

# Análisis de biochar y metales: una revisión sistemática y análisis bibliométrico

## Biochar and metal: a systematic review and bibliometric analysis

Christian F. Valderrama<sup>1</sup>  Paola Villegas-Guzmán<sup>2</sup>  Juan P. Herrera<sup>3</sup>  Javier Silva-Agredo<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Neiva, Colombia.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de la Amazonia, Grupo de Investigación Materiales, Ambiente y Desarrollo, Florencia, Colombia.

<sup>3</sup>Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Neiva, Colombia.

<sup>4</sup>Facultad de Ciencias exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Grupo de Investigación Remediación Ambiental y Biocatálisis, Medellín, Colombia.

### Resumen

El alto impacto ambiental de los desechos sólidos y líquidos que contienen elementos tóxicos y metales está teniendo un impacto negativo en diversos ecosistemas, este trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática y análisis bibliométrico de la producción científica, para comprender la capacidad de retención y absorción de biocarbón, análisis de la capacidad de diferentes biochars para ciertos elementos contaminantes incluyendo metales pesados; el análisis bibliométrico se realizó a través de una revisión de las bases de datos web of science (WoS) y Scopus. Los registros obtenidos se analizan utilizando teoría de grafos y herramientas como bibliometrix, Sci2 Tool, Gephi, se dividen en tres categorías: clásica, estructural y reciente, donde se obtienen tres perspectivas: captación de metales pesados, biodisponibilidad y contaminantes; de igual manera, se identificó que el campo de estudio es nuevo. El principal autor es Yang Yi. Autores importantes como Geng Yong y Liang Dong cuentan con un H-index bastante alto. Adicionalmente, los países con mayor producción en el tema son: CHINA que ocupa el primer lugar, USA con el segundo lugar y KOREA con el tercer puesto.

### Abstract

The high environmental impact of solid and liquid wastes containing toxic elements and metals is having a negative impact on various ecosystems, this work aims to perform a systematic review and bibliometric analysis of scientific production, hoping to understand the retention and absorption capacity of biochar, analysis Capacity of different biochars for certain pollutants including heavy metals; the bibliometric analysis was performed through a review of web of science (WoS) and Scopus databases. The records obtained are analyzed using graph theory and tools such as bibliometrix, Sci2 Tool, Gephi, are divided into three categories: classical, structural and recent, where three perspectives are obtained: uptake of heavy metals, bioavailability and pollutants; Similarly, it was identified that the field of study is new. The main author is Yang Yi, important authors such as Geng Yong and Liang Dong have a fairly high H-index. Additionally, the countries with the highest production in the subject are: CHINA which ranks first, USA with the second place and KOREA with the third place.

### Keywords:

Adsorption, Biocarbon, Biomass, Treatment, Wastes.

### Palabras clave:

Adsorción, Biocarbón, Biomasa, Depuración, Residuos.

### Cómo citar:

Valderrama, C.F., Villegas, P., Herrera, J.P., Silva-Agredo, J. Análisis de biochar y metales: una revisión sistemática y análisis bibliométrico. Ingeniería y Competitividad.2023,25(3) e-301112505. doi: <https://doi.org/10.25100/iyv.25i3.12505>.

Recibido: 30-09-22  
Aceptado 06-06-23

### Correspondencia:

christian.valderrama@unad.edu.co, pvillegas@udla.edu.co, juanp.herrera@unad.edu.co, javier.silva@udea.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses:  
Ninguno declarado



### ¿Por qué se realizó el estudio?

porque se necesitaba desarrollar una solución tecnológica dotada de inteligencia artificial que permitiera la correlación del perfil demográfico, psicográfico, conductual y de estilo de vida del cliente con el perfil del personal operativo que prestará el servicio, para la detección de patrones y predicción de comportamientos de consumo que conlleven a identificar oportunidades, reducir riesgos de insatisfacción y mejorar la experiencia del usuario del servicio.

### ¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Un desarrollo tecnológico e innovador basado en inteligencia artificial para la correlación de perfiles del cliente versus del empleado en la selección y asignación de servicios. También el incremento de la satisfacción del cliente en los servicios requeridos 2023 y la organización del sistema administrativo comercial para la efectiva segmentación del mercado, redireccionamiento del foco de la oferta de servicios y exactitud de estrategias de mercado.

### ¿Qué aportan estos resultados?

En relación a la sostenibilidad institucional se articula el desarrollo tecnológico al a visión estrategia e institucional de la empresa, A nivel de empleos, el proyecto afectó tanto a administrativos, técnicos, y operativos. Por lo tanto, la sostenibilidad de los empleos se dividió en dos: la gestión del cambio y mantener los empleos que se generan con el proyecto.

## Graphical Abstract



## Introducción

El crecimiento acelerado de la industria y la expansión urbana se consideran como las principales fuentes generadoras de residuos sólidos y líquidos, llegando a afectar de forma directa y considerablemente diversos entornos ecosistémicos, de entre los cuales cabe mencionar inicialmente la estabilidad de los suelos y los cuerpos de aguas (1). El suelo contiene importantes trazas de metales, como el As >60%, Cd <5% y Zn <25%. Algunos estudios se han orientado en la búsqueda de alternativas efectivas y económicas en la remoción, retención y absorción de elementos contaminantes y tóxicos como los metales pesados (2), por ejemplo Park (3) propone como una alternativa innovadora los Biochars; dada la capacidad que estos tienen de retener considerablemente las concentraciones de ciertos metales como el Cd, Cu y Pb. Por otro lado, M Ahmad et al. (4) resalta que la implementación de distintos biochars es influida por la temperatura de la pirólisis y el tipo de materia prima. Así mismo, Al-Wabel et al. (5) presenta el conochar como una alternativa efectiva como enmienda del suelo para la inmovilización de metales pesados y para reducir su fitotoxicidad.

El Biochar ha despertado un fuerte interés en las áreas investigativas, debido a algunos parámetros puntuales como; Ph, humedad, CE, inmovilización y disponibilidad de metales (5). Igualmente, dado a sus principales características como: la biomasa, temperaturas en la que se produce, retención de metales pesados y la reducción de la fitotoxicidad como lo plantea Al-Wabel et al. & Bandara et al. (5,6). Se considera como una alternativa adecuada en procesos de remediación de los suelos contaminados por metales y otros elementos, reduciendo la movilidad y biodisponibilidad de los suelos (7), (8). Así mismo, Karami et al. (9) resalta que los avances positivos de las propiedades fisicoquímicas del medio a tratar (Suelo, Agua) sobre el uso de Biochars, donde se incrementa la eficiencia en la retención de sustancias tóxicas, se debe al uso de mezclas con biochars y compost, aumentando el porcentaje de eliminación de metales como el plomo (Pb) y cobre (Cu) y reduciendo de la acidez del suelo.

Para lograr los objetivos anteriores, inicialmente se realizó una búsqueda en las bases de datos de *Web of Science* (en lo sucesivo, *WoS*) y *Scopus*, con el término de búsqueda "Biochar". A partir de estas bases de datos, se derivaron y procesaron un valor de (1408 referencias en total) utilizando las herramientas de Bibliometrix. Los artículos identificados en las bases de datos se extrajeron gracias a la aplicación (10). Finalmente, se procedió a analizar las redes generadas a partir de las referencias obtenidas, para lo cual se utilizó la aplicación Gephi (9,11), en la que se ordenaron los artículos más significativos y relevantes según su impacto (índice de citación). En la presentación de los documentos se utiliza un diagrama de árbol, las raíces son los documentos o artículos clásicos, los troncos son artículos considerados estructurales y, por último, las hojas son los artículos más nuevos; dada la representación del documento y sus puntos de vista, utilizando este esquema, los investigadores pueden obtener información clave sobre la evolución de Biochar.

