



BIODESULFURATION OF COAL: AN ALTERNATIVE ENVIRONMENTALLY VIABLE IN THE REDUCTION OF IT SULFURATES OF THE COAL

BIODESULFURACIÓN DE CARBÓN: UNA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE VIABLE EN LA REDUCCIÓN DE AZUFRE DEL CARBÓN

VARGAS, M. J. PhD. y RAMON, J.A. PhD.

Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS)
Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Tel:
5685303 (ext. 140) e-mail: mvargas@unipamplona.edu.co

RESUMEN

Teniendo en cuenta que el alto contenido en azufre de los carbones con fines térmicos genera emisiones atmosféricas de SO_2 e incide negativamente en su precio de venta, la búsqueda de alternativas que resuelvan dicha problemática es una permanente preocupación de los entes involucrados en la explotación, beneficio y generación de energía del carbón. El presente trabajo realiza una revisión de los resultados más recientes en lo que se refiere a la biodesulfuración de carbón como alternativa de solución.

ABSTRAC

keeping in mind that the high content in sulfur of the coal with thermal ends generates atmospheric emissions of SO_2 and it impacts negatively in its sale price, the search of alternatives that you solve this problem is a permanent concern of the entities involved in the exploitation, benefit and generation of energy of the coal. The present work carries out a revision of the most recent results in what refers to the biodesulfuration of coal like solution alternative.

KEYWORDS

biodesulfuración, biolixiviación, despiritización, carbón

1. EL CARBÓN

El carbón es el combustible fósil más abundante en el mundo. Mientras las existencias para el gas y el petróleo son limitadas, las actuales reservas disponibles para el carbón son suficientes para más de 300 años (Acharya, 2003). Su importancia como fuente de energía se ha puesto de manifiesto desde la crisis energética de la década de los 70.

La utilización del carbón como combustible ha tenido una fuerte influencia en el desarrollo industrial. No obstante, el petróleo a partir de los años 60 y en los años recientes el gas natural, se han posicionado como fuertes competidores en su papel como fuentes energéticas. Debido a que el incremento de la demanda energética en las últimas décadas y las crisis del petróleo han aumentado su precio, el carbón ha sido la





alternativa en la producción de energía en centrales térmicas frente a los otros combustibles fósiles

1.1 El carbón como contaminante

La lluvia ácida constituye un serio problema ambiental y es ocasionada principalmente por la contaminación atmosférica proveniente de la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre. La lluvia ácida se forma generalmente en las nubes altas donde el SO_2 y los NO_x reaccionan con el agua y el oxígeno formando una solución diluida de ácido sulfúrico y ácido nítrico, contribuyendo la radiación solar al aumento de dicha reacción. De ese modo, cada vez resulta más evidente la necesidad de desarrollar técnicas que permitan el uso del carbón de baja calidad y así controlar las emisiones de SO_2 e impedir su dispersión en la atmósfera, teniendo presente que el carbón contiene azufre entre el 0.1 y 10% y su combustión para la generación de energía eléctrica contribuye a la formación de la lluvia ácida.

1.2 Formas de azufre en el carbón

Azufre pirítico: Los sulfuros metálicos forman inclusiones físicamente distintas de la matriz orgánica del carbón, pudiéndose separar de ella por medios físicos.

Azufre orgánico: El azufre orgánico se encuentra unido covalentemente formando parte de la configuración molecular del carbón, siendo su distribución en la matriz carbonosa más homogénea que la pirita.

Azufre sulfato: Está presente en la materia mineral del carbón en forma de sulfatos de hierro, calcio y bario. En el carbón no meteorizado, la cantidad presente de este tipo de azufre suele ser menor del 0.1%.

2. LA BIODESULFURACIÓN COMO ALTERNATIVA

La biodesulfuración es un proceso de lixiviación catalizado por microorganismos, teniendo como resultado la disolución del mineral objeto de ataque, o la degradación de ciertos enlaces de la molécula, originando compuestos solubles de

azufre (caso del azufre orgánico). El resultado final del proceso depende del tipo de microorganismo y de las condiciones de desarrollo de los mismos, condiciones que están controladas por parámetros físicos, químicos y mineralógicos: temperatura, pH, nutrientes, estructura del mineral, tamaño de grano, densidad de pulpa, etc.

