



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Tratamiento térmico para el mejoramiento de las propiedades  
fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados: Revisión  
sistemática.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTORAS:**

Ackermann Adrianzén, Hildegard Carolina (ORCID:0000-0002-2087-6689)  
Carcasi Salluca, Zulema Elena (ORCID:0000-0001-7385-4582)

**ASESOR:**

Dr. Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio (ORCID:0000-0003-1485-5854)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2021

## **DEDICATORIA**

Expresamos nuestro profundo reconocimiento a nuestros padres y familia, quienes, con su apoyo, cariño y comprensión, nos incentivaron a seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestro docente que fungio de asesor brindándonos su experiencia y conocimiento para nuestra investigación y así alcanzar nuestras metas académicas.

## ÍNDICE DEL CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DEL CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
III. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	14
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización .....	14
3.3. Escenario de estudio.....	16
3.4. Participantes .....	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	16
3.6. Procedimiento .....	16
3.7. Rigor científico .....	18
3.8. Método de análisis de información.....	18
3.9. Aspectos éticos.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
V. CONCLUSIONES.....	28

VI. RECOMENDACIONES .....	29
REFERENCIAS.....	30
ANEXOS.....	41

### **ÍNDICE DE TABLAS**

*Tabla N°1: Estadísticas de los parámetros fisicoquímicos analizados de las 27 muestras de agua subterránea y su comparación con los estándares de la OMS (2011) para la calidad del agua potable.*

*Tabla N°2: Antecedentes de los tratamientos térmicos aplicados a contaminantes de aguas subterráneas.*

*Tabla N°3: Matriz de categorización apriorística.*

*Tabla N°4: Parámetros contaminantes de las aguas subterráneas.*

*Tabla N°5: Índice para determinar la calidad del agua subterránea.*

*Tabla N°6: Método de tratamiento térmico.*

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

*Figura N°1: Método de fluorescencia interpretable para identificar la contaminación por lixiviados.*

*Figura N°2: Transporte de productos fitosanitarios hacia las aguas subterráneas.*

*Figura N°3: Preparación del compuesto BC/Fe mediante 3 procesos térmicos.*

*Figura N°4: Proceso de tratamiento in situ térmico por estimulación y calentamiento.*

### **ÍNDICE DE GRÁFICOS**

*Gráfico N°1: Procedimiento de información.*

### **ÍNDICE DE ABREVIATURAS**

OMS= Organización Mundial de la Salud

*GAC= Carbón activado granulado*

*GW= Agua subterránea*

*PPP= Productos fitosanitarios*

*DOM= Materia orgánica disuelta*

*TDS= Sólidos disueltos totales*

*ISB= Biorremediación in situ*

*BC= Biocarbón*

*PFAS= Sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo*

## RESUMEN

Se ha investigado el tratamiento de las aguas subterráneas empleando tratamientos térmicos, con el objetivo de determinar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados. Para tal efecto se realizó la revisión sistemática con un estudio cualitativo, de tipo aplicada mediante diseño narrativo de tópico. Donde los resultados obtenidos dieron que, los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas son en un 60% por contaminación localizada, donde las fuentes determinadas son las actividades industriales, vertedero, explotación minera, entre otros y los contaminantes que más predominan son los metales pesados y los etenos clorados. Así también, los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea son clasificados en WQI, GWQI y IWQI; los cuales presentan 15 parámetros en las que se aplican las ecuaciones de los 3 índices más relevantes a nivel mundial. Siendo el más empleado por los diversos investigadores el WQI que viene a ser el Índice de Calidad del Agua. Por último, el tratamiento más empleado para la descontaminación de aguas subterráneas por lixiviados es el tratamiento térmico y el tratamiento exotérmico mediante adsorción con carbono derivado del tratamiento térmico / químico de biomasa de desechos agrícolas.

**Palabras clave:** Tratamiento térmico, agua subterránea, lixiviados, parámetros.

## ABSTRACT

The treatment of groundwater using thermal treatments has been investigated, with the objective of determining the characteristics of thermal treatments for the improvement of the physicochemical properties of groundwater and leachates. For this purpose, a systematic review was carried out with a qualitative study, of the type applied by means of a narrative topic design. Where the results obtained show that, the polluting parameters of groundwater are 60% due to localized contamination, where the determined sources are industrial activities, landfill, mining, among others, and the most prevalent pollutants are heavy metals and chlorinated ethenes. Also, the indices used to study groundwater quality are classified into WQI, GWQI and IWQI; which present 15 parameters in which the equations of the 3 most relevant indices worldwide are applied. The WQI being the most used by the various researchers, which is the Water Quality Index. Finally, the most used treatment for the decontamination of groundwater by leachate is the thermal treatment and the exothermic treatment by adsorption with carbon derived from the thermal / chemical treatment of agricultural waste biomass.

**Keywords:** Heat treatment, groundwater, leachate, parameters.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea se encuentra en casi todas partes debajo de la superficie terrestre y es una parte integral de un ciclo hidrológico complejo que involucra el movimiento continuo del agua en la tierra (Hao Yuanyuan et al., 2017, p.13). La presencia generalizada de agua subterránea potable es una de las principales razones de su uso como fuente de suministro de agua en todo el mundo, además, gran parte de los alimentos del mundo se produce mediante la agricultura de regadío, que depende del agua subterránea (Jac Van 2021, p.331).

El agua subterránea es la principal fuente para usos domésticos y de otros tipos (Wijeyaratne W. y Suvendran S., 2019, p.1). También conocidos como acuíferos subterráneos; vienen siendo muy importantes en el suministro de agua doméstica, de riego e industrial (Vigneswaran B. et al., 2016, p.2). Juega un papel crucial en el mantenimiento del flujo de los arroyos durante los períodos secos y es vital para muchos lagos y humedales (Apostolaki Stella et al., 2019, p.1). Además de los usos humanos, muchas plantas y animales acuáticos dependen del agua subterránea que se descarga en arroyos, lagos y humedales (Jia Xiyue et al., 2019, p.57).

Una de las razones que afecta las calidad o cantidad de los recursos hídricos subterráneos son las aguas de lluvia y las precipitaciones; pero también las prácticas humanas y las actividades industriales se están convirtiendo cada vez más en fuentes críticas de contaminación del agua, lo que lleva al deterioro de la calidad del agua subterránea (Ratolojanahary R et al., 2019, p.1).

Entre las principales fuentes de contaminación antropogénica incluyen recipientes de almacenamiento y depósitos de productos petrolíferos, recipientes de almacenamiento o productos químicos, sistemas sépticos, sitios de desechos peligrosos, vertederos, campos agrícolas con grandes cantidades de fertilizantes, pesticidas y otros productos químicos sin absorber (Pal P., 2017, p.1).

Además; la Organización Mundial de la Salud (OMS) informa que tener agua potable segura es un derecho humano aceptado internacionalmente (OMS, 2004). Sin embargo, los recursos de agua subterránea están bajo la constante amenaza de agotamiento y salinización, que es una preocupación mundial (Missi C. y Atekwana E., 2020, p.3). Debido a ello el diseño de un sistema de tratamiento de aguas subterráneas y lixiviados debe ser flexible y considerar la posibilidad de cambiar las

condiciones del campo en el diseño y análisis de costos de alternativas técnica eco amigables y económicamente atractivas (Comar P. y Mukherjee A., 2021, p.3).

La principal herramienta de toma de decisiones al seleccionar una técnica de remediación de aguas subterráneas y lixiviados es una evaluación económica de todas las técnicas viables durante la etapa de planificación de cualquier tipo de plan de remediación y se deben comparar los costos y la efectividad de las diferentes técnicas (De wit M. et al., 2019, p.2).

Entre ellas existe técnicas de fitotransformación; este método utiliza el metabolismo de las plantas para procesar los tejidos internos y externos degradando los contaminantes por absorción de las plantas. Son aplicables en el tratamiento de aguas superficiales y subterráneas (Issaka S. y Ashraf M., 2021, p.1). Pero generalmente, el agua subterránea se trata perforando pozos de recuperación para bombear agua contaminada a la superficie (Fuji H. y Managi S., 2016, p.2). Los enfoques de tratamiento de aguas subterráneas comúnmente utilizados incluyen extracción con aire, filtrado con carbón activado granulado (GAC) y burbujeo de aire. La extracción con aire transfiere los compuestos volátiles del agua al aire (Liu Juan et al., 2016, p.1).

En base a ello y a la realidad problemática explicada se plantean los problemas específicos; siendo en primera instancia el problema general: ¿Cuáles son las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados? Y como problemas específicos se tiene: ¿Cuáles son los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas?, ¿Cuáles son los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea? Y ¿Cuáles es el tratamiento más empleado para la descontaminación de las aguas subterránea y lixiviados?

De acuerdo a ello se obtuvieron los objetivos específicos; indicando en primer lugar el objetivo general: Determinar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados y como objetivos específicos: analizar los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas, definir los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea, por último, identificar los tratamientos más empleados para la descontaminación de las aguas subterránea y lixiviados.

El problema de los lixiviados por la descomposición de la basura u otros factores contamina gradualmente las aguas superficiales y subterráneas siendo el impacto ecológico más severo el riesgo de contaminación del agua subterránea (Aarthi A. et al., 2021, p.1). Siendo la búsqueda de los tratamientos de lixiviados y aguas subterráneas contaminadas esencial para la mejora del medio ambiente. Por ello el presente estudio tiene una justificación teórica y académica; debido a la recolección de diversos estudios a nivel del mundo para realizar la comparación de las técnicas ambientales que ayuden al mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados. Buscando de esta manera fomentar el interés por los futuros investigadores y sirviendo de aporte literario para futuros estudiantes.

## II. MARCO TEÓRICO

El agua subterránea (GW), la parte "invisible" del ciclo hidrológico, está en conexión e intercambio constante de agua con los cuerpos de agua superficiales; los acuíferos de agua subterránea se forman debido a la percolación del fondo de los ríos, lagos, humedales, estuarios y, a cambio, los cuerpos de agua superficial se reponen con los flujos de agua subterránea (Apostolaki Stella et al., 2017, p.3).

