



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas
subterráneas: Revisión sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA AMBIENTAL

AUTORAS:

Chavez Rosado, Alejandra Carolina (ORCID: 0000-0002-2281-7287)

Nina Ponce, Deysy Marisela (ORCID: 0000-0001-7468-5637)

ASESOR:

Dr. Lozano Sulca, Yimi Tom (ORCID: 0000-0002-0803-1261)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria (Alejandra)

Le doy gracias a Dios por darme la fortaleza y su infinito amor para poder luchar por mis metas de la manera correcta con mi esfuerzo y dedicación.

A mis padres por haberme apoyado en todo momento, por su sacrificio y su amor incondicional.

A mi abuelo (Q.E.P.D) por bendecirme desde el cielo.

A mi hija, mi principal fuente de amor y motivación para cada paso que doy, gracias hija por existir.

Dedicatoria (Deysy)

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes siempre han creído en mí, dándome el ejemplo de superación, humildad, sacrificio y dedicación; enseñándome a valorar todo lo que me han dado. A mis padres José Nina Paredes y Neli Ponce Taipicuri, a mis tres pequeños hijos Juan José, Jean Piere y Mía Jazmín, a mi hermano Josué y mi pareja Renzo Fernando, por haber contribuido a la consecución de este logro. Espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

Agradecimiento

Deseamos expresar nuestra más sincera gratitud a los Docentes de la Facultad de ingeniería Ambiental, a todos los Doctores, Magísteres, por el apoyo y la dedicación brindada en el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Yimi Lozano Sulca por las enseñanzas brindadas del presente trabajo de investigación, por el apoyo y sugerencias en la metodología.

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras	vi
Índice de gráficos.....	vii
Índice de abreviaturas.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	15
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	15
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	15
3.3. Escenario de estudio	16
3.4. Participantes	17
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
3.6. Procedimiento	17
3.7. Rigor científico.....	19
3.8. Método de análisis de información	19
3.9. Aspectos éticos	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
V. CONCLUSIONES	29
VI. RECOMENDACIONES.....	30
REFERENCIAS	31
ANEXOS	

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Estándares de agua potable y agua de riego establecidos por la OMS y la FAO, respectivamente</i>	9
<i>Tabla 2. Matriz de Categorización Apriorística</i>	16
<i>Tabla 3. Tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas</i>	21
<i>Tabla 4. Métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas</i>	23
<i>Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas</i>	25

Índice de figuras

<i>Figura 1. Ubicaciones y concentración de nitrato [NO₃⁻] en cuerpos de agua subterránea</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. Ciclo simplificado del nitrógeno</i> -----	<i>11</i>
<i>Figura 3. Esquema del proceso de IO</i> -----	<i>13</i>
<i>Figura 4. Diagrama esquemático que muestra los pasos comunes del proceso de ultrafiltración</i> -----	<i>14</i>

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Clasificación de los HAP en función de su aparición</i>	10
<i>Gráfico 2. Procedimiento de selección de artículos</i>	17
<i>Gráfico 3. Porcentaje de eficiencia en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante</i>	25
<i>Gráfico 4. Porcentaje de eficiencia en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante</i>	27

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ED	: Sistema de Electrodiálisis
OMS	: Organización Mundial de la Salud
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
USEPA	: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
UF	: Ultrafiltración
OI	: Ósmosis inversa

RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio es analizar cuáles son los aspectos más resaltantes de las técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas subterráneas, para lo cual se utilizó un tipo de investigación aplicada, donde se recolectó y seleccionó estudios a nivel mundial mediante un proceso de selección.

Obteniendo, que las tecnologías usadas son diversas, siendo entre las tecnologías más comunes para eliminar nitrato la precipitación y coagulación, destilación, adsorción, procesos catalíticos, biorremediación, filtración, oxidación, osmosis inversa y electrodiálisis; y entre ellas los procesos catalíticos el que presento una pequeña diferencia mayor a los demás. Además, los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas presentan dos enfoques; la separación de nitratos del agua el cual se da mediante la ósmosis inversa, intercambio iónico y electrodiálisis y el segundo enfoque es la transformación de nitratos en gas nitrógeno inocuo; el cual se da mediante la desnitrificación biológica y métodos catalíticos. Siendo en la comparación de 27 estudios que las tecnologías mediante la transformación son las más aplicadas en un 78% mientras que la separación en un 22%. Por último, mediante las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas se puede concluir que, entre las diferentes tecnologías disponibles para eliminar los nitratos, ninguna está completamente implementada o se destaca como la mejor claramente, ya que, todas presentan ciertas ventajas como desventajas que a ninguno lo convierte en una tecnología óptimas de mérito por sus fortalezas y debilidades asociadas.

Palabras clave: eliminación de nitratos, contaminación por nitratos, nitritos, aguas subterráneas, técnicas de tratamiento

ABSTRACT

The main objective of this study is to analyze which are the most outstanding aspects of the treatment techniques for nitrate removal in groundwater, for which an applied type of research was used, where studies were collected and selected worldwide through a selection process.

Among the most common technologies used to remove nitrate are precipitation and coagulation, distillation, adsorption, catalytic processes, bioremediation, filtration, oxidation, reverse osmosis and electrodialysis; and among them, catalytic processes are the one that presented a small difference greater than the others. In addition, the methods of action of the various technologies used present two approaches; the separation of nitrates from water, which occurs through reverse osmosis, ion exchange and electrodialysis, and the second approach is the transformation of nitrates into harmless nitrogen gas, which occurs through biological denitrification and catalytic methods. In the comparison of 27 studies, transformation technologies are the most applied in 78% of the cases, while separation is the most applied in 22%. Finally, through the advantages and disadvantages of the technologies used it can be concluded that, among the different technologies available to remove nitrates, none is fully implemented or stands out as the best clearly, since, all present certain advantages and disadvantages that none makes it an optimal technology of merit for its associated strengths and weaknesses.

Keywords: nitrate removal, nitrate pollution, nitrites, groundwater, treatment techniques.

I. INTRODUCCIÓN

El agua limpia y el saneamiento para la población mundial es uno de los retos más importantes establecidos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas ya que a nivel mundial una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable segura (Shiyan L. et al., 2022, p.2).

Y a pesar de la abundancia de masas de agua en diversas regiones del mundo, el agua subterránea es la única fuente de agua disponible (Zhai Yuanzheng et al., 2017, p.3). Esto se debe a que las aguas superficiales están ambientalmente desprotegidas del impacto antropogénico, y el uso de las aguas subterráneas está limitado tanto por la densidad de los compuestos húmicos como por el aumento de la densidad de los iones de hierro (Sadler R. et al., 2016, p.1).

El agua subterránea es una fuente importante para el consumo doméstico, la agricultura y las actividades industriales; pero, las aguas subterráneas, una de las principales fuentes de agua dulce, han sido dañadas considerablemente por las actividades humanas (Rezaei Hadi et al., 2019, p.3).

Ante ello, en la actualidad, existe una creciente preocupación por la presencia de nitratos (NO_3^-) en las aguas subterráneas como consecuencia del uso intensivo de fertilizantes y otras fuentes antropogénicas, tales como aguas residuales o descargas de aguas residuales industriales (Solgi E. et al., 2021, p.2). Convirtiéndose en un gran problema mundial y una preocupación para la salud pública.

Las altas concentraciones de nitratos se atribuyen principalmente a actividades antropogénicas, como el uso excesivo de fertilizantes y estiércol animal, y la descarga de aguas residuales domésticas e industriales (Picetti R. et al., 2022, p.3). Además, la deposición elevada de N atmosférico también es una fuente vital de contaminación para los ambientes acuático (Matiatos I. et al., 2016, p.1).

En consecuencia, los niveles excesivamente altos de nitrato en el agua potable pueden aumentar el riesgo de enfermedades, como la metahemoglobinemia o el 'síndrome del bebé azul', abortos espontáneos y trastornos de la tiroides (Zhang Q. et al., 2018, p.2). Además, la exportación de nitrato a las aguas superficiales puede

generar muchos problemas ecológicos y ambientales, incluida la eutrofización y la hipoxia estacional (Díaz Alcaide et al., 2019, p.3).

Sin embargo, mientras que numerosas plantas tienen como objetivo global eliminar los contaminantes de las aguas superficiales, un número mucho más escaso de instalaciones se ha centrado en la remediación de aguas subterráneas (Elzain H. et al., 2022).

Ante lo expuesto se plantea el problema de estudio: ¿Cuáles son los aspectos más resaltantes de las técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas subterráneas?

Y como problemas específicos se tiene:

PE1: ¿Cuáles son las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas?

PE2: ¿Cuáles son los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas?

PE3: ¿Cuáles son las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas?

Y como objetivos del estudio: Analizar cuáles son los aspectos más resaltantes de las técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas subterráneas.

Así mismo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

OE1: Determinar cuáles son las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas

OE2: Definir cuáles son los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas

OE3: Clasificar cuáles son las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas

Este estudio tiene como propósito, realizar una revisión y análisis del tratamiento de las aguas subterráneas por lo cual presenta una justificación teórica, destacando los avances realizados y siendo dirigido el presente trabajo a los futuros investigadores

y ciudadanos interesadas en el tema; con la finalidad de contribuir con nuevas soluciones altamente efectivas y de bajo costo para la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

II. MARCO TEÓRICO

Los investigadores a nivel mundial que son estudiados en la aplicación de las técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas subterráneas, se presentan a continuación:

Guate Miguel et al., (2019); en su trabajo presenta la evaluación experimental del rendimiento de un nuevo reactor catalítico de fibra hueca con catalizador de Pd soportado para la eliminación de nitritos de aguas contaminadas. La configuración del reactor propuesta facilita el trabajo a bajos caudales y concentraciones de hidrógeno para mejorar la selectividad de la reacción de reducción hacia el nitrógeno, inhibiendo así la formación de amoníaco. El catalizador de Pd se soportó en fibras huecas de propileno y polietersulfona siguiendo un método sencillo de impregnación; la estabilidad del catalizador soportado se comprobó a lo largo del tiempo de operación. Los experimentos de reducción de nitritos se llevaron a cabo en el rango de 0,075-1 bar de presión parcial de H₂, 0,3-0,4 bar de presión parcial de CO₂, 200-400 mL/min de caudal de agua y 20-200 mL/min de caudal de gas con una concentración inicial de nitritos de 150 mg/L. En las condiciones experimentales, se logró una selectividad al N₂ cercana al 90% con una conversión del 80% de los nitritos.

