

Artículo de Investigación

Disminución de plomo de residuos anódicos MnO_2 por descomposición térmica y lixiviación con acetato de amonio

Reduction of lead from MnO_2 anodic waste by thermal decomposition and leaching with ammonium acetate

Orfelinda Avalo Cortez¹: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

oavalo@uni.edu.pe

Miguel Jaime Martínez Coronel: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

miguel.martinez.coronel@gmail.com

David Pedro Martínez Aguilar: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

dmartinez@uni.edu.pe

Edwilde Yoplac Castromonte: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

eyoplacc@uni.edu.pe

Julio Uza Teruya: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

juza@uni.edu.pe

Fecha de Recepción: 13/06/2024

Fecha de Aceptación: 28/10/2024

Fecha de Publicación: 20/01/2025

Cómo citar el artículo

Avalo Cortez, O., Martínez Coronel, M. J., Martínez Aguilar, D. P., Yoplac Castromonte, E. y Uza Teruya, J. (2025). Disminución de plomo de residuos anódicos MnO_2 por descomposición térmica y lixiviación con acetato de amonio [Reduction of lead from MnO_2 anodic waste by thermal decomposition and leaching with ammonium acetate]. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 01-21. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1900>

Resumen

Introducción: El residuo anódico de MnO_2 se genera en el proceso de electrólisis para producir láminas de zinc catódico. Este residuo, que contiene un 12% de compuestos de Pb, se forma durante las limpiezas periódicas de los ánodos y las celdas, evitando interferencias en la producción de zinc. **Metodología:** La muestra de MnO_2 fue analizada mediante Difracción de Rayos-X (DRX) para determinar los compuestos presentes y los tamaños de cristalitas. Se realizó una descomposición térmica en horno tipo Mufla para aumentar la cristalinidad del

MnO₂, facilitando la remoción del plomo. Posteriormente, se realizaron pruebas de lixiviación con acetato de amonio. **Resultados:** El análisis DRX indicó la presencia de Dióxido de Manganeso alfa (α -MnO₂), Anglesita (PbSO₄) y Litargirio (PbO). El tamaño del cristalito de α -MnO₂ pasó de 14.82 nm a 256.9 nm después de la descomposición térmica. La lixiviación con acetato de amonio permitió reducir el plomo en un 61%. **Discusión y Conclusiones:** La caracterización FESEM mostró cambios en morfología y tamaños de partícula tras la descomposición térmica. La lixiviación eliminó eficazmente el plomo, generando PbO como subproducto y cumpliendo con la normativa ambiental.

Palabras clave: Dióxido de Manganeso; Anglesita; Litargirio; descomposición térmica; lixiviación; acetato de amonio; óxido de plomo.

Abstract

Introduction: Anodic MnO₂ residue is generated in the electrolysis process to produce cathode zinc sheets. This residue, which contains 12% Pb compounds, is formed during periodic cleaning of the anodes and cells, preventing interference with zinc production. **Methodology:** The MnO₂ sample was analysed by X-Ray Diffraction (XRD) to determine the compounds present and the crystallite sizes. Thermal decomposition was carried out in a muffle furnace to increase the crystallinity of the MnO₂, facilitating the removal of lead. Subsequently, leaching tests were carried out with ammonium acetate. **Results:** XRD analysis indicated the presence of alpha Manganese Dioxide (α -MnO₂), Anglesite (PbSO₄) and Litharge (PbO). The crystallite size of α -MnO₂ increased from 14.82 nm to 256.9 nm after thermal decomposition. Leaching with ammonium acetate allowed the lead to be reduced by 61%. **Discussion and Conclusions:** FESEM characterisation showed changes in morphology and particle sizes after thermal decomposition. The leaching effectively removed lead, generating PbO as a by-product and complying with environmental regulations.

Keywords: Manganese Dioxide; Anglesite; litharge; thermal decomposition; leaching; ammonium acetate; lead oxide.

1. Introducción

Los ánodos de plomo modificados con dióxido de manganeso (MnO₂) son candidatos prometedores para potenciar la reacción de evolución de oxígeno, pero suelen sufrir inestabilidad estructural y desactivación catalítica tras su digestión irreversible y la inserción de plomo (Pb) en las matrices de MnO₂, lo que en consecuencia restringe su aplicación industrial (Tang *et al.*, 2024). El ánodo de plomo (Pb) ha causado graves problemas de contaminación ambiental y desperdicio de recursos en la electroobtención de zinc (Zn) (Zhang, F. *et al.*, 2023) y también la prevención de la contaminación por plomo causada por la corrosión del ánodo a base de plomo es un tema candente y desafiante para la electroobtención de zinc (Ye *et al.*, 2021). El manganeso y el plomo son importantes materias primas industriales que se utilizan ampliamente en nuestra vida diaria. En el proceso de producción de manganeso se utiliza principalmente el método de fundición por reducción carbotérmica en hornos de arco eléctrico. El manganeso con impurezas continúa siendo refinado por refinamiento electrolítico. Sin embargo, en el proceso de refinación electrolítica, una gran cantidad de manganeso electrolítico en lodo anódico se produce con un contenido de plomo de aproximadamente 7%.

Durante el proceso de fundición del lodo anódico electrolítico de manganeso de retorno, el plomo se evapora primero y hace que la pureza del manganeso disminuya. Por lo tanto, la eliminación del plomo del lodo anódico electrolítico de manganeso se convierte en la clave y difícil punto de utilización del lodo anódico electrolítico de manganeso. Estudiar las características del lodo anódico electrolítico de manganeso y su utilización como recurso son

de gran importancia para reducir la contaminación ambiental y el desarrollo sostenible de la industria electrolítica del manganeso. En los últimos años, se ha realizado una gran cantidad de investigación sobre la utilización integral del lodo anódico electrolítico de manganeso. Tang *et al.* (2005) analizaron las características mineralógicas del lodo anódico y la forma de impurezas en el lodo anódico, y estableció un método que implica la volatilización a alta temperatura. Se propuso eliminar impurezas como Pb, Sn y S en el lodo anódico y aunque este método tiene un cierto efecto de eliminación de impurezas, consume mucha energía y contamina el medio ambiente. Tao *et al.* (2011) propusieron el uso de una mezcla de ácido sulfúrico diluido y una pequeña cantidad de NaCl (peso = 5%) para activar el lodo anódico y luego usar la lixiviación hidrometalúrgica para eliminar el plomo. Aunque el costo es bajo y el proceso es respetuoso con el medio ambiente, la eficiencia es relativamente baja y no se puede eliminar el plomo del lodo anódico en gran medida.

La hidrometalurgia es un método para obtener metales a partir de sus menas. Es una técnica dentro del campo de la metalurgia extractiva que implica el uso de la química acuosa para la recuperación de metales a partir de menas, concentrados y materiales reciclados o residuales (Habashi, 2005). Además, no hay producción de gases ni polvos, lo que elimina fundamentalmente la contaminación por plomo y dióxido de azufre al ambiente circundante en el proceso de recuperación hidrometalúrgica. Además, este método de tratamiento tiene buenas perspectivas de desarrollo debido a la alta tasa de lixiviación y bajo consumo de energía. Se ha demostrado que la hidrometalurgia es mejorada cuando se trabaja con alta temperatura y concentración. Por lo tanto, para poder conseguir condiciones experimentales más suaves se puede introducir las ondas ultrasónicas para mejorar el proceso de lixiviación (Xie *et al.*, 2019). El objetivo principal del presente estudio era lograr disminuir el plomo contenido en el residuo anódico de MnO_2 , por tanto, lo primero que se realizó fue la caracterización microestructural por Difracción de Rayos-X (DRX) a fin de conocer el tamaño de cristalito porque si el residuo anódico MnO_2 es nanométrico, va a perjudicar realizar la remoción del plomo, ya que el MnO_2 actuaría como nanoadsorbente. Por tanto, la alternativa es que el MnO_2 deje de ser nanométrico y pase a ser micrométrico para que la lixiviación con acetato de amonio permita remover el plomo contenido en el residuo anódico de MnO_2 .

