

Efecto del pH y la concentración de iones Ca y P en la obtención de monetita a partir de roca fosfórica

Effect of pH and Ca and P ion concentration on the production of monetite from phosphate rock

Gloria Soto-Calle¹   Néstor Rojas-Reyes²  Adrián Gómez-Zapata²  Sandra Díaz-Bello³ 

¹Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

²Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia.

³Grupo de investigación en ciencias ambientales y naturales- GICAN- CITECED, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, Colombia.

Resumen

Introducción: la monetita es una fase significativa de fosfatos de calcio destacada por su capacidad de ser absorbida por los tejidos óseos y de crear un ambiente propicio para la regeneración del hueso, lo que la posiciona como un biomaterial con alto potencial de aplicación.

Objetivos: el objetivo de esta investigación es obtener monetita directamente a partir de roca fosfórica explotada en el departamento de Boyacá, Colombia.

Metodología: se realizaron lixivaciones de roca fosfórica utilizando ácido nítrico a tres concentraciones diferentes: 2, 4 y 5 M. Posteriormente, el licor de lixiviación se neutralizó con hidróxido de sodio (NaOH) en tres rangos de pH: 3–4, 4–5 y 6–7. Los productos obtenidos fueron caracterizados mediante fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM) con el fin de verificar la presencia de la fase monetita y su morfología.

Resultados: los resultados mostraron que la fase monetita presenta mayor estabilidad en un rango de pH entre 3 y 4. Asimismo, se determinó que puede obtenerse monetita con una pureza del 100% utilizando concentraciones de NaOH de 2 M y 5 M. En condiciones de pH neutro se evidenció la precipitación y estabilidad de otras fases, como la hidroxiapatita.

Conclusiones: la obtención directa de monetita a partir de roca fosfórica de Boyacá es viable bajo condiciones controladas de pH y concentración, destacándose el rango ácido como el más favorable para su estabilidad.

Palabras clave: Monetita; fosfatos de calcio; biomaterial, ruta hidrometalúrgica, lixivación de roca fosfórica; neutralización con NaOH, caracterización por FRX, DRX y SEM.

Abstract

Introduction: monetite is a significant calcium phosphate phase known for its ability to be absorbed by bone tissues and to create a favorable environment for bone regeneration, positioning it as a biomaterial with high application potential.

Objectives: this study aims to obtain monetite directly from phosphate rock extracted in the Boyacá region of Colombia.

Methodology: leaching experiments were carried out using phosphoric rock and nitric acid at three different concentrations: 2, 4, and 5 M. The leach liquor was subsequently neutralized with sodium hydroxide (NaOH) at three different pH ranges: 3–4, 4–5, and 6–7. The obtained products were characterized by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) to verify the presence of the monetite phase and its morphology.

Results: the results showed that the monetite phase exhibits higher stability within a pH range of 3 to 4. It was also determined that pure monetite (100%) can be obtained using NaOH concentrations of 2 M and 5 M. At neutral pH values, the precipitation and stability of other phases such as hydroxyapatite were observed.

Conclusions: the direct production of monetite from phosphate rock from Boyacá is feasible under controlled pH and concentration conditions, with the acidic range being the most favorable for monetite stability.

Keywords: Monetite; calcium phosphates; biomaterial; hydrometallurgical route; phosphate rock leaching; neutralization with NaOH; characterization by XRF, XRD and SEM.

¿Cómo citar?

Soto-Calle G, Rojas-Reyes N, Gómez-Zapata A, Díaz-Bello S. Efecto del pH y la concentración de iones Ca y P en la obtención de monetita a partir de roca fosfórica. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-20414913