Es uno de los recursos naturales más importantes de la Tierra, ya que los sistemas de aguas subterráneas ofrecen una variedad de servicios a la humanidad, ya sea al proporcionar agua que se puede extraer y utilizar, o mediante diversas funciones in situ, como la amortiguación del clima y el mantenimiento de ambientes húmedos (Jac Van 2021, p.280). Constituye la fuente más importante de agua dulce utilizable a escala mundial y se consideran cruciales para el suministro de agua que cubra todas las necesidades y el suministro para la agricultura (Oyeyemi Kehinde et al., 2018, p.1).

Además, el almacenamiento de agua subterránea sostiene ecosistemas de suelos ricos en apoyo de la formación del suelo, proporcionando hábitats para las especies que habitan las aguas subterráneas y las formaciones de la superficie terrestre (Samani S., 2021, p.1).

Pero los recursos hídricos subterráneos de muchos países del mundo se encuentran actualmente en estado crítico debido a la sobreexplotación y las recientes sequías (Hernández Juárez et al., 2019, p.3). La disminución de los niveles de los acuíferos subterráneos ha provocado serias restricciones en más de 404 de las 609 áreas de estudio y un déficit de almacenamiento acumulativo de alrededor de 130 mil millones de metros cúbicos en recursos de aguas subterráneas en Irán (Pino E, et al., 2018, p.1).

Así también, en Europa, el 25% de las aguas subterráneas tiene un estado químico deficiente; donde uno de los principales factores estresantes es la agricultura, donde los nitratos y los productos fitosanitarios (PPP) provocan fallas en el 18% y el 6,5%, respectivamente, de las masas de agua subterránea (por área) (Suciu Nicoleta et al., 2020, p.1).

Los vertederos de desechos representan un problema global, que es más pronunciado en los países en desarrollo debido a la falta de recursos para implementar procedimientos que incluyan la separación y el procesamiento de desechos (Ancic Mari et al., 2020, p.1). Lo que genera, la contaminación del agua subterránea, que puede tener su origen tanto en compuestos antropogénicos (p. Ej., Hidrocarburos) como naturales (p. Ej., Nitrato y arsénico) (Ceconet Daniele et al., 2020, p.2).

Entre otros de los responsables de la adición de Nitrato (Ni) a las aguas subterráneas están los procesos de transporte, que ingresan el metal mediante penetración directa desde la superficie o por adición de agua subterránea contaminada con nitrato (Kwon Eunhye et al., 2021, p.1).

Pero es verídico señalar que los vertederos de desechos sólidos son fuentes abundantes de contaminación de las aguas subterráneas (Brouwer Roy et al., 2018, p.2). Siendo, una de las principales causas de contaminación de las aguas subterráneas en las zonas urbanas es la contaminación por lixiviados que emanan de los vertederos de desechos sólidos municipales (Aboyeji O. y Eigbokhan S., 2016, p.1).

El potencial de generar lixiviados fuertemente contaminados a partir de desechos de vertederos es muy importante, incluso para los pequeños vertederos, y la escala de tiempo se puede medir en décadas o siglos (Kristensen Peter et al., 2018, p.1). Esto indica que los vertederos de desechos sin medidas para controlar la entrada de lixiviados al agua subterránea pueden constituir una fuente de contaminación del agua subterránea mucho después de que haya cesado el vertido (Di Guardo A. y Finizio A., 2016, p.1).

Los vertederos pueden plantear varios problemas ambientales (peligros de explosión, daños a la vegetación, emisiones de polvo y al aire, etc.), pero la contaminación de las aguas subterráneas por lixiviados se considera el más importante (Pertot Llarian et al., 2017, p.2). La descomposición de la materia orgánica por los microorganismos en los vertederos genera lixiviados, cuyo volumen está influenciado por el exceso de agua de lluvia que se filtra a través de las capas de residuos (Ma Yan et al., 2021, p.1).

Como se puede observar en la figura 1, la fluorescencia permitió demostrar que el agua subterránea contaminada con lixiviados contenía materia fluorescente derivada de tintes en la Imagen B; donde la fuga de lixiviados aumenta las concentraciones de sustancias similares a las húmicas, el peso molecular de materia orgánica disuelta (DOM) y la actividad microbiana en las aguas subterráneas aguas abajo; lo que los convierte en indicadores adecuados de la contaminación del agua subterránea.

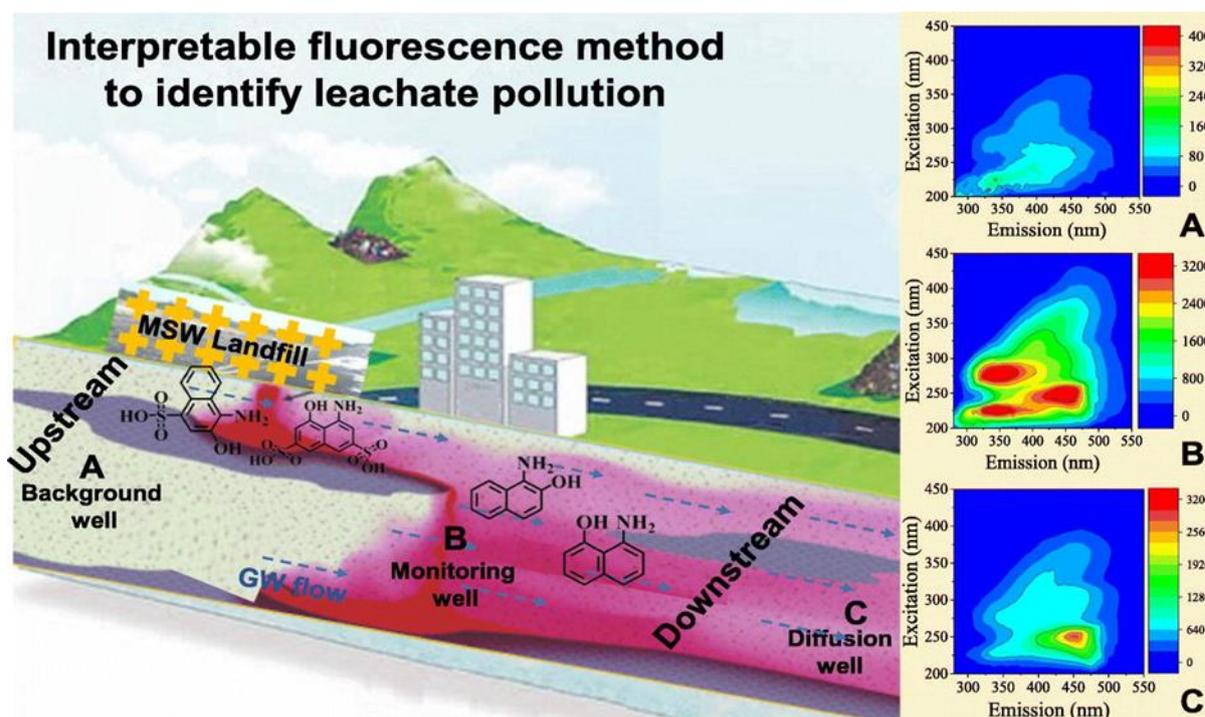


Figura N°1: Método de fluorescencia interpretable para identificar la contaminación por lixiviados

Fuente: Ma Yan et al., 2021

La DOM en el agua subterránea cerca de algún relleno sanitario es más probable que se acumule después del bombeo y la contaminación puede rebotar fácilmente en los medios del acuífero de baja permeabilidad (Jiang Yu et al., 2019, p.1). Lo que podría disminuir significativamente la calidad del agua subterránea e influir en la actividad microbiana (Peng Li et al., 2018, p.2).

Para lo cual, se realizó estadísticas de los parámetros fisicoquímicos analizados de 27 muestras de agua subterránea y su comparación con los estándares de la OMS (2011) para la calidad del agua potable como se ve en la Tabla N°1.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar	Límites máximos deseables de la calidad del agua potable (OMS, 2011)	Porcentaje de muestras que superan los límites de la OMS
pH	7.14	8.04	7,43	0,18	7-8	0 (0)
CE ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ )	329,00	2122.00	841.52	473,31		-
TDS ( $\text{mg} / \text{L}$ )	357,00	1310.00	792.67	304,06	1000,00	33,33 (9)
Ca ( $\text{mg} / \text{L}$ )	24.00	214,00	84,44	63,66		37,07 (10)
Mg ( $\text{mg} / \text{L}$ )	12.00	84,00	43,37	16.45		-
Na ( $\text{mg} / \text{L}$ )	66,00	143,00	108,22	25.57	200,00	0(0)
K ( $\text{mg} / \text{L}$ )	8.00	19.00	12.00	2,71		-
HCO <sub>3</sub> ( $\text{mg} / \text{L}$ )	46,00	162,00	86,26	33,65		-
Cl ( $\text{mg} / \text{L}$ )	93,00	390,00	217,85	102,39	250,00	33,33 (9)
SO <sub>4</sub> ( $\text{mg} / \text{L}$ )	96,00	386,00	240,52	84.09	250,00	40,74 (11)
NO <sub>3</sub> ( $\text{mg} / \text{L}$ )	5,00	31.00	19.59	6,63	50	0 (0)

*Tabla N°1: Estadísticas de los parámetros fisicoquímicos analizados de las 27 muestras de agua subterránea y su comparación con los estándares de la OMS (2011) para la calidad del agua potable.*

*Fuente: Extraído de Kahal Ali et al., 2021*

De acuerdo con la tabla 1 el número entre paréntesis indica el número de muestras que tienen valores superiores a los límites máximos permitidos; donde el 33,33% tiene valores de sólidos disueltos totales (TDS) por encima del límite máximo deseable y el 37% tiene valores de Ca por encima de los límites máximos deseables, mientras que el 33,33% y el 40,74% de las muestras examinadas tenían Cl y SO<sub>4</sub> por encima de los estándares del agua potable.