1.1. Objetivos del estudio

Objetivo General: Caracterizar el residuo anódico y luego realizar un tratamiento previo de descomposición térmica del residuo anódico para luego realizar la lixiviación del plomo y de esta manera resolver el difícil problema de la presencia de plomo en el lodo anódico electrolítico de manganeso.

Objetivos específicos:

- Realizar el Análisis por Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido con Emisión de Campo (FESEM) del residuo anódico de MnO_2 .
- Hacer las pruebas de descomposición térmica del MnO_2 - α .
- Caracterizar por DRX, FESEM y EDS el residuo anódico de MnO_2 - α .
- Realizar las pruebas de lixiviación empleando acetato de amonio.

- Realizar pruebas de precipitación del Pb presente en las soluciones lixiviadas.
- Hacer el análisis por Absorción Atómica de las muestras líquidas conteniendo Pb y Mn.

2. Marco Teórico

2.1. Residuos anódicos en la electrólisis de Zinc

La producción de zinc metálico a partir de los concentrados sulfuro de zinc, especialmente la esfalerita, comprenden varias etapas: tostación, lixiviación y electrólisis. En la etapa de lixiviación con ácido sulfúrico, otros metales presentes en el concentrado tostado tal como Fe, Cd, Co, Cu, etc., también se lixivian además del zinc. Como la electrólisis de zinc metálico requiere un electrolito que esté libre de estos contaminantes, el licor ácido sulfúrico necesita un paso de purificación para eliminarlos. El hierro siempre está presente como impureza en las materias primas empleadas y tiene que ser eliminado de la solución de lixiviación.

El dióxido de manganeso o el permanganato de potasio es generalmente agregado al electrolito de sulfato de zinc del proceso de lixiviación para oxidar las impurezas de hierro. La cantidad de manganeso agregado varía ampliamente con la cantidad de hierro y otras impurezas en la solución. Para minimizar la corrosión de los ánodos de Pb-Ag y la contaminación por plomo del cátodo de zinc producido se debe agregar manganeso al electrolito de zinc, generalmente en forma de permanganato de potasio (KMnO_4). Por esta razón en la electrodeposición de zinc también se genera residuo anódico que es de valor tecnológico. La creciente demanda mundial de manganeso hace cada vez más importante desarrollar procesos para la recuperación económica de este metal a partir de minerales de manganeso de baja ley y de otras fuentes secundarias.

El metal de manganeso es esencial para la industria metalúrgica con importantes aplicaciones en la producción de acero y aluminio. El manganeso electrolítico es un constituyente de metales no ferrosos, que se agrega a productos de aluminio, por ejemplo, para mejorar su resistencia, ductilidad y propiedades de laminado en caliente. Las fuentes secundarias que contienen una alta concentración de metales vienen siendo reutilizadas mediante técnicas de lixiviación y luego recuperadas por cementación, precipitación u otras técnicas. El paso más determinante en un proceso hidrometalúrgico es generalmente el primero, que es la lixiviación de los metales valiosos presentes en la materia prima.

2.2. Proceso de Tostación de minerales de plomo

Antes de la introducción de la moderna fusión en hornos altos de minerales de galena tostados y sinterizados, en los que el óxido de plomo se reduce con carbono o monóxido de carbono, existían dos procesos para la extracción de plomo de la galena. El proceso para la producción de plomo a partir de galena en la antigüedad se basaba en su reducción directa. De manera similar al cobre, la reducción directa del sulfuro de plomo es termodinámicamente factible por encima de aproximadamente 900°C . La galena se fundía en una fusión adecuada en un entorno con suficiente aire, lo que daba como resultado plomo líquido y dióxido de azufre. Este proceso se conoce como proceso de reacción de tostado o proceso de reducción por aire.

El proceso consiste básicamente en tostar parcialmente la galena a una temperatura comparativamente baja, seguida de un aumento de la temperatura para que se produzca la reacción de tostado. Los productos del tostado son PbO , PbSO_4 y el PbS sin tostar. Durante la fusión posterior, se produce una reacción entre los componentes oxidados del plomo así

producidos y el sulfuro de plomo inalterado, y se produce plomo. Si la temperatura de fusión no es superior al punto de fusión del PbO, PbS o PbSO₄, el plomo reducido sale lentamente de la carga. La tecnología del proceso cambió con el tiempo y el modo de suministro de aire durante la reacción de tostado fue inicialmente una corriente natural, que luego se cambió a una corriente artificial. Si PbO y PbS están presentes en proporción estequiométrica, entonces todo el PbS se reduciría. Sin embargo, si hay un exceso de PbS o mezclas de PbO y PbSO₄, siempre queda una cantidad notable de plomo sin reducir. Además, la mezcla de PbS y PbO/PbSO₄ debe ser completa para el funcionamiento eficiente del proceso (Dube, 2006).

2.3. Descomposición térmica de MnO₂

Los dióxidos de manganeso (MnO₂) sufren descomposición térmica y reducción cuando se realiza el calentamiento a temperatura elevada. Este proceso de descomposición y reducción conduce a un producto final de monóxido de manganeso (MnO) después de alcanzar los 1200°C. De acuerdo con informes anteriores, el proceso de reducción de MnO₂ sigue tres etapas: MnO₂ → Mn₂O₃ → Mn₃O₄ → MnO. Durante la etapa 1, el MnO₂ se descompone en trióxido de dimanganeso (Mn₂O₃), que generalmente ocurre entre 460°C y 570°C. En la etapa 2, Mn₂O₃ continúa y se descompone en tetraóxido de trimanganeso (Mn₃O₄) sólido en el rango de 700°C ~800°C. Luego, en la etapa 3, por encima de 1200°C se transforma completamente en monóxido de manganeso MnO. El MnO₂ sólido tiene varias estructuras cristalinas diferentes, como los tipos α, β, γ, δ y λ sus propiedades físicas y químicas varían entre sí. Una variedad de estructuras de túnel se ha encontrado en los tipos de cristales α, β y γ. La forma más abundante es la β-MnO₂ (pirolusita), que está formada por esquinas octaédricas que comparten las esquinas en el plano a-b y octaédrico que comparte aristas en la dirección c. (Sonj *et al.*, 2023).

3. Metodología

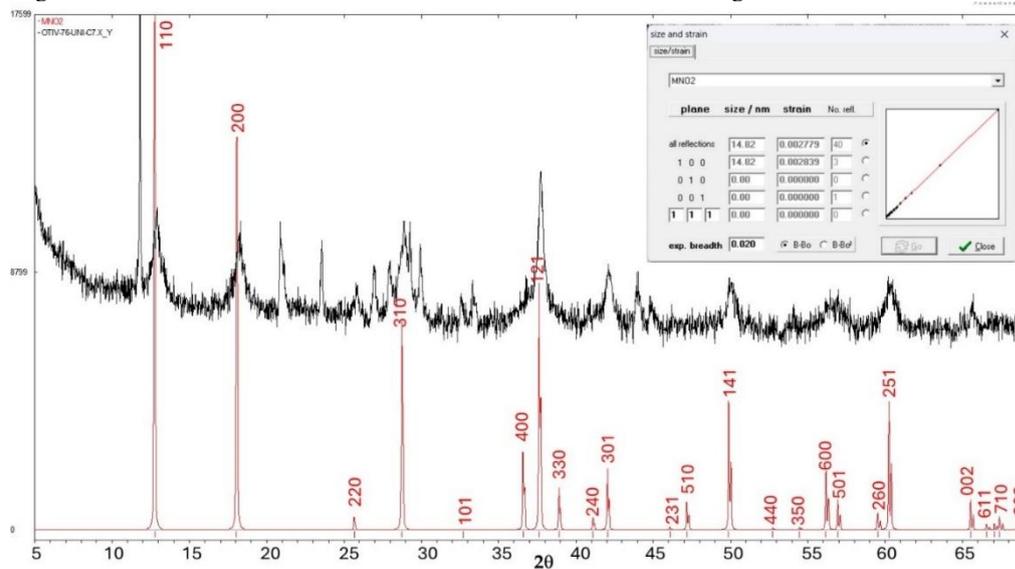
La muestra de residuo anódico de dióxido de manganeso (MnO₂) se sabía que contenía plomo, pero para poder determinar que tipos de compuestos existían tanto con Mn y Pb, la muestra se sometió a caracterización microestructural por Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica con Emisión de Campo (FESEM). Una vez que se determinó el Análisis Cualitativo, Cuantitativo, tamaño de cristalito, morfología y tamaño de partícula de la muestra empleando DRX y FESEM, se descubrió que la muestra era dióxido de manganeso alfa, α-MnO₂ de tamaño nanométrico y, por tanto, se comportaba como nanoadsorbente y por este motivo se decidió pasar la muestra a tamaño micrométrico por descomposición térmica, para poder remover el plomo. La descomposición térmica provocó cambios de fase del óxido de manganeso, aumentando la cristalinidad y el tamaño de partícula de la muestra original y por tanto, ya se podía realizar las pruebas de lixiviación en dos tipos de equipos, Plancha de Calentamiento con Agitador Magnético y en Baño de Ultrasonido, para retirar el plomo, empleando acetato de amonio.