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.14913>

Recibido: 27/05/25

Revisado: 21/07/25

Aceptado: 23/10/25

Online: 12/11/25

Correspondencia

sandra.diazb@usantoto.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

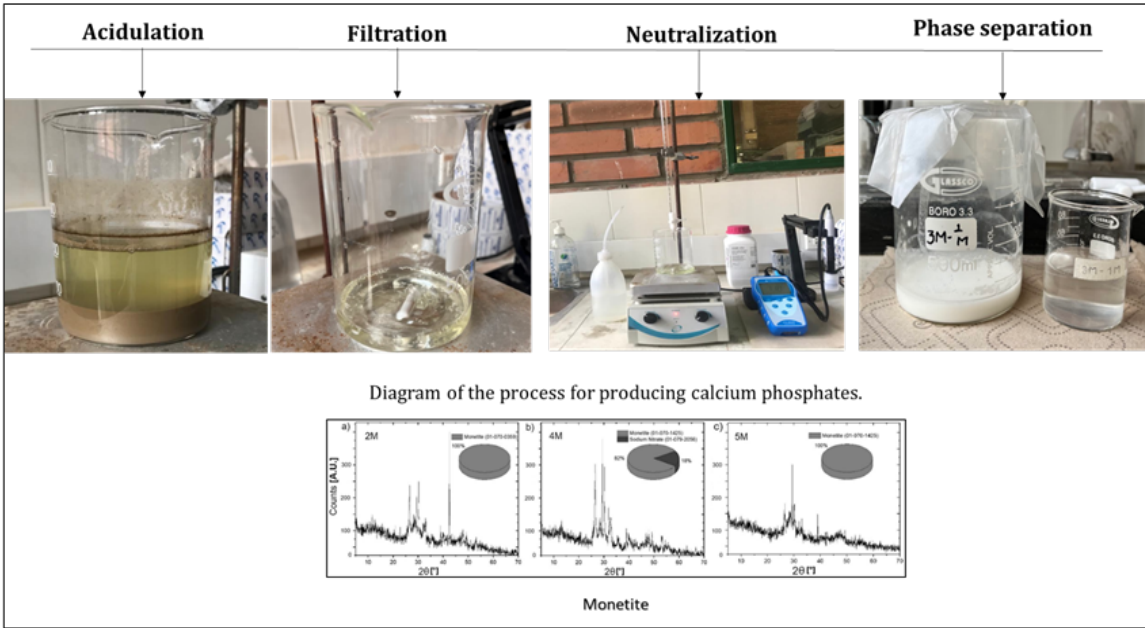
Este estudio se realizó porque la monetita encontrada representa una opción para la generación de biomateriales a partir de los recursos naturales del departamento de Boyacá. La roca fósfora tiene un gran potencial para ser tratada mediante procesos hidrometalúrgicos.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

Los hallazgos más relevantes fueron las condiciones en las que se puede obtener esta especie, ya que si se modifican las concentraciones y el pH, la especie predominante es la hidroxiapatita.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Los resultados obtenidos contribuyen a la industria de los biomateriales, teniendo en cuenta que la monetita ya se ha comenzado a estudiar y ofrece buenas propiedades para su uso como biomaterial para prótesis y prótesis oculares.



Introducción

En los últimos años, los materiales para la regeneración ósea han adquirido una importancia significativa en cirugías dentales y ortopédicas. Entre las opciones disponibles para sustitutos óseos, los materiales basados en fosfato de calcio han surgido como los más fiables debido a su similitud con el componente mineral del hueso (1). Los fosfatos de calcio pueden crear un entorno biocompatible que promueve la formación de nuevo tejido óseo (2).

Una fase específica de los fosfatos de calcio que ha ganado prominencia en el campo de los biomateriales es la monetita (CaHPO_4), también conocida como fosfato de calcio anhidro (3), (4), (5), (6), (7), (8). Esta fase es notable por sus propiedades de reabsorción, facilitando la descomposición controlada del material. Esta característica permite que la monetita sea reemplazada por tejido óseo recién formado, eliminando a menudo la necesidad de una segunda intervención para eliminar el material, asegurando así la integración del fragmento óseo sin residuos al final del proceso de recuperación (4), (7).

La aplicación de fosfatos de calcio depende de su morfología específica y composición química. La elección del fosfato de calcio se basa en la necesidad biológica que debe satisfacerse. En algunos casos, el material debe mostrar tenacidad y resistencia al impacto, mientras que en otros se requiere una buena solubilidad (9), (10), (11).

Se han realizado estudios para explorar el potencial de la monetita en la purificación del agua. Aunque la hidroxiapatita es el material más estudiado entre los fosfatos de calcio, se cree que la monetita posee mayor solubilidad debido a ser un fosfato de calcio ácido (12).

La formación de fosfatos de calcio requiere soluciones con iones de calcio (Ca^{2+}) y iones fosfato (PO_4^{3-}) (13). El tipo de material sintetizado depende en gran medida del pH. Según Suchanek et al. (2018) (14), a niveles de pH inferiores a 4, el fosfato de calcio más estable es la monetita, mientras que a niveles de pH superiores a 4, la hidroxiapatita se convierte en la fase termodinámica predominante. Este factor es crucial para controlar el proceso de fabricación de fosfatos de calcio. Además del pH, la proporción molar Ca/P influye en el entorno de formación. Sin embargo, hay evidencia de que durante la precipitación pueden formarse varias especies, presentando variaciones en las proporciones molares obtenidas (15), (1), (16). Es un área de investigación que sigue evolucionando para optimizar las condiciones del proceso y mejorar la eficiencia.

La fabricación de fosfatos de calcio, y más precisamente de monetita, no es un trabajo completamente nuevo, ya que ha sido objeto de varios estudios (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25). Pero obtener monetita de la roca fosfatada no es un trabajo fácil de encontrar en la literatura. Por esta razón, este trabajo propone la extracción de monetita a partir de soluciones con Ca y P, obtenidas directamente de la lixiviación de roca fosfática (PR) del municipio de Pesca, Boyacá, Colombia. Cuando la PR se disuelve en soluciones ácidas, se pueden obtener varios elementos en forma iónica debido a la naturaleza de esta roca (26), (27), (28). El estudio investiga la influencia de la alta concentración de la solución ácida, el rango de pH en la precipitación de monetita y la morfología de los productos obtenidos.

