



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EFECTO DEL BIOCARBÓN EN LA INMOVILIZACIÓN DE
HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS”

Trabajo de investigación para optar el Grado Académico de
Bachiller en Ingeniería Ambiental

Presentado por:

Ana Caroline Ruiz Torrado (0000-0002-2089-6057)

Asesor:

Luis Abraham Gomero Osorio (0000-0002-4739-2094)

Lima – Perú

2019



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°194-2019-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 27 de noviembre de 2019

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Efecto del biocarbón en la inmovilización de hidrocarburos en suelos contaminados**, presentado por:

- **Ana Caroline Ruiz Torrado**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Efecto del biocarbón en la inmovilización de hidrocarburos en suelos contaminados** con N° de registro de la carrera: **041-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Luis Abraham Gomero Osorio** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN LA INMOVILIZACIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS

EFFECT OF BIOCHAR IN THE IMMOBILIZATION OF HYDROCARBON CONTAMINATED SOILS

Ana Ruiz

Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur.

anacarolineruiz@gmail.com

RESUMEN

En la actualidad la industria de hidrocarburos en el Perú es de gran importancia por su aporte económico y energético al país, sin embargo, trae consigo diversos problemas, como son los derrames de petróleo los cuales tienen graves consecuencias en los suelos y la biodiversidad de la zona. Hay múltiples métodos para descontaminar el suelo, pero algunos pueden ser incompatibles con el medio ambiente o muy costosos. Este artículo es una revisión bibliográfica que da a conocer las propiedades del biocarbón y su uso en suelos contaminados, haciendo un énfasis especial en suelos contaminados por hidrocarburos. El biocarbón es un producto de materia orgánica que atraviesa por un proceso de pirolisis y da como resultado una enmienda porosa que en su superficie cuenta con radicales libres los cuales inmovilizan a los contaminantes, posibilitando la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos y otros. Además, entre sus propiedades se encuentra la retención de humedad, porcentaje de C, H, O y N que aportan a la calidad del suelo. Finalmente, la enmienda se puede asociar con otras técnicas como fitorremediación o biorremediación con lombrices para potenciar su efecto de inmovilización de contaminantes y remediación.

Palabras clave: biocarbón, hidrocarburos, inmovilización, contaminación, radicales, pirolisis, suelos

ABSTRACT

Now a day the hydrocarbons industry in Peru is of great importance due to its economic and energy contribution to the country, however, it brings with it several problems, such as oil spills which have serious consequences on the soil and biodiversity of the area. There are multiple methods to decontaminate the soil, but some can be incompatible with the environment or very expensive. This article is a bibliographic review that reveals the properties of biochar and its use in contaminated soils, with special emphasis on soils contaminated by hydrocarbons. Biochar is a product of organic matter that goes through a process of pyrolysis and results in a porous amendment that has free radicals on its surface which immobilize pollutants, enabling the recovery of soils contaminated with hydrocarbons and others. In addition, among its properties is the retention of moisture, percentage of C, H, O and N that contribute to the quality of the soil. Finally, the amendment can be associated with other techniques such as phytoremediation or bioremediation with earthworms to enhance its effect of immobilization of pollutants and remediation.

Keywords : biochar, hydrocarbons, immobilization, pollution, radicals, pyrolysis, soils

INTRODUCCION

La economía mundial ha presentado cambios importantes en el siglo XXI, estando entre los más relevantes se encuentra la diversificación en la producción de tanto recursos naturales como bienes manufacturados (Tamayo et al., 2015). En estos cambios se encuentra la industria de hidrocarburos, la cual en Perú se ha extendido a explotación de reservas no convencionales y diversificando su matriz energética (Tamayo et al., 2015). Esta industria es de gran importancia para el país, aportando según proyecciones del plan energético nacional, el 52% de energía para el año 2025 (Tamayo et al., 2015).

La extracción de esta materia prima se realiza en áreas llamadas bloques, de los cuales 180 de petróleo y gas se encuentran al oeste de la Amazonía, ocupando aproximadamente 688,000 km² de la parte más rica en especies del Amazonas (Finer et al., 2008). Lamentablemente entre el año 2009 y 2018 se han derramado un promedio de 25,000 barriles de petróleo en la Amazonía peruana, que corresponden aproximadamente a cuatro millones de litros, causando múltiples efectos negativos en las sociedades y ecosistemas aledaños, superando los \$ 300 millones en pérdidas ambientales (Sandoval, 2008; Latam, 2018; Romo, 2017).