Además, las concentraciones elevadas de contaminantes nitrogenados en las aguas subterráneas cercanas a los vertederos han generado una preocupación considerable debido a los posibles efectos adversos del nitrato en el ecosistema y la salud humana (Han Zhiyong et al., 2020, p.1).

Se ha informado también, que la contaminación de las aguas subterráneas cerca de los vertederos de diversos países, que se ha asociado con la contaminación por materia orgánica, metales pesados y sales inorgánicas (Wang Xutong et al., 2020, p.3).

Así también, las prácticas agrícolas a menudo implican un uso intensivo e incorrecto de pesticidas y fertilizantes; estos productos químicos pueden filtrarse a través del

perfil del suelo y contaminar las aguas subterráneas, incluida el agua potable, se muestran que el uso inadecuado de los productos fitosanitarios (PPP) para los cultivos puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas (Marsala Zambito et al., 2020, p.1). (Ver Figura N°2).



*Figura N°2: Transporte de productos fitosanitarios hacia las aguas subterráneas*

*Fuente: Extraído de Marsala Zambito et al., 2020*

Así también; el impacto ambiental del vertido de residuos sólidos urbanos (RSU) suele ser consecuencia de la escorrentía de los compuestos nocivos en las aguas superficiales y subterráneas, lo que en última instancia conduce a la contaminación del agua como resultado de la percolación de los lixiviados (Li Leiming et al., 2018, p.2).

Debido a la realidad problemática expuesta, el impacto de los lixiviados en las aguas subterráneas y otros recursos hídricos ha atraído mucha atención debido a su devastadora importancia medioambiental, la migración de lixiviados desde los vertederos supone un alto riesgo para los recursos hídricos subterráneos si no se gestiona satisfactoriamente (Zeng Dan et al., 2021, p.5). Aplicándose diferentes tecnologías de tratamiento a la remediación de GW: físicas, químicas y biológicas, con tasas de éxito variables (Downg Haoran et al., 2019, p.1).

El diseño del sistema de tratamiento de aguas subterráneas y lixiviados debe ser flexible y considerar la posibilidad de cambiar las condiciones del campo en el diseño y análisis de costos de alternativas técnica y económicamente atractivas (Nguyen Thi et al., 2020, p.1). Por ello, es preciso destacar que gran parte de las investigaciones se están centrando en el desarrollo in situ de tratamientos, que generalmente se consideran más sostenibles para la protección de este recurso (Favara Paul et al., 2017, p.2). Siendo la biorremediación in situ (ISB) térmicamente en acuíferos y aguas subterráneas está siendo considerado una de las técnicas más prometedoras, ya que

la aplicación de calor da como resultado una rápida eliminación de diversos contaminantes (Némecek Jan et al., 2018, p.1).

El biocarbón es un sorbente carbonoso sostenible que se puede producir localmente utilizando residuos agrícolas y de madera, en comparación con los carbones activados tradicionales que generalmente se producen a partir de combustibles fósiles (Lu Dingnan et al., 2020, p.3). El biocarbón se ha aplicado para una amplia gama de aplicaciones ambientales, como la remediación de aguas subterráneas y suelos (p. Ej., Pesticidas, metales pesados) y enmiendas (Sormo Erlend et al., 2021, p.5).

El biocarbón (BC) ha demostrado ser un material eficaz, respetuoso con el medio ambiente y ampliamente aplicable para la rehabilitación y ampliamente aplicable para la remediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas (Beckers Felix et al., 2019, p.2). Siendo propuestos los materiales carbonosos como carbones activados, carbones y biocarros, derivados de biomasa lignocelulósica como materiales prometedores para eliminar contaminantes del agua subterránea (Danish y Ahmad, 2018, p.1).

Los carbones comerciales generalmente se activan físicamente con vapor, CO<sub>2</sub>, aire o mezclas de gases, o se activan químicamente mediante la adición de sales de zinc, KOH o H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Wang et al., 2017, p.3).

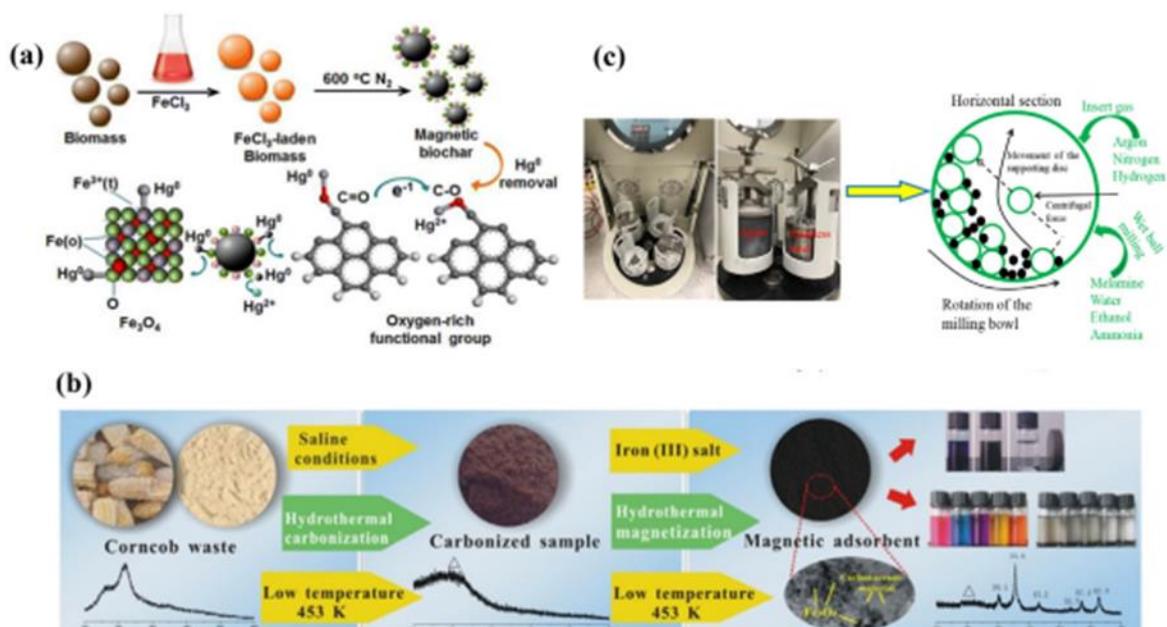


Figura N°3: Preparación del compuesto BC/Fe mediante 3 procesos térmicos

Fuente: Lyu Honghong et al., 2020

En la figura 3 se preparó un BC magnético utilizando un proceso térmico fácil de una sola olla. El jugo de cáscara de plátano tratado con  $\text{FeSO}_4$  fue tratado hidrotérmicamente a 180 C durante 6 h y calcinado a 600 C durante 2 h bajo una atmósfera de  $\text{N}_2$ ; donde el proceso térmico facilitó la generación de PFRs y eliminó la interferencia de los intermediarios orgánicos. La imagen (a) muestra la pirólisis directa, la imagen (b) la carbonización hidrotérmica y la imagen (c) el procedimiento de la tecnología de molienda de bolas.

Las sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS) coexisten en las aguas subterráneas con otros contaminantes; donde el comportamiento y el mecanismo de sorción de los PFAS se basan principalmente en las características del sorbente, las propiedades de los PFAS y las matrices de las aguas subterráneas (Xiao Xin et al., 2017, p.1). Respecto a Rong Xing et al., (2019, p.6) la tecnología de carbonización hidrotérmica supera las desventajas de la tecnología de pirólisis directa.

De acuerdo con Nemecek Jan et al., (2018, p.1) en su investigación realizó la biorremediación in situ térmicamente, donde el sistema comprendía bombeo, calentamiento y posterior inyección de agua subterránea contaminada con el objetivo de alcanzar una temperatura del acuífero de 20 a 30 °C; inyectando un sustrato fermentable (suero) en lotes separados; como se puede visualizar en la figura N°4.

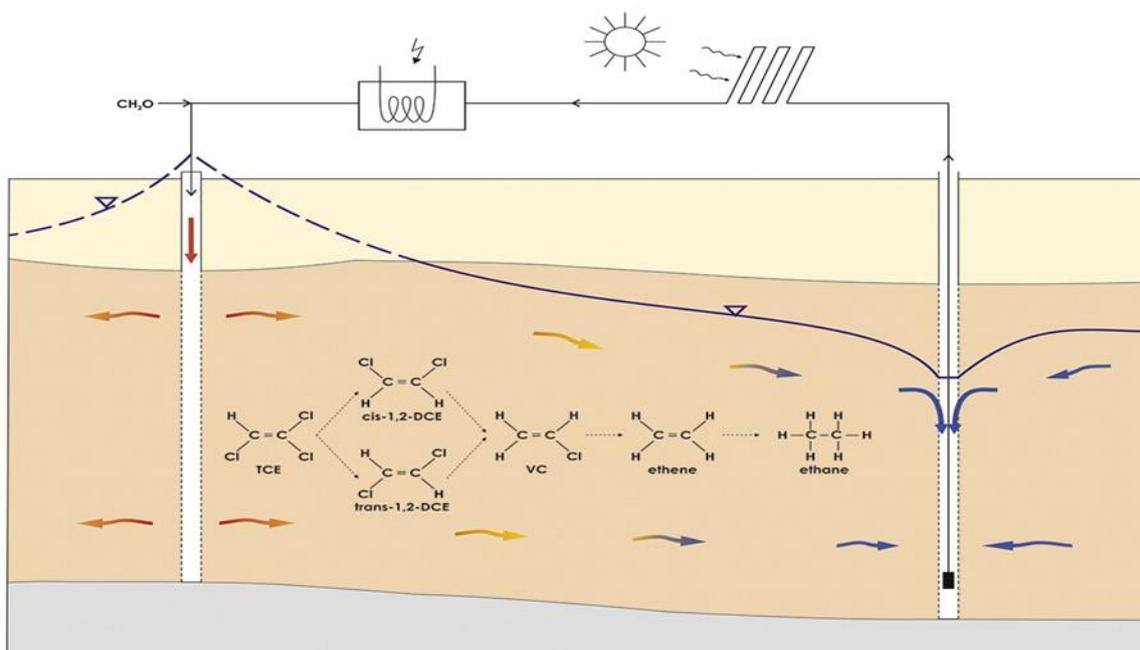


Figura N°4: Proceso de tratamiento in situ térmico por estimulación y calentamiento  
Fuente: Extraído de Nemecek Jan et al., 2018

Mediante el proceso realizado en la figura 4 nos señala que el calentamiento del acuífero tratado aceleró significativamente el proceso de tratamiento, pero solo en el caso de un sustrato abundante.