3.1. Caracterización por Difracción de Rayos-X, DRX, del residuo anódico de dióxido de manganeso con contenido de plomo

La muestra original del residuo anódico de MnO₂ fue enviada al Laboratorio de la Empresa BIZALAB para su caracterización microestructural por Difracción de Rayos X. En la figura 1 se observa el difractograma de Rayos X del MnO₂ original, utilizando el Software PowderCell 2.4. Se puede observar que la mayoría de los picos tienen una gran anchura, es decir son de tamaño nanométrico. De acuerdo con los resultados, se observa que el residuo anódico de dióxido de manganeso corresponde a MnO₂ alfa, teniendo un tamaño de cristalito de 14,82nm, es decir es un "nanomaterial".

Figura 1.

Difractograma DRX de la muestra de residuo anódico de MnO₂ original

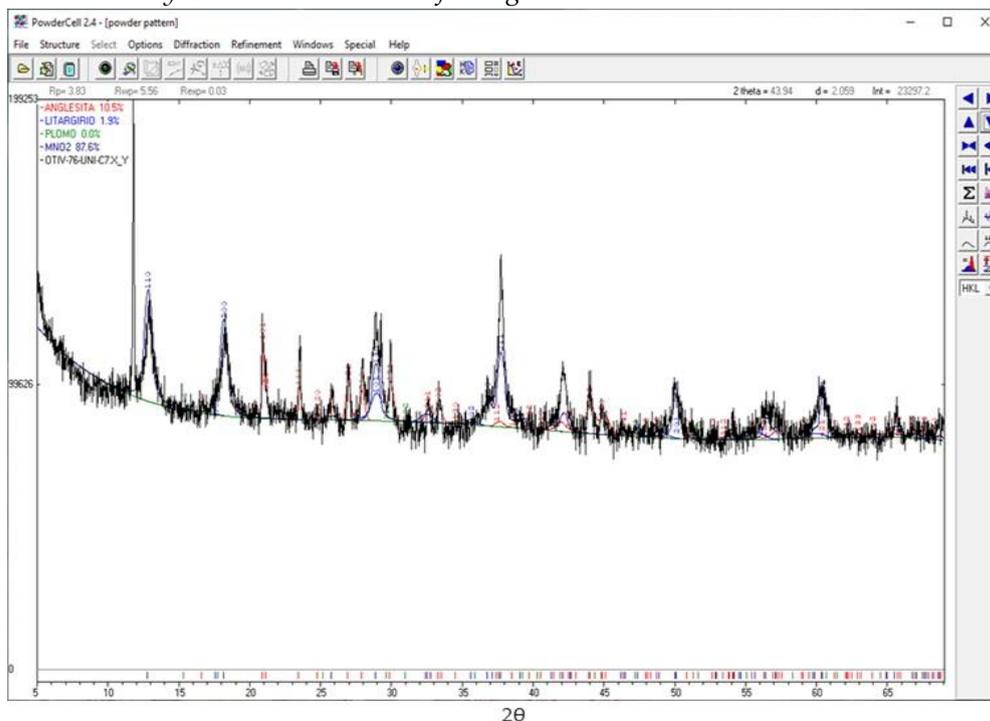


Fuente: Proyecto de Investigación NEXA y Tesis Maestría (Martínez, M. 2023)

En el siguiente análisis por Difracción de Rayos X, se determinó la presencia de compuestos de plomo asociados al residuo anódico de dióxido de manganeso. En el análisis cualitativo y cuantitativo se obtuvo 10,5% de Anglesita (PbSO₄), 1,9 % de Litargirio (PbO) y 0% de Pb puro, tal como se observa en la figura 2.

Figura 2.

Análisis Cualitativo y Cuantitativo en el Difractograma DRX del residuo anódico de MnO₂



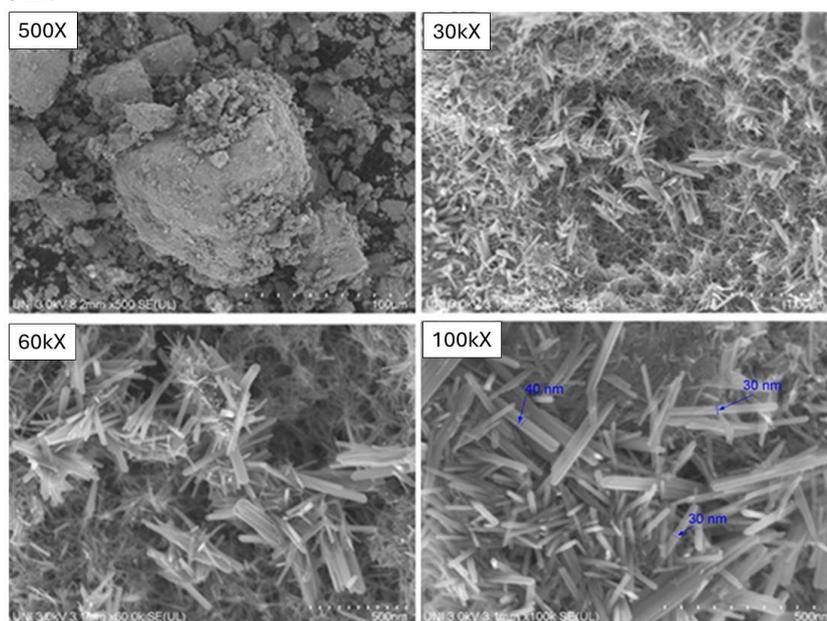
Fuente: Proyecto de Investigación NEXA y Tesis Maestría (Martínez, M. 2023)

3.2. Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido y EDS del residuo anódico de MnO_2 con contenido de Pb

Para conocer la morfología y el tamaño de partícula, el residuo anódico de dióxido de manganeso original fue caracterizado por Microscopia Electrónica de Barrido con Emisión de Campo (FESEM), teniendo acoplado la Espectrometría por Dispersión en Energía (EDS) en el Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, a fin de conocer el análisis elemental de plomo en el residuo anódico de dióxido de manganeso. Se puede observar en la figura 3 imágenes en 4 magnificaciones: 500X, 30kX, 60kX y 100kX donde la morfología de las partículas del residuo anódico del MnO_2 son “varillas” con espesores de diámetros muy inferiores a 100nm, es decir las muestras de α - MnO_2 son “nanopartículas”. Empleando el Software Image J se pudo hacer las mediciones de los diámetros de las nanovarillas del residuo anódico de dióxido de manganeso. Los diámetros de las varillas del MnO_2 son nanométricas con espesores de 30 nm y 40 nm, es decir, actúan como “nanoadsorbentes” y no permitirían la remoción del plomo. En la figura 4 se observa los resultados del análisis por EDS, teniendo una cantidad de 4,84% de plomo en el residuo anódico de MnO_2 .

Figura 3.