Materiales y métodos

Se desarrolló un proceso metalúrgico para fabricar monetita utilizando roca fosfática del municipio de Pesca, Boyacá, Colombia, como materia prima. Se descubrió que estas rocas pueden producir soluciones enriquecidas con iones P y Ca. Las reacciones para obtener precipitados de una solución de PR lixiviada se realizaron con control del pH en diferentes rangos.

Preparación de la solución de lixiviación

El mineral se trituraba y molía, y luego se tamizaba la muestra para obtener un material con partículas menores a 106 μm .

Lotes de 75 g de la muestra se lixiviaron con 225 mL de ácido nítrico (HNO_3) al 65%, marcando MERCK. Para las pruebas de lixiviación se utilizaron reactores de 500 mL con agitación, manteniendo una agitación constante durante 24 horas. Se realizaron pruebas de laboratorio a tres concentraciones diferentes de ácido: 2, 4 y 5 M, para determinar su influencia en la formación de los precipitados. Tras la agitación, las soluciones con iones P y Ca se separaron por filtración y se utilizaron como materia prima para este estudio. Se añadieron 10 mL de cada una de las tres soluciones obtenidas de la lixiviación ácida a un vaso con agitación magnética constante, donde se reaccionó con una solución MERCK de 0,5 M NaOH mark para alcanzar los tres rangos de pH establecidos para el análisis, que estaban entre 3 y 4; entre 4 y 5; y entre 6 y 7. De cada rango se obtuvieron 3 precipitados sólidos, obteniendo 9 muestras de polvo para su posterior análisis. El medidor de pH utilizado fue Apera Instruments Premium Series PH8500-SA. Una vez ajustada la solución al pH deseado, la agitación se detuvo. Las muestras se lavaron para eliminar materiales solubles de los precipitados y se secaron en placas calefactoras a 70 °C.

Análisis composicional y mineralógico

Las especies constituyentes del precipitado se analizaron mediante difracción de rayos X. Se utilizó un dispositivo Panalytical X'Pert Pro MPD, que operaba bajo condiciones establecidas para un escaneo en el eje 2θ de 5° a 70°, con pasos de 0,02° y un tiempo de 0,5 s/paso. Se utilizó radiación con una longitud de onda (λ) de 1,5406 Å. La identificación y análisis de fases se realizaron utilizando el software X'Pert High Score Plus.

El análisis composicional se realizó utilizando un aparato de fluorescencia Panalytical Epsilon 13V 1,5 V, configurado y calibrado adecuadamente para leer muestras de polvo. Se utilizaron los estándares correspondientes entregados con el equipo por el proveedor.

Caracterización morfológica

Las diferentes morfologías de los materiales obtenidos se observaron utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7000F, equipado con una sonda Oxford de espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS) conectada a software INCA para caracterización composicional. Se adquirieron imágenes con diversas ampliaciones y en distintas zonas de las muestras.

Resultados y discusión

Composición mineralógica y elemental de PR

A partir del análisis del espectro de difracción de rayos X de la muestra de PR utilizada como materia prima inicial, se encontró que las especies predominantes eran fluorapatita, cuarzo y calcita, con concentraciones del 59%, 34% y 7%, respectivamente (véase la Figura 1).

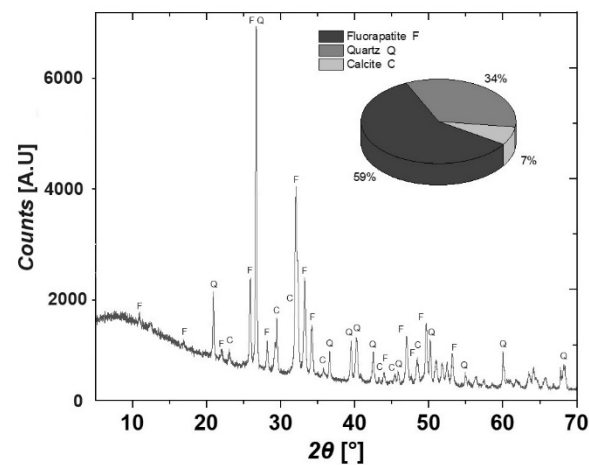


Figura 1. Espectro de difracción de rayos X y gráfico circular que muestran la distribución porcentual de las principales fases mineralógicas detectadas en la muestra PR.

El análisis químico elemental de la PR informa de porcentajes de P y Ca del 13,44% y 36,76%, respectivamente (véase la Tabla 1). La presencia de estos dos elementos químicos, como los principales o más abundantes componentes en las rocas fosfatas, no solo permite clasificar estos minerales como ideales para la agricultura sostenible, sino que también resalta su importancia como mineral estratégico e industrial (28). La Tabla 2 solo informa de los elementos químicos encontrados en concentraciones superiores al 1%, que en conjunto constituyen aproximadamente el 68,5% de la muestra.

Tanto el análisis mineralógico como la composición elemental de esta materia prima permiten clasificarla como roca fosfatada sedimentaria (29).

