

RECIBIDO: 22/11/11

APROBADO: 23/03/12

**REMEDIACIÓN DE LA ALCALINIDAD DE POLVOS DE ACERÍA MEDIANTE  
LAVADOS SECUENCIALES CON ÁCIDOS ORGÁNICOS**

**REMEDIATION OF ALKALINITY OF STEEL DUST USING SEQUENTIAL WASHED  
WITH ORGANIC ACIDS**

*Pedro Delvasto<sup>1\*</sup>, Xinyan Huang<sup>2</sup>, Daniela Sandoval Ravotti<sup>1</sup>, Julio Andrés Casal-Ramos<sup>1</sup>, José  
Ramón Domínguez Verenzuela<sup>2</sup>*

**RESUMEN**

Polvos de acería residuales, provenientes de una siderúrgica venezolana, se caracterizaron fisicoquímicamente, detectándose que los mismos poseían elevados contenidos de metales pesados como Fe, Zn y Pb y un elevado pH de contacto, superior a 12 unidades, lo que lo convierte en un residuo peligroso por su tendencia a generar lixiviados con elevada alcalinidad. Debido a estos resultados, se planteó un proceso de remediación del residuo mediante lavados secuenciales con soluciones diluidas de  $(\text{CH}_2)_2\text{COH}(\text{COOH})_3$  (ácido cítrico),  $(\text{COOH})_2$  (ácido oxálico),  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (ácido acético) y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico). Se obtuvo que la solución de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  generó la mayor atenuación de la alcalinidad de los polvos, llegando los mismos a acidificarse hasta un pH de alrededor de 4 unidades.

**Palabras Claves:** Remediación de la alcalinidad de residuos, polvos residuales de acería, lavado secuencial, ácidos orgánicos.

**ABSTRACT**

Residual Steel dusts, coming from a Venezuelan steelmaker, were characterized physicochemical and it was detected that they had high contents of heavy metals such as Fe, Zn and Pb and an elevated contact's pH, greater than 12 units, which makes it to be a dangerous residual due to its tendency to generate leachates with high alkalinity. Due to these findings, it was proposed a residual remediation process by sequential washes with dilute substances of  $(\text{CH}_2)_2\text{COH}(\text{COOH})_3$  (citric acid),  $(\text{COOH})_2$  (oxalic acid),  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (acetic acid) y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (sulfuric acid). It was obtained that the solution of  $\text{CH}_3\text{COOH}$  generated the higher alkalinity attenuation for the dusts, reaching them to acidify to a pH of around 4 units.

**Keywords:** Residual alkalinity remediation, residual dust of steel, sequential washed, organic acids.

1: Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela

2: Laboratorio de Espectroscopía Atómica, Universidad Simón Bolívar. Caracas. Venezuela

\* e-mail: delvasto@usb.ve

## I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con diferentes organizaciones internacionales, tales como la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU y la Asociación Brasileira de Normas Técnicas, los polvos residuales de acería están considerados como materiales altamente tóxicos, debido a su elevado contenido de metales pesados (Janaína y Brehm, 2006). La producción de estos polvos oscila entre los 12 kg y 14 kg por TM de acero producida (Janaína y Brehm, 2006), dando como resultado una cantidad de aproximadamente 14 millones de TM de este tipo de residuo generada a nivel mundial, para el año 2009. En el caso venezolano, estos valores pueden llegar a ser más elevados, alcanzando hasta 25 kg por TM de acero producida (Delvasto *et al.*, 2011). En los países desarrollados, estos polvos de acería son ocasionalmente reciclados (González *et al.*, 1995), para la recuperación de metales pesados o sus óxidos, particularmente Zn y Pb. No obstante, por lo general, estos residuos no se aprovechan y terminan acumulándose en predios adyacentes a las plantas siderúrgicas. Allí, las pilas de polvos de acería pueden permanecer por lapsos prolongados de tiempo, antes de ser dispuestos de manera definitiva en rellenos sanitarios o vertederos municipales, los cuales pueden o no estar debidamente acondicionados para recibir esta clase de residuo. Aparte de los metales pesados, el otro problema ambiental que presentan estos materiales residuales es su elevada alcalinidad, lo que hace que generen lixiviados potencialmente peligrosos, sobre todo al entrar en contacto con el agua de lluvia. Otra desventaja de la alcalinidad, es que la misma facilita la movilización del Pb en los referidos lixiviados. Estas características hacen atractivo el desarrollo de tratamientos que contemplen una etapa de inertización o remediación, previa a la disposición de estos residuos en recintos transitorios o definitivos, minimizando así el impacto negativo que los mismos puedan generar al medio ambiente.

