

# BIOSORCIÓN MICROBIANA APLICADA A LA SEPARACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS DAM

(Microbial biosorption of metal in effluent miners)

Francisco Orduz, Aura L. Chaves

Grupo de Investigación GEAM, Upte Sogamoso,  
francorduz@hotmail.com

(Recibido Mayo 15 de 2007 y aceptado Octubre 22 de 2007)

## Resumen:

Los drenajes ácidos de minería (DAM), emanados de las explotaciones de carbón y minería metálica entre otros, son una de las principales fuentes de contaminación de aguas superficiales y subterráneas en el mundo. La biorremediación de los ecosistemas acuáticos contaminados se está documentando permanentemente como una alternativa eficaz, aplicada especialmente a los metales pesados que contiene. En el presente trabajo se estudió un sistema "Bioquímico" para disminuir la concentración de metales mediante biosorción microbiana. Se utilizaron biorreactores de lecho fijo y fluidizado con biomasa fúngica, se seleccionaron cuatro cepas del género *Aspergillus* y cuatro del género *Rhizopus* vivas y muertas. Los tiempos de residencia del DAM en el sistema, la temperatura y la concentración de metales pesados disueltos, especialmente los derivados de la oxidación de la pirita (hierro), fueron las variables de mayor control. Se encontró que la eliminación de hierro (95.2%) fue más eficaz en los sistemas de depuración donde se trabajó con un biorreactor de lecho fijo y biomasa fúngica inerte con tiempo de residencia entre veinte y cuarenta minutos. En lo relacionado con la acidez, los valores de pH mostraron tendencia a incrementar en la medida que disminuyó la concentración de hierro.

**Palabras clave:** Drenajes Ácidos de Mina (DAM), Biorreactor, Masa fúngica, Tiempo de residencia.

## Abstract:

The mining is essential inside the energetic development of a country, but also it is one of the activities that affect the environment and the quality of life of the people who live in the mining zones. The technology of bioremediation is based on the use of microorganisms which degrade and transform pollutant substances in terrestrial and aquatic ecosystems. The aim of this work was the design of an integrated physicochemical and biological system for diminishing the concentration of iron of the effluent miners by using technologies of biosorption microbial, which is formed by a bioreactor and a fungus biomass for studying the efficiency of the decontamination of mine acid drainages (MAD) with heavy metals, specially the derivatives of the oxidation of the pyrite (iron). In this work were used four genus *Aspergillus* fungus species and four genus *Rhizopus* fungus species, all these were alive and inert; besides two kind of bioreactors of fixed bed and fluidized bed and different times of residence of the water in the system of the biofiltration were used. The elimination of iron (was of the 95.2%) was more effective in the systems of biofiltration where was employed a bioreactor of fixed bed with inert fungus biomass, with time of residence between twenty and forty minutes. In relation with the decrease of the water acidity, the pH value increased when the concentration of iron diminished.

**Key words:** Mine Acid Drainages (MAD), Bioreactor, Fungus Biomass, Time of Residence.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta este siglo pocos pensaron que los seres humanos, viviendo en una extensión de tierra aparentemente sin límites y con agua abundante, podrían causar daños irreparables al medio ambiente. Sin embargo, hoy los gobiernos y la población en general en todo el mundo luchan con la erosión costera, los derrames de petróleo y la contaminación del agua, en tanto que cuestiones como el crecimiento de la población, la deforestación, la lluvia ácida y la posibilidad de rápidos cambios climáticos significan decisiones difíciles para el futuro (Chalela, 2001).

A pesar que es esencial dentro del desarrollo energético de un país, la minería es también una de las actividades industriales que mayor incidencia provoca sobre el medio ambiente y la calidad de vida de las personas que habitan en las zonas cercanas a una explotación. Esta actividad puede generar una cantidad elevada de contaminantes, entre los que se destacan los Drenajes Ácidos de Minas (DAM) que suelen contener importantes cantidades de diferentes metales pesados (Gadd, 1988).

