



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**POTENCIAL DEL BIOCHAR PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD
AMBIENTAL EN ECUADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

AUTOR: ELISA ESTEFANÍA POLANCO MENDOZA

DIRECTOR: SERGIO FERNANDO IGLESIAS ABAD, PhD.

CUENCA - ECUADOR

2021

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**POTENCIAL DEL BIOCHAR PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL
EN ECUADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

AUTOR: ELISA ESTEFANÍA POLANCO MENDOZA

DIRECTOR: SERGIO FERNANDO IGLESIAS ABAD, PhD.

CUENCA – ECUADOR

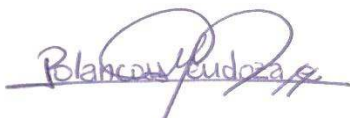
2021

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

DECLARACIÓN

Yo, Elisa Estefanía Polanco Mendoza, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.



Elisa Estefanía Polanco Mendoza

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Elisa Estefanía Polanco Mendoza, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

Sergio Fernando Iglesias Abad, PhD.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios por ser la guía y fortaleza durante todo este camino.

A mi familia, en especial a mis padres: Sr. Luis Polanco Nieves y Sra. Elisa Mendoza Serrano, por todo el apoyo incondicional durante estos 5 años de recorrido y por ser la inspiración para no desmayar y no desenfocarme de la meta, a pesar de la dificultad y la distancia, además de brindarme su constante motivación.

A la Universidad Católica de Cuenca y a sus docentes, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi formación profesional, de manera especial a mi director de tesis, Dr. Sergio Iglesias Abad, por ser un excelente docente y no dudar en brindarme su apoyo incondicional al momento de realizar mi trabajo de investigación bibliográfica.

DEDICATORIA

Mi tesis está dedicada a:

A Dios quien ha sido mi guía y fortaleza en momentos difíciles. A los formadores de mi vida, mis padres, que gracias a ellos con su amor, paciencia y sobretodo esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño muy anhelado, gracias por inculcarme con ejemplos el esfuerzo y valentía ante las adversidades que se nos han presentado.

A mis hermanos Luis y Johanna por estar pendiente en los momentos que los necesite, brindándome su apoyo.

RESUMEN

El biochar es un producto sólido rico en carbono de la biomasa de calentamiento en condiciones limitadas de oxígeno, posee una amplia gama de materias primas con las que se puede producir además de tener potencial para la absorción de metales pesados, herbicidas entre otros por esta razón en este trabajo se pretende favorecer el cumplimiento de objetivos de calidad ambiental en Ecuador, se documentó el biochar como una herramienta para el secuestro de carbono a largo plazo con beneficios ambientales y agronómicos adicionales. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo establecer el potencial del biochar para mejorar la sostenibilidad ambiental en Ecuador, para lo cual se realizó una revisión sistemática de la literatura desde el año 2010 al 2020, en bases de datos científicas; obteniendo como resultado que a pesar de las recientes investigaciones mundiales, los estudios desarrollados en Ecuador son relativamente escasos y existe poca familiarización con el concepto. Asimismo, se estableció que, en base a la disponibilidad de biomasa proveniente de residuos agroindustriales, el país está en capacidad de producir 1.3 millones de toneladas de biochar, lo que permitirá tratar 67 mil hectáreas y en referencia a estas estimaciones se espera un potencial de reducción de 0,013% del CO₂ liberado actualmente en un periodo de 100 años. El biochar presenta un alto potencial para la gestión ambiental favoreciendo la sostenibilidad y remediación ambiental en Ecuador; además, es necesario realizar estudios más profundos en las diferentes aplicaciones del biochar.

Palabras clave: Biomasa, remediación de suelos, sostenibilidad ambiental, residuos agroindustriales, cambio climático.

ABSTRACT

Biochar is a solid product rich in carbon from biomass heating in oxygen-limited conditions, it has a wide range of raw materials with which it can be produced in addition to having potential for the absorption of heavy metals, herbicides among others for this reason in this work is intended to promote compliance with environmental quality objectives in Ecuador, biochar was documented as a tool for carbon sequestration in the long term with additional environmental and agronomic benefits. In this context, this research aimed to establish the potential of biochar to improve environmental sustainability in Ecuador, for which a systematic literature review was conducted from 2010 to 2020 in scientific databases, obtaining as a result that despite recent global research, studies developed in Ecuador are relatively scarce and there is little familiarity with the concept. It was also established that, based on the availability of biomass from agro-industrial waste, the country can produce 1.3 million tons of biochar, which will allow treating 67 thousand hectares and, based on these estimates, a potential reduction of 0.013% of the CO₂ currently released is expected over a period of 100 years. Biochar has a high potential for environmental management favoring sustainability and environmental remediation in Ecuador; furthermore, it is necessary to carry out more in-depth studies on the different applications of biochar.

KEYWORDS: Biomass, soil remediation, environmental sustainability, agro-industrial wastes, climate change

INDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	iii
CERTIFICACIÓN	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INDICE DE TABLAS.....	xi
INDICE DE FIGURA	xi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Formulación del problema.	3
1.2. Justificación del problema	4
1.3. Alcance o delimitación del problema	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO II.....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1.Generalidades de la biomasa	8
2.1.1. Biomasa.	8
2.1.1.1. <i>Definición y clasificación.</i>	8
2.1.2. Tecnologías de conversión de la biomasa.	9
2.2. Biochar.	10
2.2.1. Definición.....	10
2.2.2. Factores que condicionan la producción de biochar	11
2.2.2.1. Materias primas	11
2.2.2.2. Temperatura.....	11
2.2.2.3. Tasa de calentamiento	11
2.2.2.4. Biochar como coproducto	12
2.3. Efectos del biochar sobre el suelo	12
2.3.1. Propiedades químicas	13
2.3.2. Propiedades físicas	13
2.3.3. Propiedades biológicas.....	14

2.4. Efectos del biochar en el tratamiento de agua	14
2.4.1. Eliminación de contaminantes orgánicos	15
2.4.2. Eliminación de contaminantes inorgánicos	15
2.4.3. Digestión anaeróbica	15
2.5. Sostenibilidad ambiental.....	16
2.5.1. Biochar y sostenibilidad ambiental en Ecuador.....	18
2.6. Remediación ambiental	18
2.6.1. Biochar y remediación ambiental en Ecuador	19
CAPÍTULO III.....	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. Metodología.....	20
CAPÍTULO IV	22
4. RESULTADOS	22
4.1. Propiedades del biochar.....	22
4.1.1. Resultados de las propiedades del biochar en estudios internacionales.....	22
4.1.2. Resultados de las propiedades del biochar en estudios nacionales	24
4.2. Potencial de producción de biochar en Ecuador en base a la disponibilidad de biomasa	26
4.3. Efectos del biochar en la calidad del suelo y en el tratamiento de agua	29
4.4. Impacto del biochar en las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas	30
4.5. Potencial del biochar en el aumento de la productividad de los cultivos	32
4.6. Impacto biológico del biochar en el suelo	33
4.7. Impacto del biochar en las propiedades físicas y químicas del suelo	35
4.8. Resultados del impacto del biochar en las propiedades del suelo en estudios del Ecuador.....	38
4.9. Aspectos ambientales relevantes relacionados con el uso de biochar.....	38
4.9.1. Reducción de gases de efecto invernadero	39
4.9.2. Efectos de biorremediación de la aplicación de biochar en suelos	42
4.9.3. Biochar para la rehabilitación de suelos contaminados con agroquímicos.....	42
4.9.4. Biochar para la rehabilitación de suelos contaminados con metales pesados	43
4.9.5. Biochar para la remediación de suelos contaminados orgánicamente	44
4.9.6. Efectividad del biochar en la remediación de suelos.....	45
CAPÍTULO V	47
4. CONCLUSIONES	47

CAPÍTULO VI	48
5. RECOMENDACIONES	48
Referencias Bibliográficas	49

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Inventario de residuos lignocelulósicos en las provincias de Los Ríos, El Oro y Pichincha.....	9
<i>Tabla 2.</i> Características del biochar producido utilizando diferentes materias primas en diferentes condiciones de pirólisis	23
<i>Tabla 3.</i> Estudios desarrollados en Ecuador en base a diferentes tipos de biomasa	25
<i>Tabla 4.</i> Resultados obtenidos de las estimaciones de producción de biochar en base a la biomasa agroindustrial disponible en Ecuador	28
<i>Tabla 5.</i> Impacto del biochar en las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas	31
<i>Tabla 6.</i> Potencial del biochar para mejorar el rendimiento de los cultivos en Ecuador ...	32
<i>Tabla 7.</i> Hallazgos principales del impacto del biochar en las propiedades biológicas del suelo	34
<i>Tabla 8.</i> Hallazgos principales del impacto del biochar en las propiedades físicas y químicas del suelo.....	36
<i>Tabla 9.</i> Resultados del impacto del biochar en las propiedades del suelo en estudios del Ecuador.....	38
<i>Tabla 10.</i> Resultados obtenidos de las estimaciones del potencial del biochar en la reducción de gases de efecto invernadero según Arrollo y Miguel (2019).	40
<i>Tabla 11.</i> Resultados obtenidos sobre la remediación ambiental de agroquímicos	43
<i>Tabla 12.</i> Resultados obtenidos sobre la remediación ambiental de contaminantes metálicos.....	43
<i>Tabla 13.</i> Resultados obtenidos sobre la remediación ambiental de contaminantes orgánicos.....	44

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Clasificación de biomasa	8
Figura 2. Procesos de conversión de la biomasa y principales productos/aplicaciones.....	10
Figura 3. Principales efectos del biochar sobre el suelo	13

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El biochar es un producto de carbono neutro o carbono negativo producido por la transformación termoquímica de biomasa de origen vegetal y animal (Cheng *et al.*, 2020). Asimismo, se define como un material de desecho sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en un entorno limitado en oxígeno (IBI, 2015).

El biochar muestra numerosas ventajas para aumentar el carbono orgánico disponible, el valor del pH del suelo, reduce la fracción disponible de metales pesados, aumenta la productividad de los cultivos agrícolas e inhibe la absorción y acumulación de metales pesados (Li *et al.*, 2017). Las diferentes condiciones, como el tipo de biomasa, la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia son los factores fundamentales que rigen las características de rendimiento del biochar (Tomczyk *et al.*, 2020). Por lo que, el biochar muestra una gran promesa como tecnología que puede contribuir significativamente a reducir los efectos del cambio climático y reducir la degradación de la tierra a la vez que promueve la productividad agrícola.

Existen oportunidades significativas para que el biochar se utilice para la remediación ambiental, como para mejorar la biodegradación de los hidrocarburos de petróleo en el suelo (Bushnaf *et al.*, 2011), inmovilizando y por lo tanto, reduciendo la biodisponibilidad y fitotoxicidad de los metales pesados (Park *et al.*, 2011), adsorbiendo hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en suelos, y previniendo la lixiviación de herbicidas y la posterior contaminación de los cuerpos de agua (Moreno *et al.*, 2018). Por lo tanto, el biochar puede brindar beneficios de sostenibilidad más allá de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a través de una mejor producción de alimentos y la remediación de la tierra.

La fuente de biomasa utilizada para la producción de biochar es un aspecto clave en la sostenibilidad del sistema, dado que es un recurso renovable pero finito que a menudo tiene muchos usos en competencia y ofrece una variedad de servicios económicos, sociales y ambientales (Cowie *et al.*, 2015). La biomasa puede provenir de residuos, que se enviarían a vertederos o se incinerarían. En tales casos, el uso de biochar puede evitar la liberación de los poderosos GEI como, el metano y óxido nitroso; minimizar la contaminación por nutrientes del agua subterránea, mejorar la recuperación de recursos y reducir el volumen de material que se envía al vertedero, generando así múltiples beneficios ambientales (Jayawardhana *et al.*, 2016).

La sostenibilidad debe definirse claramente, luego evaluarse y asegurarse en cada etapa de la cadena de valor y para el sistema en su conjunto, por lo que, se deben considerar los siguientes elementos para determinar y evaluar la sostenibilidad de los sistemas de biochar:

- 1.- Impactos ambientales directos relacionados con la obtención de biomasa en la salud del suelo (incluidos los niveles de nutrientes, materia orgánica, estabilidad estructural y erosión), biodiversidad y fuentes hídricas, así como impactos indirectos que provienen de los diferentes usos del suelo.
- 2.- Impactos de la producción de biochar (por ejemplo, emisiones de GEI y liberación de contaminantes, eficiencia en la utilización del gas de síntesis y calor del proceso para desplazar las fuentes de energía fósiles).
- 3.- Impactos de la aplicación de biochar (por ejemplo, sobre la salud del suelo, la lixiviación de nutrientes y la eficacia de los pesticidas).
- 4.- Impactos sociales, locales y regionales (por ejemplo, impactos en los ingresos rurales y la salud).
- 5.- Evaluación del sistema completo (por ejemplo, impacto del cambio climático en el ciclo de vida, función del ecosistema y resiliencia) (Cowie *et al.*, 2012)

El desafío de crear un sistema de biochar sostenible es limitar la huella medioambiental, satisfacer las necesidades del mercado y ser capaz de producir a una escala lo suficientemente grande para que la producción sea rentable (McLaughlin, 2016). Por lo que, es necesario evaluar los aspectos de la producción y el uso de biochar que pueden contribuir, ya sea positiva o negativamente a la sostenibilidad en general (Brassard *et al.*, 2019).

En este contexto, se puede establecer que el beneficio del biochar se basa en tres factores de sostenibilidad; uso de biomasa sostenible, procesos de producción sostenibles y uso final sostenible (Elad *et al.*, 2011). Mientras que las principales aplicaciones que motivaron su reciente investigación científica incluyen: su mitigación del cambio climático, manejo eficiente y rentable de desechos, y el uso de biochar como enmienda para mejorar las propiedades del suelo y optimizar los cultivos (Pononomi *et al.*, 2015).

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el biochar se incluyó recientemente como una tecnología de emisiones negativas prometedora además, se aspira que para el 2050 el biochar pueda secuestrar cerca de 2.2 gigatoneladas de carbono al año (Coninck *et al.*, 2018).

A diferencia de otras tecnologías prometedoras de emisiones negativas, el biochar aporta varios beneficios secundarios importantes a un costo relativamente bajo (Scholz *et al.*, 2014). Por lo tanto, podría potencialmente usarse para mitigar el cambio climático global y al mismo tiempo, aumentar la resiliencia local en países altamente expuestos y sensibles a los impactos del cambio climático, como es el caso de Ecuador. Además, el biochar puede afectar el rendimiento de los cultivos y la salud del suelo, sin comprometer la seguridad energética (Adegbeye *et al.*, 2020).

En este contexto, en la presente investigación se realiza una revisión bibliográfica con el fin de analizar problemas, proyectos y compensaciones comunes asociadas con la producción de biochar de pequeña y mediana escala, con el fin de establecer la posible inclusión de esta tecnología como mecanismo para la gestión ambiental en Ecuador debido a los resultados positivos en la sostenibilidad y remediación ambiental.

1.1. Formulación del problema.

Ecuador es considerado, debido a su abundancia en ecosistemas y biodiversidad, uno de los países más ricos del mundo, y su conciencia ecológica también se destaca, dado que ha sido pionero en Latinoamérica en implementar el cálculo de la huella ecológica en base a fuentes oficiales, y la incorporación en la planificación nacional de un indicador de sustentabilidad; todos estos elementos indican la intensión del gobierno en apuntalar mecanismos de protección ambiental, como el consumo sustentable, buenas prácticas ambientales, la implementación de tecnologías limpias, entre otros; a través de su política pública y entes responsables de la gestión ambiental, con el objetivo de reducir la contaminación y optimizar de esta manera el uso de los recursos naturales (MAE, 2014).

A nivel local, el Estado a través del Plan Nacional de Desarrollo (2017-2021), ha establecido la responsabilidad conjunta de la protección de los derechos de la naturaleza, que establece las acciones pertinentes para desarrollar territorios seguros y resilientes (SENPLADES, 2018). Asimismo, entre las principales acciones desarrolladas en pro de la sostenibilidad nacional se tiene el Programa Nacional de Reducción de emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD), así como, la sustitución de las cocinas a gas por inducción en las comunidades, desarrollo de políticas para una gestión integral de los residuos sólidos, entre otros (MAE, 2015).

No obstante, Ecuador reconoce que en las prácticas agrícolas utilizadas no se han considerado los impactos que pueden, a largo plazo afectar negativamente al medio ambiente debido principalmente al uso intensivo de fertilizantes químicos y otros insumos externos además de productos derivados del petróleo (Bonilla y Singaña, 2019) lo que cada

vez se volverá más insostenible en el futuro debido a los esfuerzos locales en promover condiciones de producción amigables con el ambiente.

Asimismo, el país ha suscrito acuerdos para apoyar mecanismos de desarrollo limpios no solo en el contexto agrícola sino a nivel industrial. Aun cuando Ecuador genera un nivel de emisiones de CO₂, relativamente bajas comparado con otros países desarrollados, las proyecciones realizadas indican que, de no tomar medidas de control se estima que el aumento de las emisiones continuará y afectará la calidad de vida del ciudadano. En este sentido, el estudio de Arroyo y Miguel (2019), estableció que de no generar cambios sociales, políticos, económicos y ambientales las emisiones de CO₂ en el país al 2030 llegarían a 46.54 millones de toneladas (MtCO₂).