2.1. Aspecto microbiológico

Previo a cualquier trabajo de biodesulfuración, es necesario el conocimiento de los seres vivos que proporcionan los enzimas que hacen posible la desulfuración del carbón, en un tiempo relativamente pequeño, desde el punto económico.

Los microorganismos susceptibles de ser utilizados en metalurgia y minería son múltiples y muy variados. De todos ellos, el más estudiado ha sido el *Thiobacillus ferrooxidans*, considerado como el prototipo de bacteria desulfurante, aunque también hoy día el *Leptospirillum ferrooxidans* se ha comprobado que puede colaborar eficazmente en el proceso (Aller, 2000).

Los microorganismos que, hasta tiempos recientes se han considerado como los principales participantes en los procesos de biodesulfuración, tienen en común las siguientes características:

- Son quimiolitotrofos, es decir su única fuente de energía son sustancias inorgánicas.
- Son aerobios estrictos, es decir sólo pueden vivir en ambientes con oxígeno.
- Son mesófilos y el rango de temperatura de crecimiento óptimo está entre 20 y 40°C dependiendo del tipo de microorganismo. También existen algunos termófilos que actúan a temperaturas entre 50 y 100°C.
- Son acidófilos, siendo capaces de desarrollar plenamente su actividad metabólica a pH's muy ácidos (1.5-2.5).
- Su única fuente de carbono es el CO_2 .





2.1. Variables asociadas a la desulfuración

2.1.1. Tamaño de partícula

Debido a que el proceso de lixiviación, ya sea en condiciones abióticas o por medio de microorganismos, es un fenómeno de superficie, depende del tamaño del grano. Se espera que al disminuir el tamaño del grano aumente el área superficial por unidad de masa, y por lo tanto, se incremente la velocidad de lixiviación. Sin embargo, Gockay y Yurtery (1983) señalan que hay un tamaño de partícula por debajo del cual no se incrementa el porcentaje de azufre eliminado, y Reed (1990) opina que para un área superficial baja, la velocidad de biolixiviación depende del área superficial, en cambio, cuando ésta es alta, la velocidad depende de la concentración celular. De este modo, para optimizar la reacción, o se reduce el tamaño de la partícula, o se incrementa la densidad de biomasa.

Beier (1990), Fakuosa (1990) y Rossi (1990) demuestran que el proceso de biodesulfuración tiene mayor rendimiento cuanto más íntimo sea el contacto entre las bacterias y el carbón. Por ello el proceso se verá favorecido para tamaños de partícula lo más pequeño posible, debido a que habrá mayor accesibilidad a los núcleos piríticos que se encuentran diseminados en el carbón.

2.1.2 Densidad de pulpa

Se define la densidad de pulpa como la concentración de carbón en el medio, y se expresa en tanto por ciento en peso de carbón en agua. Este factor es crítico para minimizar el volumen de los lixiviados.

Reed (1990), opina que se requiere del 50 al 60% de densidad de pulpa para que el proceso sea viable desde el punto de vista económico. No obstante, la aglomeración de partículas ocasiona una reducción en la solubilidad y en la transferencia de las sustancias gaseosas, incrementando la posibilidad de que se formen compuestos insolubles, y a su vez que aumente la concentración de productos de reacción que pueden llegar a ser tóxicos para los microorganismos (Kelly, 1978; Kargi, 1982). Gran

parte de los autores proponen que los rendimientos óptimos en la biodesulfuración son obtenidos para densidades comprendidas entre el 10 y el 20% (Rossi, 1993; Karavaiko, 1994; González, 1995; Martínez, 2000).

2.1.3. Medios de cultivo

Se ha establecido que los sistemas naturales de biolixiviación están formados por ecosistemas microbianos en los que, entre las distintas especies que lo constituyen, se establecen relaciones de simbiosis y comensalismo, y, en determinadas circunstancias, de competición, parasitismo o predación.

Actualmente, se tiende a usar como inóculos cultivos naturales de drenajes ácidos, dándose cada vez más importancia, para optimizar el proceso de biodesulfuración, a las interacciones entre la población microbiana que se encuentra en el ecosistema de partida.

Chandra y Mishra (1990) y Aller (2000), señalan que los carbones en general, tienen sus propios agentes biodesulfurantes, proponiendo el biodesulfurar cada carbón con las mismas bacterias que él soporta.