De acuerdo a los 80 antecedentes obtenidos se exponen los 15 más resaltantes respecto al tratamiento térmico para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados.

*Tabla N°2: Antecedentes de los tratamientos térmicos aplicados a contaminantes de aguas subterráneas*

<b>Tratamiento térmico</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Autor</b>
Biorremediación in situ térmicamente	El sistema comprendía bombeo, calentamiento y posterior inyección de agua subterránea contaminada con el objetivo de alcanzar una temperatura del acuífero de 20 a 30 °C. Se inyectó un sustrato fermentable (suero) en lotes separados.	Disolventes clorados	Nemecek Jan et al., 2018
Biocarbón de hoja de perilla	Biocarros derivados de hojas de perilla producidos a 300 y 700 ° C en aguas subterráneas.	Arsenito Arsenato	Niazi Nabeel et al., 2018
Biocarros modificados	Se aplicaron técnicas basadas en sincrotrón para caracterizar la distribución espacial y la especiación de Fe en biocarros modificados por FeCl <sub>3</sub> o FeSO <sub>4</sub> y pirolizados a 300 °C, 600 °C y 900 °C, respectivamente.	As (V), As (III), Cr (VI) y Hg (II)	Feng Yu et al., 2020
Hierro y biocarbón	El sistema de remediación se construyó bombeando agua subterránea contaminada con Cr en el suelo contaminado superior ronda tras ronda, permitiendo que el compuesto de hierro-biocarbón (Fe-BC) preaplicado en la capa superior del suelo estabilice el Cr tanto del agua subterránea como del suelo.	Cr	Chen Xiang et al., 2021
Biocarbón con hierro de valencia cero como material para la nano biorremediación	Se probó un nuevo compuesto nano-hierro-biocarbón (nZVI / BC) para remediar el agua subterránea contaminada. seguido de etenos clorados	Micro organismos residentes	Semerad Jaroslav et al., 2021

	(CE) transformados por bioestimulación.		
Compuesto magnético en biocarbón de madera de eucalipto	La madera de eucalipto local se convirtió en carbón vegetal mediante un sistema de carbonización (Pirólisis), y las partículas de óxido de Fe se sintetizaron en el carbón vegetal, (también se ha utilizado un carbón comercial como material de contraste).	Arsénico	Fuentes Amalia et al., 2021
Adsorción por nanopartículas de óxido de hierro con soporte de biocarbón de silicio	Se realizó el experimento por lotes, variando los parámetros como el pH, el tiempo de contacto del adsorbente y la dosis, la temperatura y la concentración inicial.	Uranio (VI)	Sen Kamalesh et al., 2021
Inmovilización contrastante de As (III) abiótico por fracciones disueltas y no disueltas de biocarbón	Se examina los impactos de las fracciones no disueltas y disueltas de biocarbón reducido, sobre la inmovilización de As (III) en ausencia / presencia de Ca <sup>2+</sup> (50 mM) a pH 11,5 en condiciones anóxicas.	Ca <sup>2+</sup>	Zhong Delai et al., 2020
Fibras de biocarbón decoradas con matriz de nanoagujas de óxido de hierro	Se prepararon adsorbentes de fibras de biocarbón decoradas con matrices de nanoagujas de óxido de hierro (Fe-NN / BF) mediante una simple reacción hidrotermal.	Arsénico	Wei Yuanfeng et al., 2019
Biocarbón	Diseño de biocarros derivados de tallos de maíz (S) y mazorcas de maíz (C) con grupos funcionales que contienen oxígeno como soporte basado en carbono para el hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI).	Tricloroetileno	Li Zhe et al., 2020
Hierro nanovalente cero con biocarbón	Se preparó compuestos nanovalentes de hierro / biocarbón (nZVI / BC) para eliminar el nitrato del agua subterránea con productos inofensivos.	Nitratos y dinitrógeno	Wei Anlei et al., 2018
Biocarros funcionalizados	Se exploró los mecanismos a través de los cuales Pb (II) y V (V) son eliminados en procesos de remoción de metales simples y binarios mediante biocarros dopados con oxígeno, nitrógeno y azufre, considerando también las técnicas cinéticas y de caracterización.	Plomo y vanadio	Wu Beibei et al., 2021

Adsorción de fluoruro mediante biocarbón	Se investigaron los factores que afectan la eliminación de fluoruro, incluido el pH, la dosis de adsorbente, la concentración inicial y el tiempo de contacto.	Fluoruro	Sadhu Mohini et al., 2021
Carbón activado granular injertado con nitrógeno cuaternario	Se utilizaron pruebas de isothermas por lotes y pruebas rápidas de columna a pequeña escala (RSSCT) para evaluar el rendimiento de estas variantes en la eliminación de PFOA de las aguas subterráneas.	Per fluorooctanoato	Sun H., Cannon D. y He X., 2020
Carbón activado granular injertado con nitrógeno cuaternario	Se empleó oxidación con ácido nítrico, tratamiento térmico con amoníaco y cuaternización con yoduro de metilo.	Trifluoroacetato	Sun H., Cannon D. y He X., 2019

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

Este trabajo de investigación presenta un método cualitativo, ya que, los investigadores cualitativos buscan la máxima variación al seleccionar participantes y generar datos. Se buscan deliberadamente participantes que, tengan experiencia del fenómeno bajo investigación y puedan responder a la pregunta de investigación, por lo general y los resultados se informan en un estilo literario rico (Erlingsson C. y Brysiewicz P., 2012, p.9). Dicho ello se indica que el presente estudio emplea un método cualitativo con diseño narrativo; ya que se busca analizar los fenómenos obtenidos por los investigadores que se enfoquen en la búsqueda de las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas.

Así también es de tipo aplicada; ya que, la investigación aplicada consiste sobre todo en determinar la eficacia de las soluciones para resolver un problema, a menudo es conveniente comparar los resultados con otras soluciones, como encontrar una solución óptima es un reto, siempre hay diferentes enfoques para resolver un problema (Edgar T. y Manz D., 2017, p.271).

El diseño de este estudio es narrativo de tópico, siendo el análisis narrativo referido a un conjunto de métodos analíticos para interpretar textos o datos visuales que tienen una forma histórica (Figgou L. y Pavlopoulos V., 2015, p.544). Así también, el análisis narrativo se ocupa de la estructura, el contenido y la función de las historias en la comunicación escrita y oral. De acuerdo a ello, los análisis de historias de vida autobiográficas brindan la oportunidad de abordar explícitamente la temporalidad y la reconstrucción individual de los procesos que se siguieron para abordar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas.

#### **3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización**

Las categorías que se presentan en la tabla N°3 detallan las categorías y sub categorías generadas por los objetivos específicos y problemas específicos; que detallan las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas.

Tabla N°3: Matriz de categorización apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Criterio 1	Criterio 2
<b>Analizar los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas</b>	¿Cuáles son los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas?	Parámetros influyentes en contaminación  (Downg Haoran et al., 2019, p.1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación difusa</li> <li>• Contaminación localizada</li> </ul> (Li Leiming et al., 2018, p.2)	De acuerdo a la contaminación difusa	De acuerdo a la contaminación localizada
<b>Definir los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea</b>	¿Cuáles son los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea??	Índices de calidad del agua  (Han Zhiyong et al., 2020, p.1).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WQI</li> <li>• GWQI</li> <li>• IWQI</li> </ul> (Rong Xing et al, 2019, p.6)	De acuerdo a los lixiviados	De acuerdo a la introducción de sustancias extrañas
<b>Identificar los tratamientos más empleados para la descontaminación de las aguas subterránea y lixiviados.</b>	¿Cuáles es el tratamiento más empleado para la descontaminación de las aguas subterránea y lixiviados?	Métodos de tratamientos  (Xiao Xin et al., 2017, p.1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inyección</li> <li>• El biocarbón</li> <li>• Activación térmica</li> </ul> (Nemecek Jan et al., 2018, p.1)	De acuerdo a la característica del sorbente	De acuerdo a las propiedades de los contaminantes

### **3.3. Escenario de estudio**

El escenario de estudio en esta revisión sistemática no cuenta con un entorno físico donde se realizarán los estudios; por ende, se toma como escenario a los laboratorios o campos donde los autores de las literaturas estudiadas realizaron de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados; siendo empleado para ello diversos artículos a nivel nacional e internacional.