Al derramarse el crudo en el suelo, se genera en la superficie una capa muy fina que imposibilita el crecimiento de plantas o animales, generando cambios físicos y químicos como variaciones en materia orgánica, cambios en la estructura, incremento de densidad real, entre otros (Fustamante, 2016; Martínez & López, 2000). En Perú el 34% de la población económicamente activa se dedica a agricultura, siendo en particular una de las actividades económicas más importantes para las áreas rurales de la selva, siendo las más perjudicadas en

eventos como los derrames estas comunidades (Osinergmin, 2009; Zegarra & Orihuela, 2005).

El objetivo de esta investigación fue recolectar información bibliográfica con respecto al efecto del biocarbón en la inmovilización de hidrocarburos en suelos contaminados, proponiéndolo como un método de descontaminación; brindando una alternativa limpia para solucionar los problemas de derrames de petróleo, recuperando de esa manera la flora y fauna de los lugares afectados. Esto tiene importancia particular pues la mayoría de los lotes para extracción de petróleo se ubica cerca de áreas naturales protegidas, y esta investigación presentará una forma de recuperar estas zonas de vida, además de ser también una manera para manejar los residuos orgánicos de la zona, teniendo un producto económicamente rentable que devolverá la vida a los suelos afectados por los derrames.

REVISIÓN TEÓRICA

Importancia de los suelos

El suelo es un recurso no renovable, vulnerable y de difícil recuperación que tiene funciones importantes como almacén de nutrientes, alimento para seres vivos, contener materia orgánica, entre otros (Martinez, 2015; Arroyave & Correa, 2009). Es una pieza clave en el desarrollo de ciclos biogeoquímicos superficiales, permitiendo el desarrollo de funciones esenciales para la naturaleza, sociedad y economía en el mundo (Bernad et al., s.f). La cantidad de suelo sobre todo para cultivos, en el mundo es limitada y debe ser utilizado correctamente para su preservación y conservación (FAO, s.f).

Contaminación de suelos

La contaminación de suelos se refiere a la pérdida total o parcial de la productividad del suelo como efecto de concentraciones de sustancias tóxicas que superan su capacidad de amortiguación; siendo producida en su mayoría por el hombre (Bernad et al., s.f; FAO, 2018). La industria minera aumenta la concentración de metales pesados hasta sobrepasar los estándares de calidad (Puga et al., 2006). Del mismo modo, el alto tránsito vehicular aumenta las PM₁₀ que incluyen metales traza como Pb, Ni, Zn y Cr y al precipitar aumentan su concentración en los suelos (Machado, 2008). Además, al ser un país agrícola, el suelo se encuentra contaminado por concentraciones excesivas de plaguicidas y fertilizantes químicos (Arroyave & Correa, 2009). Se presenta también contaminación de suelos por hidrocarburos, lo que disminuye la capacidad de intercambio catiónico el suelo, la densidad real y porosidad (Martinez et al., 2001).

Métodos de descontaminación de suelos

La biorremediación es de los más utilizados, basada en reacciones oxidoreducción de los organismos con los contaminantes (Maroto et al., 2002). La fitorremediación es otro en el cual se usan las plantas para degradar los contaminantes; la alfalfa (*Medicago sativa* L.), por ejemplo, puede absorber metales como Zn, Cu y Pb. (Agnello et al., 2015; Peña & Beltran, 2017). La incineración consiste en exponer el suelo y su contaminante a altas temperaturas (1200°C aproximadamente) para que estos se evaporen; sin embargo, esta es un método costoso e incompatible ecológicamente para considerarse una solución viable (Brito et al., 2016; Coria, 2007). También se puede asolar y contener el contaminante mediante barreras impermeables, Puls et al. (1999)

demonstraron que utilizando esos métodos se pudo reducir el Cr en suelos a cantidades menores de 0.01 mg/L. De encontrarse el contaminante a profundidades se recomiendan las geomembranas o un sistema de extracción (Mulligan, 2000).

El método a elegir depende del contaminante o al principio de su funcionamiento (Arcos et al., 1994; Saval; 1999). Por ejemplo, para contaminantes como hidrocarburos los tratamientos biológicos más eficientes son biorremediación asistida, bioaumentación y fitorremediación, en orden de eficiencia (Agnello et al., 2015). Sin embargo, hay otros tratamientos que no son tan conocidos como la descontaminación de suelos con biocarbón, que es un proceso in-situ y se puede combinar con técnicas como biorremediación o fitorremediación (Rodríguez, s.f).