Tabla 1. Composición elemental de la muestra mineral de PR.

Elemento	Composición [%]
Ca	36.76
P	13.44
Si	12.48
Al	1.29
Mg	3.54
Fe	1.06

Análisis elemental y análisis de fases de precipitados obtenidos en diferentes concentraciones de HNO3 y distintos rangos de pH

La Figura 2 muestra los resultados de la XRF para la cantidad de Ca y P en cada uno de los 9 precipitados sólidos obtenidos mediante lixiviación, filtración y neutralización de RP con NaOH. Se puede deducir que la condición para obtener la mayor cantidad de Ca (>43%) es a una concentración de ácido nítrico de 2 M y una neutralización a un pH entre 6 y 7. Para obtener la mayor cantidad de P (>17%) se obtiene una concentración de ácido nítrico de 4 M y una neutralización con un pH entre 4 y 5. Se observó la presencia de elementos menores como Fe, Mg y Al, así como algunos oligoelementos, pero estos no se reportan para fines prácticos de este trabajo.

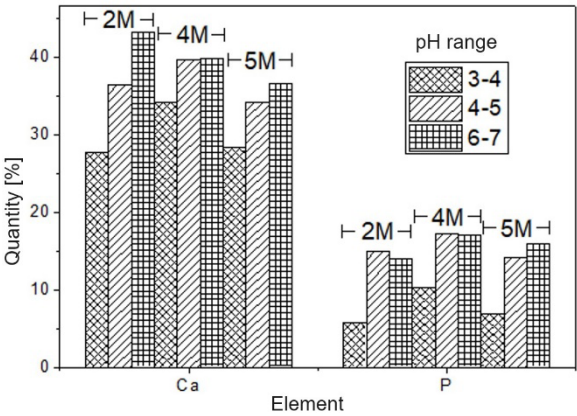


Figura 2. Cantidad de Ca y P en los precipitados obtenida en 2, 4 y 5 M HNO3 y los tres rangos de pH de precipitación.

El número de fases determinadas basándose en el análisis semicuantitativo de los espectros XRD para los 9 precipitados sólidos se presenta en la Tabla 2. Se observa que la fase fosfato de calcio para la condición de pH en el rango de 3-4 es monetita o fosfato de calcio anhidro (CaHPO₄). Estos resultados se obtuvieron tras lavar las muestras con agua desionizada para eliminar los compuestos solubles que aparecieron durante el proceso de precipitación, como el nitrato de sodio (NaNO₃). Estos resultados demuestran que es posible precipitar monetita a partir de lixiviato de roca fosfatada controlando el pH durante el proceso de neutralización.

Tabla 2. Fases presentes en los 9 precipitados sólidos. CaHPO₄ es monetita, Ca₅(PO₄)_{3OH} es hidroxiapatita y NaNO₃ es nitrato de sodio.

[HNO3]	Rango de pH	Fase [%]		
		CaHPO4	Ca5(PO4)3OH	NaNO3
2 M	3-4	100	-	-
	4-5	58	42	-
	6-7	-	100	-
4 M	3-4	82	-	18
	4-5	73	27	-
	6-7	-	94	6
5 M	3-4	100	-	-
	4-5	53	47	-
	6-7	57	43	-

Los espectros XRD de las fases constituyentes de los polvos sintetizados en el rango de pH de 3-4 se muestran en la Figura 3, donde la especie mayoritaria es monetita (CaHPO_4).

Al aumentar la presencia de iones OH y ajustar las condiciones a un rango de pH de 4-5, se observó otra especie de fosfato de calcio conocida como hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). Sin embargo, la monetita sigue siendo la fase mayoritaria bajo las condiciones establecidas (véase la Figura 4).

Cuando las condiciones se acercaron al pH neutro de la solución, el precipitado formado en concentraciones de 2M y 4M mostró hidroxiapatita como especie mayoritaria (véase la Figura 5). Sin embargo, a una concentración de 5 M, el compuesto monetita-hidroxiapatita seguía apareciendo. Según Suchanek et al., (2018) (14), para $\text{pH} > 4$, el fosfato de calcio termodinámicamente más estable es la hidroxiapatita.

Estructuralmente, la monetita es un material que cristaliza en una red triclínica perteneciente al grupo espacial P-1 (#2). Sus seis picos de difracción más intensos se encuentran en el eje $\square 2$ entre 26° y 33° , correspondientes a los planos (0 0 2); (2 0 0); (-1 2 0); (-1 -2 1); (2 0 1); y (-2 0 2) con intensidades de 92,2; 92,1; 100; 45,5; 34,2; y el 43,6%, respectivamente. Los patrones de monetita identificados en las muestras están indexados en la base de datos cristalográfica ICSD con los códigos nº 01-070-0359; 01-070-1425; y 01-070-1520. Los parámetros de la red son $a = 6,9100 \text{ \AA}$; $b = 6,6270 \text{ \AA}$; $c = 6,9980 \text{ \AA}$; y $V = 309,28 \text{ \AA}^3$.