Este artículo se divide en tres partes, comenzando con una breve introducción, seguida de los métodos utilizados para la búsqueda, identificación, selección y procesamiento de artículos como base de la investigación, con el uso de herramientas bibliométricas. La segunda parte presenta los avances y hallazgos de la investigación. Finalmente, concluye con los resultados de los aspectos y hallazgos más representativos del documento, enfatizando las limitaciones del estudio.

## Metodología

El proceso metodológico desarrollado en esta investigación está dividido en dos fases o etapas. La primera etapa, es un mapeo científico del tema de interés, implementando bibliometría de las productividades científicas registradas en *Scopus* y *WoS*; en la segunda etapa, se realiza una examinación de redes que facilita establecer documentos con más importancia sobre biochars y metales, también se dispone de grupos que actualmente sobresalen en el campo de estudio o del área.

### Mapeo científico

Para el análisis de la producción y el mapeo científico se utilizaron cinco métodos bibliométricos propuestos por Pater & Zupic (12). 1. Análisis de citas; 2. Análisis de co-ocurrencia de palabras; 3. Análisis de cocitaciones; 4. Análisis de coautores; 5. Análisis de acoplamiento bibliográfico. Su aplicación conjunta en *WoS* y *Scopus* ha permitido la expansión exitosa de dominios de conocimientos (13), estas dos bases de datos se consideran como las principales y más importantes a nivel mundial (14,15). La [tabla 1](#) a continuación enumera los parámetros de búsqueda.

Tabla 1. Parámetros de búsqueda en revisión bibliográfica

Base de datos	Scopus	Wos
Período de búsqueda	2000 - 2021	
Fecha de búsqueda	04/04/2022	
Tipo de revista	Todo tipo de revista	
Criterios de búsqueda	Título	
Términos de búsqueda	Biochar AND metals OR metaloids OR metales OR metaloides	
Resultados	740	668
<b>Resultados totales</b>	<b>817</b>	

A partir de los criterios de búsqueda se registraron 740 en *Scopus* y 668 en *WoS*, al combinar estos dos resultados y eliminar los datos duplicados, se generó un resultado de 817 artículos interesados que equivale una superposición del 42% en estas dos bases de datos, donde se evidenció la oportunidad de usarlas conjuntamente. Al involucrar los términos de búsqueda *Biochar*, *Metals*, *Metaloids* en español e inglés, se procuró cubrir la mayor cantidad de registros dentro de las bases de datos. Se encontró que el 92,9% de las publicaciones registradas en estas bases de datos están en inglés, y del 7,1% se encuentran en chino. Se relaciona que el idioma que predomina en el área de interés en las bases de datos es el Inglés, las distintas revistas y autores hacen publicaciones en este idioma con el fin de incrementar la visibilidad (16). La herramienta que se utilizó en el análisis bibliométrico fue la aplicación *Bibliometrix* (17), esta herramienta es de uso libre que facilita trabajar con otras base de datos y que cuentan con diversas y amplias funciones, también ha sido usada y validada por otros estudios (18–25).

## Análisis de red

Se fusionaron los registros obtenidos en *WoS* y *Scopus* y se eliminaron los archivos duplicados. Para obtener este resultado se utilizaron paquetes de programación dentro del *software* R como: *tosr*, *ggrepel*, *rebus*, *tidytext* y *lubridate*, en donde se extrajo la bibliografía y se diseñó la aplicación de red de citas, tipos y características, así como todos los archivos que componen la red para facilitar la gestión de la información (26,27).

Seguidamente, se cuantificaron tres indicadores bibliométricos: 1. *Indegree*, este indicador significa la cantidad de veces que han sido citadas o referenciadas por otros (27); 2. *Outdegree*, este son las veces que un nodo peculiar cita a otros o se considera como el número de interacciones que tiene cada documento (27); 3. *Betweenness*, este da a conocer el grado de intervención y centralización de cada componente dentro de la red (28), conociendo cuando el documento o artículo es referenciado y cuando cita a otros (29).

Como resultado final se obtiene una red de conocimiento en el campo integrada a través de artículos o documentos extraídos de bases de datos y referencias correspondientes, involucrando trabajos de diversas fuentes, no solo de ellas (*Scopus* y *Wos*). El análisis de redes se conoce como "gráfico de cocitación", lo que facilita la visualización del diseño o la estructura de los dominios de conocimiento, esto acelera la identificación de subdominios o tendencias de investigación (30,31). Se utilizó la herramienta *Gephi* para proporcionar un gráfico de redes de conocimiento en el campo de la investigación del biochar y su relación con metales (32).

Se utilizaron registros obtenidos de la web, se cuantificaron las métricas en el grado de las entradas, el grado de las salidas y de las intermediaciones, lo que permitió categorizar la investigación utilizando la metáfora de los árboles (33,34). A partir de esta analogía surgen tres categorías: **Raíz** (alta), literatura clásica o investigación que muestra una importancia teórica hegemónica dentro del campo de estudio, teniendo en cuenta las publicaciones que son citadas, pero no citadas por otros autores (27). Seguimiento del **cuerpo principal** (alta intermediación), hay artículos que son citados, pero también citados por otros (29), esta parte es un trabajo estructurado, entrelazado con la teoría básica clásica y la investigación actual. Finalmente, están **las hojas** (*high out-degree*), que se enfocan en artículos recientes y citan otros artículos (27), de igual forma muestran las tendencias actuales en el marco de investigación del campo, también conocidas como "**perspectivas**", que constituyen frentes de investigación emergentes. Esta técnica metodológica ha sido validada y utilizada en estudios previos (35-44).

## Resultados y discusión

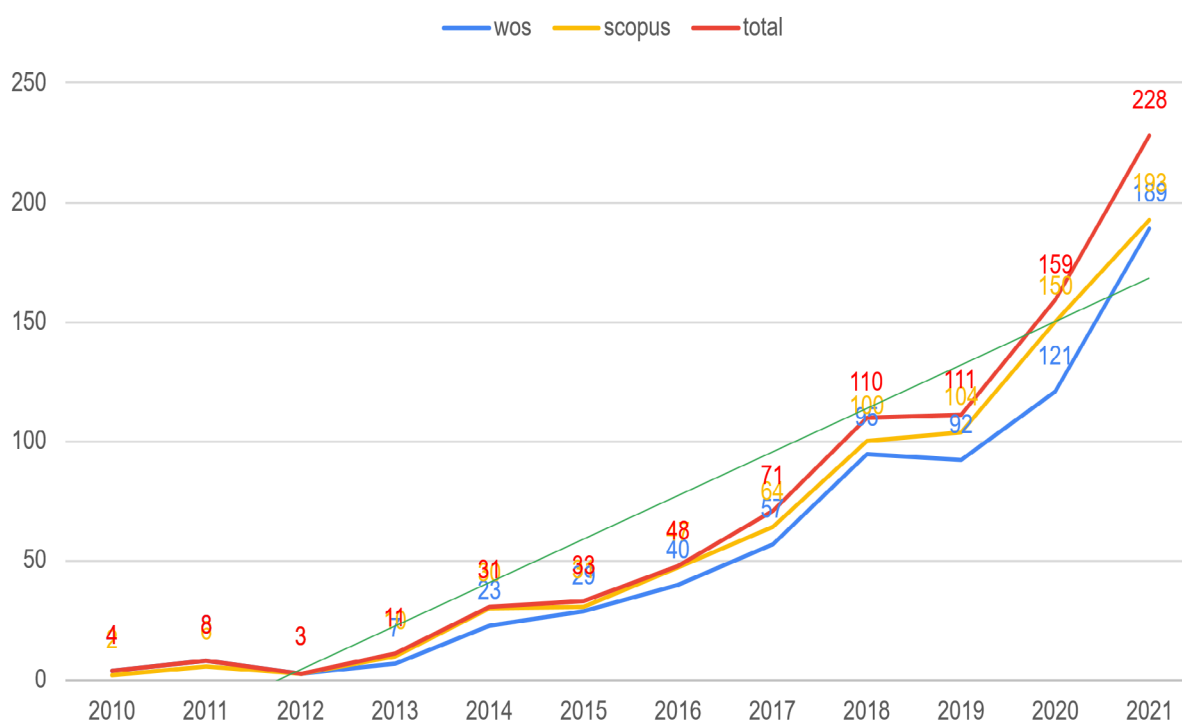
En esta sección se relacionan elementos bibliométricos de biochars y metales, los autores más relevantes en cuanto a producción científica, discriminación por países, producción e indexación de citas, y las revistas más importantes en el campo. Asimismo, se expresan redes y árboles de interconexión y, además, se presentan perspectivas regionales.