En este sentido, el sector agrícola se considera un elemento fundamental dentro de las estrategias para la reducción de los GEI, además, el aumento de la temperatura global afecta particularmente a estos ecosistemas y puede conllevar a enormes consecuencias para la producción de alimentos en muchas regiones, por lo que, mantener una buena calidad del suelo y mitigar el cambio climático son temas esenciales para garantizar la disponibilidad de alimentos y la salud de las comunidades. Asimismo, la deforestación es una realidad problemática en el país, aun cuando se han tomado medidas ambientales que han reducido su tasa, sigue siendo una de las más altas en Latinoamérica en relación con su superficie.

En este contexto, la identificación y evaluación de medidas de recuperación y protección ambiental son fundamentales para el desarrollo del país, y considerando que el biochar ha atraído un gran interés de investigación por su prometedor potencial de mitigación del cambio climático y mecanismo de biorremediación ambiental; dado que su aplicación a los suelos puede elevar el potencial de almacenamiento de carbono y mejorar la fertilidad a largo plazo (Gurwick *et al.*, 2013), es fundamental revisar y analizar la información que se dispone a la fecha de proyectos desarrollados en base a esta tecnología tanto nacional como internacionalmente.

1.2. Justificación del problema

El Gobierno de la República de Ecuador reconoce las posibles consecuencias negativas que pueden afrontar los países del mundo, debido al cambio climático, entre los que se destaca una importante disminución de la calidad de vida, el bienestar y desarrollo futuro de los individuos; por lo que, consiente de esta problemática ha realizado esfuerzos para disminuir efectivamente la vulnerabilidad de sus sistemas sociales, económicos y ambientales enfocándose en aquellos sectores altamente generados de sustancias contaminantes y que tengan una importancia económica para el país (según los resultados

del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero) y que a su vez puedan contribuir al cumplimiento de los compromisos establecidos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, debido a que uno de los principales sectores que impacta en el logro de los objetivos sostenibles es la agricultura.

En este sentido, según los datos del Ministerio de Ambiente de Ecuador (MAE, 2016), el segundo sector con mayor emisiones (30% del total generado en el país), es el USCUS (uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura) es la segunda fuente de emisiones de GEI en el país, generando, según el registro del año 2010; volúmenes superiores a los 23 millones de toneladas de CO₂ equivalentes (CO₂e), aunque se han obtenido resultados positivos como consecuencia de los esfuerzos gubernamentales, aún sigue siendo un tema que requiere mayor desarrollo y propuestas tecnológicas para su control.

No obstante, la incorporación de estrategias de mitigación puede estar sujeta al intercambio tecnológico entre países, y esto plantea un desafío crucial para el despliegue de procesos sostenibles, en este sentido, Ramos *et al.*, (2018) identifican la fusión de la sustentabilidad ambiental con la sustentabilidad social como la tarea más urgente para el éxito de los esfuerzos relacionados a la mitigación.

En este contexto, el biochar ofrece una oportunidad única para tal fusión, dado que representa una prometedora solución para mitigar el calentamiento global al aumentar el secuestro de carbono del suelo a largo plazo (Li *et al.*, 2017), si se usa en combinación con fertilizantes adecuados, se ha demostrado que mejora significativamente el rendimiento agrícola, aunque los resultados dependen en gran medida del contexto y pueden variar de muy positivos a negativos (Kavitha *et al.*, 2018).

Los resultados de estudios en Ecuador han mostrado efectos positivos en el rendimiento de los cultivos, por ejemplo en el estudio de (Iglesias, 2018), utilizó residuos pertenecientes al eucalipto (*Eucalyptus globulus*) para la producción biochar, concluyendo que el producto final es altamente beneficioso para mejorar las propiedades del suelo, así como para ser aplicado con un enfoque en la remediación ambiental.

Asimismo, el biochar puede fortalecer tanto la capacidad de retención de nutrientes y de agua de los suelos, afectar positivamente las interacciones bióticas y remediar suelos ácidos a través de su efecto encalado, al mismo tiempo que absorbe contaminantes, proporcionando así una gama de beneficios potenciales para la agricultura en contextos de estrés y que presenten vulnerabilidad (Omulo, 2020).

De igual modo, dado que el biochar se puede producir a partir de materias primas residuales, también tiene el importante potencial de reducir la deforestación (Tisserant y Cherubini, 2019) y considerando que Ecuador en la actualidad presenta una elevada tasa

de deforestación de 70000 hectáreas al año, la mayor de Latinoamérica en relación de su superficie (MAE, 2013), la implementación de biochar puede representar un mecanismo para reducir la degradación de los bosques en el país; debido a las condiciones del suelo, las poblaciones vulnerables y los bosques severamente estresados, lo cual se considera un elemento fundamental para el desarrollo del país.

El Gobierno del Ecuador ha desarrollado un cuerpo normativo que incluye a un grupo importante de políticas dirigidas a la protección del ambiente y la búsqueda del desarrollo sostenible; no obstante, se dispone de limitados recursos técnico económicos, para la implementación o desarrollo de estrategias o medidas de adaptación y mitigación que permitan una adecuada gestión ambiental y que reduzca los impactos ambientales en pro de favorecer la sostenibilidad y remediación ambiental, en este sentido debido a las facilidades y bajos costos del biochar, puede resultar un medio efectivo para el éxito de los objetivos enfocados en la protección del ambiente.

En base a lo expuesto previamente, Ecuador puede representar un sitio donde los proyectos de biochar a pequeña escala podrían desempeñar un papel importante en la creación de beneficios locales mientras se compensan las emisiones de carbono. Asimismo, se ha detectado que existe una deficiente indagación del uso del biochar, lo que hace necesario desarrollar un proceso de exploración sobre documentación bibliográfica que pueda abrir el abanico de alternativas para la solución de problemas ambientales basados en el uso de este producto.

Es necesario compilar la información de experiencias relacionadas a proyectos de biochar, con el fin de establecer el marco conceptual y extraer lecciones generalizables sobre desafíos comunes y compensaciones relacionadas con el uso de biochar en pequeña y mediana escala que puedan ser implementados en Ecuador.

El presente estudio permitió evaluar la estrategia de uso de biochar en la gestión ambiental así como en la sostenibilidad y remediación ambiental, lo que favorece el enriquecimiento de los conocimientos en esta materia, complementa los vacíos de información sobre sus beneficios y su implicación en los entornos naturales y ecosistemas, además representa un sustento teórico para futuras investigaciones, dirigidas a desarrollar sistemas propios para la producción de biochar, ajustados a las condiciones particulares del país.

Finalmente, la documentación encontrada en la presente investigación, constituirá una base analítica que servirá de guía tanto para los investigadores como para los entes responsables de la gestión ambiental, considerando el uso de biochar como herramienta ecológica con resultados positivos para la sostenibilidad y remediación ambiental.

1.3. Alcance o delimitación del problema

El biochar tiene numerosas aplicaciones posibles, pero la presente búsqueda sistematizada se centra solo en aquellas que tienen el potencial de hacer una contribución a gran escala al logro de los objetivos de calidad ambiental en Ecuador, a través de la mitigación del cambio climático considerando que en el país se produce 23.245 millones de toneladas de CO₂ y la recuperación de suelos agrícolas agotados. Tomando en cuenta que en la actualidad existen muchos factores que contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero, por lo que, el uso de biochar puede resultar beneficioso en la captura de carbono, dado que el biochar funciona como un almacén de estas sustancias, favoreciendo la reducción de los GEI y en consecuencia el efecto en el cambio climático.

En este contexto, se realizó una revisión bibliográfica sobre los aspectos ambientales del biochar y las características físicas y químicas del biochar producido a partir de biomasa, así como su implementación en el sector agrícola ecuatoriano, además se revisó los beneficios bioenergéticos que se han reportado en investigaciones previas y como puede favorecer la sostenibilidad y remediación ambiental en el país. Debido a las características de la presente investigación, es necesario desarrollar futuros estudios que complementen los hallazgos alcanzados y que establezcan la viabilidad de la implementación del sistema de biochar a gran escala en Ecuador.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar una revisión sistemática de la literatura científica sobre el potencial del biochar utilizado para la gestión ambiental y los efectos en la sostenibilidad y remediación ambiental en Ecuador.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Definir las propiedades del biochar producido a partir de biomasa.
- Determinar los efectos del biochar en la calidad del suelo y en el tratamiento de agua.
- Identificar los aspectos ambientales que se sean relevantes, relacionados con el uso de biochar.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades de la biomasa

2.1.1. Biomasa.

2.1.1.1. Definición y clasificación.

La biomasa se conoce como una fuente indirecta de energía solar y se considera una fuente de energía almacenada, asimismo, se define como un material orgánico renovable derivado de plantas y animales que sirve como fuente de energía (Abioye, 2015). La biomasa se refiere a la masa de organismos vivos, incluidas plantas, animales y microorganismos o desde una perspectiva bioquímica, celulosa, lignina, azúcares, grasas y proteínas. La biomasa incluye los tejidos de las plantas tanto por encima como por debajo del suelo, por ejemplo: hojas, ramitas, ramas, troncos, así como raíces de árboles y rizomas de pastos (Bar *et al.*, 2017).

El biochar se produce calentando biomasa a altas temperaturas (300-600 °C) en un reactor cerrado que no contiene niveles parciales de aire. En estas condiciones, la biomasa sufre una conversión termoquímica (Bernardino *et al.*, 2017). La biomasa utilizada para la producción de biochar se puede clasificar como se ilustra en la figura 1:

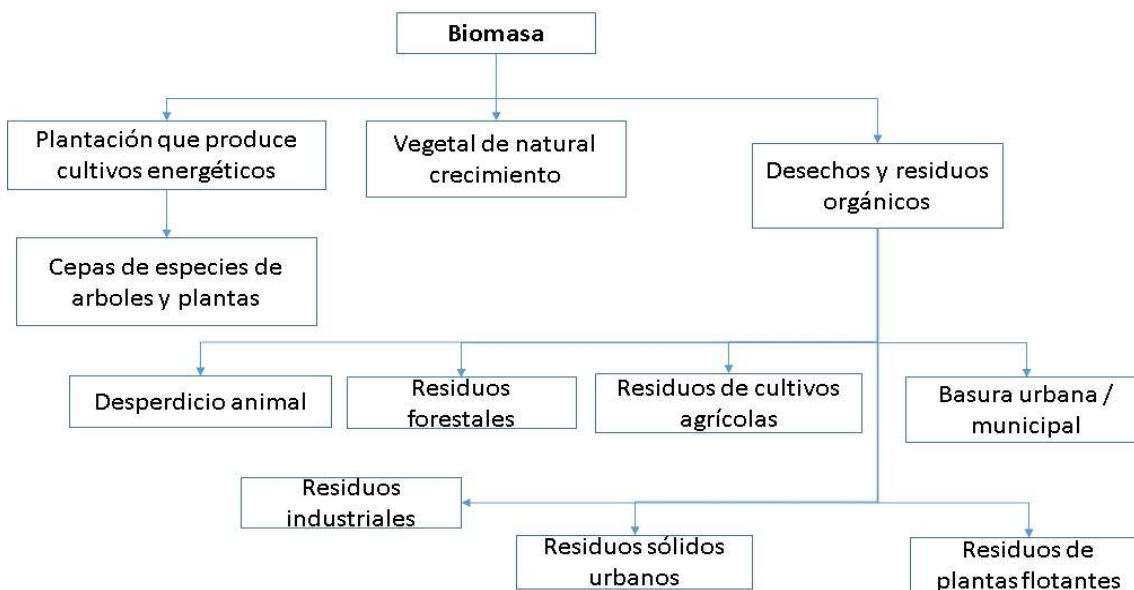


Figura 1. Clasificación de biomasa

Fuente: (Panwar *et al.*, 2019)

En Ecuador no se ha efectuado una investigación exhaustiva relacionada con el desarrollo de información referente a la disponibilidad de biomasa. Un estudio efectuado por la Corporación para la Investigación Energética (CIE, 2009) ha mostrado algunos tipos de

biomasa residual existente en las provincias de Los Ríos, El Oro y Pichincha. Los resultados son parcialmente reproducidos en la Tabla 1:

Tabla 1. Inventario de residuos lignocelulósicos en las provincias de Los Ríos, El Oro y Pichincha

Material		Los Ríos*	El Oro*	Pichincha*
Residuos de palma africana	Fibra de palmiste	5.352	0	73
	Cascarilla de nuez	41666	0	0
	Fibra de pulpa	54974	0	15039
	Raquis	66418	0	33366
	Concha almendra	0	0	974
Residuos de café	Pulpa y cascarilla	18	192	0
	Cascarilla de café	0	0	24
Otros	Concha de macadamia	1	0	26
	Cascarilla de arroz	103862	113	106
	Raquis de banano	47084	29930	56
	Raquis de plátano	0	136	162
	Tusa de maíz duro	67508	832	112
	Caña de azúcar	0	0	36451
	Residuos de bambú	0	0	624

Nota: * Las cantidades se expresan en toneladas de material seco

Fuente: (CIE, 2009)

2.1.2. Tecnologías de conversión de la biomasa.

La biomasa tiene múltiples posibles usos, siendo uno de los principales su alta posibilidad de producir energía, ya sea a través del calor o por medio de la electricidad, también se destaca su conversión a energía en estado líquido, como por ejemplo el biodiesel o en fase gaseosa como el biogás y también como resultado de su uso en forma de fibras naturales y compuestos de madera. Los procesos asociados a la conversión de la biomasa se clasifican en termoquímicos (combustión, pirolisis, torrefacción) y bioquímicos; que implica el uso de enzimas de bacterias u otros microorganismos para descomponer la biomasa (fermentación y la hidrólisis enzimática) (Pelaez y Espinoza, 2015). (Ver Figura 2)

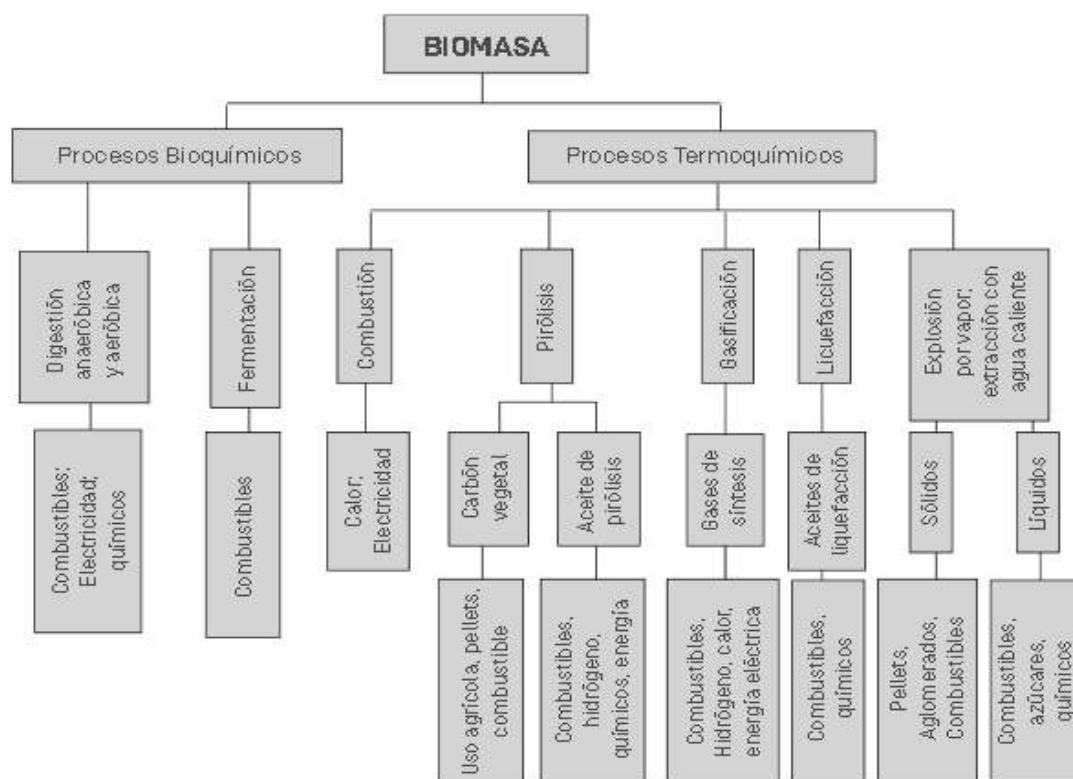


Figura 2. Procesos de conversión de la biomasa y principales productos/aplicaciones

Fuente: (Pelaez y Espinoza, 2015)

En Ecuador, existen varias zonas en las que la práctica de carbonización o pirólisis lenta es muy conocida, especialmente en aquellas áreas en las que se produce carbón vegetal a partir de madera, bambú y residuos de palma africana (Pelaez y Espinoza, 2015). Esta práctica ha permitido la exportación de más de 600 ton de carbón durante los años 2001 al 2009 (BCE, 2011).

Aunque, la producción de carbón en el país es alta, sus métodos son muy tradicionales y se basa principalmente en el uso de hornos simples compuestos de tierra o de metal con un sistema de operación muy sencilla, lo que minimiza su efectividad y reduce la capacidad de obtener subproductos del proceso (gases y líquidos) más limpios, generando que parte de estos materiales se conviertan en sustancias contaminantes que puedan dañar el ambiente (Pelaez y Espinoza, 2015).