Zhao Weirong et al., (2016); en su estudio preparó una clase de partículas de catalizador mono o dual mediante la carga de monometales (Cu, Ni) o bimetales (Pd-Cu, Pt-Cu, Au-Cu y Ru -Cu) sobre partículas de Al. Las muestras de Al cargadas con catalizador preparadas se caracterizaron por difracción de rayos X, espectroscopía de fotoelectrones de rayos X, microscopía electrónica de barrido y análisis de microscopía electrónica de transmisión. Los experimentos cinéticos por lotes indican que 0,4 % Pd-4 % Cu/Al a pH 4,0 resultó en la mayor selectividad para el nitrógeno (N₂). Los estudios cinéticos revelan que el nitrato se puede reducir primero a nitrito en la superficie de Al y Cu a una velocidad relativamente lenta y, posteriormente, se reduce rápidamente a nitrógeno en la superficie del metal noble y a amoníaco en la superficie de Al y Cu.

Pizarro A. et al., (2018); en su estudio ha evaluado catalizadores mono y bimetálicos en la reducción catalítica de NO₂ - y NO₃ -. La actividad y selectividad de los catalizadores basados en Pd, Pd-In y Pd-Sn soportados sobre diferentes materiales

como Al_2O_3 básico, SiO_2 y SnO_2 han sido evaluados en condiciones suaves de operación (25°C , 1 atm). La hidrogenación de NO_2^- se logró de manera eficiente con catalizadores monometálicos de Pd soportados en SnO_2 y catalizadores bimetalicos de Pd-In soportados en Al_2O_3 y SiO_2 , lo que condujo a la mayor cantidad de NO_2^- -conversión (80%). Los catalizadores soportados de Pd/ SnO_2 y Pd-In bimetalicos transformaron completamente el NO_3^- - mientras que el catalizador de Pd-Sn mostró una menor actividad. Se obtuvieron velocidades iniciales entre 0,5 y 2,6 $\text{mmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g Pd}^{-1}$ para la reducción de NO_3^- . La menor selectividad a NH_4^+ se observó con el catalizador Pd-In/ Al_2O_3 , que también mostró una alta estabilidad en experimentos a largo plazo.

Zhou Chen et al., (2017); en su investigación evaluó la eliminación de nitrato basada en H_2 con mayor selectividad hacia el N_2 ; donde el concepto de reducción simultánea de nitrato (NO_3^-) impulsada por microbios y catalizada por Pd se evaluó en términos de eficiencia de eliminación de NO_3^- y selectividad del producto de reducción. Los experimentos se llevaron a cabo en tres reactores de biopelícula de membrana (MBfR) basados en H_2 idénticos operados en paralelo: nanopartículas de Pd biogénicas (PdNP) asociadas con biopelícula ("biopelícula de Pd"), biopelícula sola ("Biopelícula") y PdNP abióticas solas ("Pd-película"). como resultado, la selectividad general hacia el N_2 en la biopelícula de paladio fue casi del 100 % y mayor que en la película de paladio. Por lo tanto, el acoplamiento de la catálisis de PdNP y la desnitrificación microbiana promovió la reducción de NO_3^- basada en H_2 y condujo a una mayor selectividad hacia el N_2 siempre que se controlara la entrega de H_2 .

Jonoush Z. et al., (2020); en su estudio tuvo como objetivo principal ofrecer un sistema electrocatalítico efectivo con alta selectividad al nitrógeno y bajo consumo de energía utilizando nanocompuestos de Ni- $\text{Fe}_0 @\text{Fe}_3\text{O}_4$. El electrodo nanocompuesto Ni- $\text{Fe}_0 @\text{Fe}_3\text{O}_4$ para la desnitrificación electrocatalítica preparado mediante un método de electrodeposición; los factores efectivos en la reducción electrocatalítica de nitrato, como la eficiencia de corriente, la eliminación de nitrato, la generación de nitrito y amoníaco, la selectividad de nitrógeno y el consumo de energía se estudiaron utilizando Ni- $\text{Fe}_0 @\text{Fe}_3\text{O}_4$ Electrodo nanocompuesto de O_4 . El sistema electrocatalítico propuesto alcanzó una eficiencia de eliminación de nitrato del 90,19 % utilizando una densidad de corriente de $5\text{ mA}/\text{cm}^2$ en 240 min, pH de 6,2 y NaCl 10 mM en comparación con la espuma

de Ni (28,16 %) y Ni-Fe 0 (45,95 %), además, el sistema electrocatalítico exhibió una alta selectividad al nitrógeno, una eficiencia de corriente deseable y un bajo consumo de energía, de alrededor de 4,42 KWh/n-nitrato-N en condiciones óptimas.

Weber B. et al., (2019); en su estudio compara el empleo de un catalizador de bajo coste basado en CuSn6 con un catalizador de metal noble Cu - Pd en un laboratorio y en un aparato piloto de funcionamiento continuo para tratar el agua contaminada por nitratos de un pozo. A diferencia de las aplicaciones habituales, se utilizó un ácido carbónico saturado como solución anolítica, que estabilizó el pH en el compartimento del ánodo y en el del cátodo. El mejor rendimiento, determinado por la eliminación de nitratos y la transferencia de nitrógeno a la fase gaseosa, se alcanzó con una corriente específica de 1,16 A m⁻² para el aparato de laboratorio y de 1,53 A m⁻² para el aparato de la planta piloto.

Aliaskari M. y Schafer A., (2021); en su trabajo investigó el impacto de los parámetros operativos (caudal, potencial eléctrico) y de calidad del agua (salinidad, concentración de alimentación de contaminantes, pH) en la descontaminación de agua salobre utilizando un sistema de electrodiálisis (ED) por lotes. Donde, la electrodiálisis a potenciales eléctricos bajos (5 V) fue más selectiva hacia los iones monovalentes, a potenciales más altos (>15 V) aumentó la eliminación de todos los iones y la selectividad se acercó a uno, lo que significa la eliminación de todos los iones. Cambiando el caudal de 30 a 70 L/h, aumentó ligeramente la eliminación de nitrato y fluoruro, mientras que la eliminación de arsénico (V) fue máxima a 50 L/h y el aumento de la salinidad retrasó la eliminación de iones con baja movilidad iónica y difusividad (es decir, fluoruro, arsénico (V)); el aumento de la concentración de alimentación de contaminantes no tuvo impacto en los valores de eliminación.

Ghosh A. et al., (2017); en su artículo ha sintetizado nanopartículas de hierro de valencia cero similares a flores monofásicas bien dispersas en condiciones aeróbicas utilizando un enfoque sencillo sin la adición de aditivos ni plantillas. Se ha estudiado la eficacia de eliminación de nitrato de las nanopartículas de hierro sintetizadas en diferentes disolventes y se ha observado que las nanopartículas de hierro “en forma de flor” fueron las más activas en la eliminación de nitrato. Donde los resultados concluyen que la mayor eficiencia de eliminación (~100%) se logró cuando la dosis de nanopartículas fue de 2,88 g/L, incluso para altas concentraciones de nitrato de hasta 400 mg/L.

Marchesini F. et al., (2019); en su investigación se realizó una comparación entre la actividad catalítica de los catalizadores de Pd,In/SiO₂ y Pd,In/Al₂O₃, dando a este último los mejores resultados en cuanto a la conversión de nitrato y al primero la selectividad a nitrógeno. El agua sintética que contenía nitratos (SW) y el agua subterránea (GW) con alta salinidad (81 mg/L de nitratos) y contenido de ácido húmico se trataron en estas condiciones usando HCl y CO₂ como acidificantes. Cuando el SW se acidificó con CO₂ a un flujo de H₂ (2.17 mL/min), se obtuvo más del 50 % de conversión con una concentración de amoníaco y nitrito de 0.44 y 0.92 ppm respectivamente.

Xi Siqinq et al., (2019); en su estudio operó un reactor de biopelícula de membrana a base de hidrógeno (MBfR) a escala de laboratorio durante más de 60 días con balance de electrones, análisis estructural e identificación de la comunidad bacteriana. Los resultados mostraron que la biopelícula anaeróbica tuvo una excelente eliminación tanto de selenato (95 %) como de nitrato (100 %). Reducción de Selenato → Selenita → Se⁰ con hidrógeno fue la vía principal del biofilm anaeróbico para la eliminación del selenato con el precipitado amorfo de Se⁰ acumulado en el biofilm. Pudiendo concluir que una parte del selenato (3%) también se redujo a seleniuro de metilo por bacterias heterótrofas. Además, las bacterias *Hydrogenophaga de β-Proteobacteria*, capaces de eliminar tanto el nitrato como el selenato, actuaron como especies dominantes (más del 85 %) en la biopelícula y contribuyeron a la eliminación estable tanto del nitrato como del selenato.

En los últimos siglos, la demanda de agua potable ha aumentado considerablemente y la contaminación de las aguas subterráneas, que representan la principal fuente de agua potable, se está convirtiendo en un problema mundial (Xu Dong et al., 2018, p.2). Siendo la concentración de nitratos en la mayoría de los acuíferos en áreas áridas y semiáridas el contaminante que ha aumentado en las últimas décadas como resultado de las actividades humanas (Pizarro H et al., 2018, p.1).