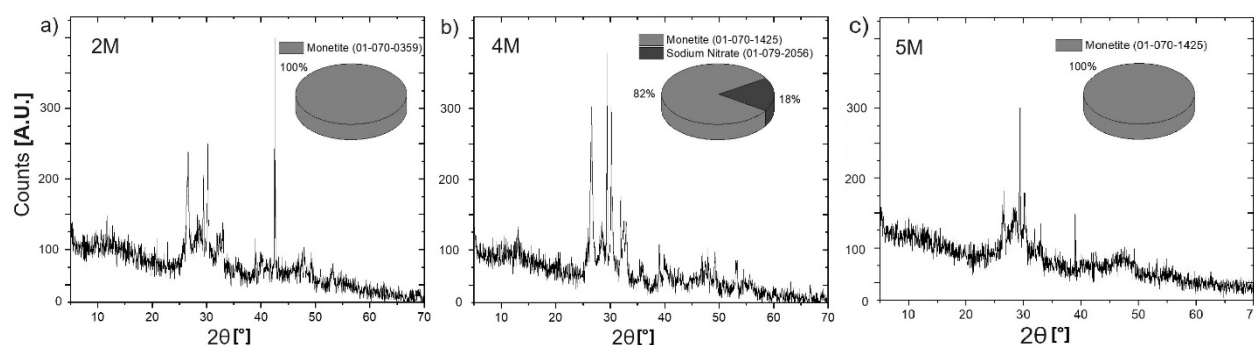


Figura 3. Espectros de difracción de rayos X y gráficos circulares que muestran la distribución porcentual de las principales fases mineralógicas detectadas en los materiales en polvo sintetizados en el rango de pH de 3-4.

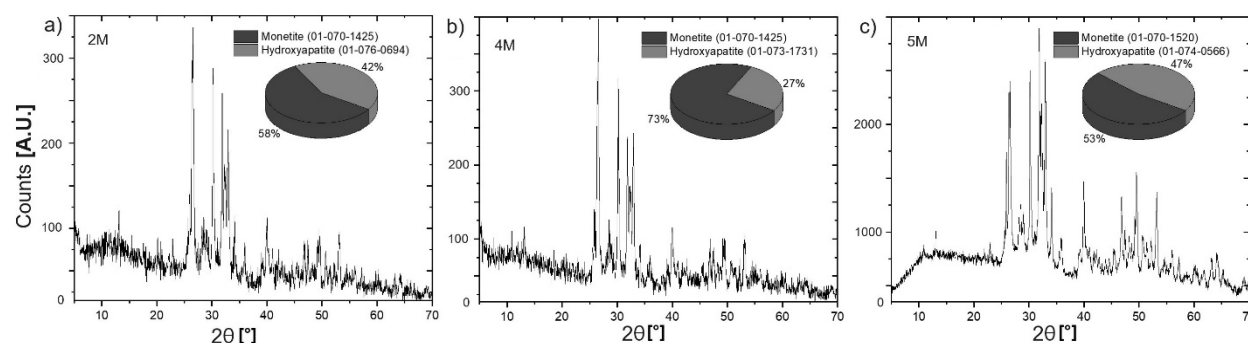


Figura 4. Espectros de difracción de rayos X y gráficos circulares que muestran la distribución porcentual de las principales fases mineralógicas detectadas en los materiales en polvo sintetizados en el rango de pH de 4-5.

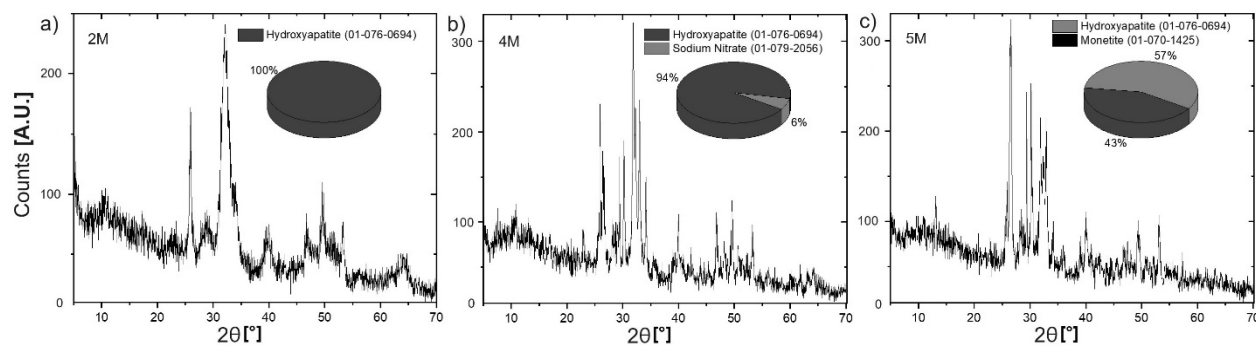


Figura 5. Espectros de difracción de rayos X y gráficos circulares que muestran la distribución porcentual de las principales fases mineralógicas detectadas en los materiales en polvo sintetizados en el rango de pH de 6-7.