2.2. Biochar

2.2.1. Definición

Biochar es el producto sólido rico en carbono de la biomasa de calentamiento en condiciones limitadas de oxígeno (pirólisis). La producción de biochar y su aplicación al suelo resulta en varios beneficios ambientales, incluyendo el secuestro de carbono, mejoras en la calidad del suelo lo que favorece el crecimiento de las especies forestales,

la posibilidad de reutilización de productos de desecho y la inmovilización de contaminantes (Aisosa *et al.*, 2019).

Las definiciones de biochar pueden variar, por lo que la terminología utilizada entre los estudios publicados no siempre es coherente. La Iniciativa Internacional de Biochar (IBI) (2015) lo define como un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en un ambiente con oxígeno limitado, y sugiere usos tales como mejora del suelo, remediación/protección de la tierra y secuestro de gases de efecto invernadero (además de varios parámetros químicos de referencia).

2.2.2. Factores que condicionan la producción de biochar

2.2.2.1. Materias primas

Se ha utilizado una amplia gama de materias primas para producir biochar, cada una de las cuales da como resultado productos con propiedades diferentes. Se ha informado comúnmente que los productos de origen vegetal como la cáscara de arroz, las maderas blandas, la paja de trigo y los carbonizados de madera de arce producen biochar con áreas de gran superficie y redes de poros bien desarrolladas (Prasanna *et al.*, 2015).

Por el contrario, también se han utilizado productos de origen animal como estiércol de cerdo, arena para aves de corral o harina de huesos, lo que da como resultado biochar ricos en nutrientes con un alto contenido de cenizas y una estructura de poros menos desarrollada (Cantrell *et al.*, 2012). La selección de una materia prima adecuada dependerá de las propiedades deseadas del biochar, las condiciones de pirólisis y la disponibilidad local o comercial de los diferentes materiales (Weber, 2018).

2.2.2.2. Temperatura

La temperatura de tratamiento también afecta significativamente las propiedades del biochar. Los componentes de la biomasa como la lignina y la celulosa se degradan a aproximadamente 350 °C, mientras que los componentes orgánicos volátiles también se eliminan o carbonizan a altas temperaturas. Los grupos de oxígeno se eliminan de la fase carbonizada dando como resultado una mayor aromaticidad, además aumentan el espacio poroso, lo que resulta en mayores volúmenes de meso y microporos; sin embargo, la naturaleza exacta de la red de poros aún dependerá de la materia prima inicial. Por lo tanto, los biochar de alta temperatura suelen estar altamente carbonizados, con poco material amorfo (Singh y Kumar, 2018).

2.2.2.3. Tasa de calentamiento

Escalante *et al.*, (2016) establece que los biochar producidos a una tasa de calentamiento más baja tienen una red de poros mejor desarrollada que los producidos a tasas de

calentamiento altas, ya que las tasas de calentamiento altas pueden causar una deformación plástica dando como resultado una red de poros macroporosa.

Para Angin (2013) los biochars producidos a velocidades de calentamiento más altas tienen propiedades elementales similares a los producidos a velocidades de calentamiento más bajas, pero tenían áreas de superficie y volúmenes de microporos más bajos. Por tanto, la velocidad de calentamiento óptima para un biochar determinado dependerá de su aplicación y de los resultados medioambientales netos deseados.

2.2.2.4. Biochar como coproducto

Como se ve en los procesos termoquímicos descritos anteriormente, el biochar puede ser un coproducto primario o auxiliar. La clave para diseñar un proceso eficiente y sostenible para una determinada materia prima, región y entorno económico es considerar los usos potenciales de cada coproducto. El hecho de que un proceso pueda optimizarse para un producto distinto del biochar no significa que este no pueda contribuir significativamente al esquema general. Por ejemplo, un proceso de pirólisis rápido diseñado para obtener los máximos rendimientos de aceite de alta calidad podría producir un 10-15% en peso de biochar y un 15-20% de gases combustibles (Sonil *et al.*, 2016).

El biochar se puede aplicar a los suelos de los que se cosechó la biomasa para reciclar los nutrientes de las plantas (concentrados en la fracción sólida) y secuestrar algo de carbono y los gases no condensables se pueden quemar para producir calor de proceso (Abioye, 2015). Un problema con las tecnologías tradicionales de fabricación de carbón vegetal y una diferencia clave en comparación con los procesos modernos es la falta de utilización de las fracciones de gas y líquido, lo que provoca una baja eficiencia general del proceso y una contaminación significativa (Singh y Kumar, 2018).

2.3. Efectos del biochar sobre el suelo

La investigación ha demostrado que la aplicación de biochar puede aumentar el carbono orgánico del suelo, y favorecer la disponibilidad de nutrientes a las plantas y por lo tanto, mejorar el crecimiento de las plantas y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Rajakumar y Sankar, 2016). Se considera que el biochar beneficia la producción de cultivos a través de tres mecanismos principales (Sohi *et al.*, 2009):

- Alteración de las propiedades químicas del suelo a través de su composición intrínseca elemental y composicional (por ejemplo: disponibilidad de nutrientes, moléculas orgánicas ligeras y disminución de la acidez del suelo);
- Proporcionando una fuerte activación química que modifica la disponibilidad de los nutrientes (por ejemplo: aumentando la capacidad de intercambio catiónico del suelo);

- y modificando el carácter físico del suelo lo que favorece la retención de nutrientes y agua por parte de las especies vegetales (por ejemplo: reducción de la densidad aparente del suelo, creación de macroagregados estables, labranza mejorada, protección para los microorganismos) (Ver figura 3):

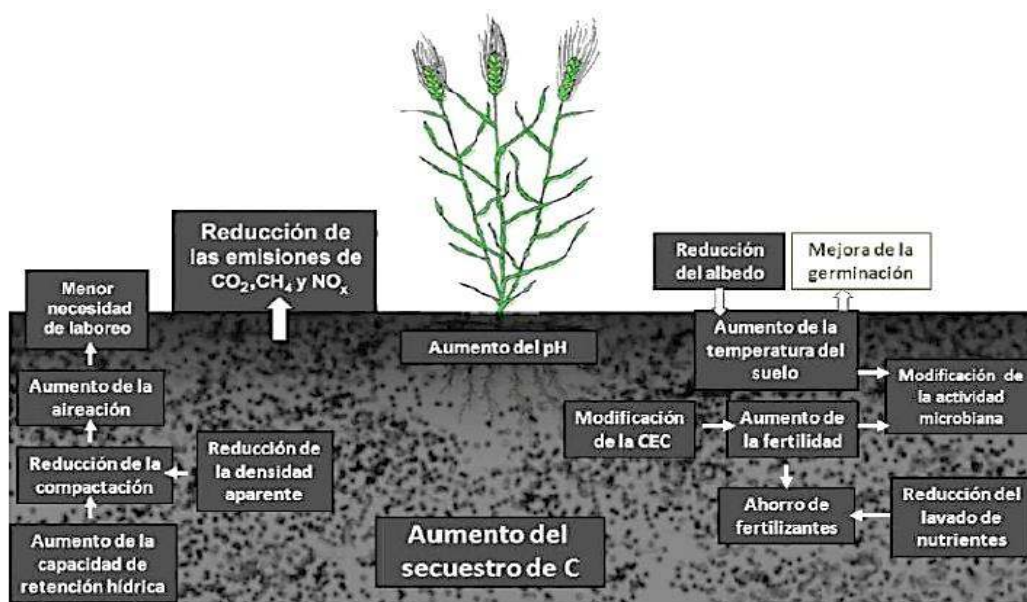


Figura 3. Principales efectos del biochar sobre el suelo

Fuente: (Villalta y Ortega, 2018)

2.3.1. Propiedades químicas

El biochar es un material orgánico de alta superficie, muy poroso y de carga variable que tiene el potencial de aumentar la capacidad de intercambio de cationes, la capacidad de absorción superficial y la saturación de bases cuando se agrega al suelo (Chukwuka *et al.*, 2019). La amplia gama de propiedades beneficiosas asociadas con la adición de biochar al suelo puede funcionar sola o en combinación para influir en las transformaciones de nutrientes, además, altera las propiedades químicas del suelo, es decir; pH, nutrientes totales y disponibles, capacidad de intercambio de cationes, cantidad de cationes intercambiables, saturación de bases y también disminuye el contenido de Al_3^+ intercambiable (Rajakumar y Sankar, 2016).

2.3.2 Propiedades físicas

Además de las características resultantes del cambio en la composición química durante la carbonización, la descomposición de la estructura de la biomasa conduce a un cambio en las propiedades físicas con tasas de aplicación del 1% al 2% de biochar (Mukherjee y Zimmerman, 2014). Entre las propiedades que se pueden mejorar significativamente se incluye la densidad aparente y la capacidad de retención de agua (Bernardino *et al.*, 2017). Sin embargo, hay pocos datos disponibles sobre el área de superficie, la estabilidad de la

agregación y la resistencia a la penetración del suelo modificado con biochar (Blanco, 2017).

2.3.3. Propiedades biológicas

La biota del suelo es vital para el funcionamiento de los suelos y proporciona muchos servicios ecosistémicos esenciales. Por lo tanto, es vital comprender las interacciones entre el biochar, cuando se usa como enmienda y la biota del suelo (Paymaneh *et al.*, 2018). En este contexto, se ha determinado que la aplicación de biochar estimula el desarrollo de microorganismos lo que influye en las propiedades del suelo y el rendimiento de las plantas (Palansooriya *et al.*, 2019); además, se ha establecido que el biochar afecta a los microorganismos del suelo de forma indirecta, al controlar la disponibilidad de nutrientes y modificar las actividades enzimáticas (Zhu *et al.*, 2017) y a través de la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), que actúan directamente sobre los microorganismos (Palansooriya *et al.*, 2019).

Asimismo, muchos estudios han demostrado que el biochar mejora la biomasa microbiana con cambios sustanciales en su composición, diversidad y abundancia (Lehmann *et al.*, 2011). Las propiedades químicas del biochar (especialmente el pH y el contenido de nutrientes), las propiedades físicas como las dimensiones y el volumen de los poros, y el área de superficie específica son fundamentales en la determinación de la eficacia del biochar sobre el desempeño microbiano, ya que proporciona hábitats adecuados para los microorganismos (Zhang *et al.*, 2019).

Por lo que, estudiar el comportamiento de los microorganismos en relación a las enmiendas de biochar, es importante para comprender mejor su interacción con el suelo, así como con las plantas y las posibilidades de su uso en la remediación ambiental (Lehmann *et al.*, 2011).

2.4. Efectos del biochar en el tratamiento de agua

El tratamiento de agua y aguas residuales es uno de los subconjuntos emergentes de la aplicación de biochar. Debido a las propiedades de gran área de superficie y volumen de poros, rico contenido de carbono orgánico y componentes minerales, abundantes y diversos grupos funcionales, lo cual genera una destacada capacidad de sorción de contaminantes inorgánicos y orgánicos en soluciones acuosas (Ahmad *et al.*, 2014). Las técnicas tradicionales para la eliminación de contaminantes de la fase acuosa, por ejemplo: el intercambio iónico, la separación por membranas, la precipitación química y la sorción con carbón activado, tienen desventajas como el alto costo y la inevitable generación de una gran cantidad de residuos químicos sin valor económico (Oliveira *et al.*, 2017).

El biochar podría usarse en diferentes etapas, para mejorar la eficiencia del tratamiento y la recuperación de subproductos de valor agregado; su aplicación podría regirse por el mecanismo de adsorción, amortiguación e inmovilización de células microbianas. Si se usa en los efluentes tratados, el biochar adecuadamente modificado podría adsorber de manera eficiente nutrientes como nitrógeno y fósforo, que luego se pueden usar como material enriquecido con nutrientes para la remediación del suelo (Pokharel *et al.*, 2020).

En este mismo orden de ideas, el biochar podría desempeñar un papel para mejorar el tratamiento y la capacidad de sedimentación del lodo mediante la adsorción de inhibidores y compuestos tóxicos o proporcionar una superficie para la inmovilización de microbios, por lo que, la adición de biochar en el sistema biológico podría eventualmente ayudar a mejorar las propiedades de enmienda del suelo. A medida que aumenta el interés en el uso de biochar en aplicaciones al suelo, su uso en el tratamiento de aguas residuales podría expandir la cadena de valor y generar beneficios económicos adicionales (Mumme *et al.*, 2014).

2.4.1. Eliminación de contaminantes orgánicos

En los últimos años, se ha realizado una cantidad significativa de investigación para examinar la aplicación de biochar para la eliminación de varios compuestos orgánicos, que incluyen agroquímicos, antibióticos/medicamentos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos orgánicos volátiles, compuestos catiónicos, entre otros (Varma *et al.*, 2018). De manera similar, se ha estudiado la eliminación de compuestos orgánicos presentes en corrientes de desechos específicos, como los compuestos de estrógeno en el estiércol y las aguas residuales, los compuestos inhibidores de la descomposición (furfural, hidroximetilfurfural, compuestos fenólicos) y los compuestos orgánicos tóxicos en el lixiviado de vertederos, utilizando biochar (Pokharel *et al.*, 2020).

2.4.2. Eliminación de contaminantes inorgánicos

Los contaminantes inorgánicos en las aguas residuales incluyen metales pesados (iones Cr, Cu, Pb, Cd, Hg, Fe, Zn y As) y compuestos como nitrato (NO_3), nitrito (NO_2), amonio (NH_4), fósforo (P) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) que suponen un riesgo significativo para la salud pública y el medio ambiente (Pokharel *et al.*, 2020). El biochar producido a una temperatura de pirólisis más baja ($<500\text{ }^\circ\text{C}$) tiene propiedades que son más adecuadas para la eliminación de compuestos inorgánicos. La composición química y la estructura morfológica son factores fundamentales en la naturaleza de sorción del biochar (Abdelhafez y Li, 2016).

2.4.3. Digestión anaeróbica

En el caso de la digestión anaeróbica, la adición de biochar ha mostrado aumentos en la tasa y cantidad de producción de biogás (Sunyoto *et al.*, 2016). Esto se atribuye a sus propiedades amortiguadoras, que promueven la metanogénesis para un mayor rendimiento de biogás (Cao *et al.*, 2012). Además, pueden desempeñar un rol importante en la disminución de la movilidad o disponibilidad de inhibidores como metales pesados, pesticidas, antibióticos y otros compuestos orgánicos al unirlos en su estructura porosa y mantener la actividad microbiana adecuada para el proceso de digestión. También, la adsorción de nutrientes en el biochar y su liberación lenta aumentan la disponibilidad de nutrientes en el suelo al tiempo que previenen la lixiviación a los cuerpos de agua circundantes, como es frecuente en el caso de los biosólidos (Fagbohunge *et al.*, 2017).

Aunque el biochar muestra una perspectiva de aplicación generalizada en la remediación de aguas residuales, también se debe analizar el impacto negativo potencial de su aplicación. Dependiendo de las características de la materia prima y la técnica de conversión adoptada para su producción, el biochar puede contener varios metales pesados y otros contaminantes que podrían liberarse durante su aplicación en soluciones acuosas (Jin *et al.*, 2016).

2.5. Sostenibilidad ambiental

Para Browning y Rigolon (2019) el desarrollo sostenible proporciona un mecanismo a través del cual la sociedad puede interactuar con el medio ambiente sin correr el riesgo de dañar el recurso en el futuro. Por lo tanto, es un paradigma y un concepto de desarrollo que aboga por mejorar los niveles de vida sin poner en peligro los ecosistemas de la tierra ni generar desafíos ambientales.

La determinación del grado de sostenibilidad de cualquier sistema se basa en el análisis del medio con respecto a los criterios seleccionados. En general, se acepta que para que cualquier sistema se considere sostenible, debe satisfacer las consideraciones ambientales, sociales y económicas establecidas para ese fin (Pavlovskaia, 2014). La sostenibilidad ambiental es, por tanto, uno de los mayores retos y objetivos de la actualidad y se enfoca en mantener las funciones del ecosistema de las que depende la vida humana (Naciones Unidas, 2013).

De igual modo, la sostenibilidad ambiental puede considerarse como la capacidad de interactuar responsablemente con el planeta para mejorar la calidad de vida humana mientras se mantiene en equilibrio los recursos naturales y se evita poner en peligro a las generaciones futuras impidiéndoles satisfacer sus necesidades (Morelli, 2011).

Promover la sostenibilidad ambiental implica que el capital natural debe mantenerse, tanto como fuente de insumos y como sumidero de desechos. Las capacidades de "fuente" del

ecosistema global proporcionan insumos de materias primas como; aire, agua, energía y alimentos; las capacidades de los sumideros asimilan productos o desechos, estas capacidades de fuente y sumidero son grandes pero finitas, por lo que, la sostenibilidad ambiental requiere que se mantengan o mejoren en lugar de agotarlos, además, la sobreexplotación de una capacidad pone en riesgo a los ecosistemas (Lobato, 2017).