### Producción científica

La figura 1, muestra el modelo de producción de artículos científicos relacionados con temas de biochar y metales publicados en las siguientes bases de datos: *WoS* y *Scopus*, entre los años 2000 y 2021, lo que da como resultado 817 artículos representado con la línea de color rojo, esta muestra la cantidad de referencias únicas en las dos bases de

datos, eliminando los registros duplicados. A partir de 2013 se puede observar cierto interés en esta área de investigación y un incremento en la publicación de artículos sobre estos dos temas, observándose un aumento considerable y significativo en los años posteriores. El 2021, fue el año de mayor producción, alcanzando los 197 artículos. Como se puede observar en la línea de tendencia, la comunidad científica tiene interés en el campo del conocimiento con una tasa de crecimiento anual del 38,37%. También se destaca un comportamiento similar en el número de publicaciones en la base de datos en los últimos 5 años. No se muestran años anteriores al 2010 ya que, no hay investigaciones de interés o relevantes en el área de estudio.

wos, scopus y total



**Figura 1.** Producción científica nacional

Al analizar la producción científica nacional, China encabeza ambas bases de datos, con 371 artículos publicados en *Scopus* y 335 artículos en *WoS*; la [tabla 2](#) muestra el impacto global de la producción académica por base de datos en las investigaciones asociadas al biochar y los metales. En la lista de 10 países con la mayor producción, se destaca el continente asiático con un 62,2%, América del Norte ocupa el segundo lugar con un 8,2 %, seguida de Europa (4,2 %) y Oceanía (2,2 %).

**Tabla 2.** Producción de artículos en CFP&UD por países

País	Wos	Scopus	Total	Porcentaje
<b>China</b>	335	371	400	49,0%
<b>Usa</b>	42	29	45	5,5%
<b>Korea</b>	34	37	40	4,9%
<b>India</b>	25	26	31	3,8%
<b>Canada</b>	23	21	22	2,7%
<b>Iran</b>	23	19	22	2,7%
<b>Spain</b>	17	18	18	2,2%
<b>Australia</b>	16	17	18	2,2%
<b>Poland</b>	16	14	16	2,0%
<b>Pakistan</b>	11	14	15	1,8%

En relación con los autores, en la [tabla 3](#), se muestra la lista de los autores más importantes, quienes son categorizados por el número de documentos publicados en sus respectivas bases de datos, además, se correlaciona su índice H (H-index), el cual se utiliza para describir la producción científica de los investigadores ([45](#)).

**Tabla 3.** Autores más relevantes

Autor	Total de Publicaciones	Wos			Scopus		Índice H
		Publicaciones	Citaciones	Índice H	Publicaciones	Citaciones	
Ok Yong Sik	31	28	22504	0	30	44845	107
Tsang, Daniel C.W.	18	16	14462	80	18	27340	87
Wang Yin	17	14	1748	27	11	3289	34
Zhang, Zengqiang	17	16	1754	52	14	9139	55
Kumar Awasthi, Mukesh	10	10	1948	30	8	8083	48
Li, Ronghua	10	9	6521	49	7	7333	47
Rinklebe, Joerg.	9	9	8584	63	9	16059	65
Vithanage, Meththika Suharshini	9	9	6963	44	9	10672	47
Wang, Hailong	9	9	8200	56	8	13395	59
Zeng, Guangming	9	9	67903	155	7	121045	165

La revista con el mayor número de publicaciones que se asocian al tema es *Chemosphere* (Q1), en el segundo puesto la sigue la revista *Science Of The Total Environment* (Q1) y *Environmental Science And Pollution Research* (Q2) en el tercer puesto, estas revistas se encuentran indexadas en las bases de datos y hacen parte del cuartil 1. Dentro de las 10 primeras y con más importancia se encuentran revistas de Holanda en el primer puesto, el Reino Unido ocupa el segundo lugar y Estados Unidos el tercer lugar ([tabla 4](#)).

**Tabla 4.** Revistas más relevantes

Revistas	WOS	SCOPUS	total	porcentaje	cuartil	sjr (2020)	h - index
<i>Chemosphere</i>	55	49	56	6,85%	Q1	1,63	248
<i>Science of the total environment</i>	52	47	52	6,36%	Q1	1,8	244
<i>Environmental science and pollution research</i>	38	37	38	4,65%	Q2	0,85	113
<i>Bioresource technology</i>	35	31	35	4,28%	Q1	2,49	294
<i>Journal of hazardous materials</i>	26	24	26	3,18%	Q1	2,03	284
<i>Journal of environmental management</i>	17	17	17	2,08%	Q1	1,44	179
<i>Ecotoxicology and environmental safety</i>	15	15	15	1,84%	Q1	1,38	129
<i>Water, air, and soil pollution</i>	NA	15	15	1,84%	Q2	0,56	111
<i>Chemical engineering journal</i>	12	13	13	1,59%	Q1	2,53	223
<i>Environmental pollution</i>	12	12	13	1,59%	Q1	2,14	227

