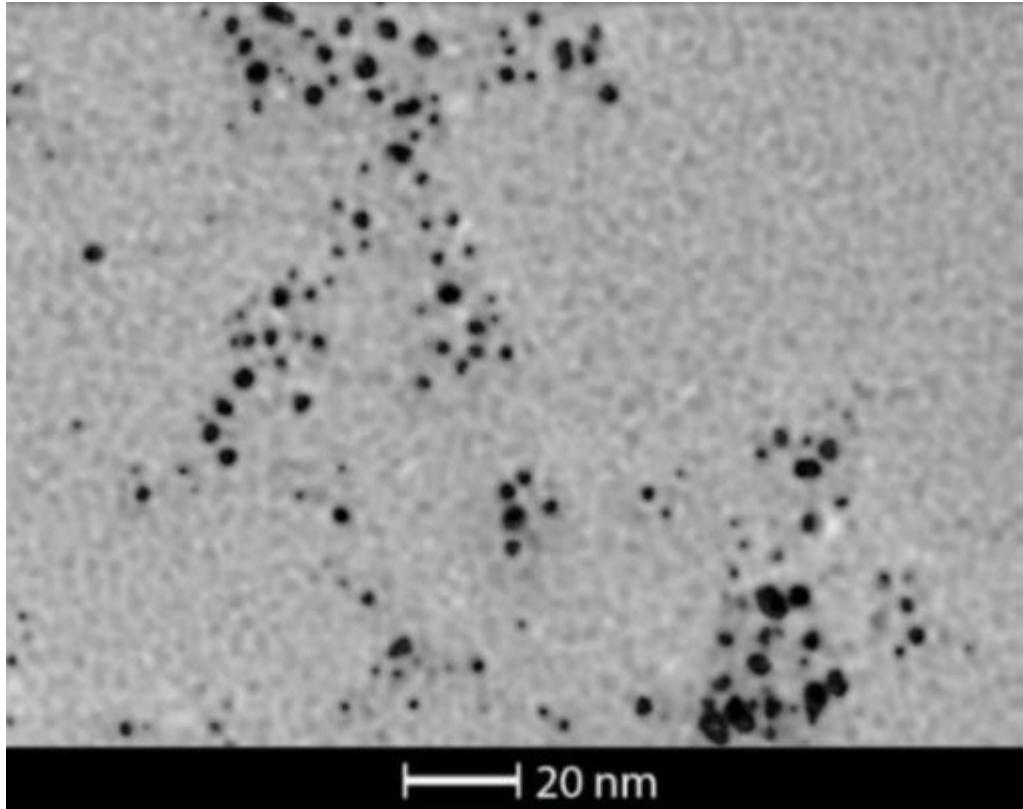


PATENTE DE INVENCIÓN: MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS MULTICOMPONENTE FE/FeS, A BASE DE SULFATO DE SODIO PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS.



RESUMEN:

La investigación se centra en el desarrollo de un método innovador para sintetizar nanopartículas multicomponente (NP-Fe/FeS), formadas por hierro de valencia cero (Fe^0) y sulfuro de hierro (FeS) para remediar eficazmente aguas contaminadas con metales pesados, especialmente residuales mineros líquidos y drenajes ácidos de roca. La tecnología se basa en una síntesis controlada de NP-Fe/SFe bajo condiciones anóxicas y a temperatura ambiente (20 °C), utilizando como reactivos principales el cloruro férrico, el borohidruro de sodio y el sulfato de sodio. El uso de agua desmineralizada previamente purgada con nitrógeno elimina el oxígeno disuelto y previene la oxidación temprana del Fe^0 . La interacción química entre los reactivos se desarrolla en un reactor con control de vacío, con dosificación gradual del agente reductor (NaBH_4) y agitación constante. El material estructural resultante está formado por un núcleo de Fe^0 recubierto por una capa superficial de FeS. El recubrimiento produce una superficie rugosa y altamente reactiva, con sitios

activos heterogéneos, que favorecen la adsorción eficiente de iones metálicos mediante mecanismos físicos y químicos.

Los análisis de distribución de tamaño y morfológicos con Dispersión Dinámica de Luz (DLS) y Microscopio de Transmisión de Electrones (TEM) revelan que los tamaños de partícula oscilan entre 7 y 9 nm, asociados a una elevada área superficial específica. Asimismo, las nanopartículas presentan alta estabilidad física y química, sin evidencia de aglomeración, disolución ni oxidación, incluso en presencia de compuestos competidores.

Las pruebas experimentales mostraron que la eficiencia de remoción de metales como cobre, zinc, plomo, níquel, manganeso, arsénico y plata fue casi del 100%, con tiempos de contacto inferiores a 30 segundos. Además, el desempeño se mantiene en amplios rangos de pH, temperatura y condiciones redox, lo que confirma su versatilidad operativa.