Por lo tanto, Goodland y Daly (1996), establecen que la escala del desarrollo económico debe mantenerse dentro de los límites biofísicos del ecosistema del que depende, entendiendo que el consumo sustentable es, por tanto, la piedra angular de la sostenibilidad medioambiental, estableciendo que para lograr esto se debe cumplir dos reglas:

- Regla de salida: Las emisiones de desechos de cualquier proyecto o acción deben mantenerse dentro de la capacidad de asimilación del medio ambiente local sin una degradación irreparable de su futura capacidad de absorción de desechos u otros servicios importantes.
- Regla de insumos: (a) Renovables: las tasas de aprovechamiento de recursos renovables deben estar dentro de la capacidad regenerativa de los sistemas naturales que los proporcionan. (b) No renovables: las tasas de agotamiento de los recursos no renovables deben ser inferiores a la tasa a la que se desarrollan los sustitutos renovables por la invención humana y la inversión.

Los pasos que cada país debe dar hacia la sostenibilidad ambiental no son los mismos, dado que difieren en el equilibrio entre el producto y el insumo. Por ejemplo, algunos países o regiones deberían centrarse en controlar la contaminación; otros deberían prestar más atención a disminuir el consumo de sus recursos renovables; o limitar el crecimiento de su población por debajo de la capacidad de carga; otros, incluidos la mayoría de los países industrializados, deberían reducir su consumo per cápita (Naciones Unidas, 2013).

En este sentido, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo estableció los objetivos de desarrollo sostenible, entre los que se destacan (PNUD, 2015):

- Objetivo 2: Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.
- Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenible que incluye; lograr el uso eficiente de los recursos, para el 2020, reducir significativamente la liberación a la atmosfera de productos químicos contaminantes, con el fin controlar los posibles efectos negativos en la calidad de vida de las personas, además de implementar medidas como el reciclado, para reducir drásticamente la generación de desechos.

- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

En este contexto, la agricultura sostenible es visto como uno de los principales objetivos para los científicos en el futuro, quienes pretenden mantener la fertilidad y la diversidad microbiana del suelo a través de medios sustentables, así como gestionar el estrés en los cultivos y la mejora de la productividad de los hábitats marginales, frágiles y extremos reemplazando los bioestimulantes y bioplaguicidas por productos de enfoques biológicos, resaltando que esto no solo conducirá a la seguridad alimentaria sino también a la sostenibilidad de los agroecosistemas (Arora, 2018).

2.5.1. Biochar y sostenibilidad ambiental en Ecuador

A nivel local, el gobierno ecuatoriano a través del Plan Nacional de Desarrollo (2017-2021), ha establecido la responsabilidad conjunta de la protección de los derechos de la naturaleza a través de lo cual se establece las acciones pertinentes para desarrollar territorios seguros y resilientes lo que les permitirá hacer frente al cambio climático (SENPLADES, 2018).

En este contexto, entre las principales acciones desarrolladas en pro de la sostenibilidad nacional se tiene el Programa Nacional de Reducción de emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD), así como, la sustitución de las cocinas a gas por inducción en las comunidades, el desarrollo de políticas para una gestión integral de los residuos sólidos, entre otros (MAE, 2015).

2.6. Remediación ambiental

Los esfuerzos de remediación del suelo deben basarse en tecnologías viables, amigables con el medio ambiente y rentables, muchos científicos hoy abogan por mecanismos de biorremediación para cumplir con estos criterios. Las aplicaciones de biochar como aditivo en suelos contaminados son una estrategia de gestión potencial para una sostenibilidad agrícola viable y rentable utilizando suelos degradados, mejorando así la seguridad alimentaria (Chukwuka *et al.*, 2019).

Muchos informes han identificado el biochar con una alta capacidad de sorción para muchos contaminantes, incluidos los contaminantes orgánicos persistentes e inorgánicos, como los metales pesados (Uchimiya *et al.*, 2010) Sin embargo, un buen conocimiento del tipo de contaminante y su concentración puede ayudar a predecir el tipo de biochar que sería más adecuado. Por tanto, es un factor crucial aclarar la correlación entre la eficiencia de sorción y las propiedades de un material particulado para la efectividad del biochar en la remediación ambiental (Mukherjee y Zimmerman, 2014).

2.6.1. Biochar y remediación ambiental en Ecuador

En el país, se han desarrollado varios estudios sobre la remediación ambiental sustentado en el uso de biochar, como el estudio realizado por Villalta y Ortega (2018), que tuvo como objetivo evaluar el proceso de restauración del suelo mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos, obteniendo como resultado que el biochar ocasiono cambios positivos en las propiedades físicas y químicas del suelo, produciendo condiciones aptas para la producción silvícola. Asimismo, en el estudio de Marín *et al.*, (2018) que tuvo como objetivo la elaboración de biochar obtenido a partir de la cáscara del cacao y raquis del banano, concluyendo que es viable diseñar un horno para la producción de biochar a partir de estos materiales.

Además, en el trabajo realizado por Iglesias (2018) en conjunto con el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y la Universidad Agraria La Molina, se estudia la aplicación de biochar en los cultivos de maíz en el Austro ecuatoriano, concluyendo que el producto obtenido, es efectivo para la optimización del desarrollo y crecimiento del grano del maíz, anticipando el posible efecto residual para nuevos cultivos en un periodo de tiempo medio.

También, se observó cambios favorables en las propiedades del suelo a partir de análisis comparativos de variables medidas antes y después de la cosecha, estableciendo que la producción y aplicación de biochar en el contexto estudiado, es viable desde una perspectiva técnica y económica, por lo que, se recomienda el desarrollo de una propuesta estrategia que permita la producción a gran escala de biochar a partir de eucalipto (Iglesias *et al.*, 2018).

Finalmente, el programa MONOIL (Monitoreo ambiental, salud, sociedad y petróleo en Ecuador), concluyo que es necesario innovar los procesos de biorremediación ambiental, incorporando nuevas estrategias tecnológicas que incluya tratamientos metabólicos producidos por agentes de origen biológico tales como los microorganismos, los cuales pueden ser responsables de la degradación de sustancias contaminantes que se encuentren presentes en el suelo, siendo capaces según los estudios, de eliminar muchas de ellas completamente, además una de sus principales ventajas es su carácter biodegradable, lo cual lo convierte en una opción altamente sustentable.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Metodología.

Una revisión sistemática es el escrutinio de una pregunta claramente formulada que utiliza métodos sistemáticos y reproducibles para identificar, seleccionar y evaluar críticamente todas las investigaciones relevantes, y para recopilar y analizar datos de los estudios que se incluyen en la revisión (Paré *et al.*, 2015). Las revisiones de este tipo siguen un procedimiento sistemático y transparente, que incluye estudios de búsqueda, selección y clasificación (Cooper *et al.*, 2018).

En este sentido, en este tipo de investigación se obtienen resultados de interés, como año de publicación, métodos de investigación, técnicas de recolección de datos y dirección o fuerza de los resultados de la investigación (por ejemplo: positivos, negativos o no significativos) en forma de análisis de frecuencia para producir resultados cuantitativos (Sylvester *et al.*, 2013).

En base a lo expuesto previamente, en la presente investigación se realizó una revisión sistemática de la literatura con un total de **157** referencias bibliográficas de documentos revisados y citados, que tuvo como objetivo establecer el potencial del biochar en la gestión ambiental y los efectos en la sostenibilidad y remediación ambiental en Ecuador. En este efecto, se realizó una búsqueda exhaustiva para recopilar información adecuada y creíble de fuentes confiables, incluidas revistas internacionales que son informes y libros útiles y de buena reputación.

Para identificar los estudios relevantes, se revisó la literatura académica en bases de datos públicos en inglés y español, tales Pubmed, Wiley Online Library, OneFile, ScienceDirect, Web of Science, y Google Scholar. Así como, directorios de revistas de acceso abierto: Journals, SpringerLink, PLoS, I, IEEE Journals y Magazines y SciELO, para el protocolo de búsqueda se utilizó las palabras claves como: “biochar”, “sustentabilidad”, “remediación”, “ambiental”, “suelo”, “agua” y “beneficios”. Para la selección de estudios, se definieron los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Criterios de inclusión: Estudios de investigación nacionales e internacionales, que se encuentren publicadas en artículos de revista o base de datos reconocidas, en idioma inglés o español, a texto completo, en un periodo de diez años (2010-2020), que presenten validez científica y un nivel académico elevado, calidad en los procedimientos utilizados y métodos de medición apropiados, así como claridad en la redacción y presentación de resultados.

- Criterios de exclusión: Se excluyó estudios de investigación que se encuentren fuera del periodo establecido de diez años y en un idioma diferente al inglés o español, que no tengan el nivel académico requerido, o cuyos resultados no se encuentren claramente expuestos, o que no se encuentren dirigidos a establecer los beneficios de la implementación del biochar.

Finalmente, la extracción de datos se basó en los requerimientos establecidos en relación al objetivo del trabajo, los criterios de inclusión/exclusión y el desarrollo del protocolo de búsqueda. Para el análisis de datos se organizó la información según el año de publicación, idioma, diseño del estudio, característica del estudio, remediación o sustentabilidad ambiental, resultados, beneficios establecidos como consecuencia directa o indirecta de la implementación biochar y datos relevantes.

El filtrado de la relevancia del tema se realizó en función de la selección del título y el resumen, seguido de la selección del texto completo. La selección del texto completo se llevó a cabo en los casos en que el título y el resumen eran insuficientes para determinar la relevancia del artículo para la presente revisión.

Se consideró que los estudios obtenidos de las bases de datos Science Direct, Springer y Elsevier, eran de alta calidad debido que presentaban validez científica y un nivel académico elevado, métodos de medición apropiados, así como claridad en la redacción y presentación de resultados. La mayoría de los artículos o informes leídos fueron excluidos, y las razones más comunes de exclusión fueron datos no originales, tipo de publicación, falta de relevancia, antigüedad, experimento no realizado correctamente o artículo mal escrito. En general, se consideró que los artículos publicados en revistas eran de mayor calidad que otras fuentes de información. Los artículos de otras fuentes de información a menudo no describían adecuadamente su diseño experimental, tenían muestras experimentales, métodos de muestreo, control de calidad inadecuados durante la recolección de datos, tenían hallazgos que eran en gran parte especulativos y carecían de conclusiones firmes, o tenían un análisis de datos deficiente.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Propiedades del biochar

Durante los años 2010 al 2020, los estudios se centraron en la aplicación de biochar en diferentes suelos agrícolas sus diferentes usos, evalúan el impacto de la fabricación y el tipo de biomasa utilizada en las propiedades del biochar. La liberación de la humedad, la descomposición de la materia volátil y los cambios de la estructura del carbono durante la pirólisis producen biochar con propiedades y funcionalidad físico-químicas únicas (Leng y Huang, 2018). Estas propiedades dan lugar a la capacidad del biochar para ser utilizado para diferentes aplicaciones, tales como; adsorción de metales pesados (Ahmad *et al.*, 2014), herbicidas (Yan *et al.*, 2020), mejoramiento de cultivos (Zhao *et al.*, 2017), retención de nutrientes (Lee *et al.*, 2017) y secuestro de carbono en el suelo (Gurwick *et al.*, 2013).

Hay más de 55 usos potenciales en los que la selección de la aplicación final adecuada depende de las propiedades del biochar, como su composición química, grupos funcionales superficiales y propiedades de textura. La calidad (propiedades) y la cantidad (rendimiento) del biochar se ven afectadas por la materia prima y los parámetros operativos como el tiempo de residencia, el tamaño de partícula, la velocidad de calentamiento, la temperatura y más (Tomczyk *et al.*, 2020).

4.1.1. Resultados de las propiedades del biochar en estudios internacionales

Las principales materias primas utilizadas en los estudios internacionales corresponde principalmente a la biomasa lignocelulósica (Tripathi *et al.*, 2016) residuos de alimentos (Elhessin y Zhao, 2017) y residuos agrícolas, incluidos cultivos y abono animal (Wang *et al.*, 2017). A continuación, en la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos en relación a diferentes tipos de biomasa y la influencia del proceso de producción en las principales características del biochar en base a estudios internacionales:

Tabla 2. Características del biochar producido utilizando diferentes materias primas en diferentes condiciones de pirólisis

Biomasa bruta	Temperatura (°C)	Velocidad Calefacción (°C/min)	Tiempo de residencia (h)	Rendimiento de biochar (%)	pH	Contenido Ceniza (%)	Carbono fijo (%)	C	C/H	C/O	País	Referencias
Lodos	850	60	-	38,0	11,9	66,3	-	29,6	3,52	26,3	Australia	(Fang <i>et al.</i> , 2014)
Residuos de Conocarpus	800	-	4	23,19	12,38	8,64	-	84,97	137,05	17,45	EE.UU.	(Harvey <i>et al.</i> , 2012)
Paja	600	-	4	30,89	10,99	34,31	55,37	60,80	45,71	5,73	España	(Manyà, 2012)
Lignosulfonato	600		4	43,85	12,95	59,69	35,05	36,81	29,21	1,24	EE.UU.	(Singh y Kumar, 2018)
Bagazo				43,7	9,3	8,57	80,97	86	30,35	8,17		
Turba de coco				62,9	10,3	15,9	67,25	84	29,32	7,24		
Paja de arroz				49,6	10,5	52,37	39,1	86	27,65	11,74		
Cáscara de almendra de palma	500	10	1	53,5	6,9	6,86	80,85	88	30,19	10,79	Reino Unido	(Windeatt <i>et al.</i> , 2014)
Tallo de madera				42,6	9,5	2,28	83,47	89	34,75	12,17		
Corteza de madera				50,3	9,6	12,84	68,66	84,84	27,11	8,32		

En base a los resultados obtenidos, se puede establecer que una temperatura de pirólisis más alta, un tiempo de residencia más largo y una biomasa de mayor contenido de lignina, con un tamaño de partícula más grande produjeron un biochar con mayor estabilidad (Harvey *et al.*, 2012) (Manyà, 2012) (Fang *et al.*, 2014). Asimismo, Li *et al.*, (2017), demostraron que la adición de minerales (caolín, calcita, fosfato de dihidrógeno cálcico) fortaleció la estabilización del biochar, entregando una nueva idea para producir el biochar diseñado con alta capacidad y estabilidad de secuestro de carbono.

4.1.2. Resultados de las propiedades del biochar en estudios nacionales

En el contexto ecuatoriano, los estudios que se destacan por el uso de biomasa para la producción de biochar son los siguientes (Ver tabla 3):

Tabla 3. Estudios desarrollados en Ecuador en base a diferentes tipos de biomasa

Referencia	(Chimbo, 2019)	(Díaz, 2017)	(Fernandez y Lopez, 2018)	(Iglesias et al., 2020)	(Arévalo, 2020)	(Carmona, 2020)
Biomasa utilizada	Desechos agrícolas y silvícolas más comunes de la Comunidad de Garenó (cacao y pigüe)	Acícula de pino (<i>pino pátula</i>) se vincula con la reforestación de ecosistemas localizados sobre los 3000m de altura, a la cual se le vincula con la acidificación del suelo	Residuos avícolas y de lodos de depuradora	Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	Pino (<i>Pinus patula</i>)	Pino (<i>Pinus patula</i>)
Tipo de pirolisis	Pirolisis lenta en hornos de tierra cubiertos (método tradicional)	Hornos artesanales de bajo costo	Reactor batch	Pirólisis lenta y rápida	Horno casero	Horno pirolítico artesanal
Temperatura	Temperatura máxima alcanzada de 429,3 °C en el pigüe y de 413,5 °C en el cacao (recomendada 300-500 °C)		300°C±10° en un periodo de 30 minutos y en una atmósfera inerte.	A los 400 °C se obtuvo la mayor producción de biochar		Se inició el termo reactor a una temperatura de 150 °C.
Características del biochar	Rendimiento del 26% de biochar de cacao y 34% biocarbón de pigüe	Rendimiento del 30%.	Se relacionan con el tiempo de calentamiento de la materia prima y la temperatura	Rendimientos en masa de alrededor del 30-40%, obteniendo mejor rendimiento con el pirólisis rápido	El rendimiento del biochar en con el aumento de materia orgánica es de 56.82% al 58.70%	El rendimiento con la utilización de biochar de pino es 31.40% y 31.57%

En relación a las principales biomásas utilizadas en el país para la producción de biochar, se obtuvo, el uso de desechos avícolas y forestales principalmente, dejando en segundo lugar el uso de biomasa lignocelulósica, la cual se destaca en estudios internacionales, debido a su alta disponibilidad y bajo costo.

4.2. Potencial de producción de biochar en Ecuador en base a la disponibilidad de biomasa

Para obtener una estimación razonablemente realista del potencial de biomasa para la producción futura de biochar en Ecuador, los cálculos se sustentaron en los potenciales de biomasa en base a residuos agroindustriales, según el estudio realizado por (Riera *et al.*, 2018), los cuales estimaron un valor superior a 2.200 miles de kilogramos de residuos agroindustriales que podrían ser aprovechables (las hojas de la caña de azúcar, la cáscara de maíz y el bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz, entre otros); computados considerando los registros nacionales promedios sobre los volúmenes de producción anual de los materiales estudiados, su estructura química y el potencial de diseñar sistemas para el manejo a gran escala de los residuos que se puedan generar.

Asimismo, se utilizó los residuos agroindustriales, dado que en el Atlas Bioenergético del Ecuador se han identificado tres sectores productivos cuyos residuos de campo e industrias poseen un alto potencial para ser aprovechados como fuente de energía y en primer lugar se encuentra el sector agrícola, con productos como el arroz, banano, cacao, café, caña de azúcar, entre otros (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014).

