

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA SEPARACIÓN DE MINERALES PESADOS (SASMP)

MAURICIO A. BERMÚDEZ[†], MORA, J.L.[†], GONZÁLEZ, A.^{*}, NAVARRO, W.^{*}, LECUE, P.^{*}, Y AGOSTINI, A.[†].

[†]Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Email: mbermude@euler.ciens.ucv.ve

^{*}Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Recibido: mayo de 2006

Recibido en forma final revisado: octubre de 2006

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño, la construcción, puesta en marcha y calibración del Sistema Automatizado para la Separación de Minerales Pesados (SASMP) que procesa grandes volúmenes de rocas y sedimentos. Éste tiene por finalidad: hacer una concentración mineral primaria, que posteriormente será refinada y cuyos granos finales de minerales pesados (apatito, circón, esfenas, entre otros) serán utilizados bajo la Técnica del Detector Externo (TDE) para su fechado por el Método de Huellas de Fisión (MHF), utilizado en el Laboratorio de Termocronología de la UCV. Este trabajo, es el resultado de un esfuerzo interdisciplinario entre ingenieros geólogos, matemáticos, ingenieros mecánicos y técnicos en metalurgia, con la finalidad de acelerar los procesos de concentración de minerales pesados para su posterior fechado por el MHF.

Palabras clave: método de huellas de fisión, técnica del detector externo, concentración y beneficio de minerales, minerales pesados, apatito, circón, esfenas.

DESIGN, CONSTRUCTION AND CALIBRATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR THE SEPARATION OF HEAVY MINERALS (SASMP)

ABSTRACT

In this article is presented the design, construction, setting in operation and calibration of the Automated System for the Separation of Heavy Minerals (ASSHM). This equipment processes big volumes of rocks and silts with the purpose of accomplishing a primary mineral concentration that later will be refined and whose final grains of heavy minerals (apatite, zircon, sphene, among other) they will be used under the External Detector Technique (EDT) for its dating by the Fission Tracks Dating Method (FTDM) used in the Thermochronology Laboratory of the UCV. This work is the result of an interdisciplinary effort between geologists, mathematicians, mechanical engineers and technicians in metallurgy.

Keywords: fission tracks dating method, external detector technique, concentration and benefit of minerals, heavy minerals, apatite, zircon, sphene.

INTRODUCCIÓN

La separación, concentración y beneficio de minerales es una técnica usada con frecuencia en Ingeniería de Minas para la obtención de minerales específicos (Barraza, L y Mencho, J., 1997; Kelly, E.G y Spottishwood, D.J. 1982; Mulak A.L. y Bhappu, R.B., 1982). Sin embargo, esta área es usada con frecuencia en Geología para la concentración de ciertos minerales, que proporcionan información geológica de determinada región. Tal es el caso, de los minerales accesorios: apatitos, circón y esfenas, quienes reciben el nombre de accesorios porque se encuentran en muy pequeñas cantidades dentro de cuerpos de rocas: ígneas,

metamórficas y sedimentarias. Estos minerales contienen alto contenido de Uranio-238 en su estructura interna, y por ende, pueden ser fechados por el Método de Huella de Fisión (Bermúdez, M., Alson, P., y Mora, J., 2005; Wagner G. y Van Den Haute P., 1992) utilizado en el Laboratorio de Termocronología de la UCV para conocer la edad y paleotemperaturas del último evento tectotérmico ocurrido en la región donde se encontraban.

Con el propósito de concentrar minerales para este último fin, es necesario procesar grandes cantidades de rocas. En el caso particular (Agostini, A., 2004) de apatitos detríticos en areniscas de las formaciones Isnotú y Betijoque del

Estado Trujillo, se necesitan por lo menos cincuenta (50) kilogramos de sedimentos para obtener una fracción de apenas 2 gramos de apatitos, esto puede variar dependiendo del terreno fuente

o roca que esté siendo erosionado.

La concentración inicial de estos minerales es realizada en trituradoras, tamizadoras y mesas hidrodinámicas, como la mesa Rodgers y Wilfley, por separado, lo que ocasiona el uso de grandes intervalos de tiempo, de una a dos semanas para la concentración inicial de minerales en una masa de 50 kilogramos de sedimentos.