2.1.4. Temperatura y pH

Respecto a la temperatura, todos los microorganismos están caracterizados por un margen de temperaturas dentro del cual es posible el crecimiento y la multiplicación de los mismos. De acuerdo con esto, la biolixiviación se puede considerar afectada por dos factores competidores, uno de naturaleza química, en el que la velocidad de oxidación se incrementa con la temperatura y otro de naturaleza biológica, en el que, superada la temperatura máxima de crecimiento, las proteínas de la célula comienzan a desnaturalizarse, se detiene el crecimiento y se produce la muerte celular.

Debido a que los microorganismos de la especie *Thiobacillus* son mesófilos, desarrollan su actividad a temperaturas entre 4 y 45°C. En el límite inferior se detiene la actividad bacteriana, pero los microorganismos permanecen en estado latente. Lo anterior permite que los cultivos





puedan conservarse durante largos períodos a bajas temperaturas y que recuperen su actividad con una nueva elevación de la temperatura. En el límite superior se produce la muerte celular.

Referente al pH, debido a que estos microorganismos son acidófilos se limita la acidez del medio lixiviante. Los microorganismos obtienen energía mediante la captura de electrones provenientes de la oxidación de formas reducidas de hierro y azufre, y, con el fin de mantener la electroneutralidad, captan protones del medio.

Según los autores: Dugan, 1986; Ruiz-Alares, 1980; Carranza, 1983; Blázquez, 1981; Mannivannan, 1994; el pH óptimo de crecimiento bacteriano para estos microorganismos está comprendido entre 2.0 y 3.5.

Aller (1998), utilizó diversas temperaturas: 20, 25, 30, 35, 40 y 45° C y los pH_s 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 y posteriormente realizó pruebas a pH 1.75. Los resultados que obtuvo dejan ver que la temperatura y pH óptimos de crecimiento y biolixiviación del cultivo de drenajes ácidos de mina de carbón fueron: 35°C y 1.75-2.

Estos estudios revelan que la adición de nutrientes, como sulfato amónico y fosfato potásico, a la suspensión acuosa del carbón no mejora apreciablemente la lixiviación del mismo y dejó ver que el esterilizar el carbón antes de tratarlo con el inóculo bacteriano no tiene un influjo significativo en la eliminación del azufre comparado cuando no se esteriliza. La investigación demostró que los carbones con los que se trabajó son portadores de bacterias desulfurantes, donde predominan los géneros *Thiobacillus* y *Leptospirillum*. De este modo, el grado de desulfuración logrado utilizando cultivos de microorganismos de los propios carbones, es siempre superior al logrado cuando se utiliza el cultivo estandarizado, concluyéndose que cada carbón debe biodesulfurarse utilizando como inóculo el cultivo de los propios microorganismos.

2.3.3.5. Agitación – Aireación

Una agitación adecuada permite el contacto íntimo entre los microorganismos y el sustrato,

y además posibilita el transporte de los nutrientes. La aireación juega un papel importante en el desarrollo y actividad de las bacterias debido a su carácter estrictamente aerobio.

En los sistemas de taques agitados, la agitación mecánica favorece la aireación. Por su parte, en los sistemas en columna la agitación se genera con la introducción de una corriente de aire, de manera que la agitación y la aireación van unidas en los sistemas en fase líquida.

3. ANTECEDENTES EN TRABAJOS EN BIODESULFURACIÓN

3.1. Pruebas en reactor agitado

Juszczak (1995) experimentó a escala de laboratorio la desulfuración catalizada utilizando *Thiobacillus ferrooxidans* en matraces agitados con pulpa carbón/agua de concentración 2.4%, con tiempos de residencia de 7 días, a temperatura de 35°C., consiguiendo eliminar hasta un 60% del azufre total y un 55% del azufre pirítico.

Martínez (2000), optimizó el proceso de biodesulfuración del carbón, estudiando las variables para obtener rendimientos aceptables en tiempos relativamente cortos. En esta investigación se utilizaron matraces erlenmeyer y luego para confirmar los resultados y aumentar el rendimiento en la reducción del contenido de azufre, matraces biorreactores de mayor capacidad (2 L). La eficacia del proceso mejora cuando se cambia de escala de matraces agitados a birreactores debido a mejores condiciones de agitación y aireación.