Ante ello, la contaminación de los acuíferos por nitratos, causada principalmente por la aplicación de fertilizantes a base de nitrógeno en la agricultura intensiva, es una de las causas más extendidas de contaminación de las aguas subterráneas en muchos países debido al rápido progreso de sus actividades agrícolas e industriales (Sharma S. y Bhattacharya A., 2017, p.3).

Para presentar una idea más clara de los alcances de la contaminación por nitrato en aguas subterráneas se realizó un estudio que resume 292 puntos estudiados en función de la contaminación por nitrato (Ver figura 1).

Figura N°1. Ubicaciones y concentración de nitrato [NO₃⁻] en cuerpos de agua subterránea



Fuente: Hepburn Emily et al., (2020)

De acuerdo a la figura 2 se estudiaron 94 muestras en África, 93 en Asia, 71 en Europa y 34 en América; aunque el continente de Oceanía ha publicado un artículo en el campo de la salud de las aguas subterráneas, no proporciona datos sobre los nitratos.

A saber, el nitrato se encuentra naturalmente en las aguas subterráneas, sin embargo, las fugas sépticas, los fertilizantes nitrogenados y el estiércol animal aplicado al suelo pueden causar niveles elevados de nitrato en las aguas subterráneas (Kim H. et al., 2016, p.2).

Siendo de acuerdo con la OMS y la FAO que los estándares de agua potable establecidos son los mostrados en la tabla 1.

Tabla N°1. Estándares de agua potable y agua de riego establecidos por la OMS y la FAO, respectivamente

Parámetro	OMS (Organización Mundial de la Salud, 2012)	FAO (Misstear et al., 2017)
Nitratos (mg/L)	50	22
Calcio (mg/L)	300	
Magnesio (mg/L)	300	
Sodio (mg/L)	200	69
Potasio (mg/L)	12	
Sulfatos (mg/L)	250	
Cloruro (mg/L)	200	107
Bicarbonatos (mg/L)		91.5
Fluoruros (mg/L)	1.5	
Conductividad (µS/cm)	2500	
pH	6.5–8.5	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	600	450

Fuente: Misstear B. et al., (2017)

Como se resume en la tabla 1, la OMS y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) han establecido estándares de calidad para el agua potable y para riego. En consecuencia, se consideran diferentes umbrales para nitratos (NO_3^-), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) y fluoruro (F^-), así como conductividad, pH y sólidos disueltos totales.

A saber, en condiciones predominantemente óxicas de estos acuíferos, se inhibe la desnitrificación, lo que permite que se acumule nitrato, una forma soluble y estable de nitrógeno (N) (Varol S. et al., 2018, p.2). Debido a su estrecha asociación con los desechos municipales y agrícolas, el nitrato se usa comúnmente como indicador de contaminación antropogénica. Pero los acuíferos afectados por desechos agrícolas pueden contener sales de retornos de riego y herbicidas además de nitratos (Kapembo M. et al., 2016, p.4).

Es así que, la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos, causada principalmente por la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la agricultura intensiva, es un problema generalizado en todo el mundo y un riesgo potencial para la salud pública (Matinez J. et al., 2017, p.1). Siendo que, la contaminación procedente de fuentes agrícolas y, en particular, la contaminación por nitratos, es

una de las principales preocupaciones en la gestión de las aguas subterráneas; sin embargo, este tipo de contaminación conlleva la entrada de otras sustancias al acuífero, así como puede promover otros procesos (Zendehbad M. et al., 2019, p.1).

Es así que la aplicación intensa de fertilizantes, que causa una alta contaminación por nitratos en los acuíferos, también homogeneiza el contenido de los principales iones disueltos (es decir, Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+}) (Mencio Anna et al., 2016, p.1). Además, cuando se comparan aguas subterráneas en acuíferos ígneos y sedimentarios, se observan diferencias significativas en condiciones naturales para Cl^- , Na^+ y Ca^{2+} (con valores de p que van desde < 0.001 a 0.038), y cuando se presentan concentraciones altas de nitratos, estas diferencias se reducen (la mayoría de los valores de p oscilaron entre $0,054$ y $0,978$) (Kawagoshi Y. et al., 2019, p.3).

Sin embargo, la creciente concentración de iones específicos no solo se atribuye a la contaminación agrícola, sino también a su efecto potenciador sobre los procesos biogeoquímicos que controlan las interacciones agua-roca (Lorite I. et al., 2018, p.7).

Otra causa principal en las diferentes regiones asociadas a las distintas actividades se muestra en Argentina, donde las actividades humanas han afectado algunas áreas ya que algunos acuíferos están aumentando las tasas de extracción de agua subterránea y la velocidad de retorno de las aguas residuales o la descarga industrial con un tratamiento deficiente (Isla F. et al., 2018, p.1).

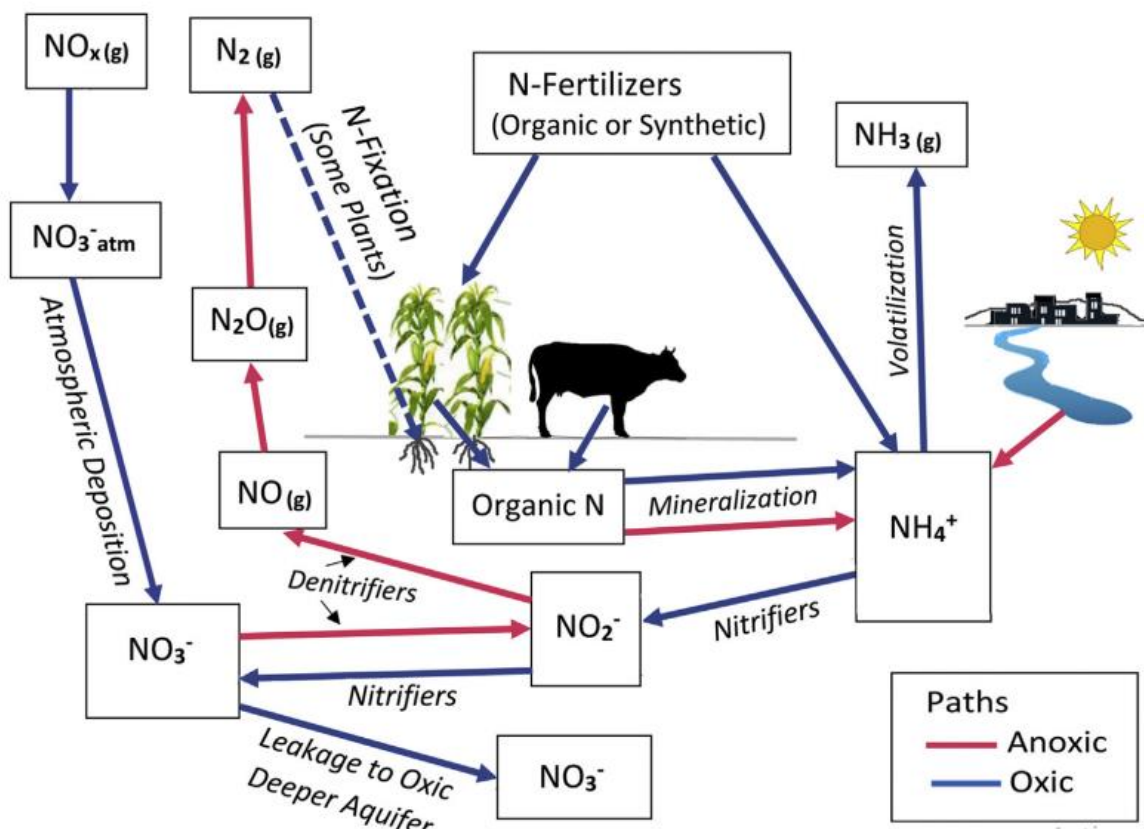
Por otro lado, en Colombia, las aguas subterráneas en los niveles someros presentan contaminación antropogénica por actividades agrícolas, ganaderas, mal manejo de residuos sólidos y la falta de un sistema de alcantarillado en ciertas regiones (Ossa V. et al., 2018, p.2). Así también, en Guatemala, el riesgo está asociado a fertilizantes y aguas residuales urbanas (Bucci Arianna et al., 2017, p.1).

Como consecuencia, los niveles elevados de nitrato (más de 2 mg/L NO_3^- -N) en el agua subterránea utilizada como agua potable se han relacionado con efectos adversos para la salud y es que el cuerpo humano lo reduce a nitrito, que puede causar metahemoglobinemia, también conocida como "síndrome del bebé azul", y lo transforma en el precursor de la amina nitrosa cancerígena (Rezvani F. et al., 2019, p.2).

La metahemoglobinemia fue el ímpetu detrás del nivel máximo de contaminación (MCL) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) de 10 mg/L NO_3^- -N (Andreo Martínez P. et al., 2020, p.3). Por estas razones, la Unión Europea y los Estados Unidos de América limitan la concentración de compuestos de nitrógeno en el agua potable (Martínez Juan et al., 2017, p.2).

En la figura 2 se muestra el ciclo simplificado del nitrógeno que muestra las principales vías anóxicas y óxicas que afectan al N de las aguas subterráneas, donde la mayoría de las transformaciones de N ocurren cerca de la superficie, desde donde el nitrato puede filtrarse y acumularse en partes más profundas del acuífero en condiciones óxicas.

Figura N°2. Ciclo simplificado del nitrógeno



Fuente: Gutiérrez M. et al., (2018)

Por ejemplo, la Directiva de Nitratos es la legislación europea que establece concentraciones máximas de 50, 0,1 y 0,5 ppm para NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ , respectivamente. La Organización Mundial de la Salud ha recomendado límites aún más bajos: 10, 0,03 y 0,4 ppm para NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ , respectivamente (Tokazhanov G. et al., 2020, p.3).