La idea original de la construcción de un Sistema Automatizado de Separación de Minerales Pesados (SASMP) surge del Profesor Jorge L. Mora del Departamento de Geología, y de su experiencia en la separación de minerales accesorios para estudios termocronológicos. El Prof. Mora, en el año 2002, incentivó a los hoy en día Ingenieros Mecánicos González A., y Navarro, W., y al Prof. Pedro Lecue de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para que elaboraran el diseño y cálculos, respectivos (González, A., y Navarro, W. (2002). Posteriormente mediante financiamiento del FONACIT el Prof. Mora y el Ing. González culminan el 60% del sistema. Luego el Prof. Bermúdez y el hoy en día Ingeniero Geólogo Agostini, A., realizan un estudio (Agostini, A., 2004) detallado del sistema, lo complementan, terminan su construcción, y es puesto en marcha. Finalmente se efectúa la primera calibración del sistema con la utilización de sedimentos de Los Andes venezolanos.

El SASMP, está actualmente 100% operativo y es parte fundamental de la segunda etapa del Laboratorio de Termocronología, ubicado en la estructura cilíndrica de la Escuela de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería.

MÉTODO CONVENCIONAL DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES PARA EL MHF

La concentración inicial de minerales, para ser usada por el MHF en diversos laboratorios de huellas de fisión en el mundo, emplea por separado una gran cantidad de trituradoras de mandíbula, de disco, tamizadoras, y mesas de concentración hidrodinámica, tal es el caso de los laboratorios de huellas de fisión del Union College (Garver, J.I., 2002), Schenectady, New York; el laboratorio de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el laboratorio de Termocronología de la Universidad de Melbourne y el de GEOTRACK en Australia, entre otros.

En la figura 1, se observa un diagrama de flujo de cómo son usados los equipos por separado para la concentración

inicial de minerales pesados. Este diagrama, puede ser explicado de la siguiente forma:

1. Se selecciona la muestra de roca o de sedimentos en campo, tomando en cuenta los criterios geológicos para este fin.
2. La muestra es triturada por la primera trituradora de mandíbulas para disminuir el tamaño de los trozos (tiempo estimado 8 minutos aprox.).
3. La muestra continua siendo triturada por otro equipo de mandíbula, para que cada vez su tamaño de grano sea menor. (tiempo estimado 8 minutos aprox.).
4. Continúa la disminución del tamaño de grano de la muestra, por medio de la trituradora de mandíbulas. (tiempo estimado 8 minutos aprox.).
5. En este paso, ya los fragmentos más pequeños entran en la trituradora de discos, en donde alcanzan tamaños de grano fino. (tiempo estimado 5 minutos aprox.).
6. La muestra entra en la tamizadora, en este paso es donde se seleccionan los granos que pasarán la mesa de Wilfley. Específicamente son los pasante tamiz 60 (tamaño 0,25 mm) y retenido tamiz 200, (tamaño 0,074 mm, tiempo estimado 15 minutos aprox.).
7. Por último, la fracción ya tamizada es pasada en la mesa de Rodgers o Wilfley, que los separa de acuerdo a densidades específicas (tiempo estimado 12 minutos aprox.).

DISEÑO DEL SASMP

Inicialmente el equipo estaba diseñado para cumplir con la totalidad de los procesos, que implicaban la separación de minerales pesados, por partes, como en el caso anterior, cada equipo cumpliría una misión de manera independiente con respecto a las otras partes. Por ejemplo, la fracción de granos provenientes de las trituradoras de mandíbulas y de disco al finalizar su tarea, debían ser llevados a la tamizadora, para luego pasar a la última etapa que es la separación gravitacional, en la mesa de Wilfley, antes de ir a la Primera Etapa del Laboratorio de Termocronología, para la obtención de los cronotermómetros (apatitos y/o circones).

El diseño (González, A., y Navarro, W., 2002) del SASMP, fue concebido considerando tres niveles: el primero llamado nivel de trituración; el segundo, formado por un sistema móvil que se encarga de tamizar y retamizar la muestra, y el último, encargado de la separación gravimétrica-hidrodinámica de la muestra.