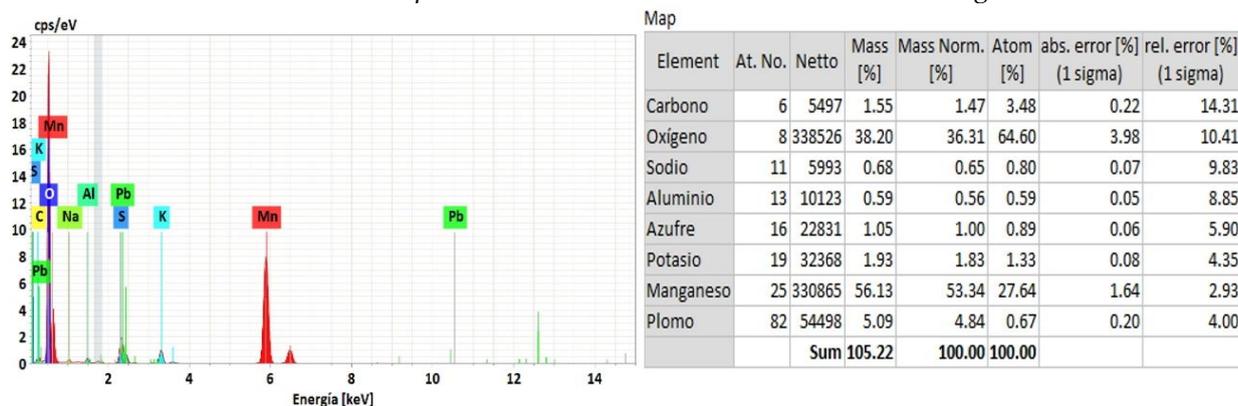
Morfologías obtenidas del residuo anódico de MnO_2 original en magnificaciones de 500X, 30kX, 60kX y 100kX en FESEM



Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Figura 4.

Resultados del Análisis Elemental por EDS del residuo anódico de dióxido de manganeso.



Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.3. Pruebas experimentales de descomposición térmica del α - MnO_2 presentes en los residuos anódicos a diferentes temperaturas

A fin de transformar las muestras originales de α - MnO_2 que eran nanométricas a micrométricas, se procedió a someter las muestras por descomposición térmica, empleando horno tipo Mufla hasta una temperatura máxima de 1000°C, para lograr que las muestras de α - MnO_2 se transformen en Mn_2O_3 y Mn_3O_4 evitando que sean nanoadsorbentes y permitan que en las pruebas de lixiviación con acetato de amonio se pueda remover el plomo presente en el óxido de manganeso.

3.3.1. Procedimiento Experimental

Para poder enviar la muestra a ser analizada por DRX y FESEM lo primero que se tuvo que hacer es convertirlas en polvo y someterlas a descomposición térmica. Para ello se utilizó Pulverizador Cerámico logrando que la muestra este totalmente menor a 74 μm y luego se hizo tamizado en un Ro-Tap con malla Tyler #200. El siguiente tratamiento fue someter las muestras pulverizadas por triplicado para descomposición térmica, con pesos de 1 gramo a procesos de calcinación en Horno Tipo Mufla, en tiempos de 1 hora y a temperaturas de 700°C, 800°C, 900°C y 1000°C. En **tabla 1** se puede observar los resultados de la descomposición térmica en la que hay pérdidas de peso en cada muestra siendo mayores en función de las altas temperaturas. La muestra M7 a 700°C de calcinación tuvo una pérdida de 5% de peso, la muestra M8 a 800°C un 13.67%, la muestra M9 a 900°C un 18.67% y la muestra M10 a 1000°C una pérdida de 22% de peso. Luego estas muestras fueron enviadas a ser analizadas por DRX, y FESEM en la Facultad de Ciencias de la UNI.

Tabla 1.

Variación de los pesos de las muestras después de las pruebas de descomposición térmica de los residuos anódicos de MnO₂

Muestra	Peso inicial (gr)	Peso después tostación y descomposición térmica (gr)	Diferencia de peso (gr)	Pérdida de Peso promedio (gr)	%Pérdida de Peso promedio
M7 700°C	1,00	0,96	0,04	0,050	5,0
	1,00	0,94	0,06		
	1,00	0,95	0,05		
M8 800°C	1,00	0,86	0,14	0,137	13,67
	1,00	0,87	0,13		
	1,00	0,86	0,14		
M9 900°C	1,00	0,82	0,18	0,187	18,67
	1,00	0,81	0,19		
	1,00	0,81	0,19		
M10 1000°C	1,00	0,78	0,22	0,220	22,0
	1,00	0,77	0,23		
	1,00	0,79	0,21		

Fuente: Laboratorio de Nanomateriales y Metalurgia-UNI.

4. Resultados

4.1. Análisis de los difractogramas DRX del residuo de α -MnO₂ con contenido de Pb, después de la descomposición térmica a diferentes temperaturas

Empleando el Software PowderCell 2.4 se procedió a realizar el análisis de los difractogramas de Difracción de Rayos-X (DRX) de las muestras de residuo anódico de MnO₂, que fueron sometidas inicialmente a pulverizado y luego a descomposición térmica. Los resultados obtenidos demostraron que las muestras originales de MnO₂ al ser sometidas a descomposición térmica a 700, 800, 900 y 1000°C pasaron a convertirse en Mn₂O₃ y luego a Mn₃O₄. Los contenidos de la muestra sometida a la temperatura de 700°C fueron: 1,6% de MnO₂; 91,3% de Mn₂O₃; 4,9% de PbSO₄; 0,8% de PbO y 1,4% de PbO₂ alfa. Es decir, el residuo anódico de α -MnO₂ que inicialmente contenía 87,6% al ser sometido a descomposición térmica a 700°C disminuyó a 1,6% y se transformó a Mn₂O₃ en proporción de 91,3%, es decir cantidad muy elevada.

Al tener conocimiento que había mucha variación de los óxidos de manganeso, en el análisis de los difractogramas de DRX, se procedió solo a considerar las determinaciones de los porcentajes de óxidos de manganeso sometidas a 700, 800, 900 y 1000°C. En la descomposición térmica a 700°C se obtuvo 2,2% de MnO₂; 93,3 % de Mn₂O₃ y 4,6% de Mn₃O₄. En la descomposición térmica a 800°C se obtuvo 0% de MnO₂; 90,6 % de Mn₂O₃ y 9,4% de Mn₃O₄, es decir desapareció el α -MnO₂. En la descomposición térmica a 900°C se obtuvo 0% de MnO₂; 9,5 % de Mn₂O₃ y 90,5% de Mn₃O₄, por lo tanto, a esta temperatura también desapareció el α -MnO₂ y en enorme cantidad estaba el Mn₃O₄. En la descomposición térmica a 1000°C se obtuvo 11% de MnO₂; 10,5 % de Mn₂O₃ y 78,5% de Mn₃O₄, es decir volvió a aparecer el MnO₂ y disminuyó el Mn₃O₄.