Además, se utilizó como ejemplo los residuos de cascarilla de café, debido a que existen estudios desarrollados en el país sobre su uso como biochar (Chimbo, 2019) (Marín y Barrezueta, 2018), por su alto volumen de biomasa que se produce; considerando que en Ecuador se genera alrededor de 2 millones de toneladas de residuos de cacao al año, de los cuales alrededor del 70% corresponde a residuos de campo como son la mazorca descartada, cáscara de mazorca y residuos de la poda y el 30% restante corresponde a residuos industriales como son el raquis, el rechazo de producto y cáscara del grano (Cayo, 2018).

Mientras que, la cáscara de la mazorca de cacao generalmente se desecha directamente al campo, sin embargo esta práctica afecta al cultivo debido a que este material abandonado a la intemperie posee tiempos prolongados de descomposición lo cual puede constituir un foco de propagación de plagas y enfermedades que afectan la productividad del cacao (INIAP, 2012), por lo que, para la estimación de su potencial como biochar, se consideró los resultados reportados por Chimbo (2019), en el que se obtuvo un rendimiento del 26% destacando el uso de pirolisis lenta en hornos de tierra cubiertos (método

tradicional) y una temperatura máxima de 413 °C, mientras que a nivel internacional se tiene el trabajo de Adjin *et al*, (2018) que reportaron un rendimiento del 30% considerando un proceso de pirolisis rápido con un rango de temperatura de 550-600 °C.

En este contexto, es posible obtener una capacidad de producción de biochar de 600.000 toneladas por año solo en base a los residuos de cascarilla de café, lo cual implica una alta capacidad de tratar suelos, considerando que Villamagua *et al*, (2016) determinaron que la aplicación de 2 kg biochar por cada m² (20 ton/ha) de suelo produjo cambios favorables en las propiedades el suelo; aunque hasta la fecha no se ha establecido una tasa de aplicación optima, algunos estudios refieren que el 20% de biochar en relación al volumen del suelo es beneficioso para la productividad (Arévalo, 2020), sin embargo, en el estudio de Jeffery *et al*, (2015), se obtuvo un aumento del 10% en el rendimiento de los cultivos, con una aplicación de biochar de 18 toneladas/acre (44,79 ton/ha), mientras que Woolf *et al*, (2010) concluyo que 24 toneladas/acre es más efectivo. Estos datos permitieron establecer cuál sería la capacidad de tratamiento de suelos a partir del biochar producido.

En relación al contenido de carbono fijo, el cual es sin duda el parámetro más valioso que refleja directamente el potencial energético de cualquier biomasa; dado que, las materias primas con mayor contenido de carbono fijo poseen valores caloríficos inherentes más altos. Los resultados reportados por Adjin *et al*, (2018) establecen que el 10,96% en peso corresponde a carbono fijo que será incorporado al suelo con la aplicación del biochar. A continuación, en la tabla 4 se muestra los resultados obtenidos de las estimaciones de producción de biochar en base a la biomasa agroindustrial disponible en Ecuador:

Tabla 4. Resultados obtenidos de las estimaciones de producción de biochar en base a la biomasa agroindustrial disponible en Ecuador

Biomasa	Rendimiento del biochar*	Cantidad estimada disponible (ton/año)	Potencial de producción de biochar (ton/año)	Área potencial de suelos a tratar (ha/año)	Referencia
Residuos de cacao	26-30%	2.000.000,00	520.000,00	26.000,00	(Cayo, 2018)
Eucalipto	30-40%	772.470,69	231.741,21	11.587,06	(Iglesias, 2018), (Jaramillo <i>et al.</i> , 2019)
Bagazo de caña de azúcar	25%	1.118.600,42	279.650,11	13.982,51	(Palomo, 2020)
Cáscara, pinzote, médula del banano	20,5%	632.495,97	129.661,67	6.483,08	(Marín <i>et al.</i> , 2018)
Fibras, cáscaras y racimos vacíos de palma aceitera	35,79%	346.054,88	123.853,04	6.192,65	(Herrera, 2018)
Mazorca y cáscara de maíz duro seco	57,5%	89.060,59	51.209,84	2.560,49	(Cedeño, 2016)
Cascarilla de arroz	66 %**	4.391,97	2.898,70	144,94	(Velázquez <i>et al.</i> , 2019)
Cascara de naranja	29.37%	5.131,66	1.503,58	75,18	
Total		4.968.206,18	1.340.518,14	67.025,91	

Adaptado de (Riera *et al.*, 2018)

*El rendimiento se basó en diferentes estudios sobre la biomasa, priorizando los resultados obtenidos a nivel nacional

**rendimientos obtenidos con la incorporación de ácido maleico y cítrico al 10 %

En la presente investigación, se analizó únicamente el potencial de producción de biochar basado en los residuos agroindustriales, calculados en el año 2018, no obstante, las fuentes para la obtención de biomasa son variadas como se mencionó previamente, por lo que la disponibilidad de material para la producción de biochar no es, ni será un problema para el desarrollo de proyectos a nivel industrial. Considerando que los residuos forestales son una fuente importante para analizar su potencial, sin embargo, debido a la poca información sobre su disponibilidad y volumen potencial no se consideró en el presente estudio.

Es importante destacar que en Ecuador no se han realizado estudios profundos sobre el tema de la disponibilidad de biomasa, en este sentido, en el año 2009 un estudio de la Corporación para la Investigación Energética (CIE) demostró la existencia de biomasa potencial en las provincias de Los Ríos, Pichincha y El Oro, asimismo, tampoco se han desarrollado incentivos o proyectos apalancados por el gobierno, para la conversión a gran escala de fuentes potenciales de biochar que pueden encontrarse en el país.

Los resultados muestran que las cantidades de biochar que se puede producir a partir de la biomasa de residuos agroindustriales es de aproximadamente 1.3 millones toneladas (masa seca), que están disponibles en el escenario elegido y estos pueden ser aplicados a 67 mil hectáreas de suelo generando beneficios tanto para la agricultura como para el medio ambiente.

4.3. Efectos del biochar en la calidad del suelo y en el tratamiento de agua

Las características del biochar (por ejemplo; composición química de la superficie, distribución del tamaño de las partículas y de los poros), así como los mecanismos de estabilización física y química en los suelos, determinan los efectos del biochar en las funciones del suelo (Ahmad *et al.*, 2014). Sin embargo, la contribución relativa de cada uno de estos factores se ha evaluado de manera deficiente, particularmente bajo la influencia de diferentes condiciones climáticas y del suelo, así como el manejo y uso del suelo.

Una comprensión sólida de la contribución que puede hacer el biochar como herramienta para mejorar las propiedades, los procesos y el funcionamiento del suelo, o al menos evitar los efectos negativos, se basa en gran medida en conocer el alcance y las implicaciones totales de las interacciones y los cambios del biochar a lo largo del tiempo dentro del sistema del suelo. La extrapolación de los resultados reportados debe hacerse con precaución, especialmente cuando se considera el número relativamente pequeño de estudios reportados en la literatura primaria, combinado con la pequeña gama de tipos de

clima, cultivo y suelo investigados en comparación con la posible instigación de la aplicación de biochar a los suelos en una escala nacional o mundial.

La aplicación del biochar para el tratamiento de aguas contaminadas ha tenido un rendimiento promedio de 31.5% mediante la utilización de un horno artesanal de pirólisis rápida, esto es posible gracias a las propiedades absorbentes de los contaminantes además de remover nitratos, DQO y fósforos en lo que se obtuvieron valores como 44.3%, 49.5% y 30.5% respectivamente al combinar factores en un nivel mínimo de concentración de biochar (1.5mg/ml) y en nivel máximo tiempo de contacto y revoluciones por minuto (5 horas y 160rpm) (Carmona, 2020).

4.4. Impacto del biochar en las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas

La tabla 5 proporciona una descripción general de los hallazgos con respecto a los efectos (potenciales) en el suelo, en base a estudios internacionales:

Tabla 5. Impacto del biochar en las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas

Características	Referencia
Biochar aumenta el pH, el carbono orgánico, la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo.	(Abioye, 2015)
La enmienda de biochar podría mejorar eficazmente la capacidad de retención de agua en un suelo franco arenoso.	(Amoakwah <i>et al.</i> , 2017)
El biochar podría mejorar la fertilidad del suelo, ya que facilita el ciclo bioquímico del nitrógeno y el fósforo.	(Yao <i>et al.</i> , 2018; Nelissen <i>et al.</i> , 2012)
Además, la materia orgánica y los iones inorgánicos (p. Ej., N, P, K, Ca, Mg, Si) del biochar proporcionaron nutrientes a las plantas.	(Mukherjee y Zimmerman, 2014; Rajkovich <i>et al.</i> , 2012)
Los efectos negativos pueden atribuirse a la reducción de la biodisponibilidad de los nutrientes, las altas concentraciones de sal o la liberación de sustancias químicas fitotóxicas del biochar a altas tasas de aplicación.	(Aguilar <i>et al.</i> , 2012; Rajakumar y Sankar, 2016)
El incremento del crecimiento de las plantas dependió en gran medida de los tipos de suelo, las especies de plantas y las propiedades del biochar.	(Jones <i>et al.</i> , 2012) (Rajkovich <i>et al.</i> , 2012)
Sin embargo, también se ha informado del impacto negativo de la aplicación de biochar en el crecimiento de las plantas. Un experimento en macetas mostró que el biochar de desperdicio de alimentos y sus altas tasas de aplicación (7%) redujeron el crecimiento del maíz en un suelo arcilloso (Alfisol). De manera similar, el crecimiento del trigo se inhibió en un suelo modificado con biochar de roble (tasa de aplicación del 4,5%).	(Rajkovich <i>et al.</i> , 2012) (Aguilar <i>et al.</i> , 2012)

En general, los hallazgos permiten establecer en relación a la aplicación de biochar, que existe un pequeño efecto positivo, pero estadísticamente significativo, sobre el rendimiento de las plantas por lo que, la investigación sobre la enmienda de biochar para mejorar la calidad de un suelo recibió gran interés.

4.5. Potencial del biochar en el aumento de la productividad de los cultivos

Para establecer el potencial del biochar en Ecuador en relación al aumento de la productividad, se consideró los principales cultivos producidos en base a las toneladas métricas (tm) y la superficie sembrada (ha) en el país según el informe del INEC (2019), asimismo se determinó el índice productivo obtenido (tm/ha); y se estimó la cantidad de biochar requerido para tratar la superficie sembrada en base al requerimiento previo de 20 ton/ha de biochar. Los resultados se muestran a continuación en la tabla 6:

Tabla 6. Potencial del biochar para mejorar el rendimiento de los cultivos en Ecuador

Principales cultivos	Superficie sembrada (ha) Año 2018*	Producción obtenida (toneladas métricas) Año 2018*	Índice Productivo (tm/ha)	Cantidad de biochar requerido (ton)
Caña de azúcar	101.898	7502251	73,625105	2.037.960,00
Banano	173.706	6505635	37,451988	3.474.120,00
Palma africana	267.760	2785756	10,403929	5.355.200,00
Arroz	301.853	1350093	4,4726837	6.037.060,00
Total	845.217	18.143.735	21,466363	16.904.340,00
Cantidad de biochar en base a la biomasa disponible (ton/año)				1.340.518,14
% de Biochar disponible en relación al requerido				7,9 %
Superficie sembrada que puede ser tratada con biochar (ha)				67.025,91
Aumento en la producción de caña de azúcar (10% por el aporte del biochar)				447.390,86

*Información obtenida de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) (INEC, 2019).

En base a las estimaciones realizadas, se obtuvo que para tratar con biochar toda la superficie sembrada de los principales cultivos en el Ecuador se necesita más de 16 millones de toneladas de biochar, sin embargo, según los cálculos previos se puede

obtener en base a la biomasa de residuos agroindustriales más de 1.3 millones de toneladas lo que corresponde al 7.9% de lo requerido; por lo que, se puede tratar solo 67 mil hectáreas produciendo un aumento de 447.390,86 toneladas métricas en el caso del cultivo de caña de azúcar, considerando los resultados obtenidos por Jeffery *et al.*, (2015), que comprendió 177 estudios individuales y en el que concluyó un aumento medio de la productividad de los cultivos de alrededor del 10% como efecto de las enmiendas de biochar.

En base a lo expuesto previamente, se puede establecer que la aplicación de biochar es beneficiosa para mejorar la calidad del suelo y retener nutrientes, optimizando así el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, puede jugar un rol importante en el desarrollo de un sistema de agricultura sostenible, no obstante, su potencial debe ser estimada considerando otras fuentes de biomasa disponible en el Ecuador.

4.6. Impacto biológico del biochar en el suelo

Los microorganismos del suelo son los componentes más activos en la reserva de carbono del suelo, que es sensible a los cambios ambientales. La naturaleza porosa y las propiedades de adsorción del biochar proporcionan un entorno favorable para el crecimiento y la reproducción de los microorganismos del suelo (Warnock *et al.*, 2010). Asimismo, se estableció que el ciclo de nutrientes del suelo se alteró después de la aplicación de biochar, y esto a su vez generó una perturbación en la composición y estructura de las comunidades microbianas en comparación con los suelos no tratados (Farrell *et al.*, 2013). En base a la revisión sistemática, se obtuvo los siguientes impactos en la biota del suelo, como consecuencia directa o indirecta de la aplicación del biochar (Ver tabla 7):

Tabla 7. Hallazgos principales del impacto del biochar en las propiedades biológicas del suelo

Características	Hallazgos	País	Referencia
Colonización de biochar por microorganismos	El proceso de envejecimiento del biochar puede alterar sus propiedades y conducir a la colonización por microorganismos. Se observó que la adición de biochar envejecido aumentó actividad microbiana, mientras que se observó lo contrario para biochar fresco. Estos hallazgos sugieren que las bacterias del suelo colonizan el biochar envejecido mejor que el fresco. La razón más evidente está en los efectos tóxicos del biochar recién preparado debido al alto contenido de productos de pirólisis.	Estados Unidos	(Mukherjee y Zimmerman, 2014) (Wang et al., 2017).
Sustancias emitidas al suelo por biochar y su efecto sobre los microorganismos del suelo	Durante la producción de biochar se forman cantidades significativas de nuevas sustancias orgánicas que pueden influir sustancialmente en las propiedades del suelo y los microorganismos que lo habitan. La composición exacta del biochar determina los cambios en las comunidades microbianas en la etapa inicial después de su adición al suelo.		(Spokas et al., 2011) (Sunyoto et al., 2016)
Hidrocarburos poliaromáticos (HPA)	El biochar puede contener cantidades significativas de HPA dependiendo del precursor. Se informó un 64,65 mg/kg de HPA totales en el biochar de cáscara de arroz, mientras que se determinó 9,56 mg/kg en el biochar de madera. Los HPA formados durante la producción de biochar pueden permanecer absorbidos en el biochar sin entrar en la solución del suelo, lo que limita los posibles riesgos ecotoxicológicos.	Reino Unido	(Quilliam et al., 2013) (Hale et al., 2013)
Nutrientes minerales en la composición del biochar y su impacto en los microorganismos	Los precursores del biochar, como la madera, la paja, la basura, los compost y los residuos agrícolas, siempre contienen una gran cantidad de elementos minerales, que permanecen en el biochar después de la pirólisis. Estos nutrientes pueden luego difundirse lentamente en el suelo y son utilizados por microorganismos y plantas la actividad microbiológica mejorada puede estar relacionadas con la capacidad de intercambio catiónico, aumentando con la aplicación de biochar.	Reino Unido	(Quilliam et al., 2013) (Zhu et al., 2017) (Amini et al., 2016). (Andrade et al., 2015)
Impacto del biochar en la estructura del suelo y la reacción de las comunidades microbianas a estos cambios	Se llevaron a cabo varios estudios sobre el impacto del biochar en la estabilidad de los agregados del suelo. Dado que estas partes estructurales del suelo son sustratos para el desarrollo de biopelículas microbianas, cualquier cambio en su proceso de formación y su existencia en el medio del suelo produce un significativo impacto en los procesos microbiológicos. En muchos estudios, hubo un efecto positivo sobre la formación de microagregados.	China	(Gul et al., 2015) (Jin et al., 2016) (Zhang et al., 2019)
pH	En este caso, en muchos estudios se observaron cambios sustanciales en las comunidades microbianas después de la aplicación de biochar en el suelo debido al cambio de pH. Por lo tanto, existe un impacto sustancial en la composición de microorganismos nitrificantes de las comunidades. Una variación sustancial del pH causada por la aplicación de biochar es uno de los principales mecanismos de su efecto sobre las comunidades microbianas del suelo.	China	(Zhang et al., 2019) (Palansooriya et al., 2019)

En base a los resultados obtenidos, se puede establecer que los efectos del biochar en la biota del suelo ha recibido mucha menos atención que sus efectos sobre otras propiedades y existe una menor comprensión de los mecanismos por los que el biochar influye en los microorganismos del suelo, la fauna y las raíces de las plantas.