Ante ello, en la actualidad la eliminación de los nitratos del agua potable se lleva a cabo principalmente mediante varias tecnologías fisicoquímicas disponibles en el mercado, como la electrodiálisis (ED), la ósmosis inversa (RO) o el intercambio de iones (IE) (Zhou C. et al., 2017, p.2). Sin embargo, estos procesos fisicoquímicos producen una salmuera concentrada de nitratos que requiere un tratamiento posterior de los efluentes con elevados costes asociados (Da Silva P. et al., 2020, p.4).

Otra posibilidad de eliminar los nitratos del agua es el uso de la desnitrificación biológica, que reduce los nitratos a nitrógeno utilizando microorganismos en un reactor biológico (Hosseini S. et al., 2016, p.2). Aunque se evitan los flujos residuales de nitratos altamente concentrados, la posibilidad de contaminación bacteriana del agua potable o los lodos formados durante el proceso hacen que la desnitrificación biológica no sea competitiva para la eliminación de nitratos en comparación con los procesos fisicoquímicos (Aliaskari M. y Schafer A., 2021, p.3).

Además, debido a que el agua subterránea puede contener diferentes iones que deben eliminarse antes de su uso se debe aplicar procesos específicos para las necesidades requeridas; siendo entre las existentes la ósmosis inversa (IO), filtración y la ultrafiltración (UF) las más encontradas (Hussain C. et al., 2021, p.2).

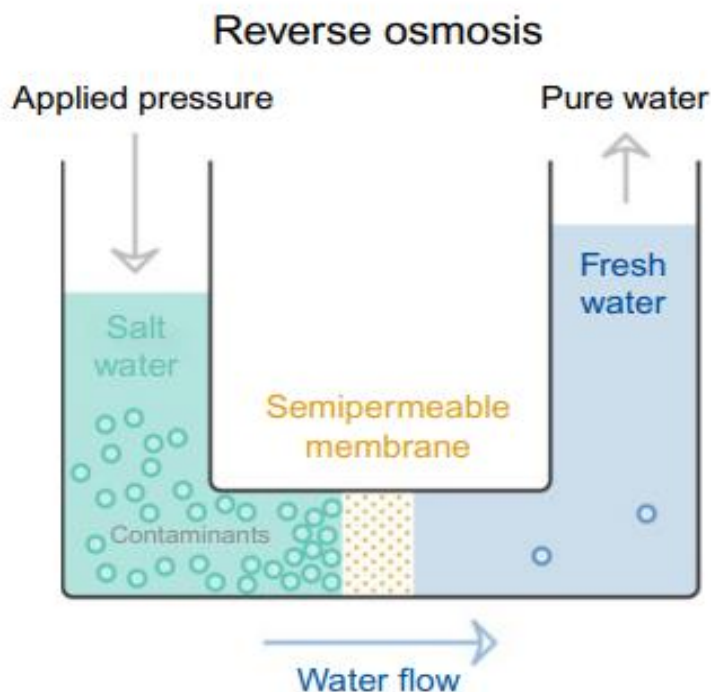
El proceso de ósmosis inversa consiste en impulsar el paso del agua a través de la membrana a alta presión, dejando atrás las sales concentradas (Singh R., 2016, p.327). Donde la tecnología de membrana es la ósmosis inversa (OI), donde las membranas se utilizan no solo para eliminar el nitrato, sino también otros subproductos, como pesticidas u otros materiales orgánicos que puedan estar presentes en el agua superficial o subterránea. (Ver figura 3).

El tratamiento de ósmosis inversa produce agua de muy alta calidad con solo unos pocos compuestos orgánicos volátiles todavía presentes (Gilron J., 2016, p.298). Sin embargo, también requiere una demanda de energía relativamente alta debido a que necesita una presión de agua que está por encima de la distribución normal, presión para impulsar el agua a tratar a través de la membrana semipermeable (Baati A. et al., 2021, p.5).

Además, RO tiene un flujo de rechazo significativo, donde esta corriente de rechazo se produce durante la limpieza y lavado de las membranas y el volumen de la

corriente de rechazo puede alcanzar el 30% del volumen total tratado y ello puede ser un problema en áreas donde los recursos hídricos son limitados.

Figura N°3. Esquema del proceso de IO



Fuente: Rabiee H. et al., (2018)

Pero varias comunidades han realizado estudios de evaluación sobre RO para la eliminación de nitratos y varias comunidades pequeñas lo han considerado como una forma de resolver múltiples problemas de calidad del agua (Ismail F. et al., 2018, p.25).

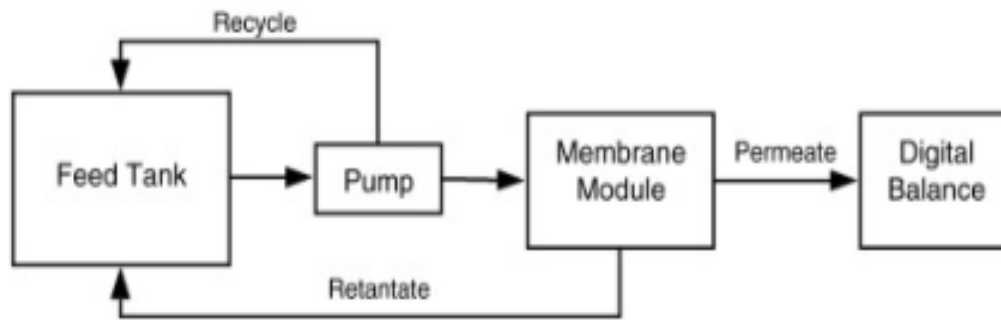
Por otro lado, la ultrafiltración (UF) también es una forma excelente de eliminar la contaminación por pirógenos del agua; este es un tipo de técnica de separación de membrana, es capaz de eliminar los materiales de partículas en soluciones (Zhang Lanhe et al., 2022, p.3). (Ver figura 4).

Este proceso de separación se suele utilizar en áreas industriales y de investigación para purificar y concentrar soluciones macromoleculares ($10^3 - 10^6$ Da), especialmente soluciones proteicas; al igual que la microfiltración, la ultrafiltración se basa en la exclusión por tamaño o la captura de partículas (Singh R. et al., 2016, p.3).

La UF es una forma de filtración que utiliza preferentemente membranas para separar diferentes fluidos o iones; un fluido se coloca bajo presión en un lado de

una membrana perforada de un tamaño de poro medido (Zhao Y., 2018, p.4). Todos los materiales más pequeños que el tamaño de poro medido pasan a través de la membrana, dejando grandes contaminantes concentrados en el lado de alimentación de la membrana (Alosaimi E. et al., 2022, p.4).

Figura N°4. Diagrama esquemático que muestra los pasos comunes del proceso de ultrafiltración



Fuente: Hussain C. et al., (2022)

En la figura 4 se muestra una ilustración de una configuración básica de ultrafiltración para la minimización de desechos; sin embargo, el mecanismo de ultrafiltración también se puede implementar en otras configuraciones.

Pero la UF se utiliza como pretratamiento paso a RO o como un proceso independiente y el proceso de UF no puede separar los constituyentes del agua con la misma eficacia que el proceso de ósmosis inversa (Asad A. et al., 2020, p.5). Sin embargo, las dos tecnologías se pueden usar en tándem, con UF eliminando la mayoría de los constituyentes relativamente grandes de una corriente de proceso antes de que la aplicación de ósmosis inversa elimine selectivamente el agua de la mezcla restante (Lu Q. et al., 2021, p.2).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación que se usó en este trabajo es la investigación aplicada; siendo descrito como la investigación aplicada a un contexto puntual que presente resolver usando para ello los conocimientos científicos de estudios ya existentes (Tamayo T., 2006, p.1). Por tal motivo, se usó este tipo de investigación, ya que, se busca analizar cuáles son los aspectos más resaltantes de las técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas subterráneas y mediante los artículos que fueron seleccionados a nivel mundial se esclarecerán y despejarán dudas acerca del problema establecido.

Mientras que el diseño usado fue el narrativo de tópico, esto debido a que el diseño narrativo recolecta y une historias de vida de uno o más investigadores mediante sus experiencias vividas (Hernández, 2016, p.702).

Es así que, en este estudio se aplicó el diseño narrativo, ya que, al ser una revisión sistemática se realizó un conglomerado de estudios actualizados en los cuales se analizó las técnicas de tratamientos usadas por los autores para la remoción de nitrato en aguas subterráneas.

Además, se define como tópico porque nos enfocamos en un tema central el cual es la remoción de nitrato en aguas subterráneas.

3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Las categorías y sub categorías planteadas se elaboraron en base a los problemas y objetivos específicos del estudio, siendo estos determinantes para la obtención de unos resultados más precisos; Ver tabla 1:

Tabla N° 2. Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
<i>Determinar cuáles son las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas</i>	¿Cuáles son las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas?	Tipos de tecnologías usadas (Guate Miguel et al., 2019, p.1)	Destilación, Precipitación y coagulación, Procesos catalíticos, Biorremediación (Zhang Q. et al., 2018, p.2).	De acuerdo al contaminante a eliminar
<i>Definir cuáles son los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas</i>	¿Cuáles son los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas?	Métodos de acción de las diversas tecnologías usadas (Pizarro A. et al., 2018, p.3)	Ósmosis inversa, método catalítico, reducción catalítica, electrodiálisis (Díaz Alcaide et al., 2019, p.3).	De acuerdo al proceso de separación y transformación usado
<i>Clasificar cuáles son las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas</i>	¿Cuáles son las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas?	Ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas (Zhou Chen et al., 2017, p.3)	Por el funcionamiento, por el tratamiento posterior, por los costos, por la efectividad (Elzain H. et al., 2022).	De acuerdo con las ventajas e inconvenientes presentados por el tipo de tecnología usada

Elaboración propia

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudio está designado por los artículos científicos incluidos al estudio, siendo estos escenarios los lugares donde se llevaron a cabo los estudios experimentales. Ello debido a que se presenta una revisión

sistemática y nos e cuenta con un escenario propio del estudio, en lugar de ello, se detallaran los lugares de las revisiones bibliográficas.