Con lo anteriormente expuesto, se propuso en la presente investigación, realizar un tratamiento de remediación de la alcalinidad a un polvo de acería proveniente de una planta ubicada en la región Sur-Oriental de Venezuela. Para lograr el objetivo, se caracterizó inicialmente al residuo mencionado empleando las técnicas de espectroscopía de absorción atómica por atomización con llama (FAAS), con la finalidad de conocer la composición química del polvo de acería generado por la operación de los hornos de arco eléctrico. El tratamiento de remediación de la alcalinidad fue posible mediante la aplicación de técnicas hidrometalúrgicas de lavados secuenciales, empleando agua (H<sub>2</sub>O) como agente de control y soluciones diluidas de ácidos orgánicos tales como, ácido cítrico

[Escribir texto]

$((\text{CH}_2)_2\text{COH}(\text{COOH})_3)$ , ácido oxálico  $((\text{COOH})_2)$ , ácido acético  $(\text{CH}_3\text{COOH})$  y ácido sulfúrico  $(\text{H}_2\text{SO}_4)$ . Los lixiviados obtenidos se estudiaron empleando medición del pH para conocer el grado de atenuación de la alcalinidad de los polvos en contacto con las distintas soluciones ácidas.

## **II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **2.1. Origen y características generales de los polvos de acería estudiados.**

Los polvos de acería estudiados provienen de los sistemas de recolección de gases de una planta siderúrgica ubicada al Sur de Venezuela, la cual emplea en su proceso hornos eléctricos de arco (EAF) para la fusión de una combinación de 20% chatarra de acero y 80% hierro de reducción directa (DRI) (Delvasto *et al.*, 2011).

Estudios previos (Delvasto *et al.*, 2011), determinaron que este polvo de acería está compuesto por varias fases cristalinas, a saber,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , diversas espinelas ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  y  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ),  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{PbO}$ .

### **2.2. Análisis químico elemental de los polvos de acería estudiados.**

Para obtener la composición química elemental de los polvos de acería se utilizó la técnica de FAAS. Para ello se digirieron las muestras del residuo en tetraborato de litio a 950 °C y luego se llevaron a solución con ácido nítrico al 10%. De esta manera se lograron cuantificar los elementos Fe, Mg, Zn, Ca, Cr, Pb y Cu. Por otro lado, para la determinación de K y Na, se utilizó adicionalmente una solución de cloruro de cesio para controlar el efecto de ionización de manera que la concentración final de éste elemento fuese de 0,1% en el momento de la lectura para patrones y muestras. Las interferencias en la determinación de Ca y Mg fueron controladas mediante la utilización de una solución que contenía 0,1% de óxido de lantano en patrones y muestras. La técnica pudo aplicarse empleando un espectrofotómetro Perkin-Elmer 2380. Finalmente, para validar la exactitud del método empleado se realizó procedimiento para establecer el porcentaje de recuperación de cada elemento medido. Con este fin, se añadió una cantidad conocida del analito a evaluar en la muestra. La exactitud suele expresarse mediante porcentaje de recuperación (%R) que indica el porcentaje que representa el valor medido respecto al valor teórico (cantidad de analito añadida).

### **2.3. Análisis microscópico de los polvos de acería estudiados.**

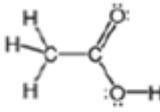
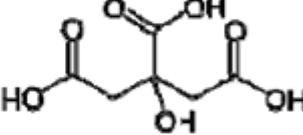
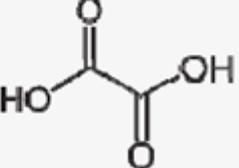
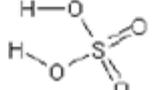
Los polvos de acería estudiados fueron también analizados mediante la técnica de [Escribir texto]

microscopía electrónica de barrido (SEM), para observar sus rasgos morfológicos micrométricos. Adicionalmente, se utilizó la técnica de espectroscopía de energías dispersivas (EDS), acoplada al microscopio, con la finalidad de obtener un análisis micro-químico elemental semi-cuantitativo de este residuo.