4.7. Impacto del biochar en las propiedades físicas y químicas del suelo

A continuación, en la tabla 8 se describe los principales hallazgos obtenidos en relación a las propiedades físicas del suelo:

Tabla 8. Hallazgos principales del impacto del biochar en las propiedades físicas y químicas del suelo

Propiedad afectada del suelo	Efecto	País	Referencia
Propiedades físicas			
Densidad aparente	Reducción de la densidad aparente debido a la porosidad de biochar.	Arabia Saudita	(Al-Wabel <i>et al.</i> , 2015)
Color	Cambios en el color de la superficie del suelo, que son visibles después de la aplicación del biochar.	EE.UU	(Brewer y Brown, 2012)
Retención de agua	Mayor retención de agua debido a la porosidad y alta superficie específica de biochar. Mayor macroporosidad e hidrofilia; tasa adsorción de agua mejorada.	Suiza	(Krause <i>et al.</i> , 2018)
Infiltración	Reducción de la infiltración del suelo.	Suecia	(Pavlovskaja, 2014)
Compactación	Reducción de la compactación del suelo.	EE.UU.	(Fidel <i>et al.</i> , 2018)
Resistencia a la penetración	Disminución de la resistencia a la penetración con la aplicación de biochar.	EE.UU.	(Blanco, 2017)
Temperatura	Aumento de la temperatura de la superficie del suelo en las primeras etapas de germinación y crecimiento de los cultivos con la aplicación de biochar.		
Porosidad	Mayor porosidad debido a una mayor estructura porosa, efecto de dilución y formación de macroagregados.	Egipto	(Zhang <i>et al.</i> , 2019)
Propiedades químicas			
pH	Alcalinización de suelos por aumento de pH. Por alto contenido de cenizas.	EE.UU.	(Blanco, 2017)
Conductividad eléctrica	Aumento de la conductividad eléctrica del suelo en presencia de biochar en comparación con el suelo sin biochar.	China	(Zhu <i>et al.</i> , 2017)
CIC	Mayor capacidad de intercambio catiónico, debido a una mayor superficie específica de biochar; grupo carboxílico aumentado (CEC).		
C orgánico total	Aumento del carbono total.	Suiza	(Krause <i>et al.</i> , 2018)
Carbono orgánico disuelto (DOC)	Mayor cantidad de DOC en el suelo.		
NO ₃	Reducción de NO ₃ - lavado en un 75% en el segundo año.	China	(Zhu <i>et al.</i> , 2017)
Na intercambiable	Aumento de sodio intercambiable.		
K intercambiable	Aumento del Potasio intercambiable.	Egipto	(Zhang <i>et al.</i> , 2019)

K soluble	Aumento de potasio soluble en el suelo.
Disponibile P	Mayor cantidad de fósforo disponible en el suelo.
Mg intercambiable	Aumento del Magnesio intercambiable
Al intercambiable	Reduce la disponibilidad de aluminio.
Acidez intercambiable	Reduce la acidez intercambiable.

En base a la información analizada, se obtuvo que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, se ven modificadas por la aplicación de biochar y en la revisión bibliográfica se incluye una variedad de documentos provenientes de diferentes países y por lo que, los resultados se pueden considerar universales.

4.8. Resultados del impacto del biochar en las propiedades del suelo en estudios del Ecuador.

En el contexto nacional, se analizaron tres estudios que tuvieron como objetivo modificar las propiedades de suelo (Ver tabla 9):

Tabla 9. Resultados del impacto del biochar en las propiedades del suelo en estudios del Ecuador.

	(Arévalo, 2020)	(Díaz, 2017)	(Chimbo, 2019)	(Iglesias <i>et al.</i> , 2018)
Tipo de suelo	Suelos negros andinos cuenca del río Machángara	Suelos andosoles (páramos en los andes ecuatorianos)	Suelo de la Cuenca Amazónica	Suelos de la región interandina de Ecuador
Propiedades modificadas	Incremento la MO de un 26.90% a un 58.7%, y la biomasa vegetal de 21% a un 23%, se empleó 2.16 libras de biochar en cada parcela	La aplicación de biochar no implicó la disminución de la acidez, por el contrario, se incrementó con respecto al pH.	Los gránulos de biochar modificaron la capacidad de retención de agua, la capacidad de adsorción de compuestos orgánicos, y un valor más alto de pH	La pirolisis optimiza la disponibilidad de nutrientes que pueden ser aprovechados por las plantas e incrementa el pH.
Objetivo del biochar	Mejorar las propiedades de los suelos	Mejorar la acidez en los suelos negros andinos (actualmente se incorpora cal agrícola).	Mejoramiento de las características físicas y químicas del suelo	Determinar las características físicas y químicas del producto resultante mediante análisis de laboratorio

Los resultados obtenidos de los estudios nacionales son similares a los registros internacionales, en los que se obtiene mejoras substanciales en las propiedades del suelo como consecuencia de la aplicación del biochar, no obstante, es necesario realizar un mayor número de investigaciones, que integren los diferentes tipos de suelo presentes en el país, y determinar si estos cambios se mantienen a largo plazo, así como considerar el impacto que puede representar los parámetros ambientales en la mejora de las condiciones del suelo, por lo que, se requieren acumular evidencia de su potencial, considerando que las modificaciones en las propiedades del suelo dependen de numerosos factores.

4.9. Aspectos ambientales relevantes relacionados con el uso de biochar

4.9.1. Reducción de gases de efecto invernadero

Un propósito clave de la presente investigación, es comprender el potencial del biochar en la reducción de gases de efecto invernadero, el cual depende en gran medida del potencial de biomasa supuesto disponible para su producción en el país.

El secuestro de carbono por el biochar es fundamentalmente diferente de otras formas de secuestro de carbono, dado que, se refiere a la captura y posterior almacenamiento de carbono para evitar su liberación a la atmósfera (Duku *et al.*, 2011). El efecto principal de la producción de biochar sobre los flujos de los GEI es evitar las emisiones que se habrían producido si se hubiera dejado descomponer la biomasa. Por ejemplo, se ha encontrado que el biochar de fuentes de materias primas herbáceas y leñosas tiene un contenido de carbono de 60,5 a 66,7% y 74,5 a 80%, respectivamente. A partir de estas cifras, se puede suponer que por cada tonelada de biochar aplicado al suelo, se pueden secuestrar 0,61-0,80 tonelada de carbono (equivalente a 2,2-2,93 toneladas de CO₂) (Galinato *et al.*, 2018).

La estabilidad y el potencial de secuestro de CO₂ del biochar dependen principalmente de su estructura y composición química; aromaticidad y grado de condensación aromática; el contenido de compuestos lábiles, alifáticos y materia volátil, entre otros (Henrique *et al.*, 2015), por lo que se desea que el biochar utilizado para el secuestro de CO₂, presente una relación molar de H/C y O/C menos aromático y más carbonizado, a temperaturas superiores a 400-500 °C, la aromatización y la pérdida de grupos funcionales contribuyen a formar un mayor complejo de anillos aromáticos, probablemente muy recalcitrantes a la degradación tanto biótica como abiótica (Wang *et al.*, 2017).

El tamaño de partícula de la materia prima también puede contribuir a la estabilidad porque la partícula más pequeña tendrá una mayor superficie expuesta al ambiente en el proceso en relación con la cantidad de biochar, sin embargo, ese efecto podría también lograrse mediante un tiempo de residencia más largo, por ejemplo; pirólisis lenta (Barskov *et al.*, 2019).

El biochar que se utilizará para el secuestro de CO₂, debe fabricarse en pirolisis lenta, a temperaturas superiores a los 400 °C y la materia prima debe poseer un tamaño de partícula pequeña, de forma que el biochar obtenido sea menos reactivo y más recalcitrante a la degradación.

Según los supuestos de la bibliografía, se considera que el 68% del carbono en el biochar elaborado a partir de biomasa sólida y el 34 % del carbono en el biochar elaborado a partir de biomasa digerible y digestatos que es material residual que se genera a partir de la digestión anaeróbica; permanecen estables a largo plazo (Enders *et al.*, 2015; Shackley *et al.*, 2011), es decir, durante al menos 100 años. Además del secuestro de carbono por la

adición de biochar al suelo, el análisis del potencial de biochar para la reducción de los gases de efecto invernadero también cubre las emisiones evitadas de CO₂ (Werner *et al.*, 2018), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) causadas por el cambio de la gestión convencional de materias primas a la producción de biochar (Jeffery *et al.*, 2015). Estos incluyen, por ejemplo; las emisiones de la gestión convencional del estiércol o compostaje. También se tienen en cuenta las emisiones evitadas al sustituir los combustibles fósiles por los aceites y gases de pirólisis. Estos varían dependiendo de si se reemplaza el lignito, la hulla o el gas natural y si se utilizan para la producción de calor o electricidad (Mulabagal *et al.*, 2015).

Para la estimación del potencial del biochar en la reducción de gases de efecto invernadero, se consideró la cantidad de biochar estimado previamente en base a los residuos agroindustriales, y la capacidad teórica mínima de secuestrar el CO₂ de suelo (2,2 toneladas de CO₂/tonelada de biochar), obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 10:

Tabla 10. Resultados obtenidos de las estimaciones del potencial del biochar en la reducción de gases de efecto invernadero según Arrollo y Miguel (2019).

Biomasa	Potencial de producción de biochar (ton /año)	Potencial de secuestro de CO ₂ (ton/año)	Potencial de CO ₂ secuestrado para 100 años (Gton)*	ppm CO ₂ en 100 años**
Residuos de cacao	520.000,00	1.144.000,00	0,11	0,015
Eucalipto	231.741,21	509.830,66	0,05	0,007
Bagazo de caña de azúcar	279.650,11	615.230,24	0,06	0,008
Cáscara, pinzote, médula del banano	129.661,67	285.255,67	0,03	0,004
Fibras, cáscaras y racimos vacíos de palma aceitera	123.853,04	272.476,69	0,03	0,003
Mazorca y cáscara de maíz duro seco	51.209,84	112.661,65	0,01	0,001
Cascarilla de arroz	2.898,70	6.377,14	0,00	0,000
Cascara de naranja	1.503,58	3.307,88	0,00	0,000
Total	1.340.518,14	2.949.139,91	0,29	0,038

*1x10⁹ toneladas es 1 Giga tonelada (Gt)

**7.80 Gt CO₂ atmosférico 1 ppm CO₂ atmosférico

La Tabla 10 resume las emisiones de gases de efecto invernadero que son secuestrados o evitados por el uso de biochar, en el ejemplo analizado, ascienden a aproximadamente 2,9 millones de toneladas de CO₂ y en 100 años correspondería a 0,038 ppm. Considerando que en Ecuador se produce 23.245 millones de toneladas de CO₂ (Arroyo y Miguel, 2019). En este sentido, con la implementación del biochar en base a residuos

agroindustriales se podría obtener una reducción del 0,013% de las emisiones de CO₂ a la atmosfera, lo cual es un aporte importante para la potenciación de acciones nacionales frente al cambio climático, destacando que únicamente se están considerando la biomasa agroindustrial, por lo que, este valor puede aumentar exponencialmente representado un aporte importante para la reducción de los GEI.

Sin embargo, es necesario evaluar el potencial de reducción de gases de efecto invernadero asociado con el biochar elaborado a partir de residuos forestales, es decir, a partir de una materia prima relativamente seca que se encuentra en cantidades relativamente grandes. Los valores calculados son comparables a los resultados obtenidos de un estudio similar realizado en el Reino Unido, el cual establece que, dependiendo del potencial de biomasa asumido, aproximadamente de uno a seis millones de toneladas de CO₂ pueden mitigarse anualmente mediante el uso de biochar en la agricultura británica (Shackley *et al.*, 2011).

Asimismo, se han reportado emisiones adicionales de GEI cuando se utilizan abono líquido y los residuos de cultivos húmedos asociados a las altas emisiones derivadas del secado de estas materias primas, lo cual resulta crucial para el balance negativo de gases de efecto invernadero.

Según el cálculo realizado en el presente informe, aproximadamente el 0,013% del CO₂ liberado actualmente a la atmosfera se puede reducir mediante el uso de biochar en la agricultura. Sin embargo, es necesario considerar el costo asociado a la producción de biochar, el cual según estudios similares está por los 100 euros por tonelada de CO₂ extraída, y en el que se incluyen los gastos de inversión y operación de las plantas de pirólisis, la materia prima y los costos de transporte de la biomasa, así como los costos de transporte y almacenamiento del biochar y su adición al suelo. Los elementos que se dedujeron de los costos incluyen los ingresos proporcionados por los aceites y gases de pirólisis para la generación de energía, así como los costos evitados relacionados a la gestión convencional de materias primas sin la producción de biochar (Teichmann, 2014).

En este contexto, proporcionar incentivos financieros, como créditos de compensación del mercado de carbono, podría contribuir sustancialmente a respaldar la aplicación del biochar y la puede convertir en una opción de mitigación viable, dado que, desde un punto de vista económico, la aplicación de biochar a suelos agrícolas para la mitigación de GEI por sí sola no es factible en las condiciones actuales del mercado y en comparación con otras medidas de secuestro de C como la reforestación o los cambios en las prácticas agrícolas como la siembra de pastos o la labranza de conservación son medios más baratos de mitigar el cambio climático, no obstante, la fuerza del biochar se origina obviamente en su potencial

para reducir las emisiones de GEI al mismo tiempo que se generan energías renovables y se obtienen beneficios agrónomos y medioambientales como la mejora de la fertilidad del suelo y las posibilidades de biorremediación de compuestos orgánicos y metales pesados.

Una comparación del biochar con otras medidas de reducción de GEI no permite sacar conclusiones generales, en el estudio desarrollado por (Arroyo y Miguel, 2019), proponen dos escenarios para la reducción de CO₂ en el país, en el que se destaca una mayor participación de energías renovable; principalmente hidroenergía y en menor grado solar y eólico, en función de la sustitución del uso de derivados del petróleo, y cuya tecnología no tiene asociado emisiones de contaminantes, sin embargo, se requiere importantes costos de inversión para el desarrollo de estos macroproyectos, por lo que el biochar no se considera una opción sustitutiva sino que acompañe a las iniciativas actuales que se evalúan para la reducción de los GEI.

Dado que en el futuro será posible cuantificar con precisión cuánto carbono se puede almacenar a largo plazo en el suelo utilizando biochar; en la actualidad para el país, parece una opción posible para la protección del clima, que se podría complementar con otras medidas de mitigación de gases de efecto invernadero.

4.9.2. Efectos de biorremediación de la aplicación de biochar en suelos

La enmienda de suelos para su remediación tiene como objetivo reducir el riesgo de transferencia de contaminantes a aguas u organismos receptores en las proximidades, por lo que, el material orgánico como el biochar puede servir como una opción popular para este propósito porque su fuente es biológica y puede aplicarse directamente a los suelos con poco pretratamiento (Beesley *et al.*, 2011). Hay dos aspectos que hacen que la enmienda de biochar sea superior a otros materiales orgánicos: el primero es la alta estabilidad contra la descomposición, de modo que puede permanecer en el suelo por más tiempo proporcionando beneficios a largo plazo al suelo y el segundo es tener más capacidad para retener los nutrientes; además de mejorar la calidad del suelo al aumentar el pH, la capacidad de retención de humedad, la capacidad de intercambio catiónico y la flora microbiana (Mensah y Frimpong, 2018).

4.9.3. Biochar para la rehabilitación de suelos contaminados con agroquímicos

A continuación, en la tabla 11 se describe los principales resultados asociados a la remoción de contaminantes agroquímicos:

Tabla 11. Resultados obtenidos sobre la remediación ambiental de agroquímicos

Plaguicidas / contaminante	Materia prima	Temperatura de pirólisis / hora	Tasa de eliminación de contaminante (%)	País	Referencia
Clorpirifós	Pino	600/1 h	67-74	India	(Varma <i>et al.</i> , 2018)
Clorpirifós	Residuos de plantas	600/1 h	42-47	EE.UU	(Uchimiya <i>et al.</i> , 2012)
Atrazina / simazina	Residuos orgánicos	400	47-52	EE.UU	(Galinato <i>et al.</i> , 2018).

Se ha informado que el uso de biochar es útil en suelos contaminados por agroquímicos (Yan *et al.*, 2020). Muchas de estas sustancias se han acumulado como resultado del uso indiscriminado de herbicidas, insecticidas y otras moléculas tóxicas (Herath *et al.*, 2015). Por ejemplo; la cantidad de atrazina en el suelo se redujo por la absorción de biochar de estiércol de ganado (Galinato *et al.*, 2018). Además, la alta superficie y nanoporosidad favoreció la adsorción de insecticidas a base de clorpirifos y carbofurano (Varma *et al.*, 2018) (Uchimiya *et al.*, Sorption of triazine and organophosphorus pesticides on soil and biochar, 2012)

4.9.4. Biochar para la rehabilitación de suelos contaminados con metales pesados

A continuación, en la tabla 12 se describe los principales resultados asociados a la remoción de contaminantes metálicos:

Tabla 12. Resultados obtenidos sobre la remediación ambiental de contaminantes metálicos

Contaminante	Materia prima	Temperatura de pirólisis / dosis	Eficiencia de la movilización (método de evaluación)	Referencia
Cu	Estiércol de pollo	500 °C/5%	73% (Extraíble con NH ₄ NO ₃)	(Meier <i>et al.</i> , 2017)
As	Fibras de palma aceitera	700 °C/3%	81% (Agua soluble)	(Qiao <i>et al.</i> , 2018)
Cd	Bambú	600 °C/15%	31,2% (Soluble en HOAc)	(Li <i>et al.</i> , 2018)
Cr	Bagazo de caña de azúcar	500 °C/1,5%	49,6% (Extraíble con DTPA)	(Bashir <i>et al.</i> , 2017)

La eficacia de la enmienda de biochar para inmovilizar los metales pesados del suelo está influenciada por una serie de factores, que incluyen la fuente de materia prima, la tasa de enmienda, las especies de metales, el tipo de suelo y la ubicación en el suelo (O'Connor *et*

al., 2018). En general, la enmienda del suelo con biochar en una proporción por encima de 2.0% en peso ayuda a estabilizar los metales pesados catiónicos (por ejemplo, Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+}) y reduce la porción bioaccesible y la bioacumulación de estos elementos tóxicos en el suelo. Asimismo, se ha determinado que la eficacia es mayor para los productos de biochar que poseen niveles más altos de pH, CIC y contenido de cenizas, y es más evidente en suelos ácidos, de textura gruesa y baja MO, también se ha establecido que su potencial de biorremediación disminuye con el tiempo (Ahmad *et al.*, 2014).