### **3.4. Participantes**

Los participantes son todas las fuentes son las revistas científicas extraídas de bases de datos como bibliotecas electrónicas donde se obtienen fuentes indizadas como artículos de investigación científicas; siendo algunas de las revistas académicas como: Scielo, Scopus, Sciencedirect, dialnet, entre otros a nivel nacional e internacional.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

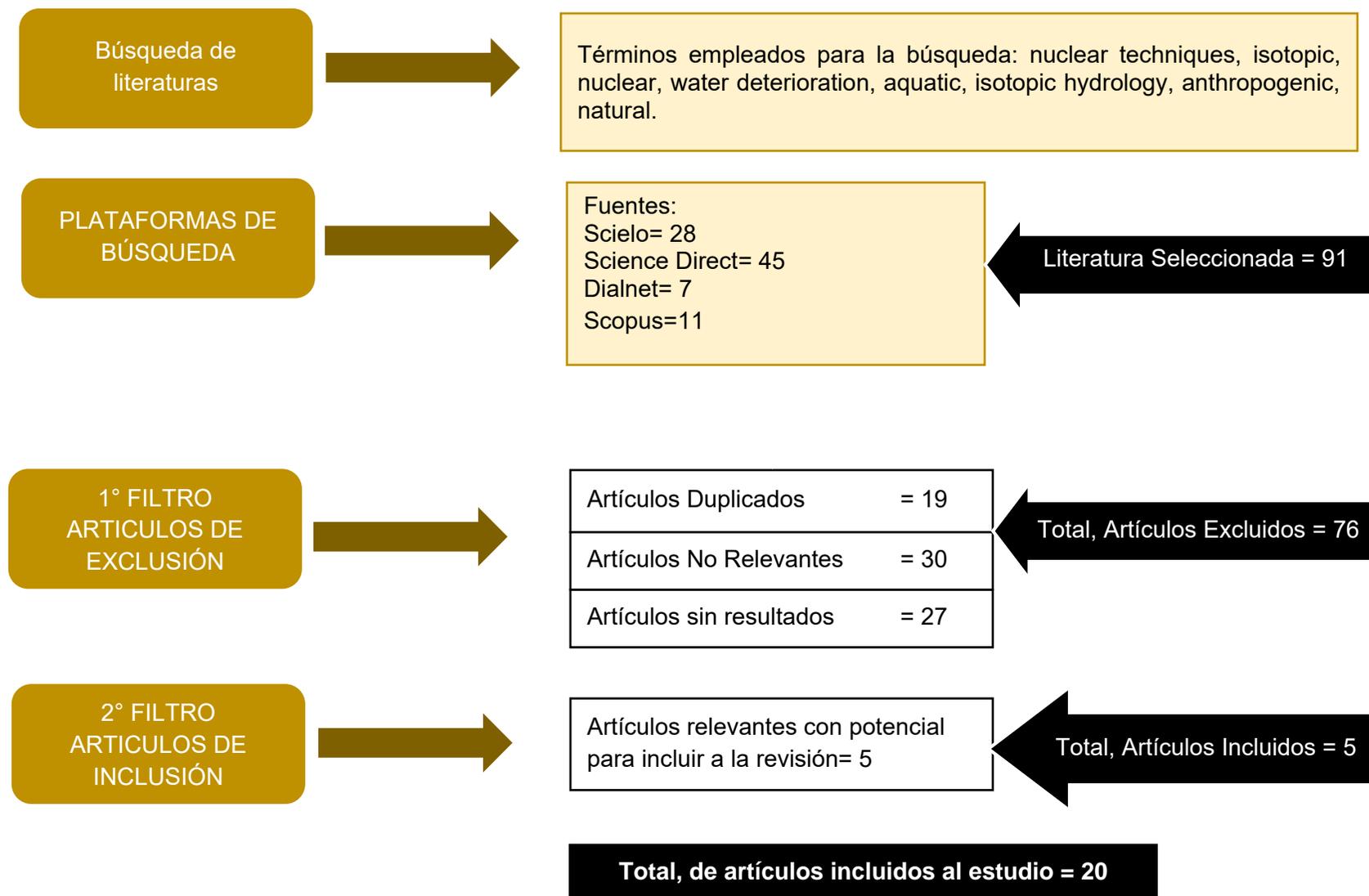
El presente estudio emplea la técnica de análisis documental y como el presente estudio presenta un diseño narrativo se recomienda utilizar una ficha de recolección de datos; siendo empleado mostrado en el Anexo 1 la ficha de recolección propuesta.

De acuerdo a Patton M., (2014, p.4). el análisis de contenido busca organizar y obtener significado de los datos recopilados y sacar conclusiones realistas de ellos. Esta técnica de análisis se emplea para describir el contenido e información del documento original, con el fin de agilizar su búsqueda y recuperación, sin perder la información sustancial que brinda el autor.

Debido a ello se emplea la ficha de análisis; una hoja en la cual se registra y procesa la información relevante de los documentos originales; siendo detallados datos como: nombre del documento, nombre del autor, año de publicación, página, título, objetivos, problemas y resultados.

### **3.6. Procedimiento**

**Gráfico N°1: Procedimiento de información**



### **3.7. Rigor científico**

El rigor científico aplica métodos para garantizar la calidad de un estudio, una metodología, resultados y la información de los datos proporcionados para lo cual hace uso de criterios científicos; siendo empleado en el presente estudio los siguientes 4:

La fiabilidad y la validez son términos empleados para estimar la calidad de la investigación; ya que, lo bueno de un método, técnica o prueba utilizada; es la consistencia de una medida, y la validez a la precisión de una medida. Y es empleado en el estudio, en las fuentes indizadas de las que se extrajeron los documentos como artículos científicos, brindando así la calidad de la información extraída. Transferibilidad, describir no sólo el comportamiento y las experiencias, sino también su contexto, de modo que el comportamiento y las experiencias cobren sentido para una persona ajena. Este criterio se emplea cuando se trasladó la información de los resultados de otros investigadores para determinar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas. Fiabilidad o confirmación es el método mediante el cual diversos investigadores van a poner a prueba una técnica o método y obtendrán el mismo resultado. Este criterio se observa en la comparación de los artículos incluidos al estudio en el cual se discutirán los resultados similares o parecidos de los diversos autores que se enfoquen en los diversos tratamientos térmicos. Y finalmente la consistencia; se enfoca en la parcialidad de los estudios y ello es obtenido mediante la comparación de los resultados de diversos autores (Arias, M. y Giraldo, C., 2011, p.502-503).

### **3.8. Método de análisis de información**

El procedimiento que se seguirá será en base a las siguientes categorías y sub categorías plantadas en la tabla N°3:

- Categorías: parámetros influyentes en contaminación, índice de calidad del agua subterránea alterada y Métodos de tratamientos.
- Sub categorías: (1) Contaminación difusa, contaminación localizada; (2) WQI, GWQI, IWQI; (3) inyección, biocarbón y activación térmica.

Siendo aplicado el método de estratificación; que es utilizado para conglomerar investigaciones mediante los parámetros contaminantes, las propiedades fisicoquímicas alteradas y el tratamiento más empleado para la descontaminación de las aguas subterráneas y lixiviados.

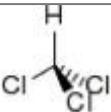
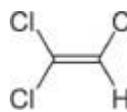
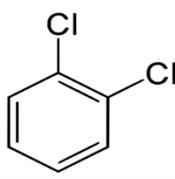
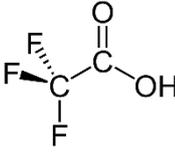
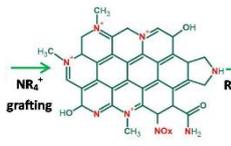
### **3.9. Aspectos éticos**

En este estudio de revisión sistemática se respetó los lineamientos planteados por la Universidad César Vallejo siguiendo la guía de productos observables; así como la debida cita de los autores que fueron utilizados para el aporte del estudio; ello mediante la Norma ISO-690 y 690-2; demostrando así el cumplimiento de los rigores de calidad del estudio.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al estudio se busca determinar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados para lo cual se plantearon resolver 3 objetivos específicos; siendo el primero mostrado en la tabla N°4 donde se analiza los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas:

Tabla N°4: Parámetros contaminantes de las aguas subterráneas

Contaminantes	Abreviatura	Estructura	Investigador	Tipo de contaminación
Triclorometano	TCM		Nemecek Jan et al., 2018	Contaminación localizada
1,1,2-Tricloroeteno	1,1,2-TCE	$\text{Cl} - \text{C} = \text{CH} - \text{Cl}$   Cl	Maldaner Carlos H. et al., 2021	Contaminación localizada
Tricloroetileno	TCE		Della Puppa Loic et al., 2020	Contaminación localizada
			Li Zhe et al., 2020	Contaminación localizada
			Guo Liangliang et al., 2021	Contaminación localizada
1,2-diclorobenceno	1,2-DCB		Dobosy Péter et al., 2018	Contaminación difusa
Trifluoroacetato	TFA, CF <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>		Sun H., Cannon D. y He X., 2019	Contaminación difusa
Perfluorooctanoato o Ácido perfluorooctanoico	PFOA		Sun H., Cannon D. y He X., 2020	Contaminación difusa
Iones Fe (II)	-	-	Nilavazhagi A. y Felixkala T., 2021	Contaminación difusa
Amonio		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	An Qiang et al., 2021	Contaminación localizada

Dinitrógeno		$N \equiv N$	Wei Anlei et al., 2018	Contaminación difusa
Fluoruro		F-	Sadhu Mohini et al., 2021	Contaminación difusa
Metales pesados		Cr	Chen Xiang et al., 2021	Contaminación difusa y Contaminación localizada
		As	Fuentes Amalia et al., 2021	Contaminación localizada
		U (VI)	Sen Kamalesh et al., 2021	Contaminación localizada
		As (III)	Zhong Delai et al., 2020	Contaminación localizada
		As (V) As (III)	Wei Yuanfeng et al., 2019	Contaminación localizada
		Pb (II) V (V)	Wu Beibei et al., 2021	Contaminación difusa y Contaminación localizada

De acuerdo a la tabla 4 los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas son en un 60% por contaminación localizada, donde las fuentes determinadas son las actividades industriales, vertedero, explotación minera, entre otros.

Eso es corroborado por Nemecek Jan et al., 2018, Maldaner Carlos H. et al., 2021, Della Puppa Loic et al., 2020, Li Zhe et al., 2020, Guo Liangliang et al., 2021, An Qiang et al., 2021, Chen Xiang et al., 2021, Fuentes Amalia et al., 2021, Sen Kamalesh et al., 2021, Zhong Delai et al., 2020, Wei Yuanfeng et al., 2019, Wu Beibei et al., 2021.