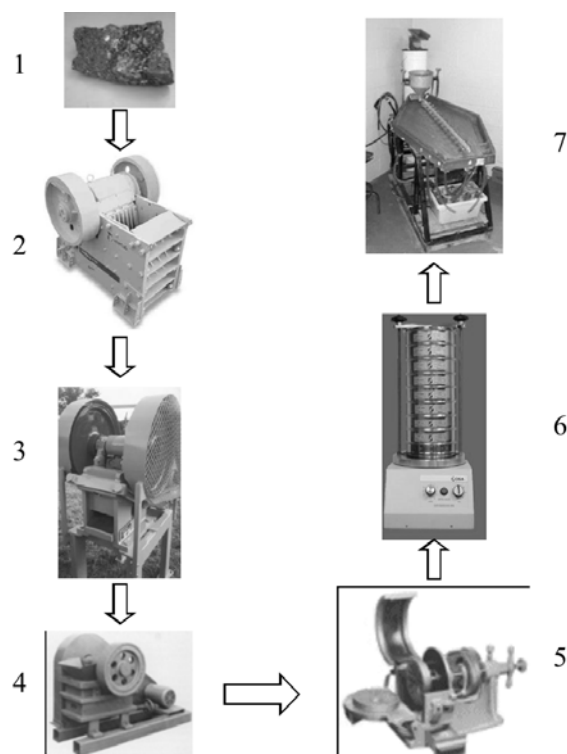


Figura 1. Diagrama de flujo representando el método convencional de concentración de minerales de una muestra
(Tomada de González, A., y Navarro, W. , 2002)

Primer nivel:

Nivel de Trituración, formado por los siguientes equipos:

- Tolva alimentadora
- Trituradora de mandíbula pequeña
- Trituradora de disco

Segundo nivel:

Sistema móvil de flujo de sedimentos, constituido por los siguientes equipos:

- Montacargas
- Tamizadora industrial VORTI SIV
- Sistemas de flujos de sedimentos por aire

Tercer nivel:

Separación gravimétrica de sedimentos, conformado por.

- Mesa de separación hidrodinámica

- Mesa de Wilfley

Estos tres niveles de procesamiento son mostrados en la figura 2; también se aprecia un primer croquis del SASMP.

CONSTRUCCIÓN DEL SASMP

La parte más laboriosa de la construcción fue el segundo nivel, conformado por el sistema de montacargas y tamizadoras. Éste fue construido (por el Prof. Mora y el Ingeniero González) en dos plantas, según se puede apreciar en la figura 2. Su ubicación en la estructura cilíndrica de la Escuela de Metalurgia, es ideal puesto que minimiza los problemas de contaminación sónica, esparcimiento de partículas de sólidos por el aire, y problemas de vibración en las instalaciones de la UCV.

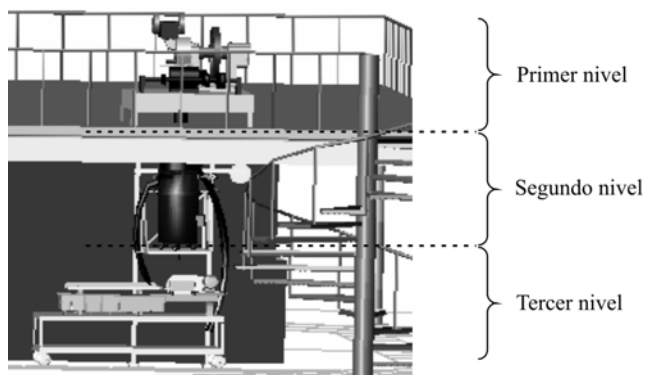


Figura 2. Croquis del SASMP, mostrando los tres niveles de funcionamiento.

(Tomada de Agostini, A. 2004; González, A., y Navarro, W., 2002)

Las partes principales del montacargas construido son: motor de tracción y torno de elevación; cabina, contrapeso; cables de tracción, que por uno de sus extremos tiran de la cabina y en el otro llevan el contrapeso; guías de la cabina y del contrapeso y circuitos eléctricos de maniobra.

El motor de tracción funciona normalmente con corriente alterna, pero puede ser sustituida por corriente continua. El torno de elevación consta de un reductor de velocidad de engranajes y de la polea de tracción.