#### 2.4. Lavado secuencial de los polvos de acería.

Los lavados secuenciales se realizaron empleando diferentes soluciones ácidas diluidas, a saber, ácido cítrico, ácido oxálico, ácido acético y ácido sulfúrico. Las características generales de dichos ácidos se muestran en la tabla 1.

(Tabla 1)

DISOLUCIÓN ÁCIDA	FÓRMULA QUÍMICA		PESO MOLECULAR (g/mol)
ÁCIDO ACÉTICO	CH <sub>3</sub> COOH		60,05
ÁCIDO CÍTRICO	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>		192,13
ÁCIDO OXÁLICO	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		90,03
ÁCIDO SULFÚRICO	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		98,08

Todas las soluciones ácidas mencionadas, se prepararon a concentraciones tales que su pH fuera de aproximadamente 2,6 unidades, ya que estas condiciones se asemejan a las alcanzadas en procesos de biorremediación de arenas, utilizando el hongo del suelo *Aspergillus Niger* (Groudev, 1987). Estos datos se resumen en la tabla 2.

[Escribir texto]

(Tabla 2)

**Tabla 2. Concentración de los ácidos empleados como agentes lixiviantes.**

Solución lixiviante	Concentración		pH efectivo alcanzado
	mol/L	g/L	
<b>Cítrico</b>	<b>0,0260</b>	<b>5</b>	<b>2,57</b>
<b>Oxálico</b>	<b>0,0072</b>	<b>0,65</b>	<b>2,59</b>
<b>Acético</b>	<b>0,8326</b>	<b>50</b>	
<b>+</b>			<b>2,58</b>
<b>Sulfúrico</b>	<b>0,0019</b>	<b>0,184</b>	
<b>Sulfúrico</b>	<b>0,0184</b>	<b>1,8</b>	<b>2,59</b>
<b>Agua destilada</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>5,54</b>

En cada experimento, se añadieron 70 g de polvo de acería en 1 L de solución de lavado, la cual se encontraba contenida en un reactor Pyrex de 2 L de capacidad, agitado con una propela de acero inoxidable accionada por un motor fuera de borda, tal y como se muestra en la figura 1. Todos los experimentos con las diferentes soluciones de lavado, se realizaron en tres etapas o *batches*, llevados a cabo de manera secuencial. Cada etapa o *batch* tuvo una duración de 120 min. Al finalizar cada lavado o *batch*, la solución sobrenadante se removió y se sustituyó por una cantidad equivalente de solución fresca, antes de iniciar la siguiente etapa de lavado.

(Figura 1)



**Figura 1. Montaje experimental empleado en la investigación para realizar los ensayos de lixiviación dinámica.**

Durante los lavados, cada 20 min se detuvo la agitación y se extrajo del reactor una alícuota de 10 mL, empleando una pipeta volumétrica. La alícuota se filtró utilizando papeles de filtro ADVANTEC Grado N° 235. El líquido resultante de la filtración, se sometió a una medición de pH, utilizando un pH-metro Digimed DM-23, para así determinar los cambios en la alcalinidad de la solución de lavado.

### **III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **3.1. Análisis químico elemental de los polvos de acería estudiados.**

La composición química elemental de los polvos de acería se muestra en la tabla 3, en donde se aprecia que este residuo está constituido en su mayoría por Fe y que contiene importantes cantidades de otros metales pesados provenientes de la chatarra utilizada como materia prima. En especial se destaca la detección de Zn, el cual proviene, en su mayoría, de la chatarra de acero galvanizado utilizada como parte de la materia prima cargada en el EAF (Janaína y Brehm, 2006). Adicionalmente, la presencia de Ca se atribuye a la incorporación de este elemento al proceso de aceración, en forma de fundente metalúrgico. La tabla 3 también muestra los resultados del porcentaje de recuperación (%R), los cuales sirvieron para validar la técnica de análisis químico empleada.