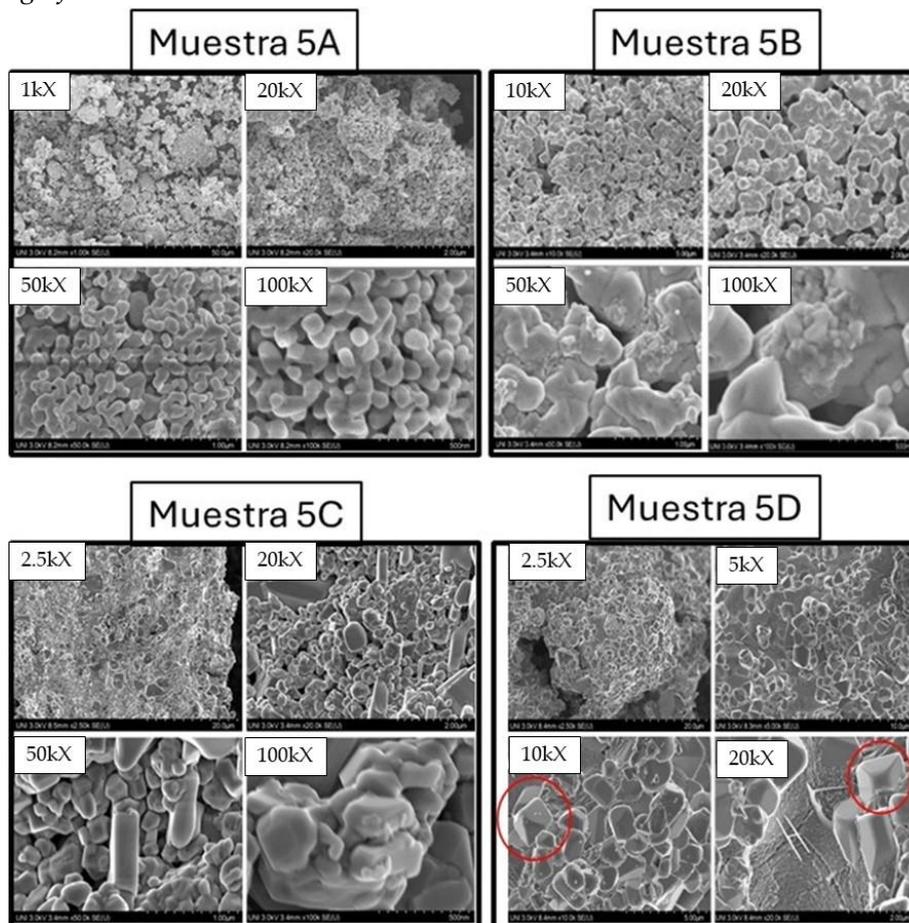
4.2. Análisis de las micrografías obtenidas por FESEM del residuo anódico de MnO₂ con contenidos de Pb luego de la descomposición térmica

Las imágenes emitidas por Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido con Emisión de Campo (FESEM) de las muestras de residuo anódico de MnO₂, que fueron sometidas inicialmente a pulverizado y luego a descomposición térmica a 700, 800, 900 y 1000°C, dieron a conocer las morfologías y los tamaños de partículas. La muestra de residuo anódico MnO₂ original, tenía forma de varilla y tamaños de partículas de 30 y 40nm, pero al someter las muestras a descomposición térmica cambiaron la morfología y aumentaron los tamaños de partículas, es decir dejaron de ser de tamaño nanométrico y pasaron a ser micrométricos, tal como se observa en la figura 5, donde aparecen los grupos de muestras 5A, 5B, 5C y 5D con 4 magnificaciones distintas en cada una de ellas.

En la muestra 5A que fue sometida a descomposición térmica a la temperatura de 700°C y que fue analizada en FESEM con magnificaciones de 1kX, 20kX, 50kX y 100kX, las imágenes mostraron cambios de morfología, es decir, forma cuasi-esférica y no de varillas y además aumentaron los tamaños de las partículas a 100nm. En la muestra 5B que fue sometida a descomposición térmica a la temperatura de 800°C y que fue analizada en FESEM con magnificaciones de 10kX, 20kX, 50kX y 100kX, las imágenes volvieron a cambiar de morfología, es decir, las partículas dejaron de ser cuasi-esféricas y se convirtieron en partículas sinterizadas heterogéneas y con mayor tamaño, llegando varias de ellas a rango micrométrico, gracias a la aglomeración de las pequeñas partículas. En la muestra 5C que fue sometida a descomposición térmica a la temperatura de 900°C y que fue analizada en FESEM con magnificaciones de 2.5kX, 20kX, 50kX y 100kX, las imágenes muestran que las partículas aumentaron más de tamaño con morfología variada y más cristalinas. En la muestra 5D que fue sometida a descomposición térmica a la temperatura de 1000°C y que fue analizada en FESEM con magnificaciones de 2.5kX, 5kX, 10kX y 20kX, las imágenes de las partículas muestras que son más micrométricas, es decir, dejaron de ser nanométricas y se convirtieron mayormente más cristalinas y facetadas. De acuerdo con todos estos resultados se puede establecer que la descomposición térmica favorece el aumento de tamaño y la cristalinidad de las partículas.

Figura 5.

Morfologías obtenidas en FESEM del residuo anódico de MnO₂ sometidas a descomposición térmica y diferentes magnificaciones



Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

4.3. Análisis de las pruebas experimentales de lixiviación iniciales en planchas de calentamiento con agitador magnético

Las primeras pruebas de lixiviación con acetato de amonio en Plancha de Calentamiento con Agitador Magnético a 500RPM, se realizaron a las muestras originales de residuos anódicos de MnO₂, a fin de determinar si sometiendo dos pruebas de lixiviación a temperatura ambiente de 25°C y una lixiviación adicional a 85°C con dos tipos de cantidades de muestras, es decir 1 gr a 25°C y 5 gr a 85°C. La importancia de estas pruebas era saber si se podía realizar la remoción del plomo que estaba dentro del residuo anódico α -MnO₂, y es por eso, que luego de realizar las pruebas de lixiviación, se enviaron a ser analizadas por Absorción Atómica y se obtuvo los resultados de las Muestras A1, A2 y A3 en la tabla 2. Las segundas pruebas de lixiviación con acetato de amonio en Plancha de Calentamiento con Agitador Magnético a 500RPM, se realizaron con las muestras que fueron sometidas a descomposición térmica en el Horno Tipo Mufla a la temperatura de 900°C y fueron elegidas estas muestras porque dejaron de ser nanométricas y se convirtieron en micrométricas en alto porcentaje de Mn₃O₄. La lixiviación de estas muestras también se realizó a 25°C y 85°C en cantidades de 1gr y 5 gr, y fueron analizadas por Absorción Atómica siendo los resultados las Muestras B1, B2 y B3 también en la tabla 2, y se pudo observar que la lixiviación de estas Muestras B presenta una mayor remoción de Pb en comparación a las Muestras A que pertenecen a los residuos anódicos de MnO₂ originales. Por lo tanto, lo que favorece la remoción de plomo de los

residuos anódicos en la lixiviación con acetato de amonio es las pruebas de descomposición térmica a 900°C. Además, tanto en las Muestras A y B a 85°C se pudo observar que disminuye la remoción de Pb, pero aumenta la remoción de Mn comparado a las pruebas de 25°C. Finalmente, se establece que es recomendable realizar las pruebas de lixiviación a temperatura ambiente con las muestras sometidas a descomposición térmica a 900°C para favorecer la remoción del plomo y no del manganeso.

Tabla 2.

Resultados por Absorción Atómica de las soluciones lixiviadas con acetato de amonio en plancha de calentamiento con agitador magnético

Muestra	Peso (g)	Temp (°C)	Velocidad Agitación (RPM)	Tiempo (min)	Pb (mg/L)	Mn (mg/L)
A1	1	25	500	100	144,44	0,06
A2	5	25	500	100	129,56	0,02
A3	5	85	500	100	81,47	0,83
B1	1	25	500	100	583,15	2,77
B2	5	25	500	100	1907,01	6,68
B3	5	85	500	100	1514,33	50,01

Fuente: Laboratorio de Espectrometría de la FIGMM.

4.4. Análisis de los resultados obtenidos por Absorción Atómica de las soluciones lixiviadas y de las soluciones finales obtenidas de la precipitación del Plomo

Las siguientes pruebas de lixiviación con acetato de amonio de las muestras sometidas a descomposición térmica por calcinación a temperaturas de 300°C, 500°C y 900°C, fueron realizadas en dos tipos de equipos a temperatura ambiente: Plancha de Agitación Magnética y Baño de Ultrasonido, tal como se observa en la tabla 3. Los resultados en la tabla 3 demuestran que tanto en la lixiviación con acetato de amonio en Plancha con Agitador Magnético (L1 y L3) y Baño Ultrasonido (L2 y L4) con muestras calcinadas a 300°C y 500°C remueven alto plomo, pero también remueven alto manganeso, a diferencia de las muestras calcinadas a 900°C que tanto en Plancha de Agitador Magnético (L5) como en Baño de Ultrasonido (L6) remueven mayor cantidad de plomo, pero muy pequeñas cantidades de manganeso.