La actividad minera subterránea genera una alta contaminación en el medio ambiente, por la acidez y la elevada concentración

de iones metálicos presentes en los DAM. En el caso particular de los suelos, los acidifica, afecta la fertilidad y su uso posterior; en el caso de los acuíferos y aguas superficiales, pueden comprometer seriamente el uso de este recurso como fuente de abastecimiento de agua para el riego, el consumo humano y animal (Chalela, 2001). En el caso de Boyacá, la explotación minera es realizada en zonas de pequeña minería con gran número de minas de carbón, por personal no calificado y sin los recursos económicos para implementar sistemas costosos para el tratamiento de los residuos resultantes de esta actividad. Además, no se realiza ningún tipo de tratamiento ni medida de calidad a los vertimientos de agua antes de ser descargados.

Desde la perspectiva ambiental de sostenibilidad es prioritario que la minería subterránea del carbón remedie aunque sea en parte uno de los mayores impactos generados a través del tiempo como es el vertimiento directo e indiscriminado de las aguas ácidas al suelo y a los cuerpos de agua. Aunque esta variable ambiental es una de las más importantes, no ha sido suficientemente valorada para buscar el difícil pero no imposible equilibrio entre el menor costo ambiental y el menor costo económico (Chalela, 2001).

A causa de la preocupación generada desde los años 70 por el creciente deterioro ambiental causado por la actividad minera, se han adelantado diversas investigaciones alrededor del mundo, en las cuales se aplican técnicas fisicoquímicas de neutralización. De otro lado, se están desarrollando proyectos que permiten aprovechar las capacidades naturales de bacterias y microorganismos para captar cationes metálicos en sus superficies celulares, proceso conocido como biosorción de metales, en el tratamiento de aguas industriales (Aksu, 1998).

Además de la posibilidad de contribuir a tecnologías alternativas con menor impacto ambiental, es posible utilizar procesos biológicos para remediar contaminaciones ya producidas por diferentes actividades industriales, en particular, por la actividad minera. El objetivo de esta investigación fue el diseño de un sistema biológico para depurar el agua de los drenajes de las minas de carbón, mediante biosorción microbiana.

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el área de estudio del municipio de Paipa (Boyacá), mina los Saucés, se seleccionaron 6 puntos de muestreo en sección lineal sobre el cauce de las aguas comprendido desde el sitio de descarga hasta aproximadamente 500 metros aguas abajo, in situ se tomaron muestras de 500 ml., y se midió el pH y Temperatura para cada una. El transporte de las muestras se realizó en neveras de icopor para mantener las mismas condiciones locales y se almacenaron a 4 °C hasta posterior análisis. En la caracterización analítica se determinó nuevamente T, pH. El análisis de cationes (Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>), y aniones (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>), se realizó en el laboratorio de Geoquímica Ambiental (GEAM) de la UPTC seccional Sogamoso por cromatografía iónica (761 compact IC).

Aun cuando el proceso de biosorción involucra la totalidad de los iones disueltos en los DAM, en este estudio sólo se tuvo en

„Ö0; b à> àÙ: (Áó)Ú@ú è6” q±“ Ú)ò@E-Di¶Ÿió ©δUgi;™æ49 tÒ ‡CEÛ”óy|@ÙC‘P̄tMÔtū

¿. ÇM>èFKÒXYbze5 q¿“àg´æD |ePeEë8Iš=>ùF”T² §< \*µacúG2 tÖ ÁØ%snÑÖ\àoŽiH)š. {\_¿4XB,z^ f•à@ÇM@žPÖ#©TÚ9 9Á×iy BYIIÉ ÊQĀ•āASXP,Š×ÓĵāZēĀ !ñ!IX|btO©Uč 9PhĀ ùF”á. •e ãðS±7%ei Cj;(†ŒĀ,ŕÇ%±7•lòPžšĀC#q¼×\$f „âðŽ“1-İgiK©©δTŪaPl“aBGŪ-YB=BN±y|>AXËËf 6., di tũG| >•â@PÖ\ã05μglòy \*ĀĒt 6fđh ĀCHRÿōĀEgq3uf tÿLd±¶|< Ū)-“Oœj CEŪ -²8-äÜŸYDβ-2šðĒE#• £.Ōm»AF“ā.3 tx×Ū)žμ Ū(v Š

