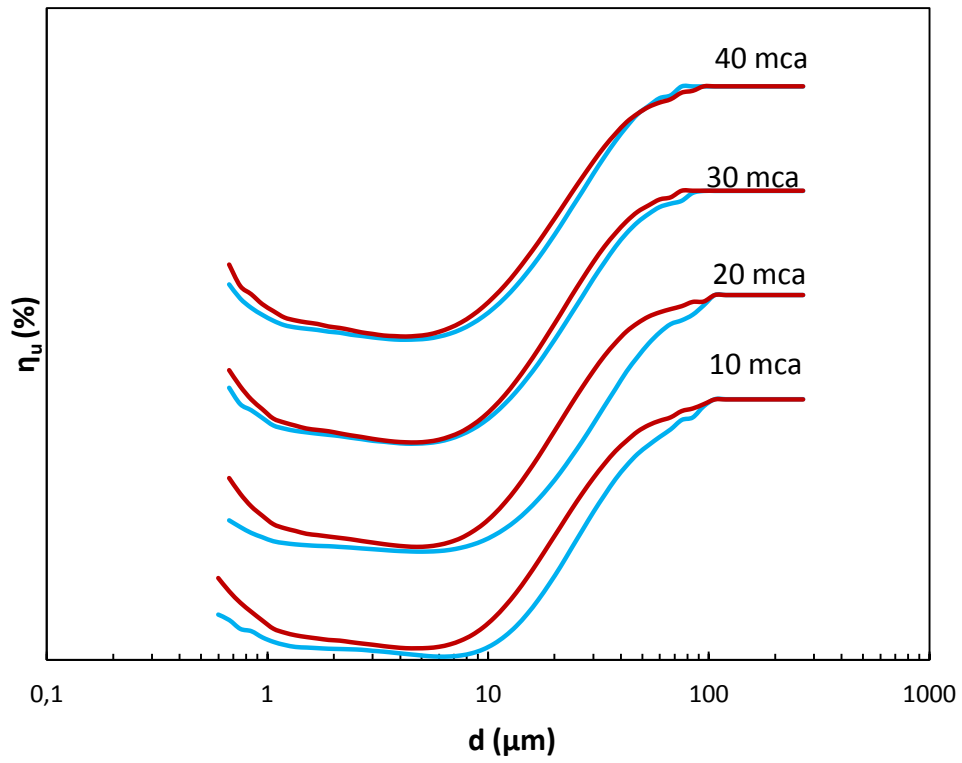


Figura 15.A.-Efecto de la longitud del cono empleado. Vortex 14 mm, spigot 3 mm.

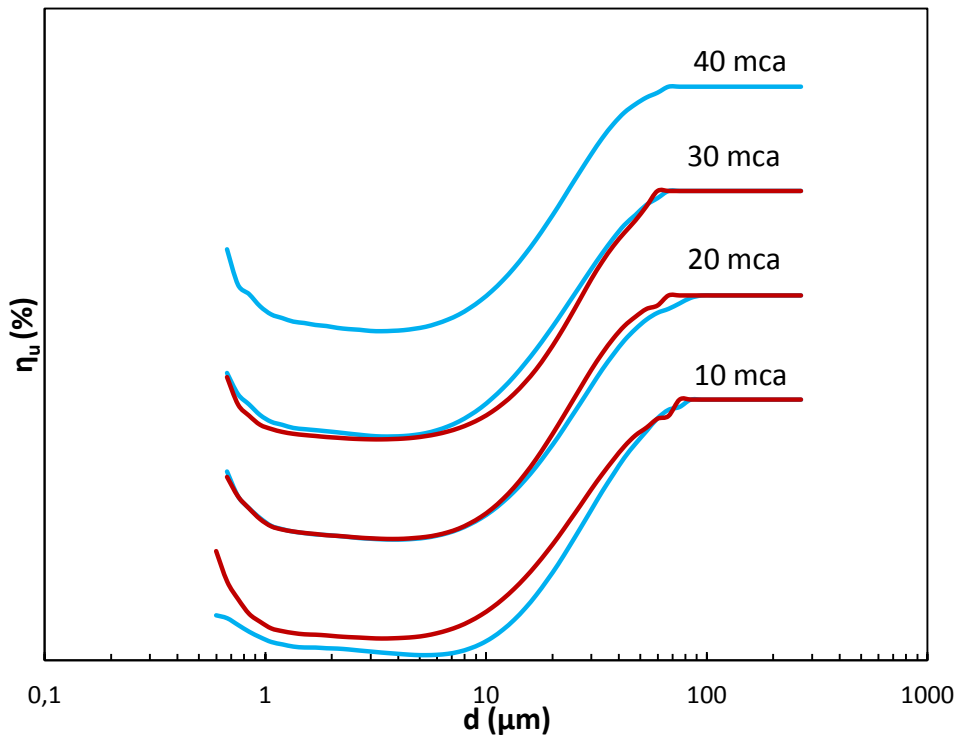


Figura 16.A.-Efecto de la longitud del cono empleado. Vortex 14 mm, spigot 6 mm.