En estos estudios, Martínez prueba tamaños de partícula entre 0.06 mm y 0.5 mm, obteniendo los mejores resultados para tamaños menores de 0.125 mm y además amplió el estudio a densidades de pulpa de 5, 10, 15 y 20%. Los resultados indican que la biodesulfuración es máxima para una densidad de pulpa del 15% y en estas condiciones la despiritización fue ligeramente superior al 90%. A su vez, obtiene mejores resultados cuando trabaja con inóculos crecidos a partir de suspensiones del propio carbón.





3.2. Pruebas en columnas aireadas

Morán (1997), realizó pruebas en una columna empaquetada de carbón, utilizando un inóculo bacteriano adaptado al carbón y obtenido del mismo, a temperatura de 20°C y pH de 1.5. En esta columna se recirculó el lixiviado obtenido del fondo al tope de la columna. El proceso consta de dos etapas: estabilización y biodesulfuración. La estabilización se lleva a cabo para prevenir las variaciones de pH durante la desulfuración, causadas por las propiedades alcalinas del carbón y consiste en pasar agua acidulada a pH de 1.5 a través de la columna. En la etapa de desulfuración se introduce el inóculo en la cima de la columna y el líquido de percolación es recirculado. Este líquido es periódicamente purgado de altas concentraciones de hierro a más bajas y el volumen es completado con agua acidulada a pH 1.5. En estas condiciones se logra eliminar hasta un 46% de azufre pirítico en un período relativamente corto (seis semanas).

Aller (1998), estudió la biolixiviación del carbón en un proceso en semi-continuo como método de eliminación de azufre, utilizando tres columnas conectadas en serie y agitadas por aire, acoplándose este sistema en serie a un reactor continuo de flujo pistón. En este proceso se logra transformar en sulfato la mayor parte del azufre pirítico del carbón y habiendo probado diferentes tiempos de residencia se obtuvo eliminación de azufre pirítico hasta del 89%.

3.3. Pruebas en columnas de lecho fijo

La biodesulfuración en reactor agitado ha sido la más estudiada, y por ello, la que más se conoce, pero el proceso en lecho fijo es el que tiene mayores posibilidades de aplicación a nivel industrial, debido a la sencillez del proceso y sus bajos costes de operación. Por lo anterior, la investigación en este área se encamina hacia el estudio en reactor de lecho fijo y sin aireación, de modo que se intenta aumentar la velocidad de desulfuración, con la optimización de las variables involucradas y a su vez utilizando inóculos biológicos mejor adaptados a las condiciones del proceso.

Cara (2000), estudió la biolixiviación de carbón en lecho fijo, utilizando un sistema de columnas en régimen no continuo, analizando principalmente la influencia de dos parámetros: la concentración de hierro en la purga del lixiviado y el tiempo muerto de lavado, sobre el rendimiento de desulfuración de carbón en el proceso llegándose a eliminar hasta un 50% de azufre pirítico.

En estos estudios se obtiene un mayor rendimiento de desulfuración con la fracción granulométrica comprendida entre 0.5 y 1 mm, debido a que es la que posee una mayor superficie disponible. Los tamaños de partícula por debajo de esta fracción granulométrica aún presentando mayor superficie específica, ésta no se encuentra expuesta en su totalidad a los microorganismos y al ión férrico, puesto que muchas de estas partículas se encuentran apelmazadas. Utiliza un inóculo obtenido a partir del propio carbón el cuál se adapta muy bien al sustrato y a las condiciones del proceso y obtuvo los mejores resultados a temperatura de 20°C y pH de 1.5.

3.4. Técnicas de biolixiviación a escala piloto e industrial

Dentro de la oxidación catalizada de la pirita, se han diseñado muchos sistemas de tratamiento con el fin de aumentar la cinética del proceso. Entre los más interesantes se encuentra un reactor denominado biorrotor, que consta esencialmente de un tambor giratorio con una serie de aspas interiores que aumentan la aireación del sistema (Loi, 1994). El tambor trabaja con suspensiones de carbón/agua superiores al 20% y gira con una velocidad muy baja para disminuir el efecto de abrasión de los microorganismos. La velocidad de lixiviación de la pirita es del orden de 500 g/m³.h.

Andrews (1988), diseñó un sistema que trabaja en ciclos de fluidización-inundación que aprovecha la desulfuración física y biológica. Con la fluidización de la columna de carbón elimina la formación de caminos preferentes y arrastra los sulfatos que más adelante podrían formar precipitados de jarositas sobre el carbón. Se





obtiene un porcentaje de eliminación pirítica superior al 80% con tiempos de residencia del orden de 25 días.