El montacargas está provisto de dispositivos de seguridad que impiden su puesta en marcha en caso de maniobras equivocadas (apertura de puertas, carga excesiva, etc.), o bien accionan frenos de emergencia en el caso de rotura de los cables de sostén, o cuando la velocidad supera un límite prefijado.

Los cálculos de factibilidad y diseño del equipo fueron estimados para manejar más de 300 kilogramos de carga, si el lector está interesado en revisar los cálculos relativos al diseño, especificaciones de equipos, diagramas, etc., puede referirse al trabajo de González y Navarro (2002).

En la figura 3, se muestra la etapa de construcción del montacargas.



Figura 3. Detalles del montacargas construido para el SASMP.

El primer nivel fue construido según el diseño realizado por González y Navarro (2002). En la figura 4, se representa un croquis elaborado en AUTOCAD de este nivel. En el trabajo de (Agostini, A., 2004) se determinaron las partes faltantes, zonas de desgastes, zonas de alta vibración y se resolvieron todos los problemas presentados, también se le incorporó un equipo de alimentación al sistema.

En la figura 5 (a) se muestra una fotografía del estado actual del primer nivel donde se observa la caja de mando (caja gris con botones) del equipo, y en la figura 5 (b), se aprecia la tolva alimentadora, la trituradora de mandíbula y la de disco.

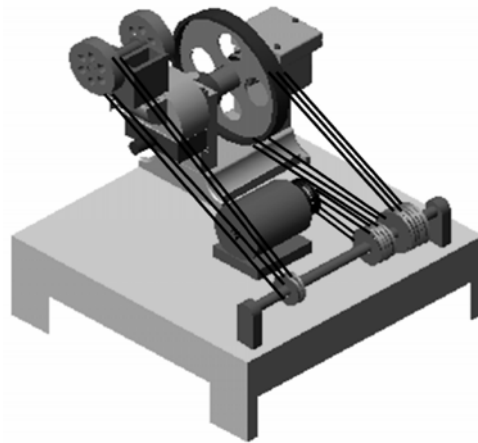


Figura 4. Croquis del primer nivel del SASMP
(Tomado de González, A., y Navarro, W., 2002)



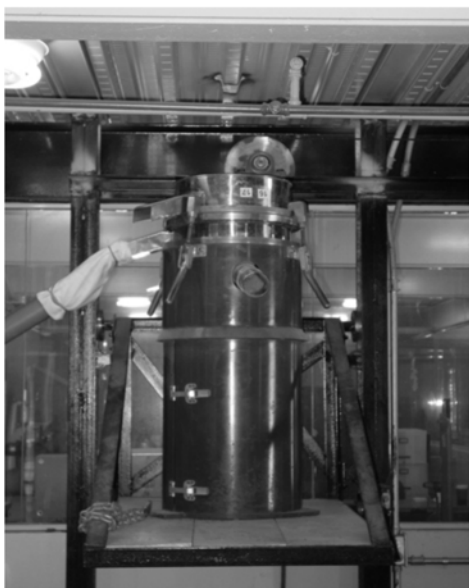
(a)



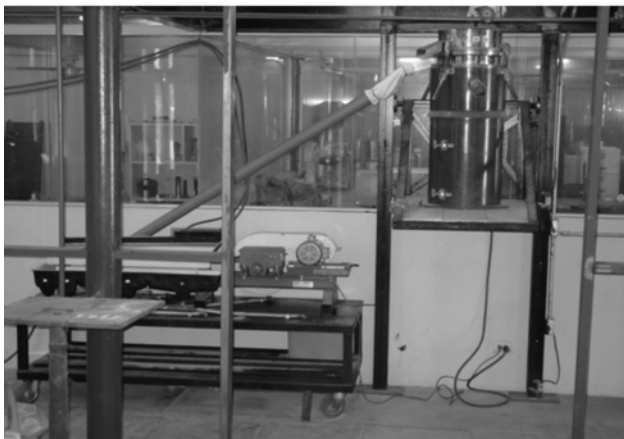
(b)

Figura 5. Estado actual del primer nivel del SASMP.
(a) Trituradoras y controles del sistema.
(b) Tolva alimentadora y trituradoras del SASMP.