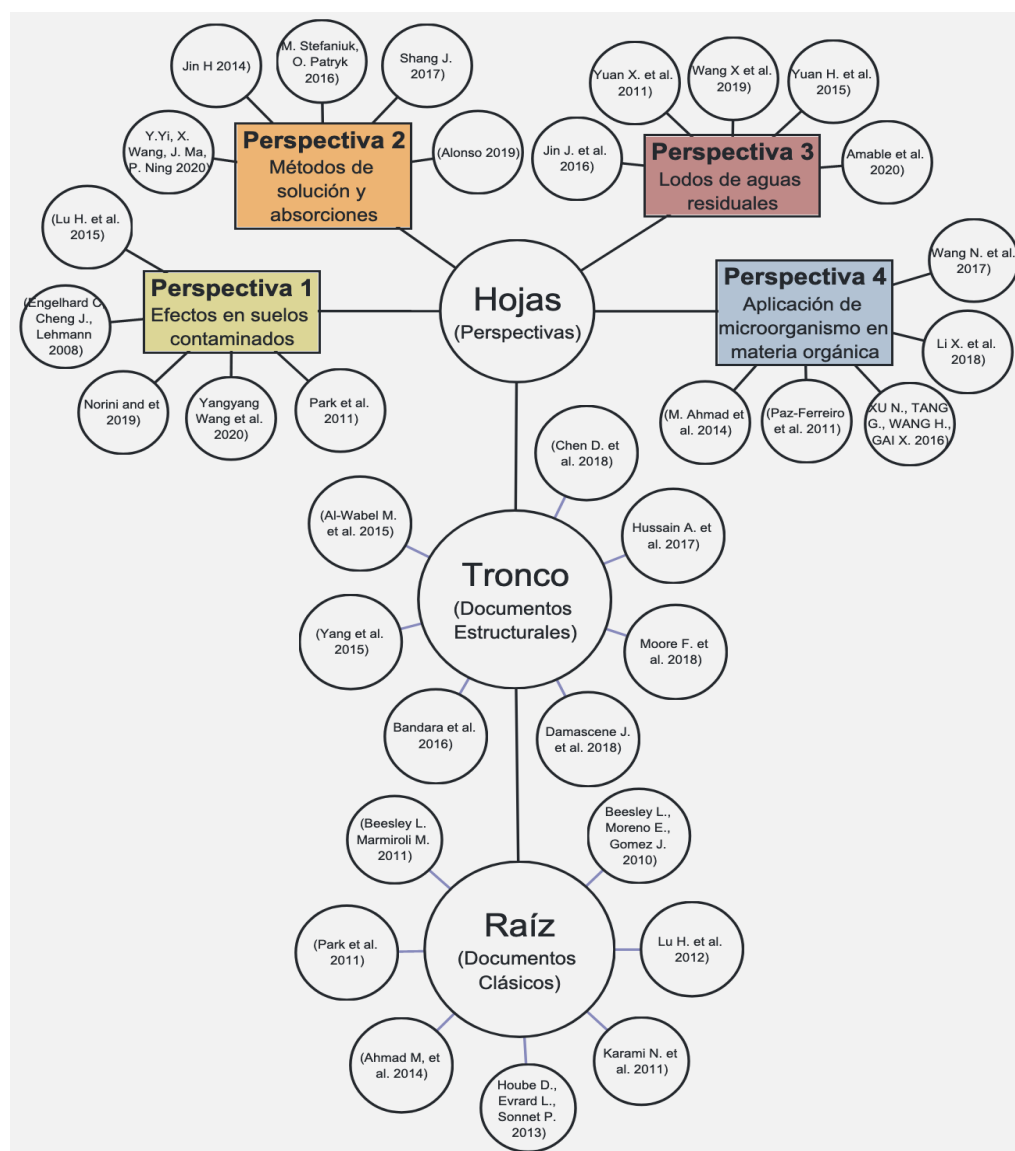
En la [figura 2](#), se ilustran los cuatro elementos principales que forman parte del análisis bibliográfico, en el primer cuadro se ubica la red colaborativa de autor y se puede mostrar el trabajo conjunto de autores mencionados en diferentes grupos, como es el caso de Wang Y., Ok Y. y Zang J. Estos grupos reflejan la interacción entre los 10 investigadores más publicados sobre el tema analizado en las bases de datos *Scopus* y *Wos*. En la segunda columna se ubican las redes de co-citación de los autores, lo que ayuda a identificar a los autores más importantes o destacados en términos de conteo de citas ([46](#)). La co-citación entre los dos grupos de autores es más prominente, el grupo más grande relaciona a los autores Zhang, Wang, Chen, etc. El segundo grupo lo integran autores como Ahmad, Uchimiya, Jehmann, entre otros; siendo los primeros de la lista por el mayor número de citaciones en la red, esto se evidencia en el *h-index* (*google citations*), siendo los autores más relevantes en el campo.





## Análisis de red

A través de este análisis, se pueden identificar los documentos más relevantes de la región, se usó la metáfora de un árbol científico para seleccionar documentos con las métricas más altas para su revisión y organización. Diez clásicos (raíz), diez estructurales (tronco) y diez recientes (hoja). El algoritmo de agrupamiento propuesto por Blondel et al. (47), establece subcampos o áreas comunes de investigación. Se identificaron de esta forma cuatro grupos principales, los cuales se pueden apreciar en las hojas. [Figura 3](#)



**Figura. 3.** Árbol del Biochar y la remoción de contaminantes

Para establecer inicialmente el tema de cada subregión (*Cluster*), se aplicó minería de textos, en particular el paquete *WordCloud* (48), que genera nubes de palabras a partir de palabras y títulos clave de artículos, compara documentos con mejor *PageRank* (49) por grupo. Asimismo, se seleccionan los diez más relevantes, haciendo uso del parámetro métrica el cual permite construir citas desde una visión cuantitativa

de los documentos más destacados de un conjunto, apoyada en citas [\(50\)](#) [\(51\)](#). A continuación, se analizaron el biocarbón, los metales y los metaloides.

### Documentos clásicos (Raiz)

Los artículos de investigación asociados al árbol de Biochars y metales, y los artículos enraizados en esta revisión bibliográfica de grado son los más destacados, es decir, se agrupan los artículos clasificados como altamente citados, que muestran disposiciones clásicas y dominantes. Esta sección analiza 7 registros que se consideran dominantes como se describe anteriormente.

Los documentos encontrados en las bases de datos (*WoS* y *Scopus*) se clasificaron en dos grupos, en el primero se encuentran los autores que han realizado contribuciones importantes referente al biochar, absorción de contaminantes tóxicos, retención de metales y términos generales para tratamiento de suelos [\(4\)](#); [\(3\)](#); [\(52\)](#); [\(53\)](#). La segunda parte contiene autores que evalúan porcentajes de remoción y eficiencia del biochar [\(1\)](#); [\(54\)](#); [\(9\)](#). Entre los investigadores principales sobresalen Luke Beesley y Uchimiya M., confirmando los resultados obtenidos en la red de cocitaciones y ratificando el protagonismo de estos autores en el campo de estudio.

La investigación con mayor impacto en el área de los Biochar y metales es "Biochar como absorbente para el manejo de contaminantes en suelo y agua: una revisión" [\(4\)](#), en este artículo se evidencia el interés en la aplicación del Biochar en diversas áreas para ayudar a retener o inmovilizar metales y retener carbono como alternativa para el mejoramiento de la fertilidad del suelo, la remediación de la contaminación y el reciclaje de subproductos/desechos agrícolas. En el año 2010, se publica un artículo llamado "Efectos de las enmiendas de biochar y compost de desechos verdes sobre la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un suelo contaminado con múltiples elementos", esta investigación presenta los altos niveles de elementos contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos en áreas industriales, y como el biochar puede incidir en la remediación de estos suelos contaminados [\(52\)](#). Otros investigadores que realizan aportes considerables en el campo de estudio analizan la capacidad de absorción del biochar y la capacidad de retención de elementos como: arsénico (As), cadmio (Cd) y zinc (Zn) [\(1\)](#).

### Documentos estructurales (Tronco)

Dentro de los documentos que hacen parte del tronco (estructurales) del árbol de Biochar y metales, se establece una tendencia en el desarrollo investigativo de corte aplicado, asociados a la identificación, biodisponibilidad [\(6\)](#), sostenibilidad y los impactos de utilizar biochar de plantas [\(2\)](#) entre ellas el *Conocarpus* [\(5\)](#); Por otro lado, se presentan estudios e investigaciones enfocadas en analizar la composición [\(55\)](#) del biochar, la capacidad de absorción y remediación de metales en suelos [\(55\)](#), entre ellos Cd, Cu, Pb, Zn [\(7\)](#), así como la asociación e interrelación de microorganismos como solución ecológica [\(56\)](#), para tratar terrenos contaminados [\(57\)](#).

### Perspectivas (Hojas)

En la revisión realizada, se identificaron 4 líneas principales de investigación a través del algoritmo de clusterización, que se muestra y se analiza a continuación figura 4.