Una alternativa para poder comparar los resultados de las cantidades removidas de Plomo (Pb) y Manganeso (Mn) en mg/L de las pruebas de lixiviación con acetato de amonio en Planchas con Agitador Magnético (L1, L3 y L5) y en Baño de Ultrasonido (L2, L4 y L6) de la tabla 3, fue realizar una gráfica en la figura 6 para visualizar las comparaciones de las cantidades de plomo removidas en las pruebas de lixiviación. En la figura 6 se pudo observar que la lixiviación en el Baño de Ultrasonido es el equipo que favorece la mayor cantidad de plomo removido de las muestras previamente sometidas a descomposición térmica a 900°C.

Tabla 3.

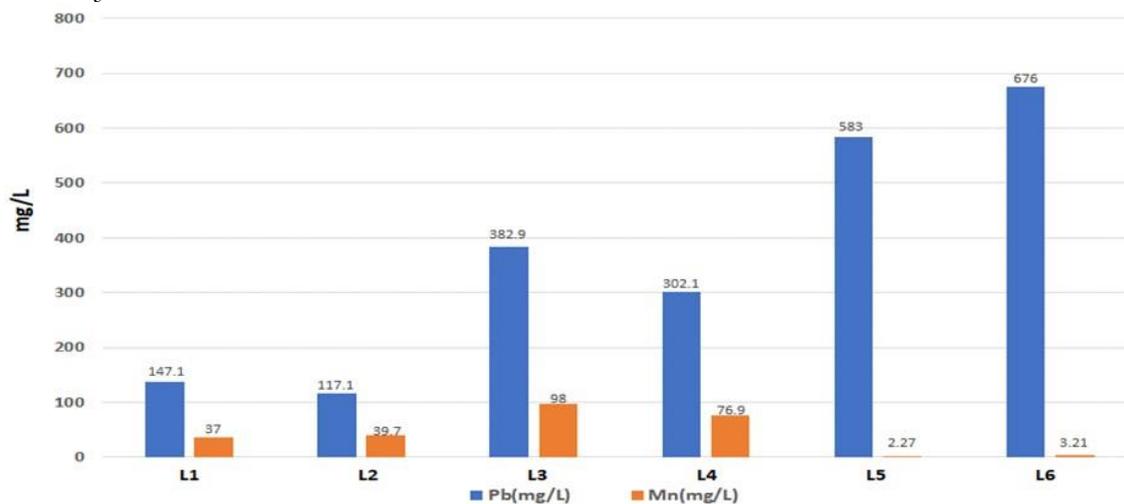
Resultados por Absorción Atómica de las soluciones lixiviadas con acetato de amonio en Plancha con agitación magnética y en Baño de Ultrasonido

	Residuo anódico calcinado a:	Cantidad de residuo anódico usado en la lixiviación	Tipo de solución	pH	Pb (mg/L)	Mn (mg/L)
L1	300°C	1gr	Lixiviada en Plancha con agitación magnética	6,77	147,1	37,0
L2	300°C	1gr	Lixiviada en Baño de Ultrasonido	6,77	117,1	39,7
L3	500°C	1gr	Lixiviada en Plancha con agitación magnética	7,01	382,9	98,0
L4	500°C	1gr	Lixiviada en Baño de Ultrasonido	6,88	302,1	76,9
L5	900°C	1gr	Lixiviada en Plancha con agitación magnética	7,07	583,15	2,77
L6	900°C	1gr	Lixiviada en Baño de Ultrasonido	6,85	676,0	3,21

Fuente: Laboratorio de Espectrometría de la FIGMM

Figura 6.

Gráfico Comparativo de las cantidades de Pb y Mn presentes en las soluciones lixiviadas en Plancha con Agitador Magnético y en Baño de Ultrasonido utilizando residuos anódicos con tratamiento previo a 300, 500 y 900°C



Fuente: Proyecto de Investigación NEXA y Tesis Maestría (Martínez, 2023).

Con la finalidad de recuperar el plomo proveniente de las soluciones lixiviadas con acetato de amonio en Planchas con Agitador Magnético y Baño de Ultrasonido, se procedió a realizar pruebas de precipitación utilizando Hidróxido de Sodio (NaOH) y generando finalmente un residuo líquido en la tabla 4 que contenga mínimas cantidades de Pb de acuerdo a lo establecido en los Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas del Decreto Supremo N°010-2010 MINAM. Se puede observar en la tabla 4 que las pruebas de precipitación de plomo con NaOH son muy favorables ya que los residuos líquidos finales contienen muy pequeñas cantidades en mg/L tanto del Pb como del Mn.

Tabla 4.

Resultados por Absorción Atómica de los residuos líquidos finales luego de la precipitación de Pb de las soluciones lixiviadas

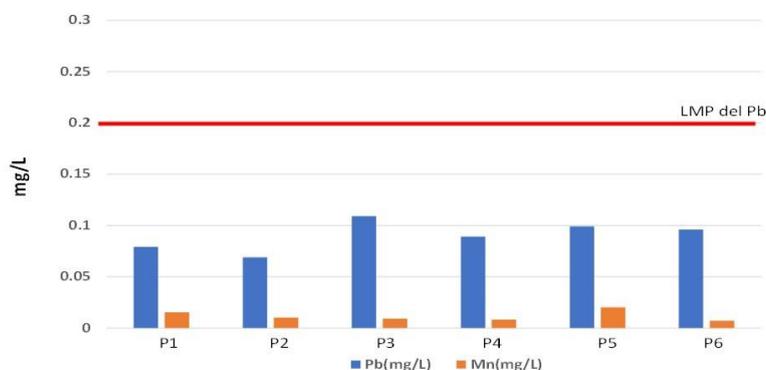
	Residuo anódico calcinado a:	Cantidad de residuo anódico usado en la lixiviación	Solución final luego de la:	pH	Pb (mg/L)	Mn (mg/L)
P1	300°C	1gr	-Precipitación con NaOH de la solución lixiviada en Plancha con agitación magnética	10,04	0,079	0,015
P2	300°C	1gr	-Precipitación con NaOH de la solución lixiviada en Baño de Ultrasonido	10,30	0,069	0,010
P3	500°C	1gr	-Precipitación con NaOH de la solución lixiviada en Plancha con agitación magnética	10,28	0,109	0,009
P4	500°C	1gr	-Precipitación con NaOH de la solución lixiviada en Baño de Ultrasonido	10,11	0,089	0,008
P5	900°C	1gr	-Precipitación con NaOH de la solución lixiviada en Plancha con agitación magnética	11,00	0,099	0,020
P6	900°C	1gr	-Precipitación con NaOH de la solución lixiviada en Baño de Ultrasonido	11,20	0,096	0,007

Fuente: Laboratorio de Espectrometría de la FIGMM.

Realizando un Gráfico Comparativo de Límites Máximos Permisibles (LMP) del plomo en la figura 7, cuyo valor es de 0,2 mg/L y de los residuos líquidos finales con cantidades de Pb y Mn separados de la precipitación del plomo utilizando Hidróxido de Sodio, NaOH, claramente se puede observar que las cantidades de Pb de los residuos líquidos finales son muy inferiores a las del LMP del Pb es decir, todo el procedimiento realizado para la remoción del plomo del residuo anódico del MnO₂, con los procedimientos previos de descomposición térmica en Hornos Tipo Mufla, lixiviación y precipitación en Plancha con Agitador Magnético y Baño de Ultrasonido, se cumple satisfactoriamente con la normativa ambiental.

Figura 7.

