

Revisión bibliográfica

Impacto de filtros verdes sobre la emisión de los gases de efecto invernadero

Carla Fernanda Silva-Padilla^{1,2*} 

Diego Armando Damián-Carrión^{2,3} 

Guido Patricio Santillán-Lima⁴ 

Carlos Hugo Bonilla-Vega^{2,3} 

Magdy Guadalupe Echeverría-Guadalupe^{2,3} 

Franklin Enrique Cargua-Catagña^{2,3} 

¹Departamento de Química Analítica, Universidad de Alcalá, Madrid, España

²Facultad de Ciencias/Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

³Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

⁴Facultad de Ingeniería/Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador

* Autor para correspondencia: nandala_18@hotmail.com

RESUMEN

La presente investigación inició su estudio preguntándose ¿De qué manera influye la implementación de filtros verdes en la calidad de las aguas residuales ? donde el objetivo principal es estudiar el impacto de los filtros verdes como una estrategia no convencional para el tratamiento de aguas residuales, con relación a la liberación de gases efecto invernadero, analizando su emisión o retención durante el proceso de depuración; además de demostrar que es una tecnología apropiada para pequeñas comunidades. Sin embargo, durante el proceso de depuración, se pueden generar gases efecto invernadero (GEIs) a medida que se lleva a cabo la degradación anaeróbica de la materia orgánica, que pueden ser emitidos a la atmósfera y contribuir de esta manera al calentamiento global. Las especies comúnmente utilizadas en el proceso de depuración son: sauce (*Salix* spp.) álamo o chopo (*Populus* spp.) y eucalipto (*Eucalyptus* spp.), ya que presenten una elevada

capacidad de depuración, asimilación de nutrientes y rápido crecimiento. Es así como los sistemas agroforestales tienen un gran potencial de secuestro de carbono debido a su mayor capacidad de captura y utilización de recursos de crecimiento, considerándoles, una medida de mitigación para la reducción de las emisiones de GEIs.

Palabras clave. Agua residual, carbono, plantación, mitigación, sistemas agroforestales

Recibido: 30/09/2019

Aceptado: 07/06/2020

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población a nivel mundial aumenta a un ritmo acelerado y para su desarrollo requiere de aguas superficiales y subterráneas, que son cada vez más escasas y de mala calidad, exigiendo la búsqueda una gestión apropiada para optimizar el abastecimiento de agua potable y depuración de aguas residuales; surgiendo inquietudes sobre cómo encontrar nuevos recursos capaces de ayudar a alcanzar el equilibrio dentro de la demanda y la oferta ⁽¹⁾. Para el año 2025, se estima que el 80 % de la población de la Tierra viva bajo condiciones de alta escasez de recursos hídricos. La producción de aguas residuales es la responsable de generar el 5 % de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) en el 2005, y se prevé que estas emisiones aumentarán en un 27 % para 2030 ⁽²⁾.

El tratamiento de aguas residuales ha evolucionado a diferentes ritmos a lo largo de la historia; durante milenios se vertieron en las fuentes de agua y, alternativamente, se vertían sobre los campos para incrementar la fertilidad del suelo. La aplicación, con o sin cultivos, permaneció activa hasta bien entrado el siglo XX y en la actualidad se practica en países en desarrollo o donde el agua es escasa y la gestión de los sistemas de saneamiento está poco desarrollada, siendo México uno de los principales países de Latinoamérica en utilizar agua residual para el riego forestal ⁽³⁾.

El Reglamento Unión Europea (UE) 525/2013 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto establecen obligaciones de reducción de las emisiones de GEIs, así como, de información sobre las emisiones antropogénicas y sumideros de estos gases. Este marco mundial tiene como objetivo mitigar los efectos del calentamiento global ⁽²⁾.

Dentro de este contexto, y como consecuencia del proceso de depuración, la emisión de gases de efecto invernadero (GEIs), especialmente metano (CH₄), (CO₂) y óxido nitroso

(N₂O), podría ocurrir. Por tanto, el objetivo principal es estudiar el impacto de los filtros verdes con relación a la liberación de gases efecto invernadero, analizando su emisión o retención durante el proceso de depuración de aguas residuales.