## Perspectiva 2. métodos de solución y absorciones

La experimentación con diferentes métodos para producir biochar más estables o eficientes es un tema que está generando diversos resultados particulares, en el caso de Shang J. (65), utiliza el método *Brunauer Emmet Teller* (BET) con residuos verdes para lograr concentraciones de C de un 44,98% a 9,37% y del Fe 39,51% a 5,67%; por otro lado, se ha utilizado el método pirolítico a temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C con residuos sólidos urbanos municipales (66), virutas (67), sauce (68), logran reducciones en la concentración de N y C (69). Se resaltan otras técnicas como la activación con vapor y ácido fosfórico para el caso de la cáscara de nuez (70) para suprimir iones metálicos reteniendo casi el 100% de estos, o la modificación de PH en la solución como agentes de aceleración en reacciones superficiales logrando la eliminación de 99,99% para Cr (VI) a pH 1, 99,86% para Pb (II) a pH 3 y 99,67% para Cd (II) a pH 5 (71).

## Perspectiva 3. lodos de aguas residuales

Los lodos depuradores contienen altas tasas de metales por lo cual no se usan con fines ambientales y/o agrícolas, sin embargo, los Biochars (BC) derivados de lodos alcanzan recuperaciones entre el 80 - 100% (72), siendo necesario conocer el porcentaje de metales después de la licuefacción (80%), esto afecta la biodisponibilidad, los procesos de adsorción - desorción, la composición iónica del agua y la movilidad de los metales en el suelo (73). La eficiencia y calidad del Biochars (BC) varían según la pirólisis; Se conoció que a 300 °C el rendimiento es del 62,5% y a 400 °C es del 28,5% (74), por otro lado, al aplicar sustancias como el DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético) en los BC y a una pirólisis adecuada, se extrae metales como Zn (82%); Pb (16%); Cu (43%); Cd (54%); Fe (6%) y Mn (34%) (75). Conociéndose las temperaturas adecuadas disminuye el contenido de material volátil del 27,4% al 5,5%, incrementa el de cenizas del 65,8% al 86,8% y de carbono fijo de 6,8% a 9,2% (76).

Considerando lo anterior, los BC derivados de lodos depuradores y por pirólisis, los convierte en un método propicio y eficiente en la retención de metales (77), y que al agregar aserrín de bambú para la co-pirólisis, disminuye el 16% en el contenido de cenizas y alrededor del 50% de metales en el lodo y en el biocarbón (78). Por otro lado, Los BC derivados de lodos teñidos de textiles a temperaturas entre 300°C y 700°C, retienen metales entre el 60,96% y el 80,85% (79). Igualmente, se conocen compuestos orgánicos en los aceites de pirólisis: bencenos, fenoles, nitrilos, ácidos orgánicos, entre otros; al agregar 50% BC de mazorca de maíz disminuye el 37,5% al 19,8% (p/p) de Nitrilos, el 4,5% (p/p) de esteroides (80); Finalmente, los BC tratan las aguas/aguas residuales reteniendo: 46% de metales, 39% de contaminantes orgánicos, 13% en otros nutrientes y 2% en otros contaminantes, esto se debe al área superficial específica, la estructura porosa y grupos funcionales superficiales del BC (81).

## Perspectiva 4. aplicación de microorganismos en materia orgánica

En la investigación de Ahmad M. et al. (4) se presenta que la absorción de contaminantes orgánicos haciendo uso de biochars se beneficia más que los contaminantes inorgánicos, con una eficiencia de eliminación del 99,5% de fenantreno (biocarbón de tallo de soja), mientras que una solución acuosa elimina el 86,4% de Hg (II). Xu H. et. al (82) indica que al agregar un biochar se incrementa el pH del suelo, las altas concentraciones de microorganismos (Proteobacteria, Acidobacteria, Chloroflexi, entre otros), representan el 91%, la acidobacteria fue la más sensible al biocarbón disminuyendo el 17,8% al 6,1% con colza y del 17,2% al 5,9% sin colza.

Sin embargo, Paz-Ferreiro et al. (83) presenta que la biomasa microbiana C disminuyó en el suelo tratado con lodos depurados (56%), y que el coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) fue menor en los suelos tratados con lodos depurados para el control del suelo (60%), por otro lado, el  $CO_2$  fue 1,5 veces mayor en lodo depurado que en el suelo de control, y la mineralización de N fue de 8,7 más alto y 12,6 más altos en comparación con el suelo de control.

En el estudio de XU N. et al. (84) un antes y después del medio recuperado con biocarbón, evaluando el cambio de la diversidad bacteriana, los cuales reducen el nitrógeno lixiviado total del orden del 18,8% agregando biochar al 2%, con biochar al 4% se reduce el nitrógeno lixiviado total en 19,5% y con un biochar al 8% se reduce el nitrógeno lixiviado en 20,2%; con respecto al nitrato lixiviado, este se reduce en 16,0% agregando Biochar al 2%, 16,7% agregando Biochar al 4% y 19,3% agregando Biochar al 8%, sin embargo, la cantidad de microorganismos (*Acidobacteria*, *Chloroflexi* y *Gemmatimonadetes*) disminuye aplicando el biocarbón, por otro lado, se incrementa otros microorganismos (Proteobacteria, Bacteroidetes y Actinobacteria aumentaron).

Con la investigación realizada por Chen Z. Et. Al. (85) se da a conocer que el biochar y agua tiene la capacidad de retener As(V) entre el 10 – 13 % y un 87 – 90%, Fe(III) 2 – 17% y un 83 – 88 % en condiciones abióticas y bióticas; también se puede identificar que al agregar el biochar se transforma la comunidad microbiana del suelo, aumentando las bacterias reductoras (*Geobacter*, *Anaeromyxobacter*, *Desulfosporosinus* y *Pedobacter*) de As (V) y Fe (III).

Asimismo, Wang N. Et. Al. (86) da a conocer que los medios de recuperación con biochars incrementa con exceso ciertos microorganismos, de Clostridia del 44,5% al 51,4%, y de bacilos del 5,89% al 8,05%; Igualmente se incrementa el nivel de género, Clostridium del 22,7 % al 27,3%, Bacillus del 2,39% al 3,34%, Caloramator del 3,88% al 4,46%, Desulfitobacterium del 0,62% al 0,84%, Desulfosporosinus del 0,65% al 0,95% y Geobacter del 0,92% al 1,17%.

En la investigación de Prayogo et al. (87) también se conoce que un biochar generado al 2% disminuye liberación de  $CO_2$ , reduciendo el 10% en la mineralización, y se ve el incremento del 29% en el análisis de ácidos grasos de fosfolípidos, y ciertos microorganismos como bacterias totales en un 28%, bacterias gramnegativas al 27% y actinobacterias del 62%.

De acuerdo con Gómez J. et al. (88) se analizaron distintos suelos con perfiles de ácidos grasos de fosfolípidos con variables del 88% en la dinámica temporal de estos perfiles, se analiza que al agregar el 20% del biochar cambian los perfiles de ácidos grasos de fosfolípidos totales en CO. Por lo anterior, se considera que la valoración sobre la reacción microbiana del suelo tiene un déficit del 77%, utilizando la dinámica temporal de los ácidos grasos de fosfolípidos.

Igualmente, una investigación de Li X. Et. Al. (89) diseña tres biochars con altas capacidades de retención, el de mayor contenido de cenizas tiene el 43,82%, la cual retiene el 92,78% de  $SiO_2$ , el 33,18% de  $K_2O$ , así como retención de otros minerales del 70,60%. Estos biocarbones contienen el 40% de grupos funcionales orgánicos hidroxilo y carboxilo, de igual manera cerca del 60% de coprecipitación o complejo en superficies minerales.

Por último, en el estudio de BASS A. et al. (90) se conoce que se incrementan los cationes de ciertas sustancias agregando el 27,5% de un biochar y del 24,7% de una

mezcla de biochar/Compost, aumentando las tasas de mineralización de carbono y reformando la estructura microbiana.