En la aplicación de biochar, es necesaria la incorporación completa y uniforme de la enmienda en el suelo contaminado para permitir que entre en contacto directo con los contaminantes de metales pesados. En la práctica, se puede emplear una enmienda de biochar junto con la fitorremediación para facilitar la "limpieza" de suelos contaminados con Cr (VI), As y Sb (Guo, 2020).

Al revisar la literatura, Ahmad *et al.*, (2014) concluyeron que los biochar con más grupos funcionales eran deseables para inmovilizar contaminantes orgánicos polares e inorgánicos en el suelo y el agua. En consecuencia, los productos de biochar derivados del estiércol de baja temperatura de pirólisis (por ejemplo, $<500\text{ }^{\circ}\text{C}$) pueden ser más eficientes para mitigar la contaminación del suelo por metales pesados.

4.9.5. Biochar para la remediación de suelos contaminados orgánicamente

La investigación también ha demostrado que el biochar es capaz de retener e incluso promover la descomposición de varios contaminantes orgánicos en los suelos (Ahmad *et al.*, 2014). A continuación, en la tabla 13 se describe los principales resultados asociados a la remoción de contaminantes orgánicos:

Tabla 13. Resultados obtenidos sobre la remediación ambiental de contaminantes orgánicos

Contaminante	Materia prima	Temperatura de pirólisis / dosis (peso)	Eficiencia de la movilización	Referencia
PCB (bifenilos policlorados)	Madera	450 $^{\circ}\text{C}$ /2,8%	Mayor a 60%	(Denyes <i>et al.</i> , 2013)
Petróleo	Cascarilla de arroz	500 $^{\circ}\text{C}$ /2%	Se obtuvo una mejora del 20%	(Qiao <i>et al.</i> , 2018)
HPA (Hidrocarburos poliaromáticos)	Residuos de coco	450 $^{\circ}\text{C}$ /5%	Importante inmovilización de PHA	(Kołtowski <i>et al.</i> , 2017)

En la práctica, los biochar derivados de residuos de madera y plantas con temperaturas de pirólisis más altas suelen poseer altos niveles porosidad y aromaticidad, por lo tanto, pueden seleccionarse con preferencia sobre los biochar derivados del estiércol para la estabilización de sustancias orgánicas basadas en la sorción de contaminantes (Zama *et*

al., 2018). A largo plazo, la enmienda de biochar puede facilitar la mineralización y la eventual eliminación de contaminantes orgánicos en el suelo mediante la mejora de las actividades microbianas del suelo (Guo, 2020).

4.9.6. Efectividad del biochar en la remediación de suelos

Aunque la eficacia de la remediación con biochar puede no ser comparable a la de otros agentes como la cal, las sales de fosfato y el carbón activado; el biochar está disponible de forma más económica y puede proporcionar otros beneficios ambientales como el secuestro de carbono y la mejora de la salud del suelo cuando se aplica de manera apropiada.

Asimismo, la enmienda de biochar puede implementarse en tierras de cultivo levemente contaminadas para garantizar la producción segura de alimentos, como en la restauración de tierras mineras para promover la vegetación y en proyectos de biorremediación y en la fitoextracción del suelo para facilitar el proceso. Sin embargo, el efecto estabilizador de contaminantes del biochar en los suelos de campo puede disminuir con el tiempo, por lo que se requerirá un monitoreo regular del efecto de remediación.

En base a los resultados de las investigaciones recientes se sugiere que la enmienda de biochar es un enfoque prometedor para mitigar la contaminación del suelo mediante la inmovilización de metales pesados y los contaminantes orgánicos, no obstante, es evidente que se necesitan estudios de campo a mayor escala para examinar su efecto a largo plazo y considerar las circunstancias prácticas relacionadas a la disponibilidad de biomasa, tipo de suelo y naturaleza de los contaminantes.

En este contexto, la aplicación de biochar, requiere evaluar los siguientes aspectos:

- Se debe prever los riesgos ecológicos secundarios asociados al proceso de producción de biochar, y la eliminación segura de materia prima contaminada.
- Se debe analizar los cambios fisicoquímicos y bioquímicos que sufrirá el suelo con el tiempo, incluidas las propiedades del biochar, dado que la mayoría de los experimentos a la fecha, se han realizado a nivel de laboratorio y ensayos de campo a corto plazo. Por lo tanto, se deben realizar pruebas de posicionamiento a largo plazo en diferentes tipos de suelo contaminado para verificar la seguridad de las tierras agrícolas.
- El biochar no puede remediar completamente el suelo contaminado. Por lo tanto, para optimizar los efectos de remediación se debe considerar incorporar aspectos multifuncionales (por ejemplo: biochar inoculado con microorganismos o modificado por productos químicos y minerales).

- Las ventajas y desventajas entre el costo económico (producción) y el valor de beneficio (aplicación) del biochar en la remediación de suelos deben medirse cuidadosamente. Para mejorar la disponibilidad económica, es necesario descubrir procesos de producción más fáciles y fuentes más baratas de materias primas de biomasa, lo que podría proporcionar una plataforma para mejorar la eficiencia de la producción y reducir las cargas económicas, es decir, para lograr el propósito de la practicidad comercial.

En el contexto nacional, no se encontraron evidencias de estudios sobre la capacidad de eliminación de metales pesados y sustancias contaminantes agroquímicas y orgánicas en base al uso de biochar en Ecuador, por lo que, es un campo que requiere ser investigado, para establecer el potencial de remoción según las condiciones particulares de los contaminantes y el suelo.

CAPÍTULO V

4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran que el biochar podría hacer una contribución significativa al logro de los objetivos de reducción del impacto climático y remediar suelos contaminados por metales pesados y diversos contaminantes orgánicos, dado que el biochar aplicado al suelo almacenaría carbono y mejoraría las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos degradados. Por lo que, debería ser un componente esencial y parte de la solución a largo plazo en el progreso de Ecuador hacia la sostenibilidad ambiental.
- La producción de biochar dependerá de la disponibilidad de biomasa en Ecuador, no obstante, en base a la producción de residuos agroindustriales, es posible producir un aproximado de 1.3 millones de toneladas de biochar, lo que permitirá tratar 67 mil hectáreas de suelo produciendo un aumento de 447.390,86 toneladas métricas por año en el caso del cultivo de caña de azúcar, generando beneficios tanto para la agricultura como para el medio ambiente.
- Según el cálculo realizado en el presente informe, aproximadamente el 0,013% del CO₂ liberado actualmente a la atmosfera se puede reducir mediante el uso de biochar en la agricultura, lo cual es un aporte importante para la potenciación de acciones nacionales frente al cambio climático, destacando que únicamente se están considerando la biomasa agroindustrial, por lo que, este valor puede aumentar exponencialmente representado un aporte importante para la reducción de los GEI.
- En varios estudios se ha demostrado que el biochar mejora la fertilidad del suelo al facilitar el ciclo del nitrógeno y fosforo, aportando en la retención de agua por otro lado diversos estudios mostraron que el biochar de desperdicios reduce el crecimiento de maíz en suelos arcillosos y de trigo en suelos modificados con biochar de roble.
- El biochar es una técnica de tratamiento de biomasa relativamente nueva que muestra resultados favorables y cuyas ventajas permiten la mayor captura de carbono además de tener el potencial de aumentar la capacidad de intercambiar cationes, absorción superficial y saturar de bases al agregarse al suelo.

CAPÍTULO VI

5. RECOMENDACIONES

- La aplicación de biochar para mejorar la salud, facilitar la remediación del suelo y mejorar el secuestro de carbono permanece actualmente en una etapa inicial, por lo que, es recomendable fomentar el desarrollo de estudios en este campo con el objetivo de diseñar un sistema de producción que sea rentable, considerando la disponibilidad de biomasa en el país y las características del proceso de producción según el objetivo final de uso del biochar.
- Además, es necesario evaluar el potencial del biochar producido en base a residuos forestales, para la reducción de gases de efecto invernadero y remediación de suelos, es decir, a partir de una materia prima relativamente seca que se encuentra en cantidades relativamente grandes.
- También, para potenciar el uso de biochar en el Ecuador, es necesario proporcionar incentivos económicos, que puedan servir para apalancar este tipo de proyectos y que permita su viabilidad como herramienta para la mitigación del cambio climática y remediación de suelos contaminados.
- Asimismo, es recomendable realizar una amplia investigación de la relación entre el biochar y los otros ciclos naturales que pueden afectar el rendimiento de las especies vegetales dado que se ha evidenciado su influencia en ciclos como nitrógeno y fósforo.
- Finalmente, al mostrarse resultados ventajosos al capturar carbono y mejorar la fertilidad del suelo sería factible asociar estos resultados al desarrollo microbiológico en suelos donde se aplica el biochar, para reconocer el aporte a la restauración de los ecosistemas fragmentados al relacionar estas dos variables.

Referencias Bibliográficas

- Abdelhafez y Li. (2016). Removal of Pb (II) from aqueous solution by using biochars derived from sugar cane bagasse and orange peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 61, 367-375.
- Abioye, A. (2015). Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for super capacitors: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 52, 1282–1293.
- Adegbeye *et al.* (2020). Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations—An overview. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118-319.
- Adjin, M., Asiedua, N., Dodoo, D., Karam, A., & Nana, P. (2018). Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks apotential agricultural waste from Ghana. *Industrial Crops & Products* 119, 304-312. Retrieved from <http://dspace.knust.edu.gh/bitstream/123456789/12227/1/Thermochemical%20conversion%20and%20characterization%20of%20cocoa%20pod%20husks%20a.pdf>
- Aguilar *et al.* (2012). Greenhouse gas emissions from a wastewater sludge-amended soil cultivated with wheat (*Triticum* spp. L.) as affected by different application rates of charcoal. *Soil Biology and Biochemistry* 52, 90–95. doi:10.1016/j.soilbio.2012.04.022
- Ahmad *et al.* (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere* 99, 19–33. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- Aisosa *et al.* (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences Volume* 64, *Issue* 2,, 222-236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006>
- Al-Wabel *et al.* (2015). Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi J Biol Sci.* 22(4), 503–511.
- Amini *et al.* (2016). Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review. *J Soils Sediments* 16, 939–953.
- Amoakwah *et al.* (2017). Corn Cob Biochar Improves Aggregate Characteristics of a Tropical Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal* 81 (5), 426-434. doi:10.2136/sssaj2017.04.0112
- Andrade *et al.* (2015). Mineralización y efectos del biocarbón de lecho de pollo sobre la capacidad de intercambio catiónico del suelo . *Pesq. agropec. bras. vol.50 no.5*, 526-531.
- Angin, D. (2013). Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresour. Techno* 128, 593-597. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852412016598>
- Arévalo, E. (2020). *Valoración de la calidad del suelo mediante la aplicación de biochar de acícula de pino (pinus patula) en la cuenca del machángara -SAUCAY"*. CUENCA–ECUADOR: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA.
- Arora, N. (2018). Environmental Sustainability—necessary for survival. *Sustainability* 1, 1-2. doi:<https://doi.org/10.1007/s42398-018-0013-3>

- Arroyo y Miguel. (2019). Análisis de la variación de las emisiones de CO₂ y posibles escenarios al 2030 en Ecuador. *Revista Espacios Vol. 40 (Nº 13)*, 1-6.
- Arroyo, F., & Miguel, L. J. (2019). Análisis de la variación de las emisiones de CO₂ y posibles escenarios al 2030 en Ecuador. *Revista Espacios*, 40(13), 1-5. doi:<http://www.revistaespacios.com/a19v40n13/a19v40n13p05.pdf>
- Bar *et al.* (2017). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(25), 1-6. Retrieved from DOI: 10.1073/pnas.1711842115
- Barskov *et al.* (2019). Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feed. *Renewable Energy* 142, 624-642. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811930552X>
- Bashir *et al.* (2017). Sugarcane bagasse-derived biochar reduces the cadmium and chromium bioavailability to mash bean and enhances the microbial activity in contaminated soil. *J. Soils Sediments* 18, 874–886. doi:10.1007/s11368-017-1796-z
- BCE. (2011). *Estadísticas de exportación de carbón vegetal*,. Quito, Ecuador: Banco Central de Ecuador.
- Beesley *et al.* (2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*. 159, 3269-3282.
- Bernardino *et al.* (2017). Preparation of biochar from sugarcane by-product filter mud by slow pyrolysis and its use like adsorbent. *Waste Biomass Valorization* 8(7), 2511–2521.
- Blanco, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Review & Analysis–Soil Physics & Hydrology Volume 81, Issue 4*, 687-711.
- Bonilla y Singaña. (2019). La productividad agrícola más allá del rendimiento por hectárea: análisis de los cultivos de arroz y maíz duro en Ecuador. *La Granja*, 29(1), 1-6. doi:<http://dx.doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.06>
- Brassard *et al.* (2019). *Char and Carbon Materials Derived from Biomass*. India: Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814893-8.00004-3>
- Brewer y Brown. (2012). Biomass and Biofuel Production. *Comprehensive Renewable Energy, Volume 5*, 357-384. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00524-2>
- Browning, M., & Rigolon, A. (2019). School green space and its impact on academic performance: A systematic literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 429-431. doi:10.3390/ijerph16030429
- Bushnaf *et al.* (2011). Effect of biochar on the fate of volatile petroleum hydrocarbons in an aerobic sandy soil. *Journal of Contaminant Hydrology* 126(3-4), 208-15. doi:10.1016/j.jconhyd.2011.08.008
- Cantrell *et al.* (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresour. Technol.* 107, 419-428. doi:DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.084
- Cao *et al.* (2012). Enhanced cellulosic hydrogen production from lime-treated cornstalk wastes using thermophilic anaerobic microflora. *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 13161-13166.

- Carmona, F. (2020). *Evaluación del biochar de pino en la remediación de aguas contaminadas por actividades pecuarias en el cantón Pucará*. Cuenca: Universidad Católica de Cuenca.
- Cayo, E. (2018). *Obtención de un biocombustible sólido por torrefacción húmeda a partir de la cáscara de la mazorca de cacao para la generación de energía*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Cedeño, R. (2016). *Obtención de un biocombustible sólido mediante carbonización hidrotérmica a partir de cascarilla de arroz*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Cheng *et al.* (2020). Application Research of Biochar for the Remediation of Soil Heavy Metals Contamination: A Review. *Molecules* 25(14), 3167. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/molecules25143167>
- Chimbo, K. (2019). *Caracterización físico-química de biocarbons elaborado tradicionalmente y su potencial en la restauración ecológica del suelo*. PUYO -PASTAZA –ECUADOR: Universidad Estatal Amazonica.
- Chukwuka *et al.* (2019). Biochar: A Vital Source for Sustainable Agriculture. *Intechopen* 86568, 1-5. doi:10.5772/intechopen.86568
- CIE. (2009). *Inventario de biomasa residual en las provincias*. Quito, Ecuador: CIE–Corporación para la investigación energética.
- Coninck *et al.* (2018). *Fortalecimiento e implementación de la respuesta global*. Suiza: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Retrieved from INFORME ESPECIAL DE IPCC: CALENTAMIENTO GLOBAL DE 1,5 °C.
- Cooper *et al.* (2018). Defining the process to literature searching in systematic reviews: a literature review of guidance and supporting studies. 18(85).
- Cowie *et al.* (2012). Is sustainability certification for biochar the answer to environmental risks? *Pesq. agropec. bras.* vol.47 no.5, 1-6. Retrieved from <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000500002>
- Cowie *et al.* (2015). *Biochar, carbon accounting and climate change. Biochar for environmental management*. Londres: In J. Lehmann & S. Joseph.
- Denyes *et al.* (2013). In situ application of activated carbon and biochar to PCB-contaminated soil and the effects of mixing regime. *Environ. Pollut.* 182, 201–208. doi:10.1016/j.envpol.2013.07.016
- Díaz, C. (2017). *Uso de biochar de acícula de pino (Pinus patula) como enmienda de suelo negro andino (Andosol)*. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay.
- Duku *et al.* (2011). Biochar production potential in Ghana –a review. *Renew SustainEnergy Rev* 15(8), 3539–355.
- Elad *et al.* (2011). The biochar effect: Plant resistance to biotic stresses. *Phytopathologia Mediterranea*; 50, 335-349.
- Elhessin y Zhao. (2017). Review Paper: The Fundamentals of Biochar as a Soil Amendment Tool and Management in Agriculture Scope: An Overview for Farmers and Gardeners. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 6, 38-61. Retrieved from DOI: 10.4236/jacen.2017.61003