Filtros verdes en el tratamiento de aguas residuales al terreno

En los filtros verdes la depuración se da de forma natural, basada en principios ecológicos y biológicos que complementan o sustituyen las obras civiles actuales, constituido por una superficie de plantación forestal (principalmente álamos, sauces o eucaliptos) sobre la que se aplica un caudal controlado de agua residual, donde la filtración física, la sorción en el suelo, la biodegradación y la absorción de la planta son los principales procesos físicos, químicos y biológicos que con la acción conjunta entre el suelo los microorganismos y las plantas son responsables de la atenuación de contaminantes ⁽⁴⁾, óptimos y recomendables para poblaciones inferiores a 25.000 habitantes ⁽⁵⁾.

En este tipo de tratamiento el suelo actúa como medio receptor de las aguas residuales y como agente activo del proceso de depuración eliminando principalmente nutrientes, materia orgánica (MO), microorganismos y otros componentes, como metales pesados o microcontaminantes orgánicos. En los filtros verdes (FVs) se instala vegetación arbórea (álamos, sauces o eucaliptos) y se aplica un caudal controlado de agua residual pretratada como agua de riego. El agua se evapora parcialmente y el resto es captada por las raíces de los árboles y filtrada (en mayor o menor medida dependiendo de los criterios de diseño), a través del suelo ⁽⁶⁾.

Las plantas, microorganismos y suelo se interrelacionan para realizar los procesos de depuración, donde se producen procesos físicos, como la filtración; químicos, como la precipitación o intercambio iónico y biológicos, como la degradación de la MO que se encuentre en el agua ⁽⁷⁾.

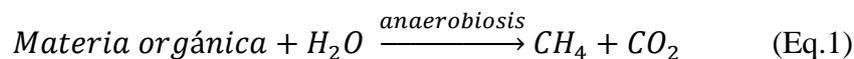
Mecanismo de eliminación de los contaminantes

A continuación, se describen los mecanismos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales, detallando cuáles son los procesos físicos, químicos y biológicos que darán lugar a la formación de los distintos GEIs.

Sólidos en suspensión. En los sistemas de tratamiento de agua, por aplicación de las aguas residuales al terreno, la eliminación de sólidos en suspensión (SS), orgánicos e inorgánicos, ocurre principalmente por filtración, a través del conjunto que forma el suelo con los rizomas y raíces dependiendo de la granulometría y textura del suelo ⁽⁸⁾.

Dado que la mayor parte de los SS se eliminan en la superficie del terreno, es preciso diseñar los sistemas de tratamiento de forma que se minimice la pérdida en su capacidad de filtración.

Materia Orgánica. La transformación de la MO se da por degradación bacteriana, desarrollándose principalmente en la superficie del terreno en condiciones aeróbicas. Las plantas asimilan los nutrientes de la MO (fitoextracción) llevándose a cabo dos procesos principales de transformación: la fotosíntesis y la respiración aeróbica realizadas por bacterias aeróbicas en los llamados horizontes aeróbicos (suelo), donde la degradación se da hasta 5cm de profundidad en las zonas cercanas a las raíces ⁽⁹⁾. A medida que el agua percola en el suelo las cantidades de O₂ se reducen produciendo condiciones de anaerobiosis, donde las bacterias heterótrofas anaeróbicas pueden degradar la MO por vía anóxica, utilizando el nitrato (NO₃⁻) como aceptor de electrones (proceso de desnitrificación) ⁽⁸⁾. La degradación anaeróbica de la MO básicamente sigue los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis ⁽¹⁰⁾, para obtener como productos finales principalmente CO₂ y CH₄ (Esquema 1) ⁽¹¹⁾.



El proceso inicia con la hidrólisis de biopolímeros orgánicos complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) en monómeros (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos de cadena larga), por acción de bacterias hidrolíticas. Es importante señalar que, en la acidogénesis y acetogénesis los productos finales de la hidrólisis se transforman en ácidos orgánicos de cadena corta, H₂ y CO₂ ⁽⁸⁾. Finalmente, en la metanogénesis por acción de las bacterias metanogénicas se produce CH₄.