## Conclusiones

Esta investigación se llevó a cabo mediante un estudio metódico y bibliométrico en relación al tema - uso de "Biochars como medio para remover metales pesados de suelos y aguas", por medio de un estudio de red. Los resultados se dan a conocer a través de la analogía del árbol para alcanzar una mejor visión en el desarrollo del tema. El centro del análisis está incluido los artículos que se sitúan en la "raíz". El "tronco" está conformado con los artículos que moldearon y le dieron forma estructural al tema de biochars y metales. Finalmente, las investigaciones que se posicionan sobre las "hojas" brindan un apoyo a las cuatro perspectivas planteadas (Perspectiva 1: Efectos en suelos contaminados, Perspectiva 2: Métodos de solución y absorciones, Perspectiva 3: Lodos de aguas residuales y Perspectiva 4: Ampliación de microorganismo en materia orgánica).

Dentro de los beneficios más representativos, se observa que los biochars aportan de forma considerable en la disminución, eliminación y retención de metales y sustancias tóxicas, a través de distintos medios o sustancias que facilitan la recuperación de los medios (Suelo y Agua) que están contaminados por un uso inadecuado de residuos, donde se apoyan en los medios: Pirólisis, Microorganismos, materia orgánica, absorción y lodos depuradores.

Los artículos que se encontraron en la red están enfocados en estudios e investigaciones del continente asiático con el 62,2% y norteamericano con el 8,2%, donde las problemáticas por contaminación de metales pesados en los suelos y en los recursos hídricos son críticos. La aceptación de los proyectos sobre el uso de biochars como posible solución en la retención de metales, se ha evidenciado importantes aportes gracias al gran interés y protección sobre los medios para la recuperación de suelos y cuerpos de aguas ciertamente contaminados puesto como objetivo en sus programas. De igual forma, es notable observar que muy pocos investigadores y/o autores refutan estas investigaciones en Latinoamérica donde también se puede encontrar esta problemática. En Colombia sería interesante indagar a fondo estas soluciones mediante programas acertados, donde el uso de los Biochars esté enfocado como medio de recuperación y restauración de ecosistemas afectados, que a su vez, se verá reflejado en un ambiente sano, mayores oportunidades de empleo, crecimiento personal, seguridad social y alimentaria entre otros; lo cual se resume en el mejoramiento de las condiciones de vida de las poblaciones que se ven directamente influenciadas.

## Bibliografía

1. Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environ Pollut* [Internet]. 2011 Feb;159(2):474–80. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>
2. Chen D Et Al. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta-analysis. *J Environ Manage* [Internet]. 2018 Sep 15 [cited 2022 Apr 22];222:76–85. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.004>

3. Park J, Choppala GK, Bolan NS, Chung JW, Chuasavathi T. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil* [Internet]. 2011 Aug 19 [cited 2022 Apr 21];348(1):439–51. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-0948-y>
4. M Ahmad, Rajapaksha AU, EunLim J, Zhang M, Bolan N, Mohan D, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* [Internet]. 2014 Mar 1 [cited 2022 Apr 21];99:19–33. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
5. Al-Wabel MI, Usman ARA, El-Naggar AH, Aly AA, Ibrahim HM, Elmaghraby S, et al. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi J Biol Sci* [Internet]. 2015 Jul;22(4):503–11. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.003>
6. Bandara T, Herath I, Kumarathilaka P, Hseu ZY, Ok YS, Vithanage M. Efficacy of woody biomass and biochar for alleviating heavy metal bioavailability in serpentine soil. *Environ Geochem Health* [Internet]. 2017 Apr;39(2):391–401. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-016-9842-0>
7. Yang X, Liu J, McGrouther K, Huang H, Lu K, Guo X, et al. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environ Sci Pollut Res Int* [Internet]. 2016 Jan;23(2):974–84. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-4233-0>
8. Wang Y., Et Al. Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: Challenges and recommendations. *Sci Total Environ* [Internet]. 2020 Aug 10;729:139060. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139060>
9. Karami N, Clemente R, Jiménez EM, Lepp NW, Beesley L. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *J Hazard Mater* [Internet]. 2011 Jul 15 [cited 2022 Apr 21];191(1-3):41–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.025>
10. Sci2 Team. Sci2 Tool : A Tool for Science of Science Research and Practice [Internet]. 2009 [cited 2022 Sep 2]. Available from: <https://sci2.cns.iu.edu/user/index.php>
11. Bastian M., Heymann S., Jacomy M. Gephi : An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks [Internet]. 2009. Available from: <https://gephi.org/publications/gephi-bastian-feb09.pdf>
12. Dater, Zupic. Bibliometric Methods in Management and Organization [Internet]. Vol. 18, *Organizational Research Methods*. 2015. p. 429–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.1177/1094428114562629>
13. Echchakoui S. Why and how to merge Scopus and Web of Science during bibliometric analysis: the case of sales force literature from 1912 to 2019. *J Market Anal* [Internet]. 2020 Sep 29;8(3):165–84. Available from: <http://link.springer.com/10.1057/s41270-020-00081-9>
14. Zhu J, Liu W. A tale of two databases: the use of Web of Science and Scopus in academic papers. *Scientometrics* [Internet]. 2020 Apr 22;123(1):321–35. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11192-020-03387-8>
15. Pranckut R. Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World. *Publications* [Internet]. 2021 Mar 12 [cited 2022 Jan 13];9(1):12. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-6775/9/1/12>



16. Vera BMA, Thelwall M, Kousha K. Web of Science and Scopus language coverage. *Scientometrics* [Internet]. 2019 Oct 12 [cited 2021 Mar 23];121(3):1803–13. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-019-03264-z>
17. Aria M, Cuccurullo C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *J Informetr* [Internet]. 2017 Nov;11(4):959–75. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157717300500>
18. Tani M, Papaluca O, Sasso P. The System Thinking Perspective in the Open-Innovation Research: A Systematic Review. *JOItmC* [Internet]. 2018 Aug 18;4(3):38. Available from: <http://www.mdpi.com/2199-8531/4/3/38>
19. Duque P, Samboni V, Castro M, Montoya LA, Montoya IA. Neuromarketing: Its current status and research perspectives. *Estudios Gerenciales* [Internet]. 2020 [cited 2020 Nov 20];36(157). Available from: <https://doi.org/10.18046/j.estger.2020.157.3890>
20. Duque P, Trejos D, Hoyos O, Mesa JCC. Finanzas corporativas y sostenibilidad: un análisis bibliométrico e identificación de tendencias. *Semestre Económico* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2022 Feb 24];24(56):25–51. Available from: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/3645>
21. Acevedo JP, Robledo S, Sepúlveda MZ. Subáreas de internacionalización de emprendimientos: una revisión bibliográfica. *Econ CUC* [Internet]. 2020 Dec 3;42(1):249–68. Available from: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/economicascuc/article/view/3186>
22. Secinaro S, Francesca DM, Brescia V, Calandra D. Blockchain in the accounting, auditing and accountability fields: a bibliometric and coding analysis. *Accounting, Auditing & Accountability Journal* [Internet]. 2021 Jan 1;ahead-of-print(ahead-of-print). Available from: <https://doi.org/10.1108/AAAJ-10-2020-4987>
23. Landinez DA, Robledo Giraldo S, Montoya Londoño DM. Executive Function performance in patients with obesity: A systematic review. *Psychol* [Internet]. 2019 Nov 20;13(2):121–34. Available from: <https://190.131.242.67/index.php/Psychologia/article/view/4230>
24. Di Vaio A, Palladino R, Pezzi A, Kalisz DE. The role of digital innovation in knowledge management systems: A systematic literature review. *J Bus Res* [Internet]. 2021 Feb 1;123:220–31. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296320306238>
25. Queiroz MM, Fosso Wamba S. A structured literature review on the interplay between emerging technologies and COVID-19 - insights and directions to operations fields. *Ann Oper Res* [Internet]. 2021 Jun 30;1–27. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-021-04107-y>
26. Yang S, Keller FB, Zheng L. *Social Network Analysis: Methods and Examples* [Internet]. SAGE Publications; 2016. 248 p. Available from: [https://books.google.com/books/about/Social\\_Network\\_Analysis.html?hl=&id=2ZNIDQAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/Social_Network_Analysis.html?hl=&id=2ZNIDQAAQBAJ)
27. Wallis WD. *A Beginner's Guide to Graph Theory* [Internet]. Springer, editor. Birkhäuser Boston; 2007. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-8176-4580-9>
28. Freeman LC. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry* [Internet]. 1977 Mar;40(1):35. Available from: <https://www.jstor.org/stable/3033543?origin=crossref>