3.4. Participantes

Los participantes a considerar en el presente trabajo de investigación son las fuentes de extracción de documentos bibliográficos; siendo considerados las bibliotecas electrónicas donde cuentan con una base de datos amplia a nivel mundial de artículos científicos y citas de revistas científicas; siendo los usados en este estudio: Scielo, Scopus y Pubmed.

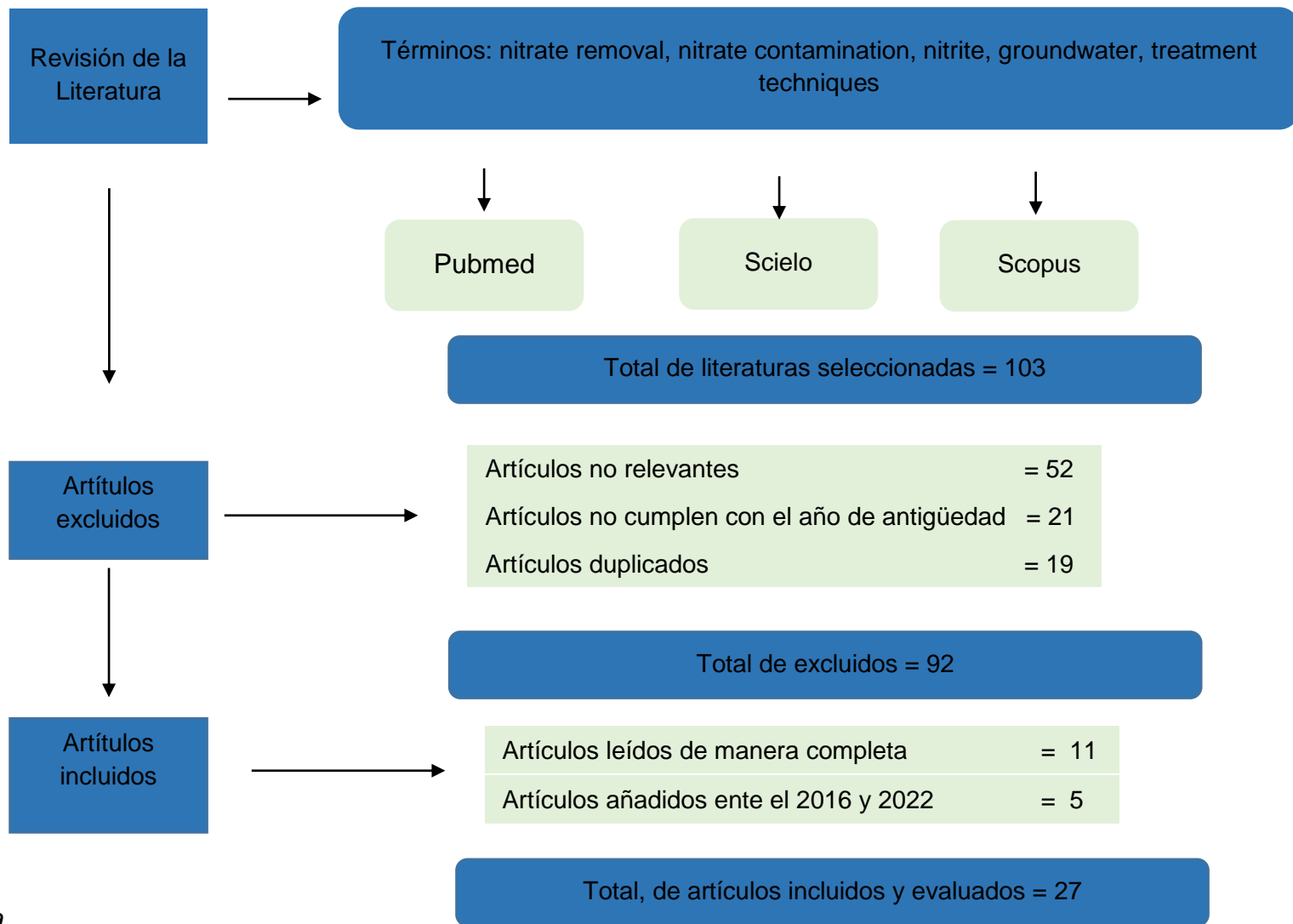
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica usada es el método de análisis de contenido y este tipo de método emplea como instrumento a la ficha de recolección de datos.

Siendo descrito el análisis del contenido como aquel procedimiento que se sigue para detallar la mayor información, de manera precisa y sintetizada del contenido de la información original; ya que toda investigación de ser analizada, interpretada y apropiada según nuestro objetivo específico (Sanchez, 2016, p.207). Además, el análisis de contenido puede ser utilizado para futuras investigaciones, sirviendo como guía ya que se detallan datos como las metodologías de los estudios que se deben.

3.6. Procedimiento

Gráfico N°1. Procedimientos de información



Elaboración propia

3.7. Rigor científico

El rigor científico aplicados para el presente estudio de investigación permiten establecer procedimientos y metodologías a partir de los cuales busca respuesta a los problemas planteados.

El criterio de la credibilidad, se centra en establecer que los resultados de la investigación sean creíbles desde el punto de vista del participante, desde los datos entregados por los autores; de los cuales el participante son los únicos que pueden juzgar la credibilidad de los resultados (Noreña et al., 2012, p.268).

El criterio de la confirmabilidad, la investigación cualitativa demuestra que cada investigador contribuye una vista única al estudio; también, los investigadores pueden usar otras investigaciones para aplicar en otros estudios con diferentes contextos (Arias et al., 2011, p.503).

El criterio de la transferibilidad, es utilizado para transferir los resultados de un estudio a otros contextos. Este criterio es el principal responsable de quien realiza la generalización (Hernández et al., 2014, p.456).

El criterio de consistencia, es el criterio se concentra en la estabilidad y seguridad de los datos que se entregan. Este criterio es difícil de conseguir debido que son datos que se extraen de otras investigaciones (Noreña et al., 2012, p.267).

3.8. Método de análisis de información

Debido a que se utilizaron más de dos técnicas se utilizó el método de triangulación, el cual permitió mediante el uso de la matriz apriorística generar categorías y sub categorías que permitieron a los resultados precisos y ordenados.

Las categorías se dividen en tres:

- Tipos de tecnologías usadas
- Métodos de acción de las diversas tecnologías usadas
- Ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas

Las subcategorías se dividen en:

- Destilación, Precipitación y coagulación, Procesos catalíticos, Biorremediación
- Osmosis inversa, método catalítico, reducción catalítica, electrodiálisis
- Por el funcionamiento, por el tratamiento posterior, por los costos, por la efectividad

3.9. Aspectos éticos

Este estudio cumple con los siguientes aspectos éticos: Respeto a la autoría, en el cual cada cita usada fue debidamente referenciada mediante la norma establecida ISO 690-2, así también se siguió con los lineamientos preestablecidos por la Universidad Cesar Vallejo, usando la guía de productos observables.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se busca analizar cuáles son los aspectos más resaltantes de las técnicas de tratamiento para la remoción de nitrato en aguas subterráneas, para lo cual se desarrolla la tabla 3, tabla 4 y tabla 5; detallando en la tabla 3 las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas.

Tabla N°3. Tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas

TECNOLOGÍA	SUSTANCIAS A ELIMINAR	FUENTE
Precipitación y coagulación	Fósforo, fluoruro, arsénico, ferrocianuro y metales pesados.	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Reblandecimiento	iones de dureza	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Destilación	Productos químicos tóxicos, metales pesados, bacterias, virus o parásitos.	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Adsorción	Elimine los compuestos que agregan color, sabor u olor al agua, como COV, cloro, metales pesados, orgánicos.	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Intercambio iónico	Aniones o cationes según el tipo de resina.	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Osmosis inversa	Sales, pesticidas, microbios.	Yang Zi et al., 2019
Electrodialisis	Partículas iónicas disueltas.	Akhter M. y Habib G., 2018
Procesos catalíticos	Compuestos orgánicos, ácido fórmico o nitratos.	Guate M. et al., 2019
		Rezvani Fariba et al., 2019
		Tokazhanov G. et al., 2020
Biorremediación	Metales pesados, sedimentos, patógenos o químicos orgánicos	Kozyatnyk I., 2016

	disueltos.	
Separación magnética	Aceite, sólidos en suspensión y algunos iones con dificultad para coagular.	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Desinfección (UV o cloro)	Bacterias y virus.	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Filtración de carbón activo	Carbono orgánico disuelto	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Filtración (UF, NF, grava, arena...)	Sólidos en suspensión, colorantes o materia orgánica	Rashid Ruhma et al., 2021
Oxidación (mecánica, térmica, con ozono)	Color, olor, compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos.	Radu G. y Racoviteanu G., 2021
Aclaración	Sólidos suspendidos totales (TSS)	Uribe I. et al., 2016
Aireación/eliminación de aire	Transferencia de componentes volátiles de un líquido a un flujo de aire	Radu G. y Racoviteanu G., 2021

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 3 las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas son diversas aplicándose de acuerdo a los contaminantes, la infraestructura, la asequibilidad y la aceptabilidad; siendo entre las tecnologías más comunes para eliminar nitrato la precipitación y coagulación, destilación, adsorción, procesos catalíticos, biorremediación, filtración, oxidación, osmosis inversa y electrodiálisis.

De acuerdo con Sharma S. y Bhattacharya A., (2017a), la destilación es la técnica de separación más común, siendo así que, en esta técnica de separación, los componentes mezclados en agua se separan mediante la aplicación de calor y mediante este proceso se da como resultado una separación entre el agua y las sustancias inorgánicas.