fĀ×5#WE£00=œq¼Yš-sÿBĀ n|P<OĒõúé;kn?D•cQ-ŷĒP×\$r ýJ1-sĀ Ā”pĒ\_ ,d |w|kS„,Ō3”Pe² jĒNœøðđ ’à>P×|ĵp tÖäk, l° AuüZNS±%<l>œĉz“â 5f“ æ4”fisũG”ò@žb”yKO 9†<éP,šµa@“ñX+‰oÖ)lĒËÿ/Ū8†OœĀÜatūX¶QVŸć7.,âŸ\*“ ýN/Ō|©@4”Bf, ð>œN-úŒU(CĒ)BòPĖ|æ3k’çĒM æ4”ĒiŪ8qĪŪ t× |Ē dĀ-ðĒÉ<Ø6...Ō×èĒĀM>ènĪNX¶ Ā |Ÿ\*Ñ, à-^~2Eā0Ž ý|á?ũ|Ūb X|Lšÿœ&8†&ĪĒEa-ũJĒ.3°eĒEĪ\_S¶8... \_-¿{|b|ā¶|o| tũyL¹1· f’ ičBĀg

fĀ×5 épĪdĀ|æüH|š0%đ,à ~RWöFì,?ũYB-?č -¼ ³ç5»wš×% „%”oĪTí’ ÁHIĀ ~Ē)<ĀŪ8...ãè0 iðN\$œw|CŒ\$ø”PžCĪ|} tÖ Ö26.,âç4G/ApXÖŸMKB,P©³ R°²yLN-Ĵ98³F“ã0~e8 :°o tÖ Ö2Ÿ+X ūfâçZĈŒK©ĒĀ^¼ĪŪŸ|Ōœjžš ~RŪ8:†æH-āĀ „Ō%”ĒŸcĀā@EĒ†-c”p\!ŌĪ.,%ŌŪWi(Ī)†k~ŪbĀšXnl ĒeĀ 9¿ „âgĀ#p”ŒĪ>Ā”5fĒ \$,ĪUHĒØZà>Ā”³4ĪDŽpL™Zš, f’ EUt tÖ vĀJ”ĪH•ó Í □g’ ^æ/¿j” œĒHŽ:ē’ðNŌžE 0-ēl-|È&9 tĀG•óĀŸis ‘e ŌĪšŪ&tšĪitKŌ0)Q .(E-U³†ŌP’çp”@ãĪĪ tÖXKN/BE&ôwĀK~ãĪŸŸ†âBŸŪ7...|ŌWœ©œWµ”æ•

fĀ×5 X¶|C£ðN±F”òũĪ|/B wŌ””èē8† 1f9—ākÉ”pöDH-“Ū( ýfāðAsĀ kpĪé6½y<Ū&j, “āf’ĒŪ7•óZCĪBµq¼) °6.,xĒ Ēt -i¶ žž7...YB=>bĸý ĪŪčy×Ū: ðBĒS sĪšðS [”> <%ŌR”p\ 9†Ō!”dh 7,ž-cĀŌ!&ty.EššĀGĪšpòxŌ#q¼ĀžC%ŪŪntŌ0 •+µQĪ-“Ūh ž Ā~ Ū8†Ōā”œdēzN-R?Y; æĀĒĒ™B /Ū(Īkn> „Ō Ō”Ī4°+xĒ(vŌ!”-fŪŌy @ũ,ĪãðS±•æC”°7š. {žĒē-ð.3° -ũN/ĀŪ ĪôðPUŪiŪĪŒšđĀKŪŸE”ð?4ē7.,ã.Ī ‡ã2ôD-z\*xg l tŌX¶Ēÿ&šĀ Ū\*œG”ã@žēr,ã@ĪŪŪ)†šRĪŸuy d±8...Īj-ch fi: Ÿa@ũ %NĪ-Ū: “ākÉē ”@ĒĀœwŪGŸ”ŌCĪ|kpĪ-āCĪ...FĀ3 tŌ×|”½Ÿy|p¼‰œŌŌ/}ç^¼Bç-|< 8=ac5 ĪĪĒE 7•šø ³†Ō3Ā r túG|B ĪL^āCatĀ^±-ũ 4XŸ>Ā#! %œçĒĀCÉ)žš~œüZ.”;” t†Ō2Ÿd:Ālô@ç6Ī B<”®³ ŸŸ[”-²“ŸóçĪũ^ j=-<é ¼ĒPžũ•óŸj... t†Ō2•ā ÖŪ9k4Īā çī=Š—ðSj•