Gráfico Comparativo del LMP del Pb con las cantidades de Pb y Mn presentes en los Residuos líquidos finales



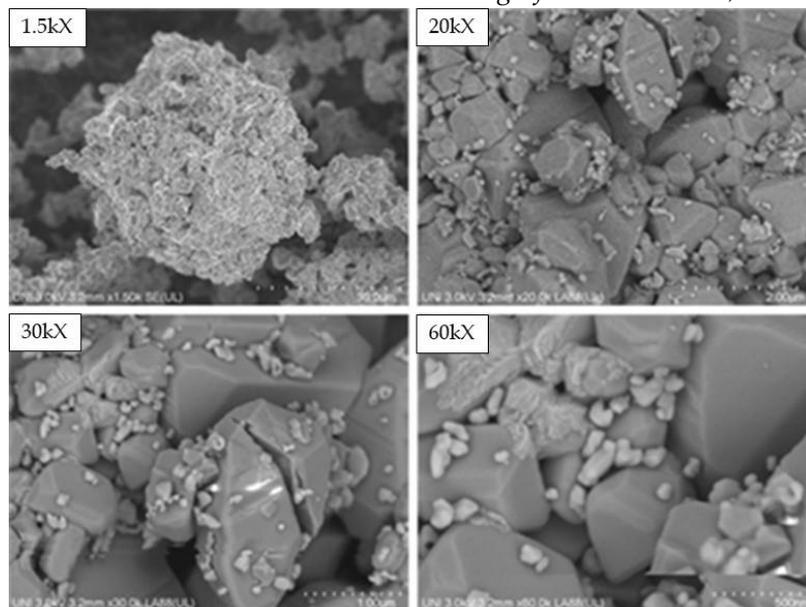
Fuente: Proyecto de Investigación NEXA y Tesis Maestría (Martínez, 2023).

5. Discusión

Para poder determinar la morfología y el tamaño de partícula de las muestras de residuos, generadas después de las pruebas de lixiviación realizadas con acetato de amonio a temperatura ambiente, en equipo de Plancha con Agitador Magnético a 500RPM, se procedió someter el residuo al equipo FESEM a 4 distintas magnificaciones 1.5kX, 20kX, 30kX y 60kX, tal como se observa en la **figura 8**. La morfología de las muestras a 60kX son distintas de acuerdo con su cristalinidad, pues solo las más grandes tienen forma octaédrica y corresponden a las de Mn_3O_4 siendo de tamaño micrométrico, mientras que las muestras pequeñas corresponden a la del plomo con tamaño nanométrico.

Figura 8.

Morfologías obtenidas en FESEM del residuo anódico a magnificaciones 1.5kX, 20kX, 30kX y 60kX

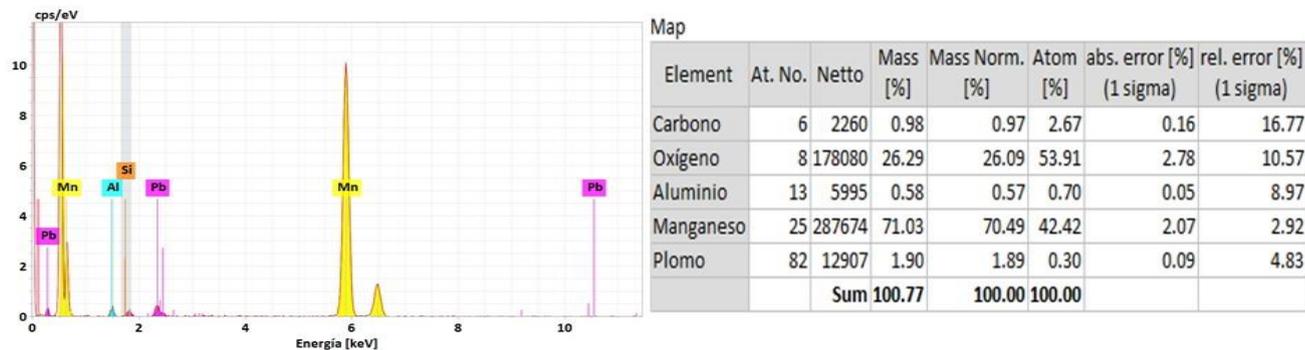


Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Como el EDS está acoplado al FESEM, se pudo obtener los resultados del análisis elemental del Mn y Pb, tal como se observa en la figura 9, donde el Mn tuvo 70.49% mientras que el plomo 1.89%, es decir hubo remoción de Pb. Se tiene que considerar que tanto el carbono (C) como el Aluminio (Al) que aparecen en los resultados del EDS no corresponden a la muestra, sino a portamuestras de aluminio que se cubre con cinta adhesiva de carbón para adherir la muestra al FESEM.

Figura 9.

Resultados del Análisis Elemental por EDS del residuo anódico a 900°C y lixiviado a 500RPM y por un tiempo de 100min.

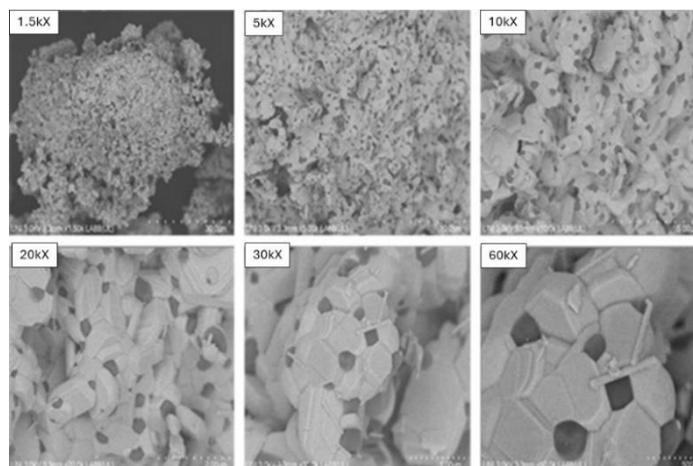


Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El acetato de plomo, $Pb(CH_3COO)_2$, luego de ser precipitado con NaOH se convirtió en $Pb(OH)_2$ y finalmente fue calcinado en el horno tipo Mufla, a la temperatura de 600°C y en 1 hora convirtiéndose en PbO de tamaño micrométrico y cristalina, tal como se muestra en la **figura 10** emitida por FESEM.

Figura 10.

Morfologías obtenidas en FESEM de la formación de PbO , con magnificaciones 1.5kX, 5kX, 10kX, 20kX, 30kX y 60kX

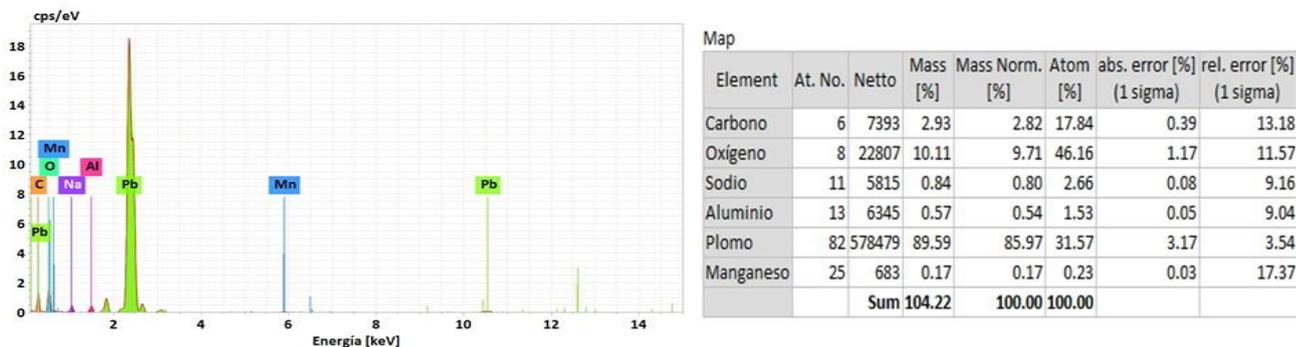


Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Para poder validar los resultados que fueron obtenidos por Absorción Atómica de las pruebas de solución lixiviada, donde las cantidades de manganeso eran muy pequeñas, se decidió realizar Análisis Elemental por EDS acoplado a FESEM de la muestra de acetato de plomo precipitado con NaOH y calcinado a 600°C por 1 hora, tal como se muestra en la figura 11. Se puede observar que existe solo 0.17% de manganeso y 85.97% de plomo, es decir se pudo validar en la muestra final que la remoción de manganeso es bien pequeña.

Figura 11.