Nitrógeno. Las aguas residuales urbanas se caracterizan por contener N fundamentalmente en forma de NH₄⁺, NO₃⁻ y N orgánico ⁽¹²⁾. Los mecanismos implicados en la eliminación de N varían en función de la forma en que este nutriente esté presente:

- **Nitrógeno orgánico.** La fracción que se encuentra asociada a los SS y la MO presentes en el agua residual, se elimina por filtración, pudiéndose incorporar directamente al suelo. En el caso de la MO que no se degrada fácilmente, se hidroliza la parte soluble en aminoácidos para luego tener como producto NH₄⁺ ⁽⁸⁾.
- **Nitrógeno amoniacal.** el NH₄⁺ en forma soluble se puede eliminar por volatilización directa a la atmósfera en forma de NH₃ gaseoso (10 %);pero, la mayor parte del NH₄⁺ (y del convertido) se adsorbe de forma reversible, mediante reacciones de

intercambio iónico a las partículas del suelo (arcillas y moléculas orgánicas cargadas eléctricamente) ⁽⁸⁾. El NH_4^+ adsorbido puede ser captado por la vegetación y por los microorganismos presentes en el suelo y, también, puede ser transformado en NO_3^- mediante reacciones de nitrificación biológica. La vegetación puede asimilar el NO_3^- pero, esto tan sólo ocurre en las proximidades de sus raíces y durante los períodos de crecimiento ⁽⁸⁾.

- **Nitrato.** El NO_3^- puede eliminarse mediante desnitrificación biológica y liberación de N_2 gaseoso y de N_2O a la atmósfera. Este mecanismo constituye la principal vía de eliminación de N en los sistemas de aplicación al terreno. La desnitrificación la realizan bacterias facultativas bajo condiciones de anoxia, no siendo necesario que todo el sistema sea anóxico, tomando en cuenta que la relación C/N sea suficientemente elevada, como mínimo de 2:1, ya que durante el proceso se toman NO_3^- como aceptores de electrones para la degradación de la MO ⁽⁹⁾. En este caso, la desnitrificación en la zona de la raíz (rizosfera), también puede contribuir a la disminución de la concentración de N en el sistema. El N_2O y el NO se producen en el suelo principalmente en el curso de dos procesos microbianos: nitrificación (de NH_4^+ a NO_2^- y de este a NO_3^-) y desnitrificación (de NO_3^- a N_2O y finalmente a N_2) ⁽¹³⁾.

Impacto de los filtros verdes sobre la emisión de GEIs

En el tratamiento de aguas residuales con FVs, los nutrientes (N, P) son captados y retenidos por la planta para luego ser expulsado, a través de las hojas y las raíces a la atmósfera. La descontaminación se realizará por bombeo orgánico a través de los nódulos de la raíz, la misma que presenta alta capacidad de absorción de agua. Esta acción de absorción de agua disminuye la lixiviación de los contaminantes hacia capas profundas del suelo ⁽⁷⁾. Se ha informado que existe un acoplamiento exacto del transporte gaseoso a nivel bioquímico que es necesario, porque el CH_4 y el N_2O pueden producirse y consumirse en el suelo, y el eventual flujo a la atmósfera depende de los sitios de reacción y las vías de escape de estos gases ⁽¹⁴⁾.

Factores influyentes en la emisión de GEIs

La actividad microbiana, procesos de descomposición química, así como, la respiración heterotrófica de los microorganismos, producen GEI en los suelos. Durante el proceso de depuración con FVs, la respiración anaerobia, aerobia y las reacciones como la

metanogénesis y la desnitrificación, se ven afectados por factores externos; como la carga orgánica contenida en el agua residual, que implica mayor producción de gases, en especial CH₄⁽¹⁵⁾.

Temperatura. La temperatura del suelo puede explicar el 74 y el 86 % de las variaciones de las emisiones de NO y N₂O, respectivamente. Un aumento de la temperatura del suelo conduce a emisiones más altas y a tasas de respiración del suelo más altas como respuesta de retroalimentación positiva del aumento del metabolismo microbiano. Las emisiones de CH₄ y N₂O también se ven forzadas por el aumento de las tasas de respiración del suelo con el aumento de las temperaturas del suelo⁽¹⁶⁾.

Exposición y presión de aire. La exposición del sitio (elevación, posición morfológica, cubierta vegetal) influye en la temperatura y la humedad del suelo. Las emisiones de N₂O son más altas en las depresiones que en las pendientes y crestas debido a la mayor humedad del suelo. Una presión de aire más baja soporta mayores emisiones del suelo debido a la contrapresión reducida en el suelo⁽¹⁶⁾.

Materia orgánica. La MO del suelo es una mezcla diversa compuesta por biomasa microbiana, raíces muertas, residuos vegetales en diversas etapas de descomposición y humus del suelo⁽¹⁷⁾, siendo el humus el resultado de la actividad microbiana que comprende el 60-80 % de la MO total del suelo.