Así también la adsorción como proceso físico, permite que los contaminantes disueltos se adhieren a la superficie porosa de las partículas sólidas, siendo este el fenómeno superficial y el resultado de la energía superficial (Sharma S. y Bhattacharya A., 2017); donde los adsorbentes más utilizados son el carbón activado, Siendo ello corroborado por Yang Zi et al., (2019), quien menciona que el carbón activo es mucho más eficiente debido a su alto carácter poroso y el carbón puede ser de coque de petróleo, carbón bituminoso, lignito, productos de madera y

cáscaras de coco/maní; entre otros; a alta temperatura, donde parte del carbono se oxidan en CO₂ y vapor, donde los gases son evacuados y se generan microfisuras y poros en la estructura de carbono, aumentando así drásticamente el área de la superficie de carbono, lo que lo convierte en un material útil para la eliminación de contaminantes.

Por otro lado, el proceso de filtración puede ser aplicado mediante técnicas de biorremediación; como el carbón biológicamente activo; que es otro proceso prospectivo, donde, el proceso utiliza carbón activado granulado (GAC) como filtración de agua (Sharma S. y Bhattacharya A., 2017). Pero ello es refutado, por Rashid Ruhma et al., (2021); quien menciona que la separación o eliminación de materia orgánica mediante la filtración por membrana es una de las técnicas de tratamiento de aguas residuales más eficaces y económicas de diferentes industrias; sin embargo, el desarrollo de membranas con una estabilidad térmica suficiente y un rendimiento mejorado sigue siendo una tarea difícil.

Por otro lado, se buscó definir cuáles son los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas; para lo cual se realizó la tabla 4 en la cual se tomó como criterio el proceso de separación y transformación usado.

Tabla N°4. Métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas

	TECNOLOGÍA	FUENTE
Separación	Osmosis inversa	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
		Tokazhanov G. et al., 2020
	Intercambio iónico	Tokazhanov G. et al., 2020
	Adsorción	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
	Electrodialisis	Aliaskari M. y Schafer A., 2020
Sharma S. y Bhattacharya A., 2017		
Transformación	Desnitrificación biológica	Martínez J. et al., 2017
		Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
		Tokazhanov G. et al., 2020
		Xu Dong et al., 2018

		Yang Zi et al., 2019
Reducción catalítica		Ghosh Ananya et al., 2017
		Guate M. et al., 2019
		Marchesini F. et al., 2019
		Martínez J. et al., 2017
		Pizarro A. et al., 2018
		Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
		Tokazhanov G. et al., 2020
		Zhou Chen et al., 2017
	Reducción electrocatalítica	
		Garcia Segura S. et al., 2018
		Martínez J. et al., 2017
		Sanjuán Ignacio et al., 2020
		Tokazhanov G. et al., 2020
		Weber Bernd et al., 2019
Método fotocatalítico		Kozyatnyk I., 2016
		Sharma S. y Bhattacharya A., 2017

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 4 se tiene que los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas presentan dos enfoques; la separación de nitratos del agua el cual se da mediante la ósmosis inversa, intercambio iónico y electrodiálisis y el segundo enfoque es la transformación de nitratos en gas nitrógeno inocuo; el cual se da mediante la desnitrificación biológica y métodos catalíticos. Siendo en la comparación de 27 estudios que las tecnologías mediante la transformación son las más aplicadas en un 78% mientras que la separación en un 22%.

Ello es debido a que el enfoque de la separación requiere un segundo paso para eliminar, concentrar o neutralizar los compuestos objetivo; por ello no es el método de acción más empleado.

Así ello lo respalda Martínez J. et al., 2017, Sharma S. y Bhattacharya A., 2017, Tokazhanov G. et al., 2020 quienes utilizaron la desnitrificación biológica como tecnología para la transformación del nitrato presente en las aguas subterráneas; así también; Ghosh Ananya et al., 2017, Guate M. et al., 2019, Marchesini F. et al., 2019 con la tecnología de reducción catalítica y Jonoush Z. et al., 2020, Garcia Segura S. et al., 2018, Martínez J. et al., 2017 con la reducción electrocatalítica.

Guate M. et al., (2019), utilizó la reducción catalítica donde en las mejores condiciones experimentales se logró una selectividad al N₂ cercana al 90% con una conversión del 80% de los nitritos. Lo que es respaldado por los resultados de: Ghosh Ananya et al., 2017, Guate M. et al., 2019, Marchesini F. et al., 2019, Martínez J. et al., 2017, Pizarro A. et al., 2018, Sharma S. y Bhattacharya A., 2017, Tokazhanov G. et al., 2020 y Zhou Chen et al., 2017.

Así también Xu Dong et al., (2018), mediante su estudio permite presentar respaldo a los resultados obtenidos, mencionando que se ha demostrado que las tecnologías electroquímicas, incluida la electrorreducción (ER), la electrocoagulación (EC) y la electrodiálisis (ED), son eficaces en la eliminación de nitratos en las aguas residuales debido a su alta reactividad.

Por último, en la tabla 5 se clasificó las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas; teniendo como criterio las ventajas e inconvenientes que puedan presentar cada tipo de tecnología usada.

Tabla N° 5. Ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	INCONVENIENTES	FUENTE
Osmosis inversa	-Equipo compacto -Posibilidad de funcionamiento continuo -No son necesarios postratamientos	-Ensuciamiento (para reducirlo, ácido sulfúrico y hexametáfosfato de sodio)	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
			Tokazhanov G. et al., 2020
Intercambio iónico	-Simplicidad -Efectividad -Selectividad -Recuperación -Costo relativamente bajo	-Menor afinidad de las resinas por los nitratos respecto a los sulfatos	Tokazhanov G. et al., 2020

Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> -Facilidad de operación -Simplicidad de diseño -Elimina diferentes tipos de contaminantes, orgánicos e inorgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de tener en cuenta algunos factores: <ul style="list-style-type: none"> i) concentraciones iniciales de nitrato, ii) otros iones presentes en el agua, iii) cantidad de adsorbente, iv) pH del agua, v) operación y mantenimiento y vi) temperatura 	Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Electrodialisis	<ul style="list-style-type: none"> -Tasas de recuperación más altas -Puede eliminar contaminantes y desalinizar simultáneamente -Tecnología respetuosa con el medio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesario considerar tiempo, temperatura, caudal y voltaje para optimizar -Proceso -Pérdida de eficiencia debido al ensuciamiento y descamación -Necesidad de un pretratamiento requisitos de remineralización 	Aliaskari M. y Schafer A., 2020 Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
Desnitrificación biológica	<ul style="list-style-type: none"> -Económico -Tecnología respetuosa con el medio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> -Altos niveles de concentración de nitrato pueden ser difíciles de reducir -Mucho tiempo -Lodo bacteriano -Altos requisitos de pH -Baja selectividad -Mayores requisitos de energía 	Martínez J. et al., 2017 Sharma S. y Bhattacharya A., 2017 Tokazhanov G. et al., 2020 Xu Dong et al., 2018 Yang Zi et al., 2019
Reducción catalítica	<ul style="list-style-type: none"> -Conversión de nitrato del 98–100 % - Sin residuos 	<ul style="list-style-type: none"> -Formación de amoníaco -Altos costos operativos 	Ghosh Ananya et al., 2017 Guate M. et al., 2019 Marchesini F. et al., 2019 Martínez J. et al., 2017

			Pizarro A. et al., 2018
			Sharma S. y Bhattacharya A., 2017
			Tokazhanov G. et al., 2020
			Zhou Chen et al., 2017
Reducción electrocatalítica	-Versátil - Escalable	-Requisito de cierta conductividad	Jonoush Z. et al., 2020
			García Segura S. et al., 2018
			Martínez J. et al., 2017
			Sanjuán Ignacio et al., 2020
			Tokazhanov G. et al., 2020
			Weber Bernd et al., 2019
Método fotocatalítico	-Alta selectividad	-Formación de nitrito y amonio	Kozyatnyk I., 2016
			Sharma S. y Bhattacharya A., 2017

Elaboración propia

De acuerdo con la clasificación en la tabla 5 para determinar las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas, se tiene que, entre las diferentes tecnologías disponibles para eliminar los nitratos, ninguna está completamente implementada o se destaca como la mejor claramente, ya que, todas presentan ciertas ventajas como desventajas que a ninguno lo convierte en una tecnología óptimas de mérito por sus fortalezas y debilidades asociadas.

Siendo así que, en el caso de ósmosis inversa, las membranas que comúnmente se emplean son poliamida y triacetato de celulosa logrando un aproximado de un 98% de eliminación de nitrato utilizando esta tecnología de membrana (Hosseini Seyed S. et al., 2016, p.2).

Por otro lado, la tecnología de membranas, junto con el intercambio iónico, tiene menos eficiencia que el proceso catalítico en la degradación de contaminantes, pero tiene costos más bajos, la automatización es más accesible y tiene menos necesidades de control (Tokazhanov G. et al., 2020). Mientras que, la adsorción de acuerdo con Sharma S. y Bhattacharya A., (2017), ha sido analizada por varios autores y los diferentes adsorbentes estudiados son sorbentes a base de carbono, sorbentes naturales, desechos agrícolas, desechos industriales, biosorbentes u otros absorbentes; donde, los hidróxidos de doble capa o el quitosano modificado reportan una mayor absorción de nitrato que los adsorbentes convencionales como los sorbentes a base de carbono o los sorbentes naturales.

En el caso de la electrodiálisis, Aliaskari M. y Schäfer A. (2020, p.4) estudiaron este proceso para eliminar salinidad, nitratos, flúor y arsénico; obteniendo que la remoción de contaminantes siguió el orden, nitrato = salinidad > fluoruro > arsénico y estos autores, obtuvieron una alta remoción de nitratos con bajo potencial eléctrico mientras que la eliminación de arsénico aumenta con alto potencial eléctrico. Además, el uso de técnicas para transformar nitratos en N₂, tiene la ventaja de que no produce residuos (Sharma S. y Bhattacharya A., 2017).