Los contaminantes que más predominan son los metales pesados y los etenos clorados; siendo esto respaldado por Blum Philipp et al., (2021, p.1) quien indica que los etenos clorados son los contaminantes más comunes de las aguas subterráneas. Esto es confirmado por Nemecek Jan et al., 2018 y Maldaner Carlos H. et al., 2021 quienes presentaron contaminación localizada con la presencia de los etenos clorados Triclorometano y 1,1,2-Tricloroetano. Así también el Tricloroetileno fue un contaminante encontrado por 3 investigadores en aguas subterráneas, siendo ello

demostrado por Della Puppa Loic et al., 2020, Li Zhe et al., 2020, Guo Liangliang et al., 2021.

Además, Siggins Alma et al., (2021, p.1) brinda soporte a lo anteriormente dicho ya que señala, que el tricloroetileno (TCE) es un carcinógeno humano que se encuentra comúnmente en el lixiviado de los vertederos; y los penachos de lixiviados contaminados al agua subterránea contaminándola y convirtiéndose en una de las causas más comunes de contaminación de estas aguas.

Por otro lado, los etenos clorados también se encuentran en presencia de la contaminación difusa; siendo los 1,2-diclorobenceno y Trifluoroacetato siendo confirmado por Dobosy Péter et al., 2018 y Sun H., Cannon D. y He X., 2019 respectivamente.

Por otro lado, los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea fueron sub categorizados y detallados en la tabla 5:

*Tabla N°5: Índice para determinar la calidad del agua subterránea*

Ecuación Parámetro	Índice		
	WQI	GWQI	IWQI
	$WQI = \sum_{i=1}^n SI_i$	$GWQI = \sum_{i=0}^n SI_i$	$IWQI = \sum_{i=1}^n SI_{ij}$
NO <sub>3</sub>	X		X
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	X		
Cl <sup>-</sup>	X	X	X
TDS	X	X	X
BOD	X		
Cd	X		X
Cr	X		
Ni	X		
Pb	X		
K		X	X
Na		X	X
Ca		X	X
Mg		X	X
SO <sub>4</sub>		X	X

pH		X	X
----	--	---	---

Fuente: Modificado de Ahn Jun-Young. Et al., 2021

Los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea de acuerdo con Ahn Jun-Young. Et al., (2021, p.6) son clasificados en WQI, GWQI y IWQI; los cuales presentan 15 parámetros en las que se aplican las ecuaciones de los 3 índices más relevantes a nivel mundial.

El Índice de Calidad del Agua (WQI) se ha utilizado recientemente para evaluar la calidad de los recursos hídricos y del agua subterránea para beber (Sutradhar S. y Mondal P., 2021, p.1).

Además, la confianza en la evaluación WQI es necesaria para la toma de decisiones; donde el desarrollo de WQI implica varios pasos que algunos de ellos han asociado con las incertidumbres (Nayak Jyotiprakash G. et al., 2021. P.2). Las fuentes de incertidumbre como el muestreo de la calidad del agua, la variabilidad de la medición y los sesgos del operador se estudian previamente, mientras que la incertidumbre asociada a los pesos asignados de los parámetros de calidad para calcular el WQI rara vez se estudian y rara vez se evalúan (Aladejana Jamiu A. et al., 2021, p.1).

Esto es apoyado por Seifi Akram et al., (2020, p.1) quien señala que la aplicación de este índice en proyectos prácticos y toma de decisiones requiere un esfuerzo considerable para la ponderación adecuada de los parámetros de calidad para tener una evaluación confiable de la calidad de los recursos hídricos.

Por último, los tratamientos más empleados para la descontaminación de las aguas subterráneas y lixiviados son determinantes para identificar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas.

*Tabla N°6: Método de tratamiento térmico*

<b>Tipo de tratamiento</b>	<b>Característica</b>	<b>% de eliminación</b>	<b>Autor</b>
Biochar	Tratamiento exotérmico mediante Adsorción con carbono derivado del tratamiento térmico / químico de biomasa de desechos agrícolas.	Adsorción del 266,9 mg / g (81%)	Nilavazhagi A. y Felixkala T., 2021

Inyección de fluido	inyección de un trazador conservador en condiciones de gradiente forzado que es típico de las inyecciones de fluido de remediación in situ.	89% de eliminación	Maldaner Carlos H. et al., 2021
Biochar	biocarros de pirólisis de madera de álamo (biochar P) y té (biochar T)	65% de adsorción	Della Puppa Loic et al., 2020
Biochar	biocarbón modificado (MBC) pirolizado de la cáscara de maní	Capacidad de adsorción máxima: $q_e = 9.02 \text{ mg / g}$ (92%)	An Qiang et al., 2021
Activación térmica	Tratamientos con ferrato y persulfato activado térmicamente	39%	Dobosy Péter et al., 2018
Inyección de agua caliente	Se inyectó un sustrato fermentable (suero) en lotes separados.	96%	Nemecek Jan et al., 2018
Biocarros modificados pirolizados	Biocarros modificados por $\text{FeCl}_3$ o $\text{FeSO}_4$ y pirolizados a 300, 600 y 900 ° C	Eliminación de 42,0%, 62,5%, 19,6% y 97,0%, respectivamente, a todo el 99,9%	Feng Yu et al., 2020
Biocarbón	Agua subterránea contaminada con Cr se bombea en el suelo contaminado superior, permitiendo que el compuesto de hierro-biocarbón (Fe-BC) preaplicado en la capa superior del suelo estabilice el Cr del agua subterránea	71%	Chen Xiang et al., 2021
Biocarbón	Se elaboró carbón vegetal mediante pirólisis	50 $\mu\text{g L}^{-1}$ (75%)	Fuentes Amalia et al., 2021
Biocarbón	Se realizó un proceso de adsorción mediante la carbonización con adición química de silicio.	99,81%	Sen Kamalesh et al., 2021
Biocarbón	Introducción del carbono negro en las aguas subterráneas	89,6%	Zhong Delai et al., 2020

	a través de la remediación in situ		
Fibras de biocarbón	Se prepararon adsorbentes de fibras de biocarbón decoradas con matrices de nanoagujas de óxido de hierro (Fe-NN / BF) mediante una simple reacción hidrotermal.	As (V): 10,4% As (III): 22,8%	Wei Yuanfeng et al., 2019
Biocarbón	Biorremediación de aguas subterráneas in situ a través de procesos de oxidación avanzados (AOP)	Eliminación del 100% en 20 min	Li Zhe et al., 2020
Biocarbón	Compuestos nanovalentes de hierro / biocarbón (nZVI / BC)	97%	Wei Anlei et al., 2018
Biocarbón funcionalizado	biocarros dopados con oxígeno, nitrógeno y azufre	Capacidad de adsorción de ~ 400 mg / g para Pb (II) y 175 mg / g para V (V). 80% 70%	Wu Beibei et al., 2021
Biocarbón	Corteza de sandía (Citrullus lanatus) Biochar (WMRBC) por su potencial de defluoración como proceso exotérmico espontáneo.	Capacidad de desfluoración 9,5mg/g (93%).	Sadhu Mohini et al., 2021
Carbón activado	Carbón activado granular injertado con nitrógeno cuaternario	73%	Sun H., Cannon D. y He X., 2020
Carbón activado	Carbón activado granular injertado con nitrógeno cuaternario	89,5%	Sun H., Cannon D. y He X., 2019
Inyección	Inyección por gravedad en el suministro de hierro de valencia cero a nanoescala (NZVI) a las aguas subterráneas contaminadas.	74,5%	Ahn Jun-Young. Et al., 2021
Inyección	Bombas de calor geotérmicas	85%	Guo Liangliang et al., 2021

De acuerdo al estudio realizado; 15 de los 20 investigadores que fueron estudiados a nivel mundial emplearon el biochar como método de tratamiento térmico para la eliminación de contaminantes en aguas subterráneas y los lixiviados.

Esto es demostrado por Nilavazhagi A. y Felixkala T., 2021; quien empleó el tratamiento exotérmico mediante adsorción con carbono derivado del tratamiento térmico / químico de biomasa de desechos agrícolas; siendo el porcentaje que obtuvo de 81%; esto también es comprobado por An Qiang et al., 2021, quien elaboró biocarbón modificado (MBC) pirolizado de la cáscara de maní obteniendo una capacidad de adsorción máxima del 92% en el agua subterránea contaminada.

De igual manera Feng Yu et al., 2020 y Sen Kamalesh et al., 2021 realizaron un proceso de adsorción de los contaminantes presentes en el agua por lixiviados; obteniendo porcentajes de adsorción por la carbonización con aditivos químicos, en un 99,9% y 99,81% respectivamente.

Siggins Alma et al., (2021, p.1) en su estudio empleó 2 tipos de biocarros; donde ambos observaron una eliminación de tricloroetileno  $\geq 99,7\%$ . Lo que estos datos demuestran, es que, el biocarbón de material de desecho puede ser capaz de soportar una biopelícula de clorante para promover la biorremediación del tricloro etileno y otros contaminantes.

Los investigadores que apoyan lo anteriormente dicho son: Nilavazhagi A. y Felixkala T., 2021, Della Puppa Loic et al., 2020, An Qiang et al., 2021, Feng Yu et al., 2020, Chen Xiang et al., 2021, Fuentes Amalia et al., 2021, Sen Kamalesh et al., 2021, Zhong Delai et al., 2020, Wei Yuanfeng et al., 2019, Li Zhe et al., 2020, Wei Anlei et al., 2018, Wu Beibei et al., 2021, Sadhu Mohini et al., 2021, Sun H., Cannon D. y He X., 2020, Sun H., Cannon D. y He X., 2019.

Pero ello es refutado por Della Puppa Loic et al., 2020 quien obtuvo un 65% de adsorción cuando utilizó biocarros de pirólisis de madera y té.