¿ 4ĪŪ£N ”ð<œü,Y<éó ūX|ă0-ĪV’ ‘Ob~bnDç^âCš×F” +xĒEĪHMŌæDĪ,yÇ#ñ?QŸĪ|ĪĒPœŸ\*Ā’@-.,ãðB 0~ŪŪ)wŷKO tŌ ŌĪx|tĀh BðPĒq?Ā! Š×ðNœüŒĀns=>- GK”æē8mðZÇ%# t†Ō2•ā -Ÿ[ç4>-bĀ”ðPŌšq KcéüžM -inĪB±8ĒðPc9—đĪE tĀG|ŸyC%æB ³9ĀŪŪ7<Ā-ũGŸ>rĀFŪŪŌĪ) &.,ĪŪŪ7.,āhiðšf tŌäkEtŌ”sšē! ŌĪj mŏzn-³4EŪDã0ŽŪ9”d²y nE”Ÿ%šãŪŽ -Y ĀoB D’ivŌæ½C³9-ŸæĀŌ4FœðRŌDšš;Ēš±Ō”Ū\*Ū... túGZMĒjÿMŌĪeŌĪ-OœĪk!’#• ² <Ū ½DĀKŠĪĪ- ñ n ŪŌj|(uz túk)Ū). { Ÿ;Āš@çĪĒ&tŌi;šš. 2, Ī?Ā#q=ŪZĪ4ŸY-Ī, +%4P xĀQ.Īç ÷\*xwĀ#pĪŸŸ|Ea 4XPeē9¿! c=lo D’ð tĀŌ2ŸdĀĪĪ dē8K|»’ð>Ā”ĒTĪCŸVœ»

¿ Cjĩ<š~3”P<ĀŌQ<šø~c%®ŪŪ ŪçĀĀ”°© wŌ#©• !:”đĪĒŪcĀG „Ō”ŌŪā@D.š b sĀGZ,Ē)ŸŪžĀ/3 mĒžēq;ŌāB p.\*Ōā” žšr c-ũĀ t Ō)Ÿf”GYā-³†ĀC”PĪŸ,yĒĒĒ ½c”gĀĪĪ(Ī:ĀĪ ŪXĀŽĪy...œž

diferentes cepas (*Rhizopus stolonifer*, *Rhizopus nigricans*, *Rhizopus oryzae*, *Rhizopus arrhizus*, *Aspergillus awamori*, *Aspergillus tamarii*, *Aspergillus terreus*, *Aspergillus niger*) y 5 tiempos de residencia (minutos 20,40, 60, 120 y hora 24). El programa estadístico usado para el procesamiento de la información fue el SPSS 11.5.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La biosorción es un concepto que se ha acuñado para describir el fenómeno de captación pasiva de iones metálicos, en el cual sólo participan interacciones de tipo físico-química con los componentes externos de la célula, por lo tanto, se trata de una unión de tipo reversible (Gadd, 1988).

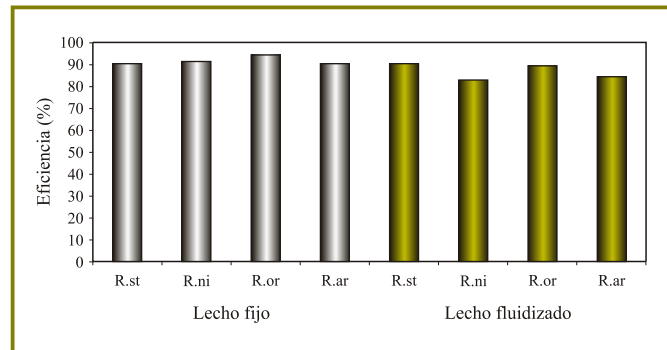
**Proceso de biosorción de hierro:** Los análisis para hierro mostraron diferencias estadísticas entre los promedios de biosorción de las dos biomazas utilizadas (viva, inerte), entre los promedios de los dos biorreactores (lecho fijo, lecho fluidizado), entre promedios de las ocho cepas y entre los promedios de los cinco tiempos.