La reducción electrocatalítica de nitratos a nitrógeno o amoníaco es otra alternativa, donde, la reacción ocurre en la superficie catódica que también actúa como catalizador y las principales configuraciones para remover nitratos usando esta tecnología son celda de cámara única, donde el cátodo y el ánodo están en el mismo compartimiento y en contacto con el electrolito, y celda de cámara doble, donde una membrana separa los electrodos (Martínez et al., 2017).

Así también, varios autores han investigado este proceso para eliminar los nitratos; como es el caso de Jonoush Z. et al., 2020, Garcia Segura S. et al., 2018, Sanjuán Ignacio et al., 2020, Tokazhanov G. et al., 2020, Weber Bernd et al., 2019.

V. CONCLUSIONES

Al analizar los 26 estudios científicos de 103 artículos se puede realizar la siguiente conclusión general; que los aspectos más relevantes son el incremento de la presencia de nitrato que se ha encontrado en los cuerpos de aguas en especial las aguas subterráneas, así mismo la importancia de las plantas dedicadas al tratamiento de aguas superficiales; así mismo, se pudieron extraer las tres siguientes conclusiones de los objetivos específicos planteados en el estudio:

- Las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas son diversas, siendo entre las tecnologías más comunes para eliminar nitrato la precipitación y coagulación, destilación, adsorción, procesos catalíticos, biorremediación, filtración, oxidación, osmosis inversa y electrodiálisis; y entre ellas los procesos catalíticos el que presento una pequeña diferencia mayor a los demás.
- Los métodos de acción de las diversas tecnologías usadas para la remoción de nitrato en aguas subterráneas presentan dos enfoques; la separación de nitratos del agua el cual se da mediante la ósmosis inversa, intercambio iónico y electrodiálisis y el segundo enfoque es la transformación de nitratos en gas nitrógeno inocuo; el cual se da mediante la desnitrificación biológica y métodos catalíticos. Siendo en la comparación de 27 estudios que las tecnologías mediante la transformación son las más aplicadas en un 78% mientras que la separación en un 22%.
- Con respecto a las ventajas e inconvenientes de las tecnologías usadas para el tratamiento de la remoción de nitrato en aguas subterráneas se puede concluir que, entre las diferentes tecnologías disponibles para eliminar los nitratos, ninguna está completamente implementada o se destaca como la mejor claramente, ya que, todas presentan ciertas ventajas como desventajas que a ninguno lo convierte en una tecnología óptimas de mérito por sus fortalezas y debilidades asociadas. Pero en el caso de ósmosis inversa, las membranas que comúnmente se emplean son poliamida y triacetato de celulosa logrando un aproximado de un 98% de eliminación de nitrato utilizando esta tecnología de membrana.

VI. RECOMENDACIONES

Mediante el estudio realizado se pudo notar la limitación de estudios a nivel nacional, por lo cual se recomienda ampliar la presente revisión; así mismo se realiza las siguientes recomendaciones:

En cuanto a los diferentes tratamientos para la eliminación de nitratos es necesario seguir investigando, ya que, aunque existen muchas tecnologías disponibles, escasas aplicaciones han llegado a escala de planta piloto.

Así mismo, entre todas las tecnologías que están actualmente en desarrollo, no hay una línea clara porque todas presentan claras ventajas y desventajas. Sin embargo, tecnologías como la reducción catalítica de nitratos, requieren de una mayor investigación, ya que, es una tecnología prometedora para la destrucción de nitratos debido a la alta conversión cercana al 98-100% y la ausencia de generación de residuos.

Por último, se recomienda realizar investigaciones prácticas para ampliar en estudios que ayuden a la remediación de los medios hídricos, aunque no sean en su totalidad, ya que, aún queda un largo camino para lograr la remediación completa de las aguas subterráneas, los esfuerzos que se están realizando actualmente promoverán respuestas a corto plazo.

REFERENCIAS

1. AKHTER, Mohsan; HABIB, Ghulam. Application of electrodialysis in waste water treatment and impact of fouling on process performance. Journal of Medical Case Reports and Reviews, 2018, vol. 1, no 07. Disponible en: <https://doi.org/10.4172/2155-9589.1000182>
2. ALIASKARI, Mehran; SCHÄFER, Andrea I. Nitrate, arsenic and fluoride removal by electrodialysis from brackish groundwater. Water Research, 2021, vol. 190, p. 116683. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116683>
3. ALOSAIMI, Eid H., et al. Fabrication of sulfonated polyethersulfone ultrafiltration membranes with an excellent antifouling performance by impregnating with polysulfopropyl acrylate coated ZnO nanoparticles. Environmental Technology & Innovation, 2022, vol. 25, p. 102210. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102210>
4. ANDREO-MARTÍNEZ, Pedro, et al. A descriptive bibliometric study on bioavailability of pesticides in vegetables, food or wine research (1976–2018). Environmental toxicology and pharmacology, 2020, vol. 77, p. 103374. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103374>
5. ASAD, Asad; SAMEOTO, Dan; SADRZADEH, Mohtada. Overview of membrane technology. En Nanocomposite membranes for water and gas separation. Elsevier, 2020. p. 1-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816710-6.00001-8>
6. BAÂTI, Souaâd, et al. A Cost-effective strategy for leachate treatment optimization: Biostimulation using carob powder as co-substrate. International Journal of Environmental Research, 2021, vol. 15, no 3, p. 535-541. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00332-2>
7. BUCCI, Arianna, et al. Groundwater chemistry characterization using multi-criteria approach: The upper Samalá River basin (SW Guatemala). Journal of

- South American Earth Sciences, 2017, vol. 78, p. 150-163. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.07.001>
8. DA SILVA PEIXOTO, Filipe; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno; GOMES, Diolande Ferreira. Influence of land use and sanitation issues on water quality of an urban aquifer. *Water Resources Management*, 2020, vol. 34, no 2, p. 653-674. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02467-6>
 9. DÍAZ-ALCAIDE, Silvia; MARTÍNEZ-SANTOS, Pedro. Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*, 2019, vol. 27, no 7, p. 2307-2324. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02001-3>
 10. ELZAIN, Hussam Eldin, et al. Comparative study of machine learning models for evaluating groundwater vulnerability to nitrate contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, vol. 229, p. 113061. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113061>
 11. GARCIA-SEGURA, Sergi, et al. Electrocatalytic reduction of nitrate: Fundamentals to full-scale water treatment applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, vol. 236, p. 546-568. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.05.041>
 12. GHOSH, Ananya, et al. Template-free synthesis of flower-shaped zero-valent iron nanoparticle: Role of hydroxyl group in controlling morphology and nitrate reduction. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28, no 9, p. 2256-2264. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.06.006>
 13. GILRON, J. Brine treatment and high recovery desalination. *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment*, 2016, p. 297-324. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=HbR0BgAAQBAJ&lpg=PA297&ots=8-cSnHd51g&dq=Chapter%2012%20-%20Brine%20Treatment%20and%20High%20Recovery%20Desalination&lr&hl=es&pg=PA297#v=onepage&q=Chapter%2012%20-%20Brine%20Treatment%20and%20High%20Recovery%20Desalination&f=false>

14. GUATE, Miguel; ORTIZ, Alfredo; ORTIZ, Inmaculada. New polymer catalytic membranes for nitrite reduction: experimental assessment. Journal of Membrane Science and Research, 2019, vol. 5, no 2, p. 157-164. Disponible en: <https://doi.org/10.22079/JMSR.2018.93546.1213>
15. GUTIÉRREZ, Mélida, et al. An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems. Science of the total environment, 2018, vol. 624, p. 1513-1522. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.252>
16. HEPBURN, Emily, et al. Environmental isotopes as indicators of groundwater recharge, residence times and salinity in a coastal urban redevelopment precinct in Australia. Hydrogeology Journal, 2020, vol. 28, no 2, p. 503-520. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02077-x>
17. HOSSEINI, Seyed Saeid, et al. Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review. Journal of Water Process Engineering, 2016, vol. 9, p. 78-110. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.11.005>
18. HUSSAIN, Chaudhery Mustansar; PAULRAJ, Mosae Selvakumar; NUZHAT, Samiha. Source Reduction and Waste Minimization. Elsevier, 2021. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=zEsiEAAQBAJ&lpg=PP1&ots=WUgcDymXM9&dq=Chapter%20%20-%20Source%20reduction%2C%20waste%20minimization%2C%20and%20cleaner%20technologies&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=Chapter%20%20-%20Source%20reduction,%20waste%20minimization,%20and%20cleaner%20technologies&f=false>
19. HUSSAIN, Chaudhery Mustansar; PAULRAJ, Mosae Selvakumar; NUZHAT, Samiha. Chapter 2 - Source reduction, waste minimization, and cleaner technologies. Source Reduction and Waste Minimization. 2022, Pages 23-59. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824320-6.00002-2>