La Figura 6 muestra el agrandamiento del pico correspondiente a una intensidad del 100% para el plano (-1 2 0), detectado en una posición del eje 2θ cerca de $30,2^\circ$ para los espectros de las muestras obtenidas a una concentración de HNO_3 de 4 y 5 M, y valores de pH entre 3 y 5. Según el análisis de los resultados reportados en la Tabla 3, estas condiciones son las más favorables para la formación de la fase monetita.

Morfología de los precipitados

La morfología de las partículas precipitadas también fue analizada por SEM, para diferentes concentraciones de ácido y en función del pH de neutralización.

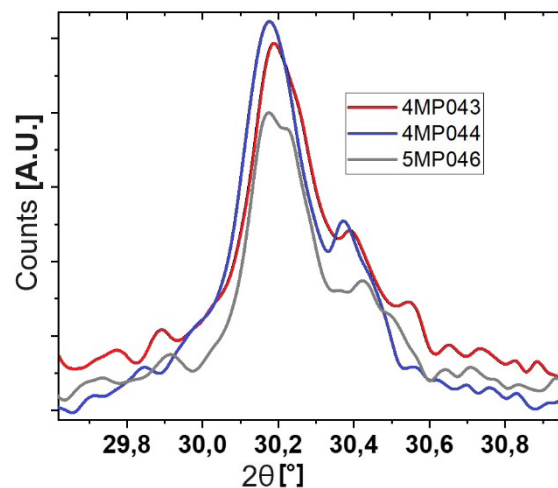


Figura 6. Agrandamiento del pico con mayor intensidad para la fase monetita obtenido en las muestras tratadas a 4 y 5 M con rangos de pH entre 3 y 5.

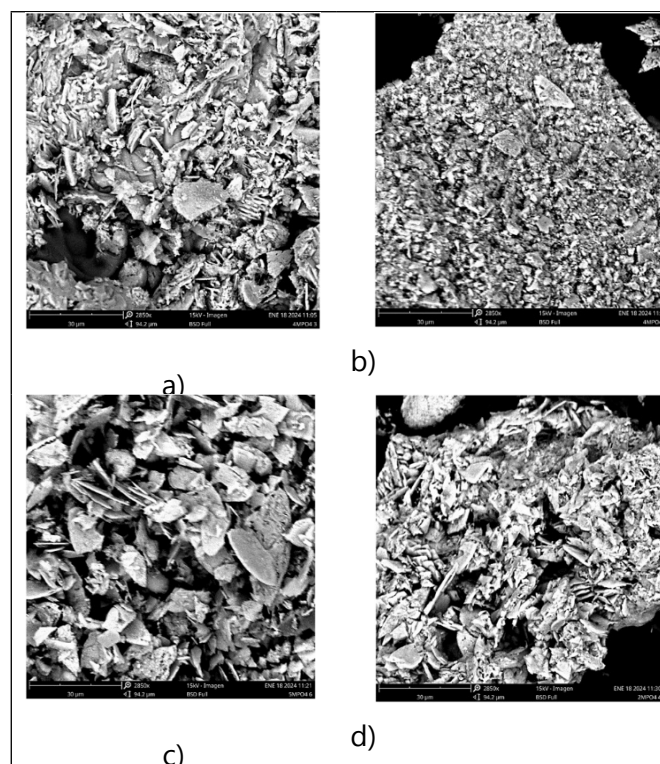


Figura 7. Microestructuras de precipitados a 4M para un rango de pH de 3–5. a) concentración 4M con pH=3, b) 4M con pH=4, c) 5M con pH=5 y d) 2 M con pH=4.

La Figura 7 muestra imágenes de los materiales en polvo obtenidos a concentraciones molares de 4 M y valores de pH entre 3 y 5. En general, se puede observar la formación de estructuras de tamaño micrométrico ($< 30 \mu\text{m}$) en forma de placas o láminas con superficies planas. Esta estructura evidencia que los procesos hidrometalúrgicos con concentraciones de 4M y valores de pH entre 3 y 5 se establecen en especies como monetita e hidroxiapatita. Con los parámetros de fabricación establecidos, el resultado muestra el crecimiento de granos con una distribución de tamaño polimodal. Es importante mencionar que las muestras se secaron a una temperatura de 70°C , por lo que es posible que un aumento de esta variable pueda modificar la estructura de la monetita[8]. Se puede observar en la figura 7 a) una hoja menor que la figura 7 c) con pH = 3. Significa que el mayor pH maximiza la obtención de la especie monetita. Sin embargo, el objetivo de este estudio es obtener monetita mediante tratamientos hidrometalúrgicos, es decir, a partir de una reacción ácido-base que parte de licor rico en Ca y P obtenido por la lixiviación de una fuente natural de estos iones, como la roca fosfatada (PR).

Para determinar el uso o aplicación de estos materiales obtenidos, es necesario desarrollar pruebas de caracterización específicas adicionales para evaluar su potencial como biomateriales.