Los resultados para biomasa indicaron que el promedio para material inerte (86.0%) es estadísticamente diferente y mayor que para biomasa viva (71.3%), mostrando que hay mayor biosorción de hierro en masa inerte (ver figuras 1 y 2). Por lo tanto, no es necesario que el microorganismo se encuentre en activo crecimiento cuando sea utilizado en un proceso de biosorción, lo cual facilita su implementación en un proceso de remoción de iones metálicos, pues es menos afectado por cambios en las condiciones ambientales, tales como temperatura o la presencia de iones tóxicos (Belliveau *et al.*, 1987).

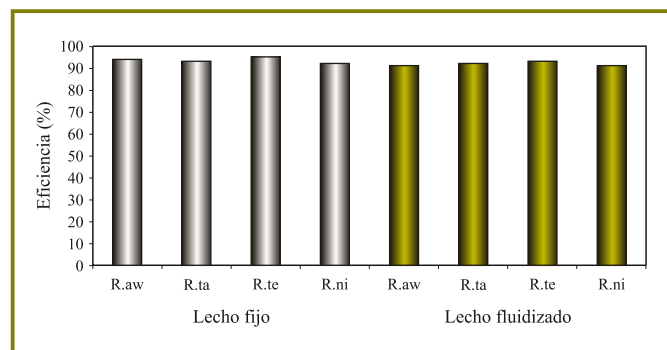
En concordancia con lo expuesto por Gadd, y White. (1989), las pruebas en los biorreactores indicaron que el promedio de biosorción en el biorreactor de lecho fijo (81.0%) es diferente y estadísticamente mayor que el promedio en el de lecho fluidizado (76.3%), indicando que el proceso de biosorción de hierro fue mayor en el biorreactor de lecho fijo.

Gran parte de los biosorbentes, entre los que se cuentan los hongos, contienen sales de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en sus estructuras, estos cationes pueden ser intercambiados con los iones metálicos y quedar unidos al material. Se considera que el intercambio iónico es el principal mecanismo de sorción de las algas marinas y de algunos hongos, esto es debido al contenido en sales de los polisacáridos que forman sus estructuras celulares (Chalela, 2001).

Las pruebas estadísticas demostraron que las cepas de *Aspergillus* adsorben mejor el hierro por cuanto presentaron mayores promedios de biosorción: *Aspergillus terreus* (78.3%), *Aspergillus tamarii* (78.8%), *Aspergillus awamori* (78.4%), *Aspergillus niger* (82.2%); y las cepas de *Rhizopus* presentaron menores promedios: *Rhizopus oryzae* (81.4%), *Rhizopus nigricans* (79.5%), *Rhizopus stolonifer* (76.6%), *Rhizopus arrhizus* (73.9%); de aquí se teoriza que las cepas más eficientes en cuanto a biosorción de hierro fueron las de *Aspergillus* y las que menos las de *Rhizopus*.



**Figura 1.** Porcentaje de eficiencia de biorremediación de hierro con biomasa inerte de *Rhizopus* en biorreactores de lecho fijo y fluidizado.



**Figura 2.** Porcentaje de eficiencia de biorremediación de hierro con biomasa inerte de *Aspergillus* en biorreactores de lecho fijo y fluidizado.

Todas las cepas de *Aspergillus* y *Rhizopus* presentaron diferencias estadísticamente significativas de biosorción entre sí; dentro de éstas los mayores promedios se observaron con *Aspergillus niger* (82.2%) y con *Rhizopus oryzae* (81.4%), esto se debe entre otras cosas a que la unión entre la superficie del biosorbente, especialmente con los polisacáridos estructurales de los hongos, y el metal se produce por fuerzas de atracción electrostática o de Van der Waals (Aksu, 1998).

El manejo estadístico temporal, indicó que el promedio de la concentración inicial de hierro (Hora 0: 104mg.L<sup>-1</sup>, 0% de biosorción) es estadísticamente diferente a los demás tiempos; se presentan diferencias significativas entre los promedios de tiempos 20, 40, 60, 120 minutos y 24 horas, presentándose los promedios más altos de biosorción en 120 minutos (84.1%), sin embargo a causa de las interacciones entre las variables evaluadas, los valores más bajos para cada género se presentaron a los 20 minutos con biomasa inerte de *Aspergillus terreus* (95.1%) (ver figura 2) en biorreactor de lecho fijo y con biomasa inerte de *Rhizopus oryzae* (94.2%) (ver figura 1) a los 40 minutos, igualmente en biorreactor de lecho fijo.