La descomposición de la MO constituye un proceso biológico básico en el que el C es recirculado hacia la atmósfera, como CO₂; el N está disponible, como NH₄⁺ y NO₃⁻ aparecen en la forma requerida por las plantas superiores. En este proceso una parte del C es asimilado dentro del tejido microbiano (biomasa del suelo) y otra parte es convertido en humus⁽¹⁸⁾. En el proceso de mineralización y descomposición de la MO, se emite CO₂ a la atmósfera; mientras que, durante el tiempo que el C está formando parte de las estructuras de la planta considerando al mismo, como retenido (sumidero de C). Lo mismo ocurre con el C que forma parte de materiales biodegradables (humus) no biodisponibles⁽¹⁸⁾.

A mayor contenido de C retenido en las plantas o el suelo y durante mayor tiempo, entonces menor es la cantidad que existirá en la atmósfera. La aplicación de aguas residuales al suelo incrementa significativamente el contenido de C orgánico en todas las formas de C, tanto formas lábiles, como fracción recalcitrante⁽¹⁹⁾. La enmienda del suelo con carbón vegetal que se obtiene de restos vegetales y residuos de biomasa (biochar) evalúa a nivel mundial, como un medio para mejorar la fertilidad del suelo, mitigar el cambio climático^(20,21) y disminuir las emisiones de GEIs del suelo, como el N₂O o el CH₄.

Se ha demostrado que la producción sostenible de biochar (utilizado como enmienda de los suelos) tiene el potencial de mitigación debido a su naturaleza altamente recalcitrante, lo que ralentiza la velocidad a la que el C fijado fotosintéticamente regresa a la atmósfera⁽²²⁾. Es posible que el CO₂ precipite como CO₃²⁻ en superficies de biochar, que tienen pH alto y metales alcalinos abundantes, lo que explicaría la detección reducida de CO₂, a pesar de los aumentos medidos en la biomasa microbiana⁽²³⁾.

Actividad microbiana. Los microorganismos del suelo representan la fracción viva de la MO, y de ellos va a depender, en gran parte, la obtención de materiales recalcitrantes pero otra gran parte de la MO es transformada por los microorganismos hasta convertirse en MO recalcitrante⁽²⁴⁾.

El contenido de MO y la cantidad de N del suelo controlan la actividad microbiana. El suelo es un hábitat favorable para la proliferación de microorganismos y en las partículas que lo forman se desarrollan microcolonias. Los microorganismos aislados del suelo comprenden virus, bacterias, hongos algas y protozoos. Las concentraciones de MO son relativamente altas en dichos ambientes, los cuales favorecen el desarrollo de microorganismos heterótrofos. Grandes aportaciones de MO y nutrientes pueden mejorar el crecimiento de organismos microbianos y, por lo tanto, los procesos de nitrificación y desnitrificación proporcionan mayor cantidad de C orgánico disuelto (COD)⁽²⁵⁾.

Vegetación. La selección de la vegetación a implantar en los FVs dependerá de la función del tipo de cultivo y la edad, siendo óptimos aquellos que presenten una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, rápido crecimiento, gran consumo de agua por transpiración, tolerancia a los suelos húmedos, escasa sensibilidad a los componentes del agua residual y unas mínimas exigencias de explotación⁽²⁶⁾.

Entre los cultivos que reúnen todas, o la mayoría, de estas condiciones se encuentran diferentes especies herbáceas (césped grama (*Cynodon dactylon*), raigrás (*Lolium*), raigrás italiano (*Lolium multiflorum*), etc.) y ciertas especies arbóreas como sauce (*Salix* spp.) álamo o chopo (*Populus* spp.) y eucalipto (*Eucalyptus* spp.). El uso de especies arbóreas con una alta tasa de evapotranspiración y el hecho de que sus sistemas radiculares muestren una excelente tolerancia a las condiciones anaeróbicas, permite la aplicación de cantidades considerables de aguas residuales. Generalmente las especies arbóreas como son los sauces (*Salix* spp.) álamos o chopos (*Populus* spp.) y eucalipto (*Eucalyptus* spp.)⁽²⁵⁾.

Retención de C en sistemas agroforestales como una medida de mitigación

Los sistemas agroforestales (AFS, *por sus siglas en inglés de Agroforestry System*) han recibido mayor atención debido a su capacidad de secuestrar CO₂ de la atmósfera en la biomasa aérea, tallos, ramas y follaje, y en la biomasa subterránea, es decir, en raíces y en el suelo. Se cree que los AFS tienen un gran potencial de secuestro de C debido a su capacidad de captura y utilización de recursos de crecimiento (luz, nutrientes y agua) que los sistemas de monocultivos o pastos ⁽²⁷⁾.