En la figura 6 se muestra el estado actual de los niveles dos y tres del sistema. Se observan en la figura 6 (a) el sistema de montacargas, la tamizadora y los ductos que transportan los sedimentos a la mesa Wilfley mostrada en la figura 6 (b).



(a)



(b)

Figura 6. Estado actual del segundo y tercer nivel del SASMP.
(a) Sistema montacargas y tamizadora,
(b) Sistema de montacargas y mesa Wilfley.

El estado culminado del SASMP es mostrado en la figura 7: en la 7 (a) se muestra, encerrado en un círculo, el motor del montacargas del segundo nivel; y en la figura 7 (b) se aprecia el estado actual del SASMP con las paredes de protección.



(a)



(b)

Figura 7. Estado actual del SASMP después de los trabajos realizados por los Profesores: Mora y Bermúdez y los tesistas: González, Navarro y Agostini.
(a) Sin las paredes de protección.
(b) Con las paredes de protección.

PUESTA EN MARCHA Y CALIBRACIÓN DEL SASMP

Con esta finalidad se procesaron cuatro muestras, dos de areniscas (VI022 y VI033) pertenecientes a las Formaciones Isnotú y Betijoque del Estado Trujillo en el Flanco Norte, tomadas en la Quebrada La Vichú y dos muestras de granitos (GR1 y GR2) pertenecientes al Flanco Sur de Los Andes venezolanos.

Resultados arrojados por el primer nivel

Las muestras de 20 y 25 kilogramos, en el caso de los sedimentos, fueron secadas previamente en la mesa de secado y puestas en la tolva alimentadora.

Se trituró cada una de las muestras en la trituradora de disco.

Se tomó el tiempo entre las etapas de alimentación y trituración, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados arrojados del procesamiento de muestras por el primer nivel del SASMP.

(Tomado de Agostini, A., 2004)

Muestra	Peso total (Kgr)	Tiempo en la tolva (seg)	Tiempo en la trituradora de discos (seg)
VI022	25	600	180
VI033	20	550	165
GR1	8	215	60
GR2	10	240	75

Resultados arrojados por el segundo nivel

En esta etapa las muestras son llevadas por el mismo sistema al montacargas donde se encuentra la tamizadora Vorti-Siv, con dos tamices de interés para el caso de aplicaciones a las huellas de fisión los tamices 60 y 200. Así se obtuvieron los siguientes resultados:

Los valores resaltados en negro representan la cantidad de sedimentos que pasa al tercer nivel del SASMP; la fracción mayor a 60 es necesaria devolverla al primer nivel del sistema para su reprocesamiento; mientras que la fracción menor a 200 es desechada.

Resultados arrojados por el tercer nivel

Según la tabla 2, la cantidad de muestra pasada a la mesa de separación gravimétrica Wilfley fue de $\frac{1}{4}$ y de $\frac{1}{12}$ kilogramos aproximadamente para sedimentos y rocas graníticas, respectivamente. El hecho de que para rocas graníticas disminuya la proporción significativamente es que se empleó menos cantidad de muestras y otro porcentaje de ellas fue necesario retamizarla.

Los parámetros necesarios para la calibración de la mesa Wilfley y los fundamentos teóricos de este equipo pueden ser leídos en (Barraza, L y Menco, J., 1997; Kelly, E.G. y Spottishwood, D.J., 1982; y Mulak A.L. y Bhappu, R.B., 1982), así como en las guías de clases elaboradas por el Prof. M. García del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la UCV. Esta mesa tiene siete (07) salidas, de las cuales sólo en las tres (03) primeras es donde se acumulan las partículas de mayor peso.

Tabla 2. Resultados arrojados del procesamiento de muestras por el segundo nivel del SASMP.

(Tomado de Agostini, A., 2004)

Muestra	Peso total (Kgrs.)	Tiempo en tamizadora (min)	200<X<60 (Kgrs.)	X>60 (Kgrs.)	X<200 (Kgrs.)
VI022	25	7,6	1,12	17,85	5,8
VI033	20	6,8	1,23	15,88	2,76
GR1	8	20	0,32	7,10	0,53
GR2	10	21	0,34	8,85	0,76

Tabla 3. Resultados arrojados del procesamiento de muestras por el tercer nivel del SASMP.