Conclusiones

Se puede concluir que la lixiviación de roca fosfática (PR) es un tratamiento eficiente. Al obtener una solución enriquecida en Ca y P y variar el pH, se pueden generar diferentes especies estables, como la hidroxiapatita y la monetita, bajo diversas condiciones. Este estudio se centró en estas especies.

Los patrones de difracción indicaron que la monetita puede obtenerse como la fase mineralógica predominante en el rango de pH de 3 a 6; sin embargo, bajo condiciones más estrictas, la monetita es el fosfato de calcio más estable con un pH de 3 a 4. A medida que el pH de la solución se acerca a la neutralidad, el entorno favorece la formación de otra especie conocida como hidroxiapatita.

Con un pH entre 5 y 6, puede formarse un compuesto de monetita-hidroxiapatita. Es necesario estudiar las propiedades resultantes de la combinación de estas fases mineralógicas, ya que existe la posibilidad de que se complementen entre sí y puedan utilizarse en diversas aplicaciones, como en el ámbito médico. Durante el proceso de precipitación, también se identificó una tercera especie conocida como NaNO_3 , que posee propiedades de solubilidad que facilitan la separación de fosfatos de calcio mediante el enjuague con agua desionizada. Sin embargo, es necesario asegurar suficientes lavados para la purificación de las especies de interés.

Reconocimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia, Medellín y el proyecto MinCiencias SGR - CTI call 006-2019, BPIN 2020000100507 y Universidad Santo Tomás bajo su dirección. También agradecemos a las empresas CECOLTEC S.A.A. el apoyo recibido.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Gloria Soto-Calle, Néstor Rojas-Reyes, Adrián Gómez-Zapata, Sandra Díaz-Bello. Análisis formal: Adrián Gómez-Zapata. Curación de datos: Néstor Rojas-Reyes. Investigación: Gloria Soto-Calle. Metodología: Gloria Soto-Calle, Néstor Rojas-Reyes. Dirección de Proyecto: Sandra Díaz-Bello. Supervisión: Sandra Díaz-Bello. Validación: Gloria Soto-Calle, Néstor Rojas-Reyes, Adrián Gómez-Zapata, Sandra Díaz-Bello. Recursos: Gloria Soto-Calle. Software: Adrián Gómez-Zapata. Redacción - borrador original - Elaboración: Gloria Soto-Calle, Néstor Rojas-Reyes, Adrián Gómez-Zapata, Sandra Díaz-Bello. Escritura - revisión y edición -Elaboración: Gloria Soto-Calle, Néstor Rojas-Reyes, Adrián Gómez-Zapata, Sandra Díaz-Bello.

Financiación: Sistema general de regalías-SGR. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

1. Xie C, Lu H, Li W, Yi-Min Z. The use of calcium phosphate-based biomaterials in implant dentistry. *J Mater Sci Mater Med*. 2011;23:853-62. <https://doi.org/10.1007/s10856-011-4535-9>
2. Medvecky L, Stulajterova R, Giretova M, Sopcak T, Girman V. Reinforcement of hydroxyapatite ceramics by soaking green samples of tetracalcium phosphate/monetite mixture in aqueous solutions. *Ceram Int*. 2022;48(12):17776-88. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.048>
3. Ma MG, Zhu YJ, Chang J. Monetite formed in mixed solvents of water and ethylene glycol and its transformation to hydroxyapatite. *J Phys Chem B*. 2006;110(29):14226-30. <https://doi.org/10.1021/jp061738r>
4. Stulajterova R, Medvecky L, Giretova M, Sopcak T, Luptakova L, Bures R, et al. Characterization of tetracalcium phosphate/monetite biocement modified by magnesium pyrophosphate. *Materials (Basel)*. 2022;15(7):2586. <https://doi.org/10.3390/ma15072586>