[Escribir texto]

(Tabla 3)

**Tabla 3. Composición química elemental (%Ele) de los polvos de acería estudiados, obtenida por FAAS. También se muestra el porcentaje de recuperación (%R) obtenido experimentalmente para la validación de la técnica empleada. Unidades en % en peso.**

	Fe	Zn	Ca	Mn	K	Pb	Mg	Na	Cu	Cr	Al	Si
%Ele	28,2 ±0,9	4,3 ±0,2	1,54 ±0,09	1,3 ±0,2	0,75 ±0,07	0,65 ±0,04	0,65 ±0,03	0,38 ±0,04	0,070 ±0,005	0,047 ±0,004	ND*	ND*
%R	93,5	81,2	106,6	86,8	87,7	76,5	102,2	100,1	88,5	95,2	ND*	ND*

ND: No determinado

De acuerdo con la bibliografía consultada (Harris, 2003), el resultado de los análisis químicos se considera válido si el porcentaje de recuperación de cada elemento químico analizado se encuentra entre 90 % y 110 %. Los elementos cuantificados que estuvieron en este rango fueron: Cr, Fe, Na, Ca y Mg. Por este motivo, puede establecerse que el procedimiento de fusión alcalina con tetraborato de litio a 950 °C y posterior disolución del fundido en ácido nítrico al 10%, para analizar por vía húmeda, mediante la técnica de FAAS, fue adecuada para la determinación de dichos elementos, razón por la cual los resultados obtenidos se pueden considerar con una elevada exactitud. Por su parte, para elementos tales como el Cu, Mn, y K, los porcentajes de recuperación fueron 88,5%, 86,8% y 87,7%, respectivamente. A pesar de que dichos valores se encuentran por debajo del 90% de recuperación, se considera que los mismos son aceptables.

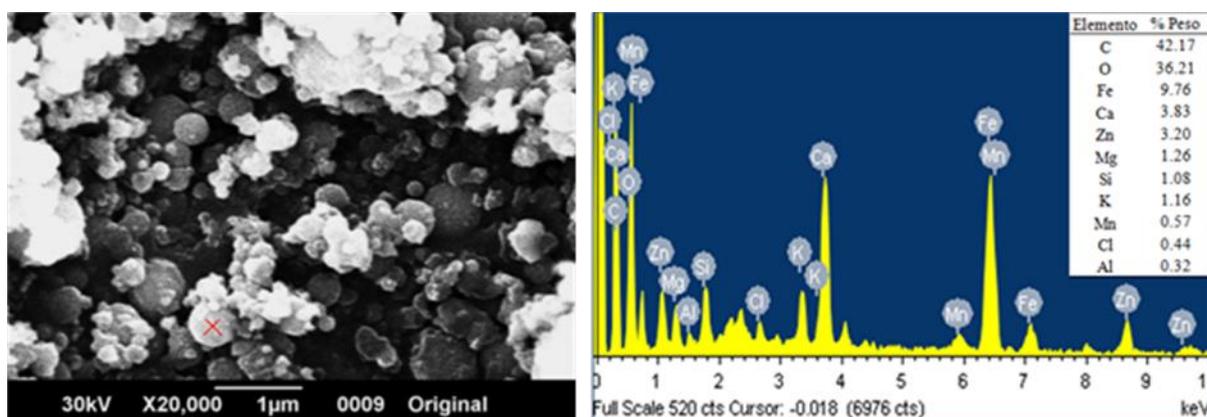
En el caso del Zn, no obstante, se obtuvo un porcentaje de recuperación que resulta ser más bajo, alcanzando un valor del 81,2%. De manera similar, el porcentaje de recuperación del Pb fue el más bajo (76,5%). En ambos casos, las mediciones realizadas fueron confiables, por lo que el bajo %R para ambos elementos, estaría relacionado con la volatilidad de los mismos, como consecuencia de haber fundido la muestra original a 950 °C (Bettineli, 1983).

### **3.2. Análisis microscópico de los polvos de acería estudiados.**

Los análisis SEM y EDS obtenidos a partir de la muestra de polvo de acería estudiada en este trabajo se presentan en la figura 2.