En resumen, esta tecnología representa una opción sostenible, efectiva y escalable para tratar aguas contaminadas con metales pesados, con gran potencial para transferirse a aplicaciones industriales y ambientales.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

El desarrollo tecnológico implementado corresponde a un método innovador para la obtención de nanopartículas multicomponente (NP-Fe/FeS) compuestas por hierro elemental (Fe^0) y sulfuro de hierro (FeS), destinadas entre otras cosas a la remediación de cuerpos de agua contaminados con metales pesados, especialmente en pasivos mineros líquidos y a drenajes ácidos de roca. Este desarrollo se sustenta en una estrategia de síntesis controlada de nanopartículas, que prioriza la eficiencia de remoción, la estabilidad físico-química del material y una menor afectación ambiental durante su producción.

La configuración estructural de las nanopartículas dota a su superficie de una textura áspera y altamente reactiva, con diversos sitios activos que facilitan mecanismos de adsorción tanto físicos como químicos. Además, la existencia de sulfuro de hierro en la superficie genera una sinergia funcional con el núcleo de Fe^0 , lo cual aumenta la cantidad de electrones disponibles para interactuar con los iones metálicos. Esto se manifiesta en altos niveles de conductividad eléctrica (36,3 mS/cm) y en un comportamiento en equilibrio acorde con la isoterma de Freundlich, lo que confirma la heterogeneidad de la superficie adsorbtiva.

Las técnicas de caracterización morfológica y de tamaño mediante DLS y TEM mostraron tamaños promedio de partículas entre 7 y 9 nm, lo cual está directamente relacionado con un aumento considerable en el área superficial específica y, por consiguiente, con una mayor capacidad de eliminar contaminantes. Además, el sistema presenta una gran estabilidad física, pues no se forman aglomerados durante 30 días, y una estabilidad

química incuestionable, ya que no se observa oxidación ni desorción de contaminantes durante el tratamiento, incluso en presencia de compuestos que compiten.

En cuanto a su desempeño funcional, los ensayos experimentales demostraron tasas de remoción cercanas al 100% para metales como Cu, Zn, Pb, Ni, Ag, Mn y As, incluso con tiempos de contacto inferiores a 30 segundos, lo que demuestra una cinética de reacción extremadamente rápida.

En suma, este desarrollo se presenta como una solución tecnológica de vanguardia para la conservación, la recuperación y la remediación ambiental, con un gran potencial para escalar a nivel industrial. Esto se debe a su eficacia, estabilidad, bajo riesgo de toxicidad durante la síntesis y su capacidad para operar en diversas condiciones ambientales, lo que la convierte en una alternativa sostenible para tratar aguas contaminadas con metales pesados.

VENTAJAS Y ASPECTOS INNOVADORES:

El desarrollo tecnológico de las nanopartículas multicomponente Fe/FeS constituye una solución innovadora y altamente eficiente para la remediación de aguas contaminadas por metales pesados, especialmente en entornos asociados a la actividad minera. Una de sus principales ventajas radica en el uso del sulfato de sodio como precursor en lugar de la ditionita de sodio, lo que reduce significativamente la emisión de sulfuro de hidrógeno (H_2S), sustancia sumamente tóxica para la salud humana y el ambiente. Esta característica convierte al método en una alternativa más segura y ambientalmente amigable durante su proceso de síntesis.

Desde el punto de vista técnico, las nanopartículas presentan una estructura multicomponente compuesta por un núcleo de hierro de valencia cero (Fe^0) recubierto por una capa superficial de sulfuro de hierro (FeS). Esta configuración genera un efecto sinérgico que incrementa la reactividad superficial, favoreciendo la adsorción de iones metálicos mediante fisisorción y quimisorción. La superficie rugosa e irregular, cuya adsorción se ajusta a la isoterma de Freundlich, evidencia la presencia de sitios reactivos heterogéneos que confieren una mayor capacidad de captación de contaminantes.

Otra ventaja crítica es su elevada capacidad de remoción de metales pesados, ya que los ensayos demostraron eficiencias cercanas al 100% en la eliminación de metales como cobre, zinc, plomo, níquel, arsénico, manganeso y plata, incluso con tiempos de contacto inferiores a 30 segundos. Esta alta velocidad de reacción representa una mejora sustancial frente a tecnologías tradicionales que requieren horas de tratamiento para alcanzar niveles de remoción similares.

Las nanopartículas Fe/FeS, además, presentan una notable estabilidad físico-química, lo que se traduce en una menor aglomeración hasta 30 días sin necesidad de agentes dispersantes, manteniendo sus propiedades funcionales a lo largo del tiempo. Asimismo,

no se detecta oxidación significativa de la estructura en presencia de contaminantes ni desorción de los metales adsorbidos, lo que garantiza la seguridad del proceso y la permanencia de los contaminantes retenidos en la fase sólida.