Biocarbón

El biocarbón es un material hecho a base de residuos orgánicos, que no necesita de una activación previa para su uso y tiene la capacidad de atraer a los contaminantes del suelo en vez de que estos reaccionen con el suelo o las plantas (Beesley et al., 2011). Para su producción, la materia orgánica debe pasar por una conversión termoquímica, que se da a altas temperaturas, mayores a 300°C, y bajo la ausencia de oxígeno; este proceso se llama pirólisis (Duku et al., 2011). En cuanto a su estructura química, el biocarbón contiene carbón como elemento más abundante; silicio, sobre todo si es proveniente de residuos de arroz o maíz; hidrógeno, oxígeno y nitrógeno como elementos principales (Xiao et al., 2018).

Propiedades del biocarbón

El biocarbón se hace en su mayoría mediante el proceso de pirolisis el cual puede ser de manera lenta o rápida; las diferencias principales entre estos dos procedimientos son la temperatura y el tiempo: El primero se realiza entre 300°C a 400°C aproximadamente y tiene una duración de varios minutos u horas; mientras el otro se produce en un rango de temperatura de 500°C a más y se puede efectuar hasta en segundos (Solís, 2016). Las distintas temperaturas y tiempos de producción afectan la composición del biocarbón (Tabla 1).

Propiedades	Temperatura			
	300 °C	400°C	500°C	700°C
Rendimiento (%)	↑	↔	↔	↓
pH	↓	↔	↔	↑
Material volátil (%)	↑	↔	↔	↓
Humedad (%)	↑	↑	↓	↓
C (%)	↔	↑	↑	↓
H (%)	↑	↔	↔	↓
N (%)	↑	↑	↔	↓
O (%)	↑	↑	↓	↓
Superficie m ² /g	↓	↓	↑	↑

Tabla 1.- Variaciones de características del biocarbón a diferentes temperaturas.

Los colores indican si los valores suben (verde), bajan (rojo) o están en un intermedio (amarillo); este último si apunta hacia arriba es un valor medio-alto y si apunta hacia abajo es un valor medio-bajo. Fuente : Hossain et al., 2011 ; Kim et al, 2012 ; Gaskin et al, 2008 ; Xiao et al., 2018.

Efectos del biocarbón en el suelo

El tamaño y los poros del biocarbón son un hábitat adecuado para los microorganismos (Lehmann et al., 2009). Gomez et al. (2014) demostró que en la concentración de enmienda utilizada es directamente proporcional a la

concentración de bacterias, especialmente las gram-negativas. Sin embargo, el aumento de microbiota depende del material usado para la elaboración del biocarbón (Steinbeiss, et al., 2009). Asimismo, el biocarbón aumenta la porosidad del suelo, ayudando a retener líquidos e incrementando la humedad relativa del suelo; mas no siempre el contenido de agua disponible en el suelo para las plantas (López et al., 2013; Novak et al., 2009; Hardie et al., 2014). Igualmente, disminuye la densidad real y la densidad aparente; mejorando la estructura del suelo e incrementando el diámetro de peso medio (MWD) disminuyendo la pérdida de suelo y evitando la erosión (López et al., 2013 Ouyang et al., 2013; Jien, et al., 2013). Además, ayuda a propiedades químicas como el pH y la capacidad de intercambio catiónico (Jien, et al., 2013).

Biocarbón en suelos contaminados con hidrocarburos

El proceso de pirólisis se vuelve crucial, pues en el ocurren diversas reacciones químicas que aportan propiedades de sorción al biocarbón a causa de los grupos funcionales, radicales libres y cargas que se forman en la superficie (Uchimiya et al., 2010; Xiao et al., 2018). Entre los grupos funcionales de la superficie se encuentran los carbonilos, carboxilos, hidroxilos y quinonas (Zimmerman, 2010). La sorción de hidrocarburos mediante el biocarbón sucede, de acuerdo a Sander et al. (2005), por la existencia de interacciones donador-aceptor de electrones mediante radicales π - π en la superficie de la enmienda y el hidrocarburo; siendo el biocarbón el donante y el hidrocarburo el aceptor. Según Fang (2014) los radicales libres son los que se adhieren a los contaminantes, teniendo una correlación inversa entre cantidad de radicales libres y concentración de contaminantes. Por otro lado, la adsorción del contaminante se debe también a los nanoporos de la superficie de la enmienda (Cornelissen et al., 2005).

Por esas razones, las concentraciones de hidrocarburos podrían reducirse hasta un 59% con la aplicación del biocarbón al suelo contaminado. (Galitskaya, 2016). No obstante, el efecto del biocarbón no siempre es positivo, Han et al (2016) asociaron la enmienda con pasto ryegrass y los resultados mostraron que el biocarbón inhibió la adsorción de hidrocarburos que realizaba el ryegrass. Si el biocarbón utilizado cuenta con altas concentraciones de sales o material volátil, los microorganismos no se verán atraídos por este, enfatizando la importancia del proceso de pirolisis y la temperatura en su producción presentado en la Tabla 1 (Boonchan, 2000).