[Escribir texto]

(Figura 2)



**Figura 2.** (A) Imagen SEM de los polvos de acería. Voltaje de aceleración de 30 kV. Aumentos de la imagen original de 20000X. (B) Análisis micro-químico elemental semi-cuantitativo por EDS, realizado en la zona con una “X” en la figura 2-A.

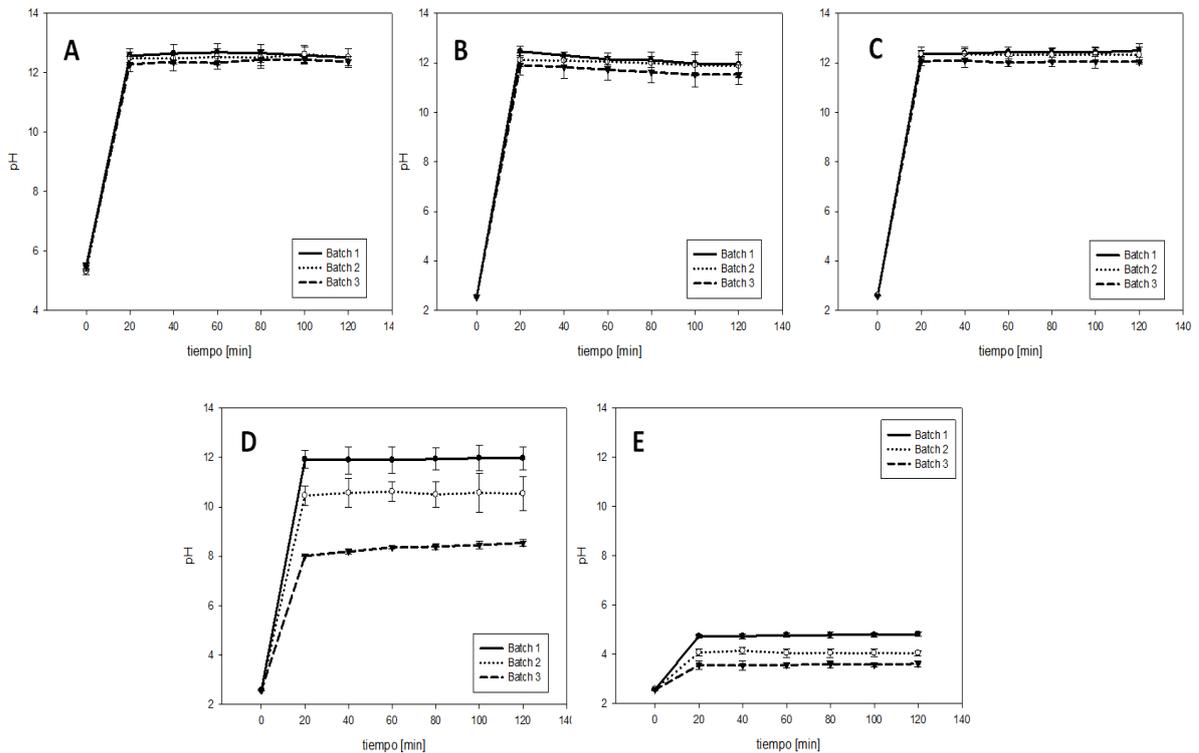
En dicha figura, se observa que los polvos de acería se encontraban formados por partículas con morfología esférica con un tamaño sub-micrométrico que ronda los 0,5  $\mu\text{m}$ . Así mismo, el análisis micro-químico elemental semi-cuantitativo por EDS, indica la presencia mayoritaria de hierro y oxígeno en los polvos. Esto se relaciona con la presencia de magnetita y espinelas en la muestra (Delvasto *et al.*, 2011). El análisis por EDS también detectó otros elementos tales como: Ca, Zn, Mg, Si, K, Mn, Cl y Al. Todos estos elementos son compatibles con las otras fases mineralógicas reportadas para este mismo polvo de acería, en un trabajo previo (Delvasto *et al.*, 2011). Sin embargo, elementos como el K y el Cl, podrían asociarse con la presencia minoritaria de cristales de sales dispersas, posiblemente adsorbidas a las partículas del polvo de acería, tal y como lo evidencian resultados publicados con anterioridad por otros investigadores (Bruckard *et al.*, 2005).