La mayoría de las técnicas de biolixiviación mencionadas anteriormente, son de utilización casi exclusiva en laboratorio y en las plantas piloto. A nivel industrial la técnica más utilizada es la lixiviación "in situ", consistente en lixiviar directamente el mineral en pilas, inundándolas de agua acidulada con microorganismos.

Cuando se quiere trasladar los métodos de biolixiviación a nivel industrial, en el caso concreto de la desulfuración de carbón, se ve que aún no se ha pasado de pruebas a nivel piloto, tanto en reactores aireados (Orsi, 1991), como en pilas o diques de carbón (Hyman, 1990; Beier, 1990).

En la experiencia llevada a cabo por Hyman (1990), se realizaron pruebas de lixiviación en pila con 25 toneladas de carbón. Se obtuvieron rendimientos de desulfuración pirítica en torno al 48% para tiempos de residencia del orden de 13 meses.

En reactor agitado a escala industrial hay una experiencia que utilizaba seis tanques agitados en serie, cuya alimentación de pulpa carbón/agua permitía tratar un caudal de 50 kg/h de carbón, obteniendo un producto con una disminución de azufre pirítico mayor al 90% (Loi, 1994). Lo más destacable de este estudio es que el tiempo de residencia en la planta piloto que se necesitó para eliminar el 90% del azufre pirítico presente en el carbón resultó ser aproximadamente un 50% menor que el que se necesitó a escala de laboratorio, pero los costes económicos en la tecnología usada no fueron favorables, principalmente por las altas necesidades energéticas del sistema de reactores agitados.

3.5. Experiencias previas en desulfuración en lecho fijo

Cara (2000), tal como se ha comentado previamente, estudió la biodesulfuración en lecho fijo e inicialmente obtuvo el mejor inóculo adaptado a las condiciones de trabajo, las cuales fueron pH de 1.5 y temperatura de 20°C. En dicho estudio utilizó como inóculo el obtenido del propio

carbón a desulfurar, y cepas mixtas adaptadas a altas concentraciones de metales en disolución.

Igualmente, estudió la influencia que ejercen la concentración de hierro en la purga de lixiviado y el tiempo muerto de lavado, sobre el rendimiento de desulfuración de carbón.

También propuso diferentes modelos cinéticos para el sistema en lecho fijo, calculando los parámetros cinéticos más relevantes.

Optimizadas las variables del proceso, Cara, utilizó un sistema de columnas en régimen no continuo, llegando a separar hasta un 50% de azufre pirítico.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados obtenidos por Cara, se plantea el presente trabajo, donde se estudia la biodesulfuración del carbón con alto contenido en azufre en lecho fijo, el objetivo es evaluar posteriormente el proceso a nivel de planta piloto.

Paralelamente se llevó a cabo el montaje y puesta a punto del sistema de desulfuración en pila de carbón. Se hizo énfasis al funcionamiento del sistema de bombeo, irrigación y percolación de la pila mediante pruebas preliminares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acharya, C., Sukla, L. B., Misra, V. N. (2003). Review. Biodepyritisation of coal. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 79. 1-12.
- Aller, A. (1998). Limpieza de carbones de las cuencas mineras de León por biolixiviación en un proceso en semicontinuo. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.
- Aller, A., Martínez, O., de Linaje, J. A., Méndez, R., Morán, A. (2001). Biodesulphurisation of coal by microorganisms isolated the coal itself. *Fuel Processing Technology.* 69, 45-57.
- Andrews, F. (1988). The Selective Adsorption of Thiobacilli to Dislocation Sites on Pyrite Surfaces. *Biotechnology and Bioengineering.* 31, 378-381.
- Beier, E. (1990). Microbe-assisted pyrite removal from hard coal with due consideration of ensuing