- Enders *et al.* (2015). Characterization of Biochars to Evaluate Recalcitrance and Agronomic Performance. *Bioresource Technology* 114, 644–653.
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoam vol.34 no.3*, 1-6. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300367
- Fagbohunge *et al.* (2017). The challenges of anaerobic digestion and the role of biochar in optimizing anaerobic digestion. *Waste Management* 61, 236-249.
- Fang *et al.* (2014). Biochar carbon stability in four contrasting soils. *Eur J Soil Sci* 65, 60–71. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/ejss.12094>
- Farrell *et al.* (2013). Microbial utilisation of biochar-derived carbon. *Sci Total Environ* 1;465, 288-97. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.03.090
- Fernandez y Lopez. (2018). *Evaluación de la eficiencia de biochar obtenido mediante pirólisis de residuos avícolas, y lodos de depuradora*. Riobamba –Ecuador: Escuela Superior Politecnica de Chimborazo.
- Fidel *et al.* (2018). Sorption of ammonium and nitrate to biochars is electrostatic and pH-dependent. *Scientific Reports volume 8*, 17627.
- Galinato *et al.* (2018). The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Energy Policy* 39(10), 6344–6350.
- Goodland, R., & Daly, H. (1996). Environmental Sustainability: Universal and Non-Negotiable. *Ecological Applications Vol. 6, No. 4*, 1002-1017. doi:DOI: 10.2307/2269583
- Gul *et al.* (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 206, 46–59.
- Guo, M. (2020). The 3R principles for applying biochar to improve soil health. *Soil Syst.* 4:9, 326-329. doi:10.3390/soilsystems4010009
- Gurwick *et al.* (2013). A Systematic Review of Biochar Research, with a Focus on Its Stability in situ and Its Promise as a Climate Mitigation Strategy. *PLoS One*, 8(9), 236-242. doi:doi: 10.1371/journal.pone.0075932
- Hale *et al.* (2013). Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. *Environ Sci Technol* 46(5), 2830-8. doi:10.1021/es203984k
- Hansen *et al.* (2018). Sustainability transitions in developing countries: Stocktaking, new contributions and a research agenda. *Environmental Science and Policy*, 84, 198–203.
- Hansson *et al.* (2020). Biochar as multi-purpose sustainable technology: experiences from projects in Tanzania. *Environment, Development and Sustainability*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00809-8>
- Harvey *et al.* (2012). An index-based approach to assessing recalcitrance and soil carbon sequestration potential of engineered black carbons (biochars). *Environ Sci Technol* 46, 1415–1421. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/es2040398>

- Henrique *et al.* (2015). BIOCHAR: PYROGENIC CARBON FOR AGRICULTURAL USE - A CRITICAL REVIEW. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* vol.39 no.2, 196-205.
- Herrera, J. (2018). *Pirólisis de biomasa para la obtención de biocarbón y su efecto en el rendimiento de tomate*. Coatepeque, Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- Homagain *et al.* (2014). Biochar-based bioenergy and its environmental impact in Northwestern. *Journal of Forestry Research* 25(4), 737–748.
- IBI. (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. *Biochar Initiat v. 1.1.* , 1-47. Retrieved from <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>
- IBI. (2015). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. IBI biochar standards*. Suecia: International Biochar Initiative. Retrieved from https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Sta
- Iglesias *et al.* (2018). Biochar de biomasa residual de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) mediante dos métodos de pirólisis Biochar. *Manglar* 17(2), 105-111.
- Iglesias, S. (2018). *Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- INEC. (2019). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua -ESPAC*. Quito, Ecuador: INEC.
- INIAP. (2012). *Guía del manejo integrado de enfermedades del cultivo de cacao (Theobroma cacao L) en la amazonía*. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Central de la Amazonía. Retrieved from <http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/guia-del-manejo-integrado-de-enfermed>
- Jaramillo *et al.* (2019). Valoración económica ambiental, producción de biomasa y carbono de un bosque nativo andino, frente a plantaciones forestales eucalyptus globulus y pinus patula, en la Provincia de Loja. *Investigación y Desarrollo Volumen 1 / Número 1*, 25-29. Retrieved from <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1801>
- Jayawardhana *et al.* (2016). *Municipal Solid Waste Biochar for Prevention of Pollution From Landfill Leachate*. India: National Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka. doi:10.1016/B978-0-12-803837-6.00006-8
- Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K., & Verheijen, F. (2015). *Biochar effects on crop yield*. EE.UU.: In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.).
- Jin *et al.* (2016). Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *J. Hazard Mater* 320, 417–426.
- Jones *et al.* (2012). Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry Volume 45*, 113-124. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.012>
- Kavitha *et al.* (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 227, 146–154.

- Kořowski *et al.* (2017). Effect of biochar activation by different methods on toxicity of soil contaminated by industrial activity. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 136, 119–125. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.10
- Krause *et al.* (2018). Biochar affects community composition of nitrous oxide reducers in a field experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 119, 143–151. doi:10.1016/j.soilbio.2018.01.018
- Lee *et al.* (2017). Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. *Bioresour Technol* 236, 155–166.
- Lehmann *et al.* (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry Volume* 43, Issue 9, 1812–1836. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Leng y Huang. (2018). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresour Technol* 270, 627–642. doi:doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.030.
- Li *et al.* (2017). Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediment.* Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1906-y>
- Li *et al.* (2018). Biochars induced modification of dissolved organic matter (DOM) in soil and its impact on mobility and bioaccumulation of arsenic and cadmium. *J. Hazard. Mater* 348, 100–108.
- Li, H., Dong, X., Silva, E., Oliveira, L., Chen, Y., & Ma, L. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere* 178, 466–478.
- Lobato, I. (2017). *ECONOMÍA CIRCULAR De la “eco-obligación a la eco-oportunidad”*. Colombia: Autopublicaciones Tagus. Retrieved from https://www.miteco.gob.es/gl/ceneam/recursos/materiales/economia-circular-ebook_tcm37-442642.pdf
- MAE. (2013). *DAP Actualización de prioridad proyecto "Sistema Nacional de Control Forestal"*. Quito, Ecuador: Ministerio de Ambiente.
- MAE. (2014). *Naciones Unidas reconoce a Ecuador como modelo de Desarrollo Sostenible*. Quito, Ecuador: Ministerio de Ambiente.
- MAE. (2015). *Ecuador posicionó a nivel mundial sus logros en materia ambiental y su visión del desarrollo sostenible*. Quito, Ecuador: MAEA. Retrieved from <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-posiciono-a-nivel-mundial-sus-logros-en-materia-ambiental-y-su-vision-del-desarrollo-sostenible/>
- MAE. (2016). *Primer Informe Bienal de Actualización del Ecuador*. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Manyà, J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol.* 46, 7939–7954. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/es301029g>
- Marín y Barrezueta. (2018). Elaboración de biocarbón obtenido a partir de la cáscara del cacao y raquis del banano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(3), 75–81.

- McLaughlin, H. (2016). An Overview of the current Biochar and Activated Carbon Markets . *Biofuels Diges*, 1-6. Retrieved from <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/10/11/an-overview-of-the-current-biochar-and-activated-carbon-markets>
- Meier *et al.* (2017). Chicken-manure-derived biochar reduced bioavailability of copper in a contaminated soil. *J. Soils Sediments* 17, 741–750. doi:10.1007/s11368-015-1256-6
- Mensah y Frimpong. (2018). Biochar and/or compost applications improve soil properties, growth, and yield of maize grown in acidic rainforest and coastal savannah soils in Ghana. *International Journal of Agronomy*. 155, 1-8. doi:10.1155/2018/6837404
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2014). *Atlas bioenergético del Ecuador*. Quito: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.
- Morelli, J. (2011). Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals. *Journal of Environmental Sustainability Vol. 1: Iss. 1, Article 2*, 1-10. Retrieved from <http://scholarworks.rit.edu/jes/vol1/iss1/2>
- Moreno *et al.* (2018). The effect of biochar amendments on phenanthrene sorption, desorption and mineralisation in different soils. *PeerJ*. 6, e5074.
- Mukherjee y Zimmerman. (2014). Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of The Total Environment* 487, 26-36.
- Mulabagal *et al.* (2015). *Biochar from Biomass-A strategy for carbon dioxide sequestration, soil amendment, power generation and CO2 utilization*. New York, EE.UU.,: Springer Publishers.
- Mumme *et al.* (2014). Use of biochars in anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 164, 189-197.
- Naciones Unidas. (2013). *Sustainable Development Challenge*. New York: Department of Economic and Social Affairs. Naciones Unidas.
- Nelissen *et al.* (2012). Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry* 55, 20–27. doi:10.1016/j.soilbio.2012.05.019
- O'Connor *et al.* (2018). Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials. *Sci. Total Environ.* 619–620, 815–826. doi:10.1016/j.scitot
- Oliveira *et al.* (2017). Environmental application of biochar: current status and perspectives. *Bioresource Technology* 246, 110–122. doi:10.1016/j.biortech.2017.08.122
- Omulo, G. (2020). Biochar Potential in Improving Agricultural Production in East Africa. *Intechopen* 181, 1-6. Retrieved from DOI: 10.5772/intechopen.92195
- Palansooriya *et al.* (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar volume 1*, 3-22.
- Palomo, L. (2020). *Valorización de productos de la conversión termoquímica de biomasa lignocelulósica residual: biochar como aditivo agrícola*. Mexico: Universidad Autonoma San Luis de Potosí .
- Panwar *et al.* (2019). Comprehensive review on production and utilization of biochar. *SN Appl. Sci.* 1, 168. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6>

- Paré *et al.* (2015). Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. 52(2).
- Park *et al.* (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, v.348, 439-451.
- Pavlovskaya, E. (2014). Sustainability criteria: their indicators, control, and monitoring (with examples from the biofuel sector. *Environ Sci Eur.* 26(1), 17. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5044937/>
- Paymaneh *et al.* (2018). Soil Matrix Determines the Outcome of Interaction Between Mycorrhizal Symbiosis and Biochar for *Andropogon gerardii* Growth and Nutrition. *Front. Microbiol.*, 27, 1-6. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02862>
- Pelaez y Espinoza. (2015). *Estado de uso de la biomasa para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos en Ecuador*. Cuenca, Ecuador: Renewable Energies in Ecuador: Current status, tendencies and perspectives (pp.29-107)Publisher: Universidad de cuenca- Graficas Hernandez.
- PNUD. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Ginebra: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Retrieved from <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>
- Pokharel *et al.* (2020). Biochar-Assisted Wastewater Treatment and Waste Valorization. *Intechopen* 92288, 1-5. doi:10.5772/intechopen.92288
- Ponanomi *et al.* (2015). A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. *Journal of Plant Pathology* 97(2), 223-23.
- Prasanna *et al.* (2015). Influencing factors on sorption of TNT and RDX using rice husk biochar. *J. Ind. Eng. Chem.*32, 178–186. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1226086X15003925>
- Qiao *et al.* (2018). Roles of different active metal-reducing bacteria in arsenic release from arsenic-contaminated paddy soil amended with biochar. *J. Hazard. Mater* 344, 958–967. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.11.025
- Quilliam *et al.* (2013). Biochar application reduces nodulation but increases nitrogenase activity in clover. *Plant and Soil* 366, 1-2.
- Rajakumar y Sankar, J. (2016). Biochar for Sustainable Agriculture –A Review. *International Journal of Applied and Pure Science and Agriculture (IJAPSA)*Volume 02, Issue 09, 173-179.
- Rajkovich *et al.* (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48(3), 536-542.
- Ramos, M., Franco, M., & Jauregui, J. (2018). Sustainability transitions in the developing world: Challenges of socio-technical transformations unfolding in contexts of poverty. *Environmental Science & Policy*,84, 217–223.
- Riera *et al.* (2018). RESIDUOS AGROINDUSTRIALES GENERADOS EN ECUADOR PARA LA ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICOS. *Revista Ingeniería Industrial-Año 17 N°3*, 227-246. Retrieved from <https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.13>

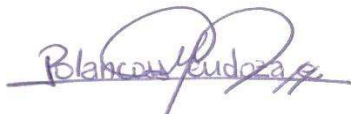
- Scholz *et al.* (2014). *Biochar systems for smallholders in developing countries: Leveraging current knowledge and exploring future potential for climate-smart agriculture*. Washington, DC: World Bank Studies.
- SENPLADES. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021.Toda una Vida*. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional de Planificación.
- Shackley *et al.* (2011). The Feasibility and Costs of Biochar Deployment in the UK. *Carbon Management* 2, no.3, 335–356.
- Singh y Kumar. (2018). Biochar: A Potential Alternative for Sustainable Agriculture. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* 7(10):, 410-425. Retrieved from <https://www.ijcmas.com/7-10-2018/Harender%20Singh%20Dahiya%20and%20Yogendra%20Kumar%20Budania2.pdf>
- Sohi *et al.* (2009). *Biochar's Role in Soil and Climate Change: A Review of Research Needs*. Australia: CSIRO Land and Water Science.
- Sonil *et al.* (2016). Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste and Biomass Valorization* volume 7, 201–235. doi:<https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>
- Spokas *et al.* (2011). Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. *Journal of Environmental Quality* 41(4), 973-89. doi:10.2134/jeq2011.0069
- Sunyoto *et al.* (2016). Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresource Technology* 219, 29-36.
- Sylvester *et al.* (2013). Beyond synthesis: re-presenting heterogeneous research literature. 32(12).
- Teichmann, I. (2014). *Climate Protection Through Biochar in German Agriculture: Potentials and Costs*. Alemania: DIW Economic Bulletin .
- Tisserant y Cherubini. (2019). Potentials, Limitations, Co-Benefits, and Trade-Offs of Biochar Applications to Soils for Climate Change Mitigation. *Land* 8(12), 179-186.
- Tomczyk *et al.* (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev Environ Sci Biotechnol* 19, 191–215. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Tripathi *et al.* (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renew Sust Energ Rev* 55, 467–481.
- Uchimiya *et al.* (2010). Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. *Chemosphere* 80, 935-940.
- Uchimiya *et al.* (2012). Sorption of triazine and organophosphorus pesticides on soil and biochar. *J. Agric. Food Chem.*, 60, 2989-2997.
- Varma *et al.* (2018). *A Review on Pyrolysis of Biomass and the Impacts of Operating Conditions on Product Yield, Quality, and Upgradation*. India: Springer, In.
- Velázquez *et al.* (2019). CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE ARROZ. *Rev. fitotec. mex* vol.42 no.2, 136-148.
- Verheijen *et al.* (2015). *Biochar Sustainability and Certification*. Portugal: Routledge.

- Villalta y Ortega. (2018). *Diferencias de parámetros físico-químicos de suelo en el proceso de restauración de enmiendas de biochar*. Quito, Ecuador: Universidad Estatal Amazonica.
- Villamagua, M., Valarezo, C., Maza, H., & Valarezo, L. (2016). *Efecto del biocarbón, cal y nutrientes sobre el crecimiento de dos especies arbóreas en el ambiente de ladera del sur de la amazonía ecuatoriana*. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja.
- Wang *et al.* (2017). Impact of torrefaction on woody biomass properties. *Energy Procedia* 105, 1149–1154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.486>
- Warnock *et al.* (2010). Mycorrhizal Responses to Biochar in Soil – Concepts and Mechanisms. *Plant and Soil* 300(1-2), 9-20.
- Weber, K. (2018). Properties of biochar. *Fuel* 217, 240-261. doi:DOI: 10.1016/j.fuel.2017.12.054
- Werner *et al.* (2018). Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5 °C. *Environmental Research Letters*, Volume 13, Number 4, 112-116.
- Windeatt *et al.* (2014). Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. *J Environ Manag* 146, 189–197. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.003>
- Woolf, D., Amonette, J., Street, F., Lehmann, J., & Joseph, .. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 1:56, 132-139.
- Yan *et al.* (2020). The Trends in Research on the Effects of Biochar on Soil. *Sustainability* 12, 7810.
- Yao *et al.* (2018). Biomass gasification for syngas and biochar co-production: energy application and economic evaluation. *Appl. Energ.* 209, 43–55. doi:DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.077
- Zama *et al.* (2018). Advances in research on the use of biochar in soil for remediation: a review. *J. Soils Sediments* 18,, 2433–2450. doi:10.1007/s11368-018-2000-9
- Zhang *et al.* (2019). Biochar Induces Changes to Basic Soil Properties and Bacterial Communities of Different Soils to Varying Degrees at 25 mm Rainfall: More Effective on Acidic Soils. *Front. Microbiol.*, 12, 1-6. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01321>
- Zhao *et al.* (2017). Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies* 10, 1293.
- Zhu *et al.*, X. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil. *Environmental Pollution* 227, 98-115. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/316578957_Effects_and_mechanisms_of_biochar-microbe_interactions_in_soil_improvement_and_pollution_remediation_A_review/link/5b9e66ba92851ca9ed0f78c4/download

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Elisa Estefanía Polanco Mendoza** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0705932028**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Potencial del biochar para mejorar la sostenibilidad ambiental en Ecuador”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **12 de mayo de 2021**



F.

Elisa Estefanía Polanco Mendoza

C.I. 0705932028