### 3.3. Lavado secuencial de los polvos de acería.

La evolución del pH de los líquidos sobrenadantes durante el proceso de lavado secuencial de los polvos de acería se presenta en la figura 3, para los diferentes ácidos diluidos utilizados.

[Escribir texto]

(Figura 3)



**Figura 3. Curvas de pH vs tiempo de los tres *batches* realizados en los experimentos de lixiviación con (A) agua destilada, (B) ácido oxálico, (C) ácido sulfúrico, (D) ácido cítrico y (E) ácido acético.**

Al observar la figura 3-A se aprecia que, al colocar en contacto el polvo de acería con agua destilada, el citado residuo afectó al agua elevando su pH hasta valores entre 12 y 13 unidades. De esta manera, se muestra como el polvo de acería estudiado puede generar lixiviados con alto nivel de basicidad y, por lo tanto, al estar eventualmente en contacto con el agua de lluvia, supondría un elevado peligro de contaminación de los ecosistemas acuáticos adyacentes al sitio en donde se encuentren dispuestos estos materiales. En principio, las principales fases responsables de la elevación del pH del agua al ponerse en contacto con los polvos de acería son los óxidos anhidros, tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{PbO}$ , y  $\text{ZnO}$ , los cuales, al contacto con el agua, favorecerían la formación de hidróxidos. La figura 3-A también muestra que a pesar de someter al residuo a tres ciclos de lavado con agua, el pH resultante de los sobrenadantes continua siendo básico, de forma tal que se demuestra que el agua, por si sola, no constituye un buen agente de lavado capaz de neutralizar los lixiviados generados por los polvos de acería.

[Escribir texto]

Las figuras 3-B y 3-C, muestran los resultados del experimento de atenuación de la alcalinidad de los polvos de acería empleando ácido oxálico y ácido sulfúrico, respectivamente. Se aprecia que ambas soluciones de lavado no generan una remediación de la alcalinidad de los polvos de acería, ya que el pH se mantiene entre 12 y 13 unidades, el cual es un resultado casi idéntico al que se obtuvo cuando se empleó agua destilada (figura 3-A). Por tanto, el poder de atenuación de la basicidad del ácido oxálico y el ácido sulfúrico es despreciable al emplearse para el tratamiento de polvos de acería, lo que impediría una posible aplicación tecnológica de estos ácidos para las finalidades perseguidas en el presente trabajo.

Por su parte, al realizar los lavados con ácido cítrico (Figura 3-D), se observa que el pH de los lixiviados resultantes disminuye conforme se realizan los lavados o *batches*, llegando a un pH de 8 unidades con el tercer *batch*, lo que pudiese interpretarse como una condición casi óptima para el almacenamiento del citado desecho industrial, ya que los líquidos resultantes de una eventual interacción del polvo con el agua de lluvia, tendrían posiblemente un pH casi neutro, disminuyendo así los riesgos de contaminación de suelos, aguas subterráneas y cuerpos de agua adyacentes al sitio donde se disponen los polvos de acería.

Finalmente, en la figura 3-E, se observa la interacción del polvo de acería con la solución de ácido acético, la cual genera lixiviados notoriamente ácidos, partiendo de un pH de aproximadamente 5 en el primer *batch* hasta llegar a un valor menor a las 4 unidades en el tercer y último *batch*. A pesar de que la solución de ácido acético demostró poseer la mayor capacidad de disminución del pH de los lixiviados, los valores ácidos alcanzados pudiesen resultar no consonos, con la intención de neutralizar el pH de estos residuos. No obstante, no se descarta que un eventual tratamiento con una solución de ácido acético menos concentrada y, por tanto, con un pH inicial menos ácido, pudiese alcanzar resultados satisfactorios con la realización de un único *batch*.