Ello da lugar a lo Nemecek Jan et al., 2018 y Guo Liangliang et al., 2021 quienes utilizaron como método de tratamiento para la descontaminación de aguas subterráneas a la inyección como tratamiento térmico; siendo obtenido por Nemecek Jan et al., 2018 un 96% de purificación del agua subterránea y un 85% para Guo Liangliang et al., 2021.

De acuerdo con Nilavazhagi A. y Felixkala T., 2021 en la tabla 7 la separación termodinámica del ion Fe (II) por adsorbentes fue un proceso exotérmico, factible, espontáneo y utilizable mediante técnicas adecuadas para erradicar los contaminantes del agua subterránea.

## V. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se puede llegar buscando determinar las características de los tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y lixiviados mediante la recopilación de estudios a nivel mundial son los siguientes:

- ❖ Los parámetros contaminantes de las aguas subterráneas son en un 60% por contaminación localizada, donde las fuentes determinadas son las actividades industriales, vertedero, explotación minera, entre otros. Los contaminantes que más predominan son los metales pesados y los etenos clorados.
- ❖ Los índices que se utilizan para estudiar la calidad del agua subterránea son clasificados en WQI, GWQI y IWQI; los cuales presentan 15 parámetros en las que se aplican las ecuaciones de los 3 índices más relevantes a nivel mundial. Siendo el más empleado por los diversos investigadores el WQI que viene a ser el Índice de Calidad del Agua y se viene utilizado recientemente para evaluar la calidad de los recursos hídricos y del agua subterránea para beber.
- ❖ El tratamiento más empleado para la descontaminación de aguas subterráneas por lixiviados es el tratamiento térmico y tratamiento exotérmico mediante adsorción con carbono derivado del tratamiento térmico / químico de biomasa de desechos agrícolas.

## VI. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se brindan en este estudio son de maneras académicas; con el presente estudio, esperando generar interés por los lectores para que realicen estudios prácticos buscando la mejora de la calidad del agua subterránea, produciendo beneficios de uso directo para la sociedad (por ejemplo, agua potable limpia y segura) y los ecosistemas que dependen del agua subterránea.

- ❖ Es necesario desarrollar estudios experimentales empleando otro tipo de tratamientos térmicos como la inyección, ya que, aunque ha sido utilizado en menor cantidad los resultados son mayores al 90%.
- ❖ Es preciso realizar la degradación del TCE, ya que es una de las mayores causas de contaminación del agua subterránea por lixiviados.
- ❖ Realizar estudios evaluando como el aumento de las temperaturas puede acelerar la biorremediación de los sitios contaminados en las aguas subterráneas por etenos clorados.

## REFERENCIAS

1. AARTHI, A., et al. Evaluating the detection efficacy of advanced bimetallic plasmonic nanoparticles for heavy metals, hazardous materials and pesticides of leachate in contaminated groundwater. *Environmental Research*, 2021, p. 111590. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111590>
2. ARIAS, María y GIRALDO, Clara. El rigor científico en la investigación cualitativa. *Revista Investigación y Educación en Enfermería*, Colombia, 2011, 29(3): 500-514pp. ISSN: 0120-507. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1052/105222406020.pdf>
3. ABOYEJI, Olatunji Sunday; EIGBOKHAN, Stephen Femi. Evaluations of groundwater contamination by leachates around Olusosun open dumpsite in Lagos metropolis, southwest Nigeria. *Journal of environmental management*, 2016, vol. 183, p. 333-341. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.002>
4. AHN, Jun-Young, et al. Field-scale investigation of nanoscale zero-valent iron (NZVI) injection parameters for enhanced delivery of NZVI particles to groundwater. *Water Research*, 2021, vol. 202, p. 117402. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117402>
5. ALADEJANA, Jamiu A., et al. Groundwater quality index as a hydrochemical tool for monitoring saltwater intrusion into coastal freshwater aquifer of Eastern Dahomey Basin, Southwestern Nigeria. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 13, p. 100568. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100568>
6. AN, Qiang, et al. Ammonium removal from groundwater using peanut shell based modified biochar: Mechanism analysis and column experiments. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, vol. 43, p. 102219. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102219>
7. ANČIĆ, Mario, et al. PHYSICO chemical properties and toxicological effect of landfill groundwaters and leachates. *Chemosphere*, 2020, vol. 238, p. 124574. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124574>

8. APOSTOLAKI, Stella, et al. Freshwater: The importance of freshwater for providing ecosystem services. En Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12117-7>
9. Apostolaki, S., Duffy, A., 2017. Amenity: Delivering value for society. In: Charlesworth, S.M., Booth, C.A. (Eds.), Sustainable surface water management: A handbook for SUDS. John Wiley & Sons Ltd., UK, pp. 105–115. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781118897690.ch8>
10. BECKERS, Felix, et al. Impact of biochar on mobilization, methylation, and ethylation of mercury under dynamic redox conditions in a contaminated floodplain soil. Environment international, 2019, vol. 127, p. 276-290. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.040>
11. BLUM, Philipp, et al. Is thermal use of groundwater a pollution?. Journal of Contaminant Hydrology, 2021, vol. 239, p. 103791. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>
12. BROUWER, Roy, et al. Economic valuation of groundwater protection using a groundwater quality ladder based on chemical threshold levels. Ecological Indicators, 2018, vol. 88, p. 292-304. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.041>
13. CECCONET, Daniele, et al. In situ groundwater remediation with bioelectrochemical systems: a critical review and future perspectives. Environment international, 2020, vol. 137, p. 105550. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105550>
14. CHEN, Xiang, et al. Application of iron-biochar composite in topsoil for simultaneous remediation of chromium-contaminated soil and groundwater: Immobilization mechanism and long-term stability. Journal of Hazardous Materials, 2021, vol. 405, p. 124226. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124226>
15. COOMAR, Poulomee; MUKHERJEE, Abhijit. Global geogenic groundwater pollution. En Global Groundwater. Elsevier, 2021. p. 187-213. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818172-0.00014-1>

16. DE WIT, Maarten, et al. Practical guidance for engaging patients in health research, treatment guidelines and regulatory processes: results of an expert group meeting organized by the World Health Organization (WHO) and the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases (ESCEO). *Aging clinical and experimental research*, 2019, vol. 31, no 7, p. 905-915. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01193-8>
17. DELLA PUPPA, Loïc, et al. Poplar wood and tea biochars for trichloroethylene remediation in pure water and contaminated groundwater. *Environmental Challenges*, 2020, vol. 1, p. 100003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100003>
18. DI GUARDO, Andrea; FINIZIO, Antonio. A moni-modelling approach to manage groundwater risk to pesticide leaching at regional scale. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 545, p. 200-209. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.056>
19. DOBOSY, Péter, et al. Comparative study of ferrate and thermally activated persulfate treatments for removal of mono-and dichlorobenzenes from groundwater. *Microchemical Journal*, 2018, vol. 136, p. 61-66. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.10.015>
20. DONG, Haoran, et al. Integration of nanoscale zero-valent iron and functional anaerobic bacteria for groundwater remediation: a review. *Environment international*, 2019, vol. 124, p. 265-277. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.030>
21. Edgar, T. W., & Manz, D. O. (2017). Applied Experimentation. *Research Methods for Cyber Security*, 271–297. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805349-2.00011-x>
22. ERLINGSSON, Christen; BRYSIEWICZ, Petra. Orientation among multiple truths: An introduction to qualitative research Orientation atravers les verites multiples: Une introduction ala recherche qualitative. 2012. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.afjem.2012.04.005>

23. FAVARA, Paul; GAMLIN, Jeff. Utilization of waste materials, non-refined materials, and renewable energy in in situ remediation and their sustainability benefits. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 204, p. 730-737. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.097>
24. FENG, Yu, et al. Distribution and speciation of iron in Fe-modified biochars and its application in removal of As (V), As (III), Cr (VI), and Hg (II): An X-ray absorption study. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 384, p. 121342. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121342>
25. Figgou, L., & Pavlopoulos, V. (2015). Social Psychology: Research Methods. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 544–552. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-097086-8.24028-2>
26. FUENTES, Amalia Lara Bursztyn, et al. Efficient low-cost magnetic composite based on eucalyptus wood biochar for arsenic removal from groundwater. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 14, p. 100585. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100585>
27. FUJII, Hidemichi; MANAGI, Shunsuke. Economic development and multiple air pollutant emissions from the industrial sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no 3, p. 2802-2812. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5523-2>
28. GUO, Liangliang, et al. Experimental and numerical investigation of the influence of groundwater flow on the borehole heat exchanger performance: A case study from Tangshan, China. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 248, p. 111199. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111199>
29. HAN, Zhiyong, et al. Identification of nitrogen-sources in an aquifer beneath a municipal solid waste landfill in the vicinity of multiple pollutant sources. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 268, p. 110661. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110661>
30. HAO, Yuanyuan, et al. The critical role of local policy effects in arid watershed groundwater resources sustainability: a case study in the Minqin oasis, China. *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 601, p. 1084-1096. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.177>

31. HERNÁNDEZ JUÁREZ, Rodrigo Alejandro, et al. Gestión del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería en Jalisco y Colima, México. *Región y sociedad*, 2019, vol. 31. Disponible en: <https://doi.org/10.22198/rys2019/31/1093>.
32. ISSAKA, Sakinatu; ASHRAF, Muhammad Aqeel. Phytorestoration of mine spoiled: "Evaluation of natural phytoremediation process occurring at ex-tin mining catchment". En *Phytorestoration of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites*. Elsevier, 2021. p. 219-248. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821200-4.00009-1>
33. Jac van der Gun. Groundwater resources sustainability. 2021. páginas 331-345. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818172-0.00024-4>
34. JIA, Xiyue, et al. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 672, p. 551-562. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.457>
35. JIANG, Yu, et al. Migration and evolution of dissolved organic matter in landfill leachate-contaminated groundwater plume. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 151, p. 104463. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104463>
36. KHAN, M. N., et al. Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 2018, vol. 5, p. 225-240. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09888-2>
37. KRISTENSEN, Peter, et al. European waters assessment of status and pressures 2018. EEA Report, 2018, no 7/2018. Disponible en: ISSN: 1977-8449
38. KWON, Eunhye, et al. Nitrate contamination of coastal groundwater: Sources and transport mechanisms along a volcanic aquifer. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 768, p. 145204. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145204>