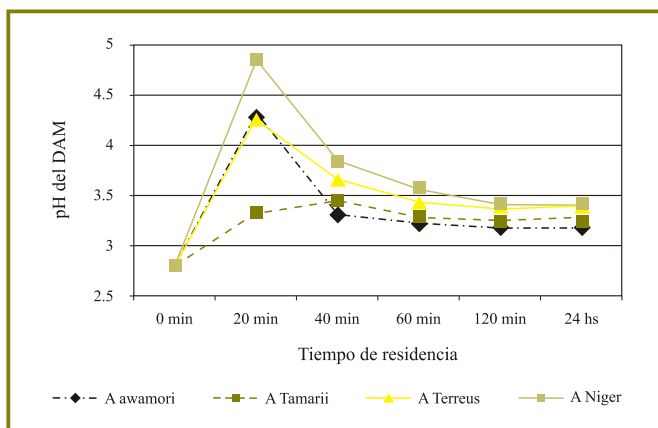
Estos resultados fueron satisfactorios y se ajustaron a lo expuesto por Chalela (2001), en cuanto a que la biosorción es una reacción muy rápida (la reacción alcanzó el equilibrio en



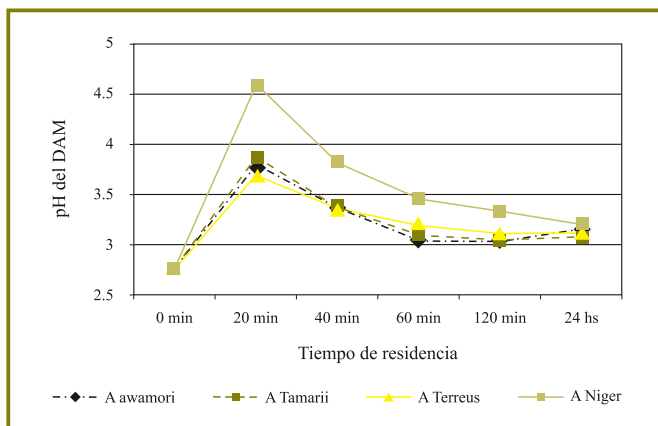
menos de 20 min); enseguida se produjo una deserción, que genero un incremento en el valor final de la concentración.

**Comportamiento del pH:** la biosorción es un proceso dependiente del pH de la solución (ver figuras 3 y 4), es importante resaltar su incremento en la medida en que la concentración de hierro en el DAM se reduce (Chalela, 2001). El análisis estadístico realizado para biorremediación de pH (en porcentaje) mostró que hubo diferencias significativas entre los promedios de biorremediación de los dos tipos de biomasa utilizadas (viva, inerte), de igual manera el pH mostró un incremento con respecto a los tiempos iniciales y a los promedios de los tiempos 20, 40 y 120 minutos no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sus promedios, pero si las tuvieron con los de los demás tiempos. La prueba para la biomasa indicó que el promedio para la inerte (25.8%) es diferente y mayor que para la biomasa viva (24.6%), mostrando que hay mayor aumento de pH en este tipo de material biosorbente.

Los resultados en los biorreactores indicaron para incremento de pH un promedio en fluidizado (27.6%) estadísticamente



**Figura 3.** Valores de pH del DAM en los tiempos de residencia en los biorreactores de lecho fijo con biomasa inerte de *Aspergillus*.



**Figura 4.** Valores de pH de los DAM en los tiempos de residencia en los biorreactores de lecho fijo con biomasa viva de *Aspergillus*.

diferente y mayor que el fijo (22.8%), mostrando que hay mayor biorremediación de pH en el biorreactor de lecho fluidizado. De acuerdo con Chalela, 2001, los contrastes observados en la remoción del metal a diferentes pH's, pueden deberse a la participación de grupos carboxilato ( $pK= 3-5$ ) y fosfato, que presentan una carga negativa por encima de pH 3.0, por lo que el incremento observado en la eliminación de los metales estudiados se puede atribuir al cambio en el estado iónico de estos grupos funcionales.

Esto implica que la adsorción depende en parte de la protonación o desprotonación de los polímeros que forman parte de la pared celular. A pHs menores que el pK, estos grupos se encuentran protonados, restringiendo la entrada de los iones hierro, sin embargo a pHs entre 4.0 y 6.0, los grupos responsables de la retención se encuentran cargados negativamente facilitando el enlace de los iones positivos.