5. Tas AC. Monetite (CaHPO₄) synthesis in ethanol at room temperature. *J Am Ceram Soc.* 2009;92(12):2907-12. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03351.x>
6. Tortet L, Gavarrí JR, Nihoul G, Dianoux AJ. Study of protonic mobility in CaHPO₄·2H₂O (brushite) and CaHPO₄ (monetite) by infrared spectroscopy and neutron scattering. *J Solid State Chem.* 1997;132:SC977383. <https://doi.org/10.1006/jssc.1997.7383>
7. Wang Z, Li Q, Ren S, Zhang H, Chen J, Li A, et al. Composite monetite/amorphous calcium phosphate bone cement promotes bone regeneration. *Ceram Int.* 2023;49(5):7888-904. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.296>
8. Zhou H, Yang L, Gbureck U, Bhaduri SB, Sikder P. Monetite, an important calcium phosphate compound-Its synthesis, properties and applications in orthopedics. *Acta Biomater.* 2021;127:41-55. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.03.050>
9. Le HR, Chen KY, Wang CA. Effect of pH and temperature on the morphology and phases of co-precipitated hydroxyapatite. *J Sol-Gel Sci Technol.* 2012;61(3):592-9. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2665-7>
10. Sakka S, Bouaziz J, Ben F. Mechanical properties of biomaterials based on calcium phosphates and bioinert oxides for applications in biomedicine. In: *Advances in Biomaterials Science and Biomedical Applications.* 2013. <https://doi.org/10.5772/53088>
11. Mishchenko O, Yanovska A, Kosinov O, Maksymov D, Moskalenko R, Ramanavicius A, et al. Synthetic calcium-phosphate materials for bone grafting. *Polymers (Basel).* 2023;15:3822. <https://doi.org/10.3390/polym15183822>
12. Shen J, Evangelista MF, Mkongo G, Wen H, Langford R, Rosair G, et al. Efficient defluoridation of water by Monetite nanorods. *Adsorption.* 2018;24(2):135-45. <https://doi.org/10.1007/s10450-017-9928-8>
13. Tamimi F, Sheikh Z, Barralet J. Dicalcium phosphate cements: brushite and monetite. *Acta Biomater.* 2012;8(2):474-87. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.08.005>
14. Suchanek K, Bartkowiak A, Perzanowski M, Marszałek M. From monetite plate to hydroxyapatite nanofibers by monoethanolamine assisted hydrothermal approach. *Sci Rep.* 2018;8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33936-4>
15. Akram M, Ahmed R, Shakir I, Ibrahim WAW, Hussain R. Extracting hydroxyapatite and its precursors from natural resources. *J Mater Sci.* 2014;49(4):1461-75. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7864-x>
16. Le HR, Chen KY, Wang CA. Effect of pH and temperature on the morphology and phases of co-precipitated hydroxyapatite. *J Sol-Gel Sci Technol.* 2012;61(3):592-9. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2665-7>
17. Dorozhkin SV. Calcium orthophosphate (CaPO₄): occurrence and properties. *Prog Biomater.* 2016;5:9-70. <https://doi.org/10.1007/s40204-015-0045-z>
18. Sergey V, Matthias E. Biological and medical significance of calcium phosphates. *Angew Chem Int Ed.* 2002;41:3130-46. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020902\)41:17<3130::AID-ANIE3130>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020902)41:17<3130::AID-ANIE3130>3.0.CO;2-1)

19. Gbureck U, Dembski S, Thull R, Barralet JE. Factors influencing calcium phosphate cement shelf-life. *Biomaterials*. 2005;26:3691-7. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.09.036>
20. Kumar RR, Wang M. Biomimetic deposition of hydroxyapatite on brushite single crystals grown by the gel technique. *Mater Lett*. 2001;49:15-9. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00333-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00333-5)
21. Higueta LP, Vargas AF, Gil MJ, Giraldo LF. Synthesis and characterization of nanocomposite based on hydroxyapatite and monetite. *Mater Lett*. 2016;175:169-72.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.011>
22. Duncan J, MacDonald JF, Hanna JV, Shirosaki Y, Hayakawa S, Osaka A, et al. The role of the chemical composition of monetite on the synthesis and properties of β -tricalcium phosphate. *Mater Sci Eng C*. 2014;34:123-9. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.08.038>
23. Dorozhkin S. Calcium orthophosphates: Occurrence, properties, biomineralization, pathological calcification and biomimetic applications. *Biomater*. 2011;1:121-64.
<https://doi.org/10.4161/biom.18790>
24. Macha IJ, Ozyegin L, Chou J, Samur R, Oktar FAIK, Ben-Nissan B. An alternative synthesis method for di calcium phosphate (Monetite) powders from mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*) shells. *J Aust Ceram Soc*. 2013;49(2):122-8. Available from:
www.austceram.com/ACS-Journal.
25. Canillas M, Pena P, de Aza AH, Rodríguez MA. Calcium phosphates for biomedical applications. *Bol Soc Esp Ceram Vidrio*. 2017;56(3):91-112 <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.05.001>
26. Avşar C, Gezerman AO. An evaluation of phosphogypsum (PG)-derived nanohydroxyapatite (HAP) synthesis methods and waste management as a phosphorus source in the agricultural industry. *Medziagotyra*. 2023;29(2):247-54. <https://doi.org/10.5755/j02.ms.31695>
27. Bouchkira I, Latifi AM, Khamar L, Benjelloun S. Modeling and multi-objective optimization of the digestion tank of an industrial process for manufacturing phosphoric acid by wet process. *Comput Chem Eng*. 2022;156:107536. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107536>
28. Ryszko U, Rusek P, Kołodyńska D. Quality of phosphate rocks from various deposits used in wet phosphoric acid and P-fertilizer production. *Materials (Basel)*. 2023;16(2):20793.
<https://doi.org/10.3390/ma16020793>
29. Javied S, Waheed S, Siddique N, Tufail M, Chaudhry MM, Irfan N. Elemental analysis of phosphate rocks: for sustainable agriculture in Pakistan. *J Radioanal Nucl Chem*. 2008;278(1):17-24. 0. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-7205-0>