39. LI, Leiming, et al. Distribution, pollution, bioaccumulation, and ecological risks of trace elements in soils of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, vol. 166, p. 345-353. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.110>
40. LI, Zhe, et al. Biochar-supported nanoscale zero-valent iron as an efficient catalyst for organic degradation in groundwater. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 383, p. 121240. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121240>
41. LIU, Jun, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113, no 28, p. 7756-7761. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1604537113>
42. LU, Dingnan, et al. Treatment train approaches for the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 386, p. 121963. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121963>
43. LYU, Honghong, et al. Biochar/iron (BC/Fe) composites for soil and groundwater remediation: synthesis, applications, and mechanisms. *Chemosphere*, 2020, vol. 246, p. 125609. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125609>
44. MA, Yan, et al. Molecular structure and evolution characteristics of dissolved organic matter in groundwater near landfill: Implications of the identification of leachate leakage. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 787, p. 147649. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147649>
45. MALDANER, Carlos H., et al. Quantifying groundwater flow variability in a poorly cemented fractured sandstone aquifer to inform in situ remediation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2021, p. 103838. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103838>
46. MARSALA ZAMBITO, Roberta, et al. First evaluation of pesticides occurrence in groundwater of Tidone Valley, an area with intensive viticulture. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139730>

47. MISSI, Charles; ATEKWANA, Eliot A. Physical, chemical and isotopic characteristics of groundwater and surface water in the Lake Chilwa Basin, Malawi. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, vol. 162, p. 103737. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103737>
48. NAYAK, Jyotiprakash G.; PATIL, L. G.; PATKI, Vinayak K. Artificial neural network based water quality index (WQI) for river Godavari (India). *Materials Today: Proceedings*, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.100>
49. NĚMEČEK, Jan, et al. Thermally enhanced in situ bioremediation of groundwater contaminated with chlorinated solvents—a field test. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 622, p. 743-755. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.047>
50. NGUYEN, Thi Minh Hong, et al. Influences of chemical properties, soil properties, and solution pH on soil–water partitioning coefficients of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Environmental Science & Technology*, 2020, vol. 54, no 24, p. 15883-15892. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05705>
51. NIAZI, Nabeel Khan, et al. Arsenic removal by perilla leaf biochar in aqueous solutions and groundwater: an integrated spectroscopic and microscopic examination. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 232, p. 31-41. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.051>
52. NILAVAZHAGI, A.; FELIXKALA, T. Adsorptive Removal of Fe (II) ions from Water using Carbon Derived from Thermal/Chemical Treatment of Agricultural Waste Biomass: Application in Groundwater Contamination. *Chemosphere*, 2021, p. 131060. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131060>
53. OYEYEMI, Kehinde D.; AIZEBEOKHAI, A. P.; OLOFINNADE, O. M. Geoelectrical investigations for groundwater exploration in crystalline basement terrain, SW Nigeria: implications for groundwater resources sustainability. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018,

vol. 9, no 6, p. 765-772. Disponible en:  
<http://eprints.covenantuniversity.edu.ng/id/eprint/11115>

54. Pal, P. (2017). Introduction. Industrial Water Treatment Process Technology, 1–19. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-810391-3.00001-1>
55. PATTON, Michael Quinn. Qualitative research & evaluation methods: Integrating theory and practice. Sage publications, 2014. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=ovAkBQAAQBAJ&lpg=PP1&ots=ZRY01pCCB2&dq=Qualitative%2C%20research%20%20evaluation%20methods&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=Qualitative,%20research%20%20evaluation%20methods&f=true>
56. PENG, Li, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in landfill groundwater. Huan jing ke xue= Huanjing kexue, 2018, vol. 39, no 10, p. 4556-4564. Disponible en: <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201802136>
57. PERTOT, Ilaria, et al. A critical review of plant protection tools for reducing pesticide use on grapevine and new perspectives for the implementation of IPM in viticulture. Crop Protection, 2017, vol. 97, p. 70-84. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.025>
58. PINO, Edwin; CHÁVARRI, Eduardo; RAMOS, Lia. Crisis de gobernanza y gobernabilidad y sus implicancias en el uso inadecuado del agua subterránea, caso acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. Idesia (Arica), 2018, vol. 36, no 3, p. 77-85. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301>
59. RATOLOJANAHARY, R., et al. Groundwater quality assessment combining supervised and unsupervised methods. IFAC-PapersOnLine, 2019, vol. 52, no 10, p. 340-345. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.054>
60. RONG, Xing, et al. The magnetic biochar derived from banana peels as a persulfate activator for organic contaminants degradation. Chemical Engineering Journal, 2019, vol. 372, p. 294-303. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.135>

61. SADHU, Mohini, et al. Adsorptive removal of fluoride using biochar—a potential application in drinking water treatment. *Separation and Purification Technology*, 2021, p. 119106. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119106>
62. SAMANI, Saeideh. Analyzing the Groundwater Resources Sustainability Management plan in Iran through Comparative Studies. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 12, p. 100521. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100521>
63. SEIFI, Akram; DEGHANI, Majid; SINGH, Vijay P. Uncertainty analysis of water quality index (WQI) for groundwater quality evaluation: Application of Monte-Carlo method for weight allocation. *Ecological Indicators*, 2020, vol. 117, p. 106653. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106653>
64. SEMERÁD, Jaroslav, et al. Discovering the potential of an nZVI-biochar composite as a material for the nanobioremediation of chlorinated solvents in groundwater: Degradation efficiency and effect on resident microorganisms. *Chemosphere*, 2021, vol. 281, p. 130915. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130915>
65. SEN, Kamallesh, et al. Adsorption of uranium (VI) from groundwater by silicon containing biochar supported iron oxide nanoparticle. *Bioresource Technology Reports*, 2021, vol. 14, p. 100659. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100659>
66. SIGGINS, Alma, et al. Simultaneous adsorption and biodegradation of trichloroethylene occurs in a biochar packed column treating contaminated landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 403, p. 123676. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123676>
67. SØRMO, Erlend, et al. Stabilization of PFAS-contaminated soil with activated biochar. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 763, p. 144034. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144034>
68. SUCIU, Nicoleta, et al. Evaluation of groundwater contamination sources by plant protection products in hilly vineyards of Northern Italy. *Science of The*

Total Environment, 2020, vol. 749, p. 141495. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141495>

69. SUN, Hao; CANNON, Fred S.; HE, Xin. Effective removal of perfluorooctanoate from groundwater using quaternary nitrogen-grafted granular activated carbon. Journal of Water Process Engineering, 2020, vol. 37, p. 101416. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101416>
70. SUN, Hao; CANNON, Fred S.; HE, Xin. Enhanced trifluoroacetate removal from groundwater by quaternary nitrogen-grafted granular activated carbon. Science of The Total Environment, 2019, vol. 660, p. 577-585. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.057>
71. SUTRADHAR, Subhasish; MONDAL, Prolay. Groundwater suitability assessment based on water quality index and hydrochemical characterization of Suri Sadar Sub-division, West Bengal. Ecological Informatics, 2021, p. 101335. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101335>
72. VIGNESWARAN, B.; SIVAKUMARAN, K. P.; VEERASINGAM, P. Identifying Petroleum Hydrocarbons and associated Contaminants in the Chunnakam Aquifer: a preliminary study, 2016. Jaffna Water Project R2015-001.
73. WANG, Xutong, et al. Contamination, ecological and health risks of trace elements in soil of landfill and geothermal sites in Tibet. Science of The Total Environment, 2020, vol. 715, p. 136639. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136639>
74. WEI, Anlei, et al. Enhanced nitrate removal and high selectivity towards dinitrogen for groundwater remediation using biochar-supported nano zero-valent iron. Chemical Engineering Journal, 2018, vol. 353, p. 595-605. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.127>
75. WEI, Yuanfeng, et al. Efficient removal of arsenic from groundwater using iron oxide nanoneedle array-decorated biochar fibers with high Fe utilization and fast adsorption kinetics. Water research, 2019, vol. 167, p. 115107. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115107>

76. WIJEYARATNE, WM Dimuthu Nilmini; SUVENDRAN, Subanky. In depth analysis of groundwater quality and use of Moringa oleifera leaf powder treatment to improve physico-chemical properties and drinkability of contaminated groundwater. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2019, vol. 11, p. 100199. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.100199>
77. WU, Beibei, et al. Interpret the Elimination Behaviors of Lead and Vanadium from the Water by Employing Functionalized Biochars in Diverse Environmental Conditions. Science of The Total Environment, 2021, p. 148031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148031>
78. XIAO, Xin, et al. Sorption of poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) relevant to aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted groundwater by biochars and activated carbon. Environmental science & technology, 2017, vol. 51, no 11, p. 6342-6351. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00970>
79. ZENG, Dan, et al. Factors influencing groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in the Qinghai-Tibetan plateau. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, vol. 211, p. 111913. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111913>
80. ZHONG, Delai, et al. Contrasting abiotic As (III) immobilization by undissolved and dissolved fractions of biochar in Ca<sup>2+</sup>-rich groundwater under anoxic conditions. Water Research, 2020, vol. 183, p. 116106. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116106>

# **ANEXOS**

## ANEXO 1: Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Título:					
<b>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</b>					
Palabras clave:					
Bibliografía:					
Año de publicación	Lugar de publicación	Doi	Página	ISBN	Tipo de documento
Índice de calidad del agua					
WQI		GWQI		IWQI	
Tratamientos térmicos					
Objetivos:					
Resultados:					