(Tomado de Agostini, A., 2004)

Muestra	Peso (kg)	Salida 1 (gr)	Salida 2 (gr)	Salida 3 (gr)
VI022	1,12	0	89	58
VI033	1,23	12	75	36
GR1	0,32	5	28	13
GR2	0,344	7	42	21

Aplicando una proporción de agua de lavado de un 90% y 300 sacudidas por minuto, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.

Las salidas 4, 5, 6 y 7 son despreciadas por lo explicado anteriormente. Puede apreciarse en la tabla 4, que la cantidad de sedimentos obtenidos al final del proceso de concentración de minerales pesados, es muy pequeña en comparación con la cantidad de sedimentos y fragmentos de rocas con la que se inició el proceso.

Tabla 4. Porcentaje de aprovechamiento de minerales de las muestras procesadas bajo el SASMP.

(Tomado de Agostini, A., 2004)

Muestra	% de beneficio
VI022	4,48
VI033	6,15
GR1	4
GR2	3,44

Cuando la muestra es pasada por cada equipo del sistema, de manera individual, como se encuentran en la mayoría de los laboratorios de concentración de minerales, el tiempo de procesamiento de la muestra no varía en comparación con el SASMP.

La única diferencia en tiempo, sería la variable transporte de la muestra a cada equipo, debido a que los equipos no necesariamente se encuentran físicamente en el mismo lugar, cómo en el caso de los laboratorios de la UNAM y Union College. Además la limpieza individual de cada equipo también afecta el tiempo de procesamiento de la muestra, mientras que con el SASMP, la limpieza de las trituradoras se lleva a cabo en paralelo, al colocar una muestra de cuarzo o de vidrio molido en el sistema. La tamizadora, la tolva alimentadora y la mesa Wilfley es necesario limpiarlas de manera individual.

Otra ventaja del SASMP es que el nivel de contaminación de la muestra es mayor cuando los sistemas trabajan por separado, o son sistemas abiertos, a diferencia de cuando se trabaja con un sistema cerrado como el SASMP.

En la figura 8, se aprecia la comparación realizada entre el SASMP y la separación convencional de minerales pesados.

En esta última gráfica, se aprecia la comparación entre el rendimiento de los equipos del sistema por separado (curvas discontinuas) y el SASMP (curva continua con cuadros negros).