La prueba para tiempo mostró que el valor de pH antes del experimento es estadísticamente diferente a los demás tiempos; los promedios de tiempo de residencia a los 60 minutos (19.8%) y 24 horas (19.8%) fueron estadísticamente iguales. Se presentaron los promedios más altos a los 20 minutos (41.3%) y los más bajos a los 120 minutos (18.2%); el mayor aumento de pH para cada género se dio con biomasa inerte de *Rhizopus Arrhyzus* (78.6%) en biorreactor de lecho fijo a los 20 minutos y biomasa inerte de *Aspergillus niger* (72.7%) en biorreactor de lecho fluidizado en 20 minutos.

Dentro de las cepas de *Rhizopus* y de *Aspergillus* (Grficas 3 y 4) se presentaron diferencias significativas entre promedios de aumento de pH, siendo el de *Aspergillus niger* (33.3%) el de mayor diferencias estadísticas con respecto de todos los demás; *Aspergillus terreus* (20.9%) y *Rhizopus stolonifer* (21.0%) los menores, sin diferencias estadísticas entre sus promedios (Ordúz, 2008).

## 4. CONCLUSIONES

Los mejores resultados de biosorción de hierro (95.2%) de los drenajes ácidos de mina fueron obtenidos al hacer la combinación de biomasa de origen fúngico en condición inerte en biorreactores de lecho fijo.

Las cepas de *Aspergillus* presentaron mayor biosorción de hierro (95.2%) que las cepas de *Rhizopus* (94.2%), *Aspergillus terreus* fue la cepa que mas absorbió hierro (95.2%) y *Rhizopus oryzae* dentro de las cepas de *Rhizopus* fue la especie que absorbió más hierro (94.2%).

El tiempo óptimo de residencia del agua en los biorreactores se presentó entre 20 y 40 minutos, teniendo en cuenta que el proceso de biosorción varió levemente en el tiempo, de acuerdo al tipo de cepa y al tipo de biorreactor usados.

Después de su paso por los filtros, la acidez del agua se redujo (pH aumentó) a medida que la concentración de hierro y sulfatos disminuyó. El mayor cambio en la acidez del agua se observó en la biomasa inerte de la cepa *Aspergillus tamaritii* y en el biorreactor de lecho fijo.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación fue posible gracias al apoyo financiero de la Cooperativa Agrominera de Paipa y del CINBBYA (Centro de Investigación en Biotecnología Bioética y Ambiente) de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Y al grupo de investigación GEAM de la Uptc, a los Ing. Alfredo Guío, Pilar Velazco y Ana Lucía Fraile, cuya contribución fue definitiva en el desarrollo del trabajo.

## 6. REFERENCIAS

Aksu, Z. (1998). Biosorption of heavy metals by microalgae in batch and continuous systems. En: *Algae for waste water treatment*. N. Tam y V. S. Wong, (eds.). Springer-Verlag and Landes Bioscience, Germany. pp. 37-53.

- Belliveau, B. H., M. E. Starodub, C. Cotter y J.T. Trevors (1987). Metal resistance and accumulation in bacteria. *Biotechnol.* 5, pp. 101-127.
- Chalela, G. (2001). Biosorción de Cadmio por medio de *Aspergillus Nger* y *Rhizopus oryzae*. Universidad Industrial de Santander, CINBIN, pp. 7-55.
- Gadd, G. M. (1988). Accumulation of metals by microorganisms and algae. En: *Biotechnology - A Comprehensive Treatise Special Microbial Processes*. H. J. Rehm (ed.). VCH Verlagsgesellschaft. Weinheim. Volumen 6, pp. 401-433.
- Gadd, G. M.; y C. White (1989). Heavy metal and radionuclide accumulation and toxicity in fungal and yeasts. En: *Metal-Microbe Interactions*. R. K. Poole y G. M. Gadd (eds.), IRL Press, Oxford. pp. 19-38.
- Kapoor, A., T. Viraraghavan y D. R. Cullimore (1999). Removal of heavy metals using the fungus *Aspergillus niger*. *Biores. Technol.* 70, pp. 95-104.