20. ISLA, Federico Ignacio; QUIROZ LONDOÑO, Orlando Mauricio; CORTIZO, Luis Camilo. Groundwater characteristics within loessic deposits: the coastal springs of Los Acantilados, Mar del Plata, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no 17, p. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7766-y>
21. ISMAIL, Fauzi; KHULBE, Kailash Chandra; MATSUURA, Takeshi. Reverse osmosis. Elsevier, 2018. Disponible en: https://books.google.com.pe/books?id=Zml0DwAAQBAJ&lpg=PP1&ots=Q_g8Ee_MZI&dq=reverse%20osmosis&lr&hl=es&pg=PR5#v=onepage&q=reverse%20osmosis&f=false
22. JONOUSH, Zohreh Akbari; REZAEI, Abbas; GHAFFARINEJAD, Ali. Electrocatalytic nitrate reduction using Fe⁰/Fe₃O₄ nanoparticles immobilized on nickel foam: selectivity and energy consumption studies. *Journal of cleaner production*, 2020, vol. 242, p. 118569. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118569>
23. KAPEMBO, Michel L., et al. Evaluation of water quality from suburban shallow wells under tropical conditions according to the seasonal variation, Bumbu, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Exposure and Health*, 2016, vol. 8, no 4, p. 487-496. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0213-y>
24. KAWAGOSHI, Yasunori, et al. Understanding nitrate contamination based on the relationship between changes in groundwater levels and changes in water quality with precipitation fluctuations. *Science of the total environment*, 2019, vol. 657, p. 146-153. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.041>
25. KIM, Heejung, et al. Identifying the sources of nitrate contamination of groundwater in an agricultural area (Haean basin, Korea) using isotope and microbial community analyses. *Science of the Total environment*, 2015, vol. 533, p. 566-575. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.080>

26. KOZYATNYK, Ivan. Filtration materials for groundwater: a guide to good practice. IWA Publishing, 2016. ISBN: 9781780407005
27. LORITE, Ignacio J., et al. Water management and climate change in semiarid environments. En *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment*. Academic Press, 2018. p. 3-40. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813164-0.00001-6>
28. LU, Qingchen; LI, Nana; ZHANG, Xiaoming. Supramolecular recognition PVDF/PVA ultrafiltration membrane for rapid removing aromatic compounds from water. *Chemical Engineering Journal*, 2021, p. 132889. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132889>
29. MARCHESINI, Fernanda Albana, et al. PdIn catalysts in a continuous fixed bed reactor for the nitrate removal from groundwater. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2019, vol. 17, no 6. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/ijcre-2018-0126>
30. MARTÍNEZ, Juan; ORTIZ, Alfredo; ORTIZ, Inmaculada. State-of-the-art and perspectives of the catalytic and electrocatalytic reduction of aqueous nitrates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, vol. 207, p. 42-59. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.016>
31. MATIATOS, Ioannis. Nitrate source identification in groundwater of multiple land-use areas by combining isotopes and multivariate statistical analysis: A case study of Asopos basin (Central Greece). *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 541, p. 802-814. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.134>
32. MENCÍÓ, Anna, et al. Nitrate pollution of groundwater; all right..., but nothing else?. *Science of the total environment*, 2016, vol. 539, p. 241-251. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.151>
33. MISSTEAR, B.; BANKS, D.; CLARK, L. Appendix 3 FAO irrigation water quality guidelines. *Water Wells and Boreholes*, 2017, p. 469-470. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781119080176.app5>

34. OSSA-VALENCIA, Juliana; BETANCUR-VARGAS, Teresita. Hydrogeochemical characterization and identification of a system of regional flow. Case study: the aquifer on the Gulf of Urabá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2018, no 86, p. 9-18. Disponible en: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n86a02>
35. PICETTI, Roberto, et al. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental Research*, 2022, p. 112988. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112988>
36. PIZARRO, A. H.; TORIJA, I.; MONSALVO, V. M. Enhancement of Pd-based catalysts for the removal of nitrite and nitrate from water. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2018, vol. 67, no 7, p. 615-625. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.024>
37. RASHID, Ruhma, et al. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no 8, p. 9050-9066. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x>
38. RABIEE, Hesamoddin, et al. Energy-water nexus: renewable-integrated hybridized desalination systems. *Polygeneration with polystorage for chemical and energy hubs*, 2019, p. 409-458. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813306-4.00013-6>
39. RADU, G.; RACOVITEANU, G. Removing ammonium from water intended for human consumption. A review of existing technologies. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021. p. 012029. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/664/1/012029>
40. REZAEI, Hadi, et al. Health-risk assessment related to the fluoride, nitrate, and nitrite in the drinking water in the Sanandaj, Kurdistan County, Iran. *Human and ecological risk assessment: an international journal*, 2019, vol. 25, no 5, p. 1242-1250. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1463510>

41. REZVANI, Fariba, et al. Nitrate removal from drinking water with a focus on biological methods: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no 2, p. 1124-1141. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9185-0>
42. SADLER, Ross, et al. Health risk assessment for exposure to nitrate in drinking water from village wells in Semarang, Indonesia. *Environmental pollution*, 2016, vol. 216, p. 738-745. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.041>
43. SANJUÁN, Ignacio, et al. Bi-Sn nanoparticles for electrochemical denitrification: activity and selectivity towards N₂ formation. *Electrochimica Acta*, 2020, vol. 340, p. 135914. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135914>
44. SHARMA, S.; BHATTACHARYA, A. Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied water science*, 2017, vol. 7, no 3, p. 1043-1067. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0455-7>
45. SHIYAN, L. N.; MACHEKHINA, K. I.; FRANTCUZSKAIA, E. O. Groundwater sources in the West Siberian region: Chemical composition, analysis, and water treatment technologies. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, p. 100441. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100441>
46. SINGH, Rajindar. Development of Hybrid Processes for High Purity Water Production. *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016, p. 327-357. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=HbR0BgAAQBAJ&lpg=PA327&ots=8-cSnHd4Wi&dq=Chapter%2013%20-%20Development%20of%20Hybrid%20Processes%20for%20High%20Purity%20Water%20Production&lr&hl=es&pg=PA327#v=onepage&q=Chapter%2013%20-%20Development%20of%20Hybrid%20Processes%20for%20High%20Purity%20Water%20Production&f=false>


47. SINGH, Rajindar; HANKINS, Nicholas P. Introduction to membrane processes for water treatment. Emerging membrane technology for sustainable water treatment, 2016, p. 15-52. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=HbR0BgAAQBAJ&lpg=PA15&ots=8-cSnHf-1e&dq=Chapter%20%20-%20Introduction%20to%20Membrane%20Processes%20for%20Water%20Treatment&lr&hl=es&pg=PA15#v=onepage&q=Chapter%20%20-%20Introduction%20to%20Membrane%20Processes%20for%20Water%20Treatment&f=false>
48. SOLGI, Eisa; JALILI, Mohammadreza. Zoning and human health risk assessment of arsenic and nitrate contamination in groundwater of agricultural areas of the twenty two village with geostatistics (Case study: Chahardoli Plain of Qorveh, Kurdistan Province, Iran). Agricultural Water Management, 2021, vol. 255, p. 107023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107023>
49. TOKAZHANOV, Galym, et al. Advances in the catalytic reduction of nitrate by metallic catalysts for high efficiency and N₂ selectivity: a review. Chemical Engineering Journal, 2020, vol. 384, p. 123252. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123252>
50. URIBE, Inmaculada Ortiz, et al. Advanced technologies for water treatment and reuse. AIChE Journal, 2015, vol. 61, no 10, p. 3146-3158. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/aic.15013>
51. VAROL, Simge; ŞEKERCI, Mediha. Hydrogeochemistry, water quality and health risk assessment of water resources contaminated by agricultural activities in Korkuteli (Antalya, Turkey) district center. Journal of Water and Health, 2018, vol. 16, no 4, p. 574-599. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wh.2018.003>
52. WEBER, Bernd; CHÁVEZ, Alma; STADLBAUER, Ernst A. Electro-catalytic reduction of aqueous nitrates using Cu-Sn and Cu-Pd cathodes. Int. J.

- Electrochem. Sci, 2019, vol. 14, p. 329-345. Disponible en: <https://doi.org/10.20964/2019.01.21>
53. XIA, Siqing; XU, Xiaoyin; ZHOU, Lijie. Insights into selenate removal mechanism of hydrogen-based membrane biofilm reactor for nitrate-polluted groundwater treatment based on anaerobic biofilm analysis. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, vol. 178, p. 123-129. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.005>
54. XU, Dong, et al. Electrochemical removal of nitrate in industrial wastewater. *Frontiers of environmental science & engineering*, 2018, vol. 12, no 1, p. 1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1033-z>
55. YANG, Zi, et al. A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification. *Polymers*, 2019, vol. 11, no 8, p. 1252. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/polym11081252>
56. ZENDEHBAD, Mohammad, et al. Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of Mashhad, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, vol. 25, p. 100618. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100618>
57. ZHAI, Yuanzheng, et al. Groundwater nitrate pollution and human health risk assessment by using HHRA model in an agricultural area, NE China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 137, p. 130-142. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.010>
58. ZHANG, Lanhe, et al. The performance of electrode ultrafiltration membrane bioreactor in treating cosmetics wastewater and its anti-fouling properties. *Environmental research*, 2022, vol. 206, p. 112629. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112629>
59. ZHANG, Qianqian; WANG, Huiwei; WANG, Long. Tracing nitrate pollution sources and transformations in the over-exploited groundwater region of north China using stable isotopes. *Journal of contaminant hydrology*, 2018, vol. 218, p. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.06.001>

60. ZHAO, Weirong, et al. Catalytic reduction of aqueous nitrates by metal supported catalysts on Al particles. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 254, p. 410-417. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.144>
61. ZHAO, Y. Chapter 2-physical and chemical treatment processes for leachate. *Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste*. Butterworth-Heinemann, 2018, p. 31-183. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00030-O](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00030-O)
62. ZHOU, Chen, et al. Coupling of Pd nanoparticles and denitrifying biofilm promotes H₂-based nitrate removal with greater selectivity towards N₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, vol. 206, p. 461-470. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.01.068>

ANEXOS

Anexo N° 1:

	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)		
PÁGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACIÓN	LUGAR DE PUBLICACIÓN
TIPO DE INVESTIGACIÓN:		
CÓDIGO:		
PALABRAS CLAVES:		
MICROBIOS USADOS PARA LA MITIGACION DE MERCURIO		
MAYOR ABSORCION DE MERCURIO		
REMEDIACIONES UTILIZADAS PARA MITIGAR EL MERCURIO		
RESULTADOS:		
CONCLUSIONES:		

Elaboración propia