El volumen de biomasa aérea y los sistemas de raíces profundas de árboles en los AFS han recibido una mayor atención para la adaptación y mitigación del cambio climático. En los sistemas agroforestales hasta 1m de profundidad en el suelo, las estimaciones globales del potencial de secuestro de C en un período de 50 años oscilan entre 1,1 y 2,2 mg C año⁻¹ pero en particular, las estimaciones del área terrestre son muy inciertas ⁽²⁸⁾.

El sauce (*Salix* spp.), álamo o chopo (*Populus* spp.) y eucalipto (*Eucalyptus* spp.) son los principales tipos de vegetación arbórea utilizada en los FVs. En particular, la presencia de sauces y álamos influye positivamente en el proceso de tratamiento de GEIs ⁽²⁹⁾. De igual manera estudiaron el rendimiento del álamo, ya que el proceso de fotosíntesis está entre los más altos debido a su gran capacidad de crecimiento, y por fijar CO₂ de la atmósfera ⁽²⁵⁾.

En países como Suecia, Polonia, Dinamarca y Estonia se ha comprobado la eficiencia de sauce como filtro verde en la purificación de aguas residuales donde las raíces tienen la capacidad de absorber del 75-95 % del nitrógeno (N) y el fósforo (P) en las aguas residuales ⁽³⁰⁾. Cuando se utiliza sauce con fines energéticos, es decir, para la conversión de electricidad de calor, esta fuente de energía puede ser considerado como CO₂ neutral, debido a que no afecta a la cantidad de los llamados gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Durante el crecimiento, el sauce recupera la misma cantidad de CO₂ a medida que se libera durante la combustión, y el tiempo de demora es una cuestión de meses en lugar de años ⁽³⁰⁾.

CONCLUSIONES

- Los filtros verdes presentan una elevada eficiencia, como tecnologías de aplicación al suelo para el tratamiento y reutilización de aguas residuales pretratadas, gracias a la acción conjunta de suelo, microorganismos y vegetación, resultan ser un eficiente

método de reducción de la emisión de contaminantes. Donde a mayor contenido de C retenido en las plantas y suelo; la cantidad de GEIs en la atmosfera será menor.

- La eficiencia de los FVs con relación a los GEIs dependerá de varios factores entre ellos la temperatura, la cantidad de materia orgánica contenida en el agua residual, y principalmente tipo de vegetación; siendo el alamo (*Populus* spp) y el sauce (*Salix* spp) las especies arbóreas comúnmente utilizadas, no solo por su rápido crecimiento, resistencia a plagas y cambios de clima, sino por la gran capacidad de absorción y acumulación de CO₂ y fijación de C. Es por ello por lo que la práctica de AFSes una medida de mitigación que ayuda al secuestro de C para contribuir a reducir las emisiones de GEIs, y demostrar que es una tecnología apropiada para pequeñas comunidades tanto económica como ambientalmente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hernández-Baranda Y, Rodríguez-Hernández P, Peña-Icart M, González-Hernández P, San Nicolás-López FT. Caracterización química y agronómica de las aguas residuales del yacimiento Castellano, Pinar del Río. *Cultivos Tropicales*. 2018;39(3):11–7.
2. Sweetapple C, Fu G, Butler D. Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. *Water Res*. 2014 Oct 1;62:249–59.
3. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe. 2017;133. Available from: <http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf>
4. Martínez-Hernández V, Leal M, Meffe R, de Miguel A, Alonso-Alonso C, de Bustamante I, et al. Removal of emerging organic contaminants in a poplar vegetation filter. *J Hazard Mater*. 2018 Jan 15;342:482–91.
5. Moreno L, Fernández MA, Rubio JC, Calaforra JM, López JA, Beas J, Alcaín G, Murillo JM. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos. In: Moreno L, editor. 1st ed. Madrid: 2003; [cited 14/03/2020]. Available from: http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm
6. De Bustamante I, Lillo J, Segura M, Iglesias JA, Gómez D, Ortiz I, Gil J. Adaptación de los filtros verdes: de estaciones depuradoras de agua (EDAR) a estaciones de regeneración y reutilización de aguas depuradas (ERRAD).