- alterations of the organic coal substance. *Bioprocessing and Biotreatment of Coal*, Wise, D.L.; (Edit), 549-567.
- Blázquez, M. L., Ballester, A., González, F., Mier, J. L. (1991). Desulfuración de carbones. La biodesulfuración como alternativa. *Canteras y explotaciones*, mayo, 40-50.
 - Blázquez, M.L., Ballester, A., González, F., Mier, J.L. (1993). Coal Biodesulphurization: A review. *Biorecovery*, 2, 155-177.
 - Cara, J. (2000). Tratamiento biológico del carbón en lecho fijo. Modificación de la combustibilidad. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo
 - Carranza, F., Moraga, J. M., Pereda, J. (1983) Introducción a la lixiviación microbiológica de sulfuros metálicos. *Ingeniería Química*, Nov'83.
 - Chandra, D., Mishra, A. K. (1990). Removal of sulphur from Assam coals by bacterial means. *Bioprocessing and Biotreatment of Coal*, Wise, D.L. New York: Marcel Dekker Inc., 631-652.
 - Fakoussa, R. (1990). Microbiological Treatment of German Hard Coal. *Bioprocessing and Biotreatment of coal*. (Wise, D.L.) Ed. Marcel Dekker, Inc, New York: 95-107.
 - Gokcay, C., Yurteri, R. (1983). Bacterial desulfurization of lignites. *Bioprocessing and Biotreatment of Coal*, Wise. D.L (Ed). Massachusetts, Northeastern University. 607-629.
 - Hyman, D., Hammack, R., Fniseth, D., Rhce, K. (1990). Biologically mediated heap leaching for coal depyritization. *First International Symposium on the Bioprocessing of coal*. Palo Alto, CA, cap.3, 101-111.
 - Juszczak, A., Domka, F., Kozlowski, M., Wachowska, H. (1995). Microbial desulfurization of coal with *Thiobacillus Ferrooxidans* bacteria. *Fuel*, 74, nº 5, p725-728.
 - Karavaiko, G. I.; Lobyreva, L. B. (1994). An overview of the bacteria and archaea involved in removal of inorganic and organic sulphur compounds from coal. *Fuel Processing Technology*, 40, 167-182.
 - Kargi, F. (1982). Microbiological coal desulphurization. *Enzyme Microbial Technology*, 4, 13-19.
 - Kelly, D.P., Jones, C.A.(1978). Factos affecting metabolism and ferrous iron oxidation in suspensions and batch cultures of *Thiobacillus ferrooxidans*. In: *Metallurgical Applications of Bacterial Leaching and Related Microbiological Phenomena*. Murr, L. E.. Torma, A.E., and Brieley, J.A (eds). Academic Press, New York.
 - Loi, G., Mura, A., Trois, P., Rossi, G. (1994). The Porto Torres biodepyritization pilot plant: Light and shade of one year operation. *Fuel Processing Technology*, 40, 261-268.
 - Mannivannan, T., Pandey, R.A., Sandhya, S. (1994). Microbial desulphurisation of coal by chemoautotrophic *T. ferrooxidans*-an iron mine isolate. *J Environ Sci Heat Part-A*. 29, 2045-2061.
 - Martinez, O. (2000). Optimización del proceso de biodesulfuración del carbón. Efecto sobre su combustibilidad. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo.
 - Martínez, O., Aller, A., Alonso, J., Gómez, E., Morán, A. (1995). Biodesulphurization of coals from the north of León (Spain). Optimization of process variables, *Coal Science and Technology* 24, J. A. Pajares and J.M. Tascón, Eds., Elsevier, Amsterdam, Vol II, p. 1749-1752.
 - Morán, A., Aller, A., Cara, J., Martínez, O., Encinas, J. P., Gómez, E. (1997). Microbiological desulfurization of column-packed coal. *Fuel Processing Technology*, 52, 155-164.
 - Olson, G. (1994). Prospects for biodesulfurization of coal: mechanisms and related process designs. *Fuel Processing Technology*, 40, 103-114.
 - Olsson, G., Pott, B.-M., Larsson, L., Holst, O., Karlsson, H.T. (1994). Microbial desulfurization of coal by *Thiobacillus ferrooxidans* and thermophilic archaea. *Fuel Processing Technology*, 40, 277-282.
 - Orsi, N., Rossi, G., Trois, P., Valenti, P.D., Zecchin, A. (1991). Coal biodesulfurization: design criteria of a pilot plant. *Resources, Conservation and Recycling*, 5, 211-230.
 - Reed, L. (1990). Focus of research in coal bioprocessing. In: *Bioprocessing and Biotreatment of coal*. (Wise, D.L.) Ed. Marcel Dekker, Inc, New York: 1-27.
 - Rossi, G. (1993). Biodepyritization of coal – achievements and problems, *Fuel* 72 (12), p. 1581-1592.