Queda visto por los resultados mostrados en la figura 3, que el proceso de lavado de los polvos de acería no es dependiente del pH de la solución que se utilice como medio de lavado, esto, en razón de que todas las soluciones de lavado (salvo el agua destilada) se prepararon de tal suerte que su pH final fuese cercano 2,6 unidades. Esto indica que los aniones orgánicos juegan un papel fundamental en el proceso de atenuación de la alcalinidad de los polvos de acería. En este sentido, se extrae que los aniones citrato y acetato parecen interactuar de forma más íntima con los polvos de acería para impedir la formación de hidróxidos a partir de la reacción de los óxidos anhidros, inicialmente

[Escribir texto]

presentes en el sólido, con el agua disponible en el medio de lavado. No obstante, los motivos que conducen a este comportamiento no se investigaron en el presente trabajo, debido a que las técnicas de caracterización necesarias para sustentar esta hipótesis no fueron empleadas. Sin embargo, esta problemática será abordada en futuras investigaciones. De igual manera, las investigaciones que deriven del presente trabajo, se enfocarán también en la determinación de metales pesados en los líquidos sobrenadantes obtenidos durante cada ciclo de lavado, de forma tal que se confirme que, durante el proceso de disminución de la alcalinidad, también se eliminan parte de los metales pesados presentes en los polvos de acería. Lo anterior permitiría relacionar las variaciones de pH con el ataque a diversas fases presentes en los polvos de acería y, por tanto, podría generar aplicaciones tecnológicas en el ámbito de recuperación de metales pesados por lixiviación dinámica de los polvos de acería con ácidos orgánicos diluidos.

#### **IV. CONCLUSIONES**

Los estudios realizados al polvo de acería revelaron que éste se encuentra compuesto por diversos metales pesados, entre los cuales predominan el Fe y el Zn. Adicionalmente, se encontró que el residuo estudiado se encontraba compuesto por partículas con morfología esférica y tamaño sub-micrométrico que promedia 0,5  $\mu\text{m}$ . Se observó que el polvo de acería es un residuo altamente contaminante desde el punto de vista de su grado de alcalinidad, ya que eleva el pH del agua destilada a un valor comprendido entre 12 y 13 unidades. Los resultados de atenuación de la alcalinidad muestran que la solución de ácido acético presentó el mayor poder de atenuación, no obstante, tomando en cuenta el punto de vista ecológico, la solución de ácido cítrico brindó los mejores resultados con las condiciones experimentales empleadas, ya que permite que el lixiviado alcance un valor cercano a la neutralidad, luego de tres ciclos de lavado. Se encontró también que las soluciones de ácido oxálico y de ácido sulfúrico no pueden ser utilizadas desde un punto de vista tecnológico, con el propósito de atenuar la basicidad de los polvos de acería, ya que no generan una disminución en el pH de las soluciones en contacto con el polvo de acería, bajo las condiciones estudiadas. Estos resultados preliminares sugieren que con un solo *batch* de una solución de ácido acético, pero con menor pH inicial que el usado en la presente investigación, podría resultar económicamente útil, pero esto aún debe determinarse experimentalmente.

#### **V. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

[Escribir texto]

1. Bettineli, M. (1983). Determination of trace metals in siliceous standard reference materials by electrochemical atomic absorption spectrometry after lithium tetraborate fusion. *Anal Chim Acta*, (148): 193-201.
2. Bruckard, W. J.; Davey, K. J.; Rodopoulos, T.; Woodcock, J. T.; Italiano, J. (2005). Water leaching and magnetic separation for decreasing de chloride level and upgrading de zinc content of EAD steelmaking baghouse dusts. *Int. J. Miner. Process*, (75): 1-20.
3. Delvasto, P.; Ibañez Aldao, B.; Sandoval Ravotti, D. (2011). Caracterización de polvos de acería eléctrica producidos en Venezuela y evaluación preliminar de su lixiviabilidad con ácidos orgánicos diluidos. *Dyna*, (169): 221-229.
4. González, J.; Vadillo, L.; López, C.; González, A.; Navarro, E.; Vázquez, Á. (1995). Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica, Madrid (España): Instituto Tecnológico Geominero de España, pp: 166-171.
5. Groudev, S. (1987). Use of heterotrophic microorganisms in mineral biotechnology. *Acta Biotechnol*, (7): 299-306.
6. Harris, D. (2003). *Análisis químico cuantitativo*. 3ra Ed. Barcelona (España): Editorial Reverté, S.A., pp: 723.
7. Machado, J.; Brehm, F.; Mendes Moraes, C. A.; dos Santos, C. A.; Faria Vilela, A. (2006). Characterization Study of Electric Arc Furnace Dust Phases. *Mat. Res.*, (9): 41-45.