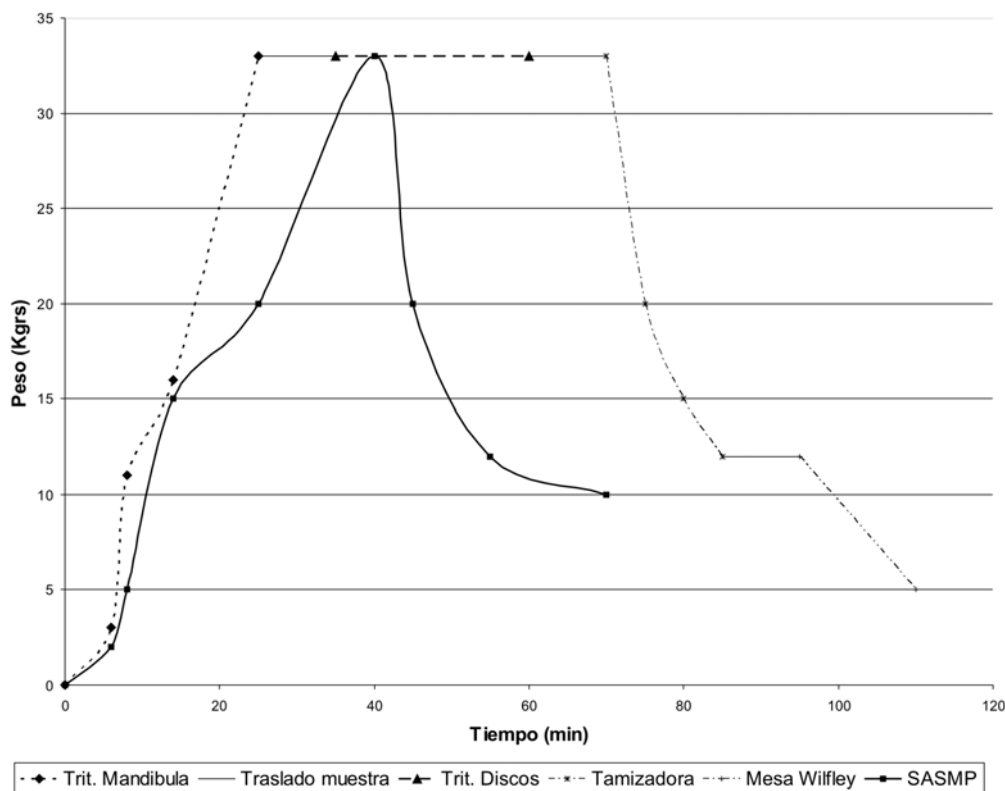


Figura 8. Comparación entre el SASMP y el método tradicional de concentración de minerales en condiciones «ideales».

La figura 8 está dividida en dos curvas, la primera: está representada por una curva discontinua a trozos, que se refiere al sistema convencional. En ésta, el primer fragmento de la curva representa el procesamiento de la muestra en la trituradora de mandíbula; es necesario esperar que se haya terminado de triturar la muestra para pasar a la siguiente etapa de triturado. Entre estas dos etapas hay un fragmento continuo de curva de color negro, que equivale al tiempo de traslado de la muestra, posteriormente todo el volumen es procesado por la trituradora de discos. Nuevamente debe ser trasladada la muestra a la tamizadora, existiendo otro intervalo o fracción de tiempo representado por el fragmento de curva continua, la muestra es tamizada, y en esta etapa se van perdiendo sedimentos. Al finalizar este proceso, debe ser trasladada a la mesa Wilfley, en la fase de tamizado y de separación por mesa Wilfley se pierden fracciones de sedimentos. Esta curva representa el procesamiento en el sistema convencional en «condiciones muy favorables e ideales» y suponiendo que las características de todos los equipos convencionales con el SASMP son idénticas.

La segunda curva representa el desempeño del SASMP, en este sistema se hace la entrega de los sedimentos de manera automatizada. A diferencia del caso anterior, no es necesario esperar que la muestra sea completamente triturada, sino el primer nivel va alimentando a los otros niveles, puede verse la diferencia en tiempo, al momento en que se culmina el proceso de concentración de la muestra.

DISCRIMINACIÓN MINERALÓGICA DE LA PULPA CONCENTRADA

Con la finalidad de estudiar el grado de concentración del sistema y cada una de las variables dentro de este, al concentrado proveniente de la muestra VI022 de sedimentos se le realizó un estudio de difracción de rayos X.

En la figura 9, se aprecian fragmentos de roca y minerales constituyentes de la muestra VI022, después de haber sido concentrada por el SASMP. En esta fotografía se puede observar encerrado en círculos, algunos granos de minerales pesados. Los granos de color blanco corresponden a cuarzo y aquellos con estructura laminar son micas.

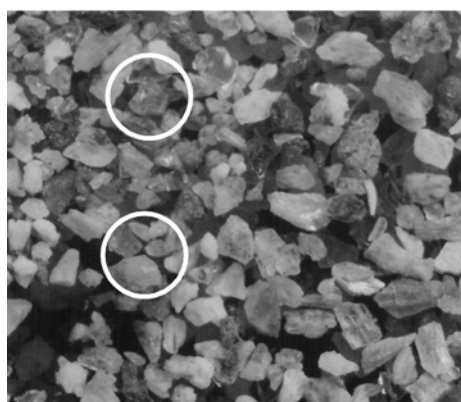


Figura 9. Fragmentos de rocas pertenecientes a la muestra VI022 después de la concentración por el SASMP.

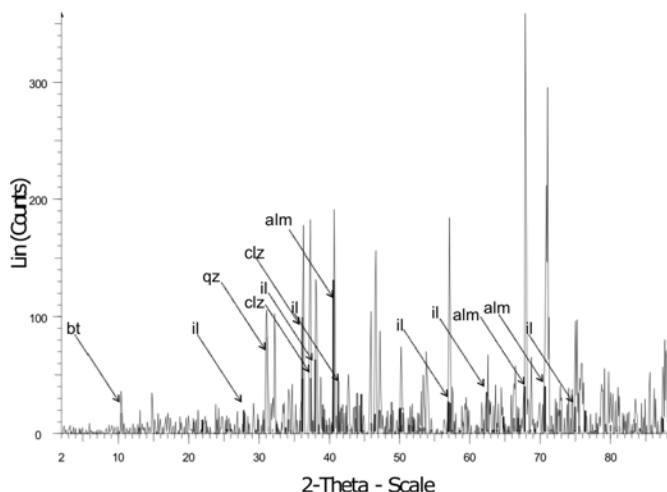


Figura 10. Gráfica resultado de la Difracción de rayos X, de la arena estudiada VI022.