29. Zhang J, Luo Y. Degree Centrality, Betweenness Centrality, and Closeness Centrality in Social Network. In: Atlantis Press, editor. Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2017) [Internet]. 2017. p. 300–3. Available from: <http://dx.doi.org/10.2991/msam-17.2017.68>
30. Zuschke N. An analysis of process-tracing research on consumer decision-making. *J Bus Res* [Internet]. 2020 Apr;111:305–20. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0148296319300281>
31. Gurzki H, Woisetschläger DM. Mapping the luxury research landscape: A bibliometric citation analysis. *J Bus Res* [Internet]. 2017 Aug;77:147–66. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0148296316306336>
32. Bastian M, Heymann S, Jacomy M. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media* [Internet]. 2009 [cited 2019 Oct 9]; Available from: <https://gephi.org/users/publications/>
33. Robledo S, Osorio G, Lopez C. Networking en pequeña empresa: una revisión bibliográfica utilizando la teoría de grafos. *Vínculos* [Internet]. 2014 Dec 19 [cited 2019 Oct 9];11(2):6–16. Available from: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/9664>
34. Valencia HDS, Robledo S, Pinilla R, Duque MND, Gerard OT. SAP Algorithm for Citation Analysis: An improvement to Tree of Science. *Ing Inv* [Internet]. 2020 Jan 1;40(1):45–9. Available from: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/77718>
35. Buitrago S, Duque P, Robledo S. Branding Corporativo: una revisión bibliográfica. *Económicas CUC* [Internet]. 2020 [cited 2020 Mar 2];41(1). Available from: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/economicascuc/article/view/2636>
36. Duque P, Cervantes LS. Responsabilidad Social Universitaria: una revisión sistemática y análisis bibliométrico. *Estudios Gerenciales* [Internet]. 2019 Dec 4;35 (153 Oct-Dic 2019):451–64. Available from: [https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/estudios\\_gerenciales/article/view/3389](https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/estudios_gerenciales/article/view/3389)
37. Duque P, Meza O, Zapata G, Giraldo J. Internacionalización de empresas latinas: evolución y tendencias. *ECONÓMICAS CUC* [Internet]. 2021 [cited 2020 Nov 15];42(1). Available from: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/economicascuc/article/view/3012>
38. Ramos V, Duque P, Vieira JA. Responsabilidad Social Corporativa y Emprendimiento: evolución y tendencias de investigación. *DESARROLLOGERENCIAL* [Internet]. 2021 Apr 8 [cited 2021 Sep 6];13(1):1–34. Available from: <http://revistas.unisimon.edu.co/index.php/desarrollogerencial/article/view/4210>
39. Duque P, Toro A, Ramírez D, Carvajal ME. Marketing viral: Aplicación y tendencias. *Clío América* [Internet]. 2020 Mar 3 [cited 2021 Sep 6];14(27):454–68. Available from: <http://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/clioamerica/article/view/3759>
40. Duque P, Meza OE, Giraldo D, Barreto K. Economía Social y Economía Solidaria: un análisis bibliométrico y revisión de literatura. *REVESCO Revista de Estudios Cooperativos* [Internet]. 2021 Jun 14 [cited 2021 Jul 17];138:e75566–e75566. Available from: <https://revistas.ucm.es/index.php/REVE/article/view/75566>
41. Trejos-Salazar DF, Duque PL, Montoya LA, Montoya IA. Neuroeconomía: una revisión basada en técnicas de mapeo científico. *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E*

INNOVACIÓN [Internet]. 2021 Feb 15 [cited 2021 Jul 17];11(2):243–60. Available from: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion\\_duitama/article/view/12754](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_duitama/article/view/12754)

42. Rubaceti NAB, Giraldo SR, Sepulveda MZ. Una revisión bibliográfica del Fintech y sus principales subáreas de estudio. *ECONÓMICAS CUC* [Internet]. 2022 [cited 2021 Dec 1];43(1). Available from: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/economicascuc/article/view/3246>

43. Clavijo-Tapia FJ, Duque-Hurtado PL, Arias-Cerquera G, Tolosa-Castañeda MA. Organizational communication: a bibliometric analysis from 2005 to 2020. *Clío América* [Internet]. 2021 Oct 13 [cited 2021 Dec 1];15(29). Available from: <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/clioamerica/article/view/4311>

44. Torres G, Robledo S, Berrío SR. Orientación al mercado: importancia, evolución y enfoques emergentes usando análisis cuantitativo. *criteriolibre* [Internet]. 2021 Dec 28 [cited 2022 Jan 12];19(35):326–40. Available from: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/criteriolibre/article/view/8371>

45. Hirsch J. An index to quantify an individual's scientific research output. 2005; Available from: <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>

46. H. White. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2003; Available from: <https://doi.org/10.1002/asi.10228>

47. Blondel VD, Guillaume JL, Lambiotte R, Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *J Stat Mech* [Internet]. 2008 Oct 9 [cited 2022 Sep 2];2008(10):P10008. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008/meta>

48. Ohri A. *R for Business Analytics* [Internet]. Springer Science & Business Media; 2012. 312 p. Available from: <https://play.google.com/store/books/details?id=D2Su4qomE4sC>

49. Page L., et. al. The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web. 1998 [cited 2022 Sep 2]; Available from: <http://ilpubs.stanford.edu:8090/422/1/1999-66.pdf>

50. Ding Y., Yan E., Sugimoto C. P-Rank: An indicator measuring prestige in heterogeneous scholarly networks. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* [Internet]. 2010; Available from: <https://doi.org/10.1002/asi.21461>

51. Yan E., Et Al. PageRank for ranking authors in co-citation networks. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* [Internet]. 2009; Available from: <https://doi.org/10.1002/asi.21171>

52. Beesley L, Moreno Jiménez E, Gomez Eyles JL. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ Pollut* [Internet]. 2010 Jun;158(6):2282–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.003>

53. Lu H, Zhang W, Yang Y, Huang X, Wang S, Qiu R. Relative distribution of Pb<sup>2+</sup> sorption mechanisms by sludge-derived biochar. *Water Res* [Internet]. 2012 Mar 1 [cited 2022 Apr 21];46(3):854–62. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.058>

54. Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere* [Internet]. 2013 Sep 1 [cited 2022 Apr 21];92(11):1450–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.055>
55. Hussain A EA. Use of Biochar as an Amendment for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Prospects and Challenges. *Pedosphere* [Internet]. 2017 Dec 1 [cited 2022 Apr 22];27(6):991–1014. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60490-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60490-9)
56. J Damascene Et A. Biochar-bacteria-plant partnerships: Eco-solutions for tackling heavy metal pollution. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2020 Nov 1 [cited 2022 Apr 22];204:111020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111020>
57. Moore F EA. Copper immobilization by biochar and microbial community abundance in metal-contaminated soils. *Sci Total Environ* [Internet]. 2018 Mar 1 [cited 2022 Apr 22];616-617:960–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.223>
58. Norini M, Et A. Mobility of Pb, Zn, Ba, As and Cd toward soil pore water and plants (willow and ryegrass) from a mine soil amended with biochar. *J Environ Manage* [Internet]. 2019 Feb 15 [cited 2022 Apr 28];232:117–30. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.021>
59. Engelhard C Cheng J Lehmann. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim Cosmochim Acta* [Internet]. 2008 Mar 15 [cited 2022 Apr 29];72(6):1598–610. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.010>
60. Jiang J, Xu R. Application of crop straw derived biochars to Cu(II) contaminated Ultisol: Evaluating role of alkali and organic functional groups in Cu(II) immobilization. *Bioresour Technol* [Internet]. 2013 Apr 1 [cited 2022 Apr 29];133:537–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.161>
61. Forján R, Asensio V, Vila AR, Covelo EF. Contributions of a compost-biochar mixture to the metal sorption capacity of a mine tailing. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2015 Oct 3 [cited 2022 May 2];23(3):2595–602. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-015-5489-0>
62. Karer J, Wawra A, Zehetner F, Dunst G, Wagner M, Pavel PB, et al. Effects of Biochars and Compost Mixtures and Inorganic Additives on Immobilisation of Heavy Metals in Contaminated Soils. *Water Air Soil Pollut Focus* [Internet]. 2015 Sep 17 [cited 2022 May 9];226(10):1–12. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-015-2584-2>
63. Wang Y, Ma X, Wang J, Cheng S, Ren Q, Zhan W, et al. Effects of Mercapto-functionalized Nanosilica on Cd Stabilization and Uptake by Wheat Seedling (*Triticum aestivum* L.) in an Agricultural Soil. *Bull Environ Contam Toxicol* [Internet]. 2019 Oct 11 [cited 2022 May 9];103(6):860–4. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00128-019-02729-4>
64. Lu H. et. al. Combining phytoextraction and biochar addition improves soil biochemical properties in a soil contaminated with Cd. *Chemosphere* [Internet]. 2015 Jan 1 [cited 2022 May 9];119:209–16. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.024>

65. Shang J. E al. Removal of chromium (VI) from water using nanoscale zerovalent iron particles supported on herb-residue biochar. *J Environ Manage* [Internet]. 2017 Jul 15 [cited 2022 May 3];197:331–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.085>
66. Jin H E al. Biochar pyrolytically produced from municipal solid wastes for aqueous As(V) removal: Adsorption property and its improvement with KOH activation. *Bioresour Technol* [Internet]. 2014 Oct 1 [cited 2022 May 3];169:622–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.103>
67. Alonso A. Designing biochar properties through the blending of biomass feedstock with metals: Impact on oxyanions adsorption behavior. *Chemosphere* [Internet]. 2019 Jan 1 [cited 2022 May 3];214:743–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.091>
68. M. Stefaniuk, O. Patryk. Addition of biochar to sewage sludge decreases freely dissolved PAHs content and toxicity of sewage sludge-amended soil. *Environ Pollut* [Internet]. 2016 Nov 1 [cited 2022 May 2];218:242–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.063>
69. Cao X., Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresour Technol* [Internet]. 2010 Jul 1 [cited 2022 May 10];101(14):5222–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>
70. Bansode R. Et. Al. Adsorption of metal ions by pecan shell-based granular activated carbons. *Bioresour Technol* [Internet]. 2003 Sep 1 [cited 2022 May 10];89(2):115–9. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00064-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00064-6)
71. M.Koby, E.Demirbas, E.Senturk, M.Ince. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone. *Bioresour Technol* [Internet]. 2005 Sep 1 [cited 2022 May 9];96(13):1518–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.005>
72. Fuentes A. et. al. Comparative study of six different sludges by sequential speciation of heavy metals. *Bioresour Technol* [Internet]. 2008 Feb 1 [cited 2022 May 7];99(3):517–25. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.025>
73. Yuan X. et. al. Total concentrations and chemical speciation of heavy metals in liquefaction residues of sewage sludge. *Bioresour Technol* [Internet]. 2011 Mar 1 [cited 2022 May 6];102(5):4104–10. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.055>
74. Agrafioti E, Bouras G, Kalderis D, Diamadopoulos E. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. *J Anal Appl Pyrolysis* [Internet]. 2013 May 1;101:72–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237013000454>
75. Lu H. Et. Al. Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures. *J Anal Appl Pyrolysis* [Internet]. 2013 Jul 1 [cited 2022 May 10];102:137–43. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2013.03.004>
76. Yuan H. Et. Al. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. *J Anal Appl Pyrolysis* [Internet]. 2015 Mar 1 [cited 2022 May 6];112:284–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.010>

77. Jin J. Et al. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *J Hazard Mater* [Internet]. 2016 Dec 15 [cited 2022 May 6];320:417–26. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>
78. Jin J E al. Cumulative effects of bamboo sawdust addition on pyrolysis of sewage sludge: Biochar properties and environmental risk from metals. *Bioresour Technol* [Internet]. 2017 Mar 1 [cited 2022 May 3];228:218–26. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.103>
79. Wang X et. al. Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and risk evaluation of heavy metals in biochar derived from textile dyeing sludge. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2019 Jan 30 [cited 2022 May 6];168:45–52. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.022>
80. Zhou Y. Et. Al. Effects of pyrolysis temperature and addition proportions of corncob on the distribution of products and potential energy recovery during the preparation of sludge activated carbon. *Chemosphere* [Internet]. 2019 Apr 1 [cited 2022 May 10];221:175–83. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.026>
81. Ambaye TG, Vaccari M, van Hullebusch ED, Amrane A, Rtimi S. Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *Int J Environ Sci Technol* [Internet]. 2020 Dec 26 [cited 2022 May 7];18(10):3273–94. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-020-03060-w>
82. Xu H. et. al. Biochar Impacts Soil Microbial Community Composition and Nitrogen Cycling in an Acidic Soil Planted with Rape. 2014; Available from: <https://doi.org/10.1021/es5021058>
83. Paz-Ferreiro J, Gascó G, Gutiérrez B, Méndez A. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biol Fertil Soils* [Internet]. 2011 Dec 21 [cited 2022 May 7];48(5):511–7. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-011-0644-3>
84. XU N., TAN G., WANG H., GAI X. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *Eur J Soil Biol* [Internet]. 2016 May 1 [cited 2022 May 10];74:1–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.02.004>
85. Chen Z. Et. Al. Enhanced bioreduction of iron and arsenic in sediment by biochar amendment influencing microbial community composition and dissolved organic matter content and composition. *J Hazard Mater* [Internet]. 2016 Jul 5 [cited 2022 May 10];311:20–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.069>
86. Wang N. Et. Al. Biochar increases arsenic release from an anaerobic paddy soil due to enhanced microbial reduction of iron and arsenic. *Environ Pollut* [Internet]. 2017 Jan 1 [cited 2022 May 11];220:514–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.095>
87. Prayogo C, Jones JE, Baeyens J, Bending GD. Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. *Biol Fertil Soils* [Internet]. 2013 Nov 27 [cited 2022 May 11];50(4):695–702. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-013-0884-5>

88. Gomez J., et al. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. 2014; Available from: <https://doi.org/10.1111/ejss.12097>

89. Li X. Et. Al. Qualitative and quantitative correlation of physicochemical characteristics and lead sorption behaviors of crop residue-derived chars. *Bioresour Technol* [Internet]. 2018 Dec 1 [cited 2022 May 11];270:545–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.078>

90. BASS A., BIRD M., KAY G., MUIRHEAD B. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. *Sci Total Environ* [Internet]. 2016 Apr 15 [cited 2022 May 11];550:459–70. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.143>