Biocarbón en otros suelos contaminados

El biocarbón ha demostrado efectos positivos también para reducir la lixiviación de contaminantes en los suelos (Laird et al., 2010). Del mismo modo, aporta a la inmovilización de metales pesados como Cd, Cu y Pb, reduciendo la bio disponibilidad y fitotoxicidad en las plantas (Park et al., 2011; Bian et al., 2014). Asimismo, muestra efectos positivos con los pesticidas, Yu et al. (2009) demuestra que con una concentración de 1% de enmienda, se redujo hasta en un 90% los residuos de pesticidas como clorpirifos y carbofuran en las plantas.

Maneras de potenciar el efecto del biocarbón

La efectividad de la enmienda se puede potenciar, por ejemplo, agregando bacterias como *Corynebacterium variabile*, lo que da resultados de hasta 78.9% de reducción de hidrocarburos en suelos (Zhang et al., 2016). Otra manera es utilizando también la lombriz *Eisenia fétida* que tiene la capacidad de remover otros elementos tóxicos encontrados en los hidrocarburos, mientras que el biocarbón continua con la inmovilización de estos (Gomez-Eyles, 2010).

CONCLUSIONES

- El suelo es uno de los recursos más importantes que tenemos pues tiene funciones biológicas importantes como almacén de nutrientes y es clave para los ciclos biogeoquímicos.
- La mayoría de la contaminación de suelos es de origen antrópico y proviene en su mayoría de minería, fertilizantes y pesticidas químicos, partículas en la atmosfera e hidrocarburos.
- Actualmente existen múltiples tipos de descontaminación de suelo, sin embargo, algunos pueden ser incompatibles con el medio ambiente o muy costosos como la incineración.
- El biocarbón está compuesto a base de residuos orgánicos los cuales pasan por un proceso de pirólisis para la formación de la enmienda por lo que se puede considerar un método biológico.
- El biocarbón cuenta con propiedades que aportan a la calidad de suelo, así como a la inmovilización de contaminantes, las cuales se ven influenciadas por la temperatura en el proceso de pirólisis.
- Los radicales libres formados en la superficie del biocarbón en el proceso de pirólisis se adhieren a contaminantes como los hidrocarburos, y los inmoviliza. Sin embargo, es importante utilizar la temperatura de pirólisis correcta, pues de ser muy baja la concentración de material volátil en el biocarbón aumentará y los microorganismos, que son los que luego degradarán al contaminante, no se verán atraídos por la enmienda.
- Se puede potenciar el efecto del biocarbón si se asocia con otros métodos como biorremediación con lombrices o fitorremediación.

REFERENCIAS

- Agnello, A. C., Bagard, M., Van Hullebusch, E. D., Esposito, G., & Huguenot, D. (2015). Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of the Total Environment*, 563, 693-703.
- Arcos, M., Fernández, G., Ibarra, C. & Izcapa, C. (1999). *Tecnologías de tratamiento para la descontaminación de suelos. Área de riesgos químicos*.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T. (2011). A review of biochars potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils.
- Bernad, I., García, J., Valiño, M. & Fernández, S. (s.f) *Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica*. CITME (Circulo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía).
- Bian, R., Joseph, S., Cui, L., Pan, G., Li, L., et al. (2014). A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment. *Journal of hazardous materials*, 272, 121-128.
- Boonchan, S., Britz, M. L., & Stanley, G. A. (2000). Degradation and mineralization of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by defined fungal-bacterial cocultures. *Applied and environmental microbiology*, 66(3), 1007-1019.
- Coria, I. (2007). *Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos*.

- Cornelissen, G., Gustafsson, Ö., Bucheli, T. D., Jonker, M. T., Koelmans, A. A., & van Noort, P. C. (2005). Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation. *Environmental science & technology*, 39(18), 6881-6895.
- Duku, M. H., Gu, S., & Hagan, E. B. (2011). Biochar production potential in Ghana—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3539-3551.
- Fang, G., Gao, J., Liu, C., Dionysiou, D. D., Wang, Y., & Zhou, D. (2014). Key role of persistent free radicals in hydrogen peroxide activation by biochar: implications to organic contaminant degradation. *Environmental science & technology*, 48(3), 1902-1910.
- FAO. (2018). *Un informe lanza la alarma sobre la contaminación del suelo*.
- FAO. (s.f). *El suelo*.
- Finer, M., Jenkins, C. N., Pimm, S. L., Keane, B., & Ross, C. (2008). *Oil and gas projects in the western Amazon: threats to wilderness, biodiversity, and indigenous peoples*. *PloS one*, 3(8), e2932.
- Galitskaya, P., Akhmetzyanova, L., & Selivanovskaya, S. (2016). Biochar-carrying hydrocarbon decomposers promote degradation during the early stage of bioremediation. *Biogeosciences*, 13(20), 5739-5752.
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., & Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2061-2069.