En la figura 10 el eje x (2-Theta- scale) se refiere al ángulo de incidencia del rayo sobre los minerales y el eje y (Lin counts) se refiere a los conteos por segundo, lo cual es la respuesta al inducir los rayos X sobre las determinadas capas energéticas de los elementos constituyentes de la muestra. En ésta, se aprecia que las especies minerales reconocidas son: ilmenita (il), clinozoisita (clz), almandino (alm), biotita (bt) y fragmentos de cuarzo (qz).

Es normal que no aparezcan picos representativos de minerales pesados como apatito y circón, puesto que estos se encuentran en muy bajas proporciones en areniscas. La obtención específica de estos minerales se logra tomando la pulpa concentrada y aplicando diversos procedimientos de concentración de minerales como separación por líquidos pesados y separación magnética.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que el SASMP fue concluido y puesto en funcionamiento de una manera satisfactoria. El SASMP presenta un gran número de ventajas con respecto a la metodología tradicional. Entre las que destacan:

Por ser un sistema casi cerrado, el grado de contaminación de la muestra es mínimo en comparación con el sistema convencional de procesamiento de muestras.

Tiene una capacidad de procesamiento de grandes volúmenes de rocas más rápido.

Los resultados arrojados muestran que aún en condiciones ideales, es decir que todos los equipos individuales estén en el mismo sitio de trabajo y tengan la misma capacidad de procesamiento (en el caso de la separación convencional), el SASMP reduce en tiempos de aproximadamente la mitad, el procesamiento de concentración de minerales para su posterior datación por el método de huellas de fisión.

El SASMP está a disposición de otras Escuelas y Departamentos de la Universidad Central de Venezuela, y puede tener aplicación en proyectos de interés para beneficio y concentración de minerales, separación de partículas, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado bajo el Proyecto FONACIT número S1-2000000636. Igualmente agradecemos la colaboración del Sr. Rómulo Millano, técnico de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica; a los profesores Manuel García de la Escuela de Ingeniería Mecánica y Abilio Carrillo del Ciclo Básico; y en particular a la Facultad de Ingeniería de la

Universidad Central de Venezuela por la ayuda económica otorgada para construir las paredes de protección del sistema.

REFERENCIAS

AGOSTINI, A. (2004): Puesta en marcha y calibración del Sistema Automatizado de Separación de Minerales Pesados (SASMP) utilizando areniscas y granitos del Flanco Sur de los Andes Venezolanos. UCV, Trabajo Especial de Grado, Inédito.

BARRAZA, L Y MENDO, J., (1997): Beneficio de minerales, Volúmenes I y II.

BERMÚDEZ, M., ALSON, P., Y MORA, J. (2005): Ecuación Fundamental de la Edad para la datación de minerales y su adaptación a la ecuación práctica para el método de huellas de fisión. Revista de la Facultad de Ingeniería, Volumen 20, N° 2, Caracas, Venezuela.

GARVER, J.I., (2002): Fission-track Laboratory Procedures at Union College. (http://idol.union.edu/%7Egarverj/FT/FT_book_2.pdf).

GONZÁLEZ, A., Y NAVARRO, W. (2002): Diseño de un sistema automatizado para la separación de minerales pesados. Escuela de Ingeniería Mecánica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

KELLY, E.G. Y SPOTTISHWOOD, D.J. (1982): Introduction to mineral processing. John Wiley & Sons.

MULAK A.L. Y BHAPPU, R.B. (1982): Diseño de plantas de proceso de minerales. Ed. Rocas y Minerales, Volúmenes 1 y 2.

WAGNER G. Y VAN DEN HAUTE P. (1992): Fission track dating. Netherlands: Solid Earth Sciences Library, Kluwer Academic Publishers.