Desde el punto de vista morfológico y de distribución de tamaños, los análisis mediante Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) y Difracción de Luz Dinámica (DLS) determinaron tamaño promedio entre 7 y 9 nm, lo que origina una elevada área superficial específica y, en consecuencia, una mayor capacidad de interacción con los iones metálicos.

Adicionalmente, las nanopartículas mantienen su eficacia en un amplio rango de condiciones experimentales. Son funcionales en un rango de pH de 3 a 9, a temperaturas de 20 a 60 °C y pueden operar en ambientes oxidantes o reductivos. Además, su eficiencia de remoción no se ve comprometida, incluso en presencia de compuestos competidores, como la materia orgánica e inorgánica, convirtiéndolas en materiales robustos y adaptados a diversos escenarios ambientales e industriales.

ESTADO ACTUAL:

La tecnología se encuentra desarrollada a escala de laboratorio y pruebas piloto en campo.

APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA:

1. Tratamientos de aguas contaminadas por metales pesados.

La principal aplicación de la invención radica en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados tales como Cu, Pb, Zn, Ni, Mn, Ag y As. Las nanopartículas Fe/FeS tienen casi un 100% de capacidad de remoción, incluso en menos de 30 segundos, lo que las hace una solución efectiva para descontaminar tanto aguas superficiales como subterráneas, así como efluentes industriales.

2. Tratamiento de relaves mineros y pasivos ambientales mineros

Las nanopartículas resultan sumamente efectivas en el tratamiento de relaves mineros, que contienen diversos contaminantes y elementos competidores. Gracias a su estabilidad y elevada capacidad de absorción, logran eliminar metales de forma eficaz incluso en entornos complejos, lo que las convierte en un recurso estratégico para la rehabilitación de pasivos ambientales mineros y de áreas afectadas por la actividad extractiva.

3. Sistemas de purificación y plantas de potabilización de agua

Gracias a su alta eficacia en la eliminación de metales pesados y su estabilidad química, las nanopartículas son aptas para ser integradas en sistemas de tratamiento terciario de la potabilización del agua, sobre todo en áreas donde existen metales pesados de manera

natural o por acción humana, tales como el arsénico o el plomo, ayudando así a resguardar la salud pública.

4. Tecnología para plantas de tratamiento industriales

La invención puede aplicarse en instalaciones de tratamiento de aguas residuales industriales, particularmente en las áreas de metalurgia, galvanoplastia, curtiduría y producción química, donde los desechos tienen elevadas concentraciones de metales pesados.

5. Sistemas de barrera reactiva permeable (PRB)

Las nanopartículas de Fe/FeS son útiles en barreras reactivas permeables para eliminar contaminantes de los acuíferos. Funcionan como filtros activos que capturan y neutralizan los metales mientras atraviesan el flujo subterráneo.

COLABORACIÓN BUSCADA:

Se busca empresas interesadas en adquirir esta tecnología para su explotación comercial, mediante:

- Licenciamiento
- Proyectos conjuntos para adaptación de la tecnología a las necesidades identificadas.
- Proyectos para mejorar las bondades de la innovación

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL:

Solicitud de patente de invención en territorio ecuatoriano: CONCEDIDA

No. Trámite: IEPI-2016-90181

SECTORES DE APlicACIÓN:

Sector minero

Principal beneficiario de esta tecnología, ya que permite:

- Tratamiento de relaves y drenajes ácidos de rocas
- Recuperación ambiental de zonas mineras
- Cumplimiento de normativas ambientales
- Reducción de impacto ecológico

Sector ambiental y gestión de residuos

Organismos públicos y empresas que gestionan residuos de minería líquidos pueden utilizar esta invención para:

- Proyectos de remediación ecológica
- Recuperación de cuerpos hídricos contaminados
- Gestión sostenible de pasivos industriales

Sector industrial y manufacturero

Aplicable en industrias que generan efluentes con metales pesados, tales como:

- Extracción minera
- Metalurgia
- Galvanoplastia
- Industria química
- Industria automotriz
- Producción de baterías

Sector agroindustrial

Puede emplearse en la descontaminación de aguas de riego contaminadas por metales pesados, mejorando la calidad del suelo y reduciendo riesgos en cultivos agrícolas.

Sector salud pública y saneamiento

Contribuye al acceso a agua segura en comunidades expuestas a contaminación minera o industrial, fortaleciendo programas de saneamiento básico y prevención de enfermedades asociadas a metales pesados.

Para mayor información comuníquese al correo electrónico: transferencia-tec@espe.edu.ec

O al siguiente número telefónico: (02) 3989400 Ext. 2527