- Conferencia Nacional sobre la reutilización del agua. Madrid. 2009.
7. Vicente Nuevo C. Aplicación de Tecnologías Blandas a la Depuración de Aguas Residuales. Dimensionamiento para la Población de Huerta. Salamanca: Universidad de Valladolid; 2017.
 8. Centa, Secretariado de Alianza por el agua E y D. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Centa, Secretariado de Alianza por el agua, Ecología y Desarrollo [Internet]. Ideasmare. España; 2008. p. 264. Available from: <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
 9. Prieto R. Emisión de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales. Universidad de Cataluña; 2011.
 10. Appels L, Baeyens J, Degreève J, Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog Energy Combust Sci.* 2008;34(6):755–81.
 11. FAO, MINENERGIA, PNUD, GEF. Manual del Biogás. Proy CHI/00/G32 [Internet]. 2011;120. Available from: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
 12. Mara D, Horan N. Handbook of Water and Wastewater Microbiology. 2003. 427-439.
 13. Smith KA, Ball T, Conen F, Dobbie KE, Massheder J, Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *Eur J Soil Sci.* 2018;69(1):10–20.
 14. Blagodatsky S, Smith P. Soil physics meets soil biology: Towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biology and Biochemistry.* Pergamon. 2012;47:78-92.
 15. Doorn MRJ, Towprayoon S, Manso Vieira SM, Irving W, Palmer C, Pipatti R, et al. Tratamiento Y Eliminación De. Directrices del IPCC 2006 para los Inventar Nac gases Ef invernadero. 2006;1–31.
 16. Oertel C, Matschullat J, Zurba K, Zimmermann F, Erasmi S. Greenhouse gas emissions from soils—A review. Vol. 76, *Chemie der Erde.* Elsevier GmbH. 2016. p. 327–52.
 17. Cambardella C-C. Carbon cycle in soils formation and decomposition. *Encycl Soils Environ* [Internet]. 2005 [cited 17/03/2020];1(9780123485304):170–5. Available from: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=167297>.
 18. Julca-Otiniano A, Meneses-Florián L, Blas-Sevillano R, Bello-Amez S. La materia

- orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*. 2006 Apr;24(1):49–61.
19. Zamora FR, Guevara NJR, Rodríguez DGT, Héctor José Yendis Colin. Uso de agua residual y contenido de materia orgánica y biomasa microbiana en suelos de la llanura de Coro, Venezuela. *Agric Técnica en México*. 2009;35(2):211–8.
 20. Cayuela ML, Oenema O, Kuikman PJ, Bakker RR, van groenigen JW. Bioenergy by-products as soil amendments? Implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions. *GCB Bioenergy*. 2010;2:201–13.
 21. Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology and Biochemistry*. Pergamon. 2011;43:1812-36.
 22. Woolf D, Amonette JE, Street-Perrott FA, Lehmann J, Joseph S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat Commun*. 2010;1(5):1–56.
 23. Escalante A, Pérez G, Hidalgo C, López J, Campo J, Valtierra E, et al. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil. *Terra Latinoam* [Internet]. 2016;34:367–82. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
 24. Milian L. Influencia de la materia orgánica del suelo en el secuestro de carbono. Biochar, una estrategia potencial [Internet]. Universidad Complutense de Madrid. 2015. Available from: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/LAURA MILIAN GAY.pdf>
 25. Miguel A de, Meffe R, Leal M, González-Naranjo V, Martínez-Hernández V, Lillo J, et al. Treating municipal wastewater through a vegetation filter with a short-rotation poplar species. *Ecol Eng*. 2014 Dec 1;73:560–8.
 26. Alvarez Vega F. (PDF) Filtros verdes. Un sistema de depuración ecológico. *Ing hidráulica y Ambient* [Internet]. 2002 [cited 17/03/2020];1(1680–0338). Available from: https://www.academia.edu/39200917/Filtros_verdes._Un_sistema_de_depuraci%C3%B3n_ecol%C3%B3gico.
 27. Concha JY, Alegre JC, Pocomucha V. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de theobroma cacao l. En el departamento de san martín, peru. *Ecol Apl*. 2007;6(1–2):75.
 28. Pardos JA. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigacion y Tecnologia Agraria

- yAlimentaria . 2010. 11–29 p.
29. Khurelbaatar G, Sullivan CM, van Afferden M, Rahman KZ, Fühner C, Gerel O, et al. Application of primary treated wastewater to short rotation coppice of willow and poplar in Mongolia: Influence of plants on treatment performance. *Ecol Eng.* 2017, Jan 1;98:82–90.
 30. Börjesson P, Berndes G. The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy.* 2006 May 1;30(5):428–38.