- Gomez, J. D., Deneff, K., Stewart, C. E., Zheng, J., & Cotrufo, M. F. (2014). Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 28-39.
- Gomez-Eyles J., Sizmur T., Collins C. y Hodson M. (2010) Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability?. *Plant and Soil*, 376(1-2), 347-361.
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., & Nelson, P. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 223-228.
- Jien, S. H., & Wang, C. S. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225-233.
- Kim, K. H., Kim, J. Y., Cho, T. S., & Choi, J. W. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource technology*, 118, 158-162.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442.
- Latam, M. (2018). *Perú: las claves del informe del Congreso sobre los derrames de petróleo en la Amazonía*.
- Lehmann, J., Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management*. London: Routledge.

- López, M. A., Crespo, Y. A., Abreu, L. C., López, G. G., Quintana, Y. G., & Martínez, I. D. L. C. C. (2013). Efectos del biocarbón en las propiedades físicas de diferentes sustratos
- Machado, A., García, N., García, C, Acosta, L., et al. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(4), 171-182.
- Maroto, M. E., & Rogel, J. M. (2002). Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos.
- Martinez, M. (2015). *Políticas públicas ambientales*.
- Martínez, V. E., & López, M. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra latinoamericana*, 19(1).
- Mulligan, C. N., Yong, R. N., & Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering geology*, 60(1-4), 193-207.
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., ... & Schomberg, H. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*.
- Osinermin. (2009). *Eliminación del mayor impacto ambiental de los campos petroleros*.
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., & Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(4), 991-1002.

- Park, J. H., Choppala, G. K., Bolan, N. S., Chung, J. W., & Chuasavathi, T. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and soil*, 348(1-2), 439.
- Peña, F. & Beltran L.. (2017). Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. en la Estación Experimental El Mantaro. *Prospectiva Universitaria*, 9(1), 31-45.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*, 5(1-2), 149-155.
- Puls, R. W., Paul, C. J., & Powell, R. M. (1999). The application of in situ permeable reactive (zero-valent iron) barrier technology for the remediation of chromate-contaminated groundwater: a field test. *Applied Geochemistry*, 14(8), 989-1000.
- Romo, V. (2017). *Congreso peruano halla irregularidades en contratación de empresas que limpiaron derrames de petróleo.*
- s' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental pollution*, 159(12), 3269-3282.
- Sander, M., & Pignatello, J. J. (2005). Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single-solute and bi-solute competitive experiments. *Environmental science & technology*, 39(6), 1606-1615.

- Sandoval Del Aguila, J. R. (2008). *Valoración económica de espacios contaminados por hidrocarburos en la cuenca del corrientes Loreto-Perú, 2007, 2008.*
- Saval, S. (1999). Éxitos y fracasos de la remediación de suelos.
- Solís Hontañón, S. (2016). Biochar production by biomass pyrolysis for various applications.
- Steinbeiss, S., Gleixner, G., & Antonietti, M. (2009). Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(6), 1301-1310.
- Tamayo, J.; Salvador, J.; Vásquez, A.; y De la Cruz, R. (2015). La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte al desarrollo del país. Osinergmin. Lima-Perú.
- Uchimiya, M., Lima, I. M., Klasson, K. T., & Wartelle, L. H. (2010). Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: roles of natural organic matter. *Chemosphere*, 80(8), 935-940.
- Xiao, X., Chen, B., Chen, Z., Zhu, L., & Schnoor, J. L. (2018). Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review. *Environmental science & technology*, 52(9), 5027-5047.
- Yu, X. Y., Ying, G. G., & Kookana, R. S. (2009). Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil. *Chemosphere*, 76(5), 665-671.
- Zegarra, E. & Orihuela, J. (2005). *La agenda pendiente en el sector agricultura - Informe final de consultoría para el proyecto CRECER.*
- Zhang, H., Tang, J., Wang, L., Liu, J., Gurav, R. G., & Sun, K. (2016). A novel bioremediation strategy for petroleum hydrocarbon pollutants using salt

tolerant *Corynebacterium variabile* HRJ4 and biochar. *Journal of Environmental Sciences*, 47, 7-13.

Zimmerman, A.(2010). Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environmental science & technology*, 44(4), 1295-1301.