Resultados del Análisis Elemental por EDS del precipitado con NaOH y calcinado a 600°C por 1 hora



Fuente: Laboratorio de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Como resultado final, para poder cumplir con la disminución del plomo del residuo anódico MnO_2 , se tiene que realizar las siguientes pruebas: Descomposición térmica en Horno Tipo Mufla a 900°C por 1 hora, logrando que el α - MnO_2 nanométrico pase a Mn_3O_4 micrométrico, dejando de ser nanoadsorbente y que no predomine las fuerzas de atracción y permita que en la siguiente prueba de lixiviación con acetato de amonio en Plancha con Agitador Magnético y Baño de Ultrasonido a temperatura ambiente a 500RPM en 100 min favorezca la remoción del plomo y no del manganeso, cumpliendo el objetivo del estudio.

6. Conclusiones

Al analizar por DRX la muestra original de residuo anódico de dióxido de manganeso se determinó que estaba constituida de 87.6% de α - MnO_2 , 10,5% de Anglesita ($PbSO_4$) y 1,9% de Litargirio (PbO), teniendo el α - MnO_2 un tamaño de cristalito de 14,82 nm siendo un nanomaterial. En el análisis por FESEM se estableció que el α - MnO_2 tenía forma de “nanovarillas” y con tamaños de partículas menores a 100nm, es decir, las muestras originales eran “nanoadsorbentes” y por eso no se podía remover el plomo del MnO_2 .

Al realizar las pruebas de descomposición térmica del α - MnO_2 en el Horno tipo Mufla, hubo cambios de compuestos en función de las temperaturas y por este motivo se eligió trabajar a 900°C formando Mn_3O_4 con partículas de tamaño micrométricas y con morfología de cristales facetados, dejando de ser nanoadsorbentes.

Las pruebas de lixiviación fueron realizadas en Plancha de Agitador Magnético y Baño de Ultrasonido, a temperatura ambiente con acetato de amonio, formando acetato de plomo, $Pb(CH_3COO)_2$. Luego se procedió a hacer pruebas de precipitación utilizando hidróxido de sodio, formando $Pb(OH)_2$, secado en estufa y calcinado en Horno Tipo Mufla a la temperatura de 600°C por 1 hora, logrando finalmente obtener un subproducto de óxido de plomo de una gran pureza.

Se puede concluir finalmente que la disminución del plomo del residuo anódico de MnO_2 , se logró satisfactoriamente gracias a la prueba de descomposición térmica, dejando de ser nanométrica y nanoadsorbente, favoreciendo la lixiviación y logrando disminuir el plomo del residuo anódico en 61%, formando un subproducto de PbO puro y un efluente líquido con contenidos de Pb y Mn cumpliendo la normativa ambiental.

7. Referencias

- Dube, R. K. (2006). The extraction of lead from its ores by the iron-reduction process: A historical perspective. *JOM*, 58(10), 18-23. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0195-5>
- Habashi, F. (2005). A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 79(1-2), 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.01.008>
- Song, J., Liu, M., Ma, X., Tian, Q., Feng, J., Zhong, X. y Duan, F. (2023). Thermal decomposition behavior and computational analysis of alpha and beta manganese dioxide nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*, 962, 171208. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171208>
- Tang, B., Yang, F., Chen, C., Shi, C., Wang, B., Li, J. y Zhang, D. (2024). Asymmetric structural tuning of industrial MnO₂ arrays on a hierarchical lead-based anode for manganese metallurgy. *Green Chemistry*, 26(3), 1587-1597. <https://doi.org/10.1039/D3GC04402E>
- Tang, J. G. y Han, Z. C. (2005). Investigation on process mineralogy of manganese anode slime and impurity removal. *Journal of Mining and Metallurgy*, 14, 75-78. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:100963295>
- Tao, C. Y., Li, D. H., & Liu, Z. H. (2011). Activation and purification of electrolytic-manganese anode slime and its application. *Battery Bimonthly*, 9, 121-124. <https://caod.oriprobe.com/order.htm?id=28738008&ftext=base>
- Xie, H., Zhang, L., Chen, G., Koppala, S., Li, S., Wang, Y. y Long, H. (2019). High temperature roasting combined with ultrasonic enhanced extracting lead from electrolytic manganese anode mud. *Materials Research Express*, 6(10), 105530. <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab3d5b>
- Ye, W., Xu, F., Jiang, L., Duan, N., Li, J., Ma, Z., Zhang, F. y Chen, L. (2021). Lead release kinetics and film transformation of Pb-MnO₂ pre-coated anode in long-term zinc electrowinning. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124931. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124931>
- Zhang, F., Duan, N., Zuo, J., Jiang, L., Li, J., Zhuang, S., Yong, L. y Xu, F. (2023). Fe doped γ -MnO₂ of anode for lead release inhibition in zinc electrowinning. *Chemical Engineering Journal*, 476, 146475. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146475>
- Zhang, H., Bi, Y., Chen, X., Huang, L. y Mu, L. (2016). Treatment and characterization analysis of electrolytic manganese anode slime. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 683-690. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.125>

CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Contribuciones de los/as autores/as:

Conceptualización: Avalo Cortez, Orfelinda; Martínez Coronel, Miguel Jaime; **Software:** Avalo Cortez, Orfelinda; **Validación:** Martínez Aguilar, David Pedro; Yoplac Castromonte, Edwilde; Uza Teruya, Julio; **Análisis formal:** Avalo Cortez, Orfelinda, Martínez Coronel, Miguel Jaime; **Curación de datos:** Avalo Cortez, Orfelinda; Martínez Aguilar, David Pedro; **Redacción-Preparación del borrador original:** Avalo Cortez, Orfelinda; **Redacción-Revisión y Edición:** Avalo Cortez, Orfelinda, Martínez Coronel, Miguel Jaime; **Visualización:** Avalo Cortez, Orfelinda; **Supervisión:** Avalo Cortez, Orfelinda; **Administración de proyectos:** Avalo Cortez, Orfelinda; **Todos los/as autores/as han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito:** Avalo Cortez, Orfelinda; Martínez Coronel, Miguel Jaime; Martínez Aguilar, David Pedro; Yoplac Castromonte, Edwilde y Uza Teruya, Julio.

Financiación: Esta investigación ha sido financiada por la Compañía Minera NEXA RESOURCES PERU S.A.A. y por el Vicerrectorado de Investigación que es el órgano rector del sistema de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Agradecimientos: Se agradece la participación de los docentes del grupo de Investigación Nanomateriales y Metalurgia, así como también al alumno de Posgrado de la Especialidad de Metalurgia de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Conflicto de intereses: No existe ningún conflicto de intereses entre los autores.

AUTORES:

Orfelinda Avalo Cortez

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Docente Investigador en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. 07 años de experiencia como Jefa de Laboratorio y Líder del Grupo de Investigación “Nanomateriales y metalurgia” registrado en el DANI desde el 2016 a la fecha y responsable de la implementación de este laboratorio de investigación. Formación Académica como Bachiller y Título Profesional en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería. Grado de Doctor y Maestro en Ingeniería Metalúrgica y Materiales, obtenidos en la Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil.

oavalo@uni.edu.pe

Índice H: 1

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-6619-7227>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55890683200>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=AjhFQYQAAAAJ&hl=es>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Orfelinda-Avalo>

Academia.edu: <https://independent.academia.edu/AvaloCortez>

Miguel Jaime Martínez Coronel

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Ingeniero Metalurgista y tiene un post grado en Ciencias Metalúrgicas registrado en SUNEDU y especializaciones en Gerencia Comercial, Dirección de Proyectos, Gestión Financiera, así como estudios en Sistemas Integrados de Gestión y Calidad. Posee más de 12 años de experiencia en operaciones mineras y proyectos de mejora en gran Minería.

miguel.martinez.coronel@gmail.com

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0000-7038-9005>

David Pedro Martínez Aguilar

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Investigador en Ingeniería Metalúrgica en la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el Área de metalurgia extractiva y nanomateriales. Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería. Docente de Pregrado en los cursos de Cerámica, Procesamiento de minerales y materiales. Docente de Posgrado en la Maestría de Ingeniería Metalúrgica en el dictado de cursos de Biometalurgia.

dmartinez@uni.edu.pe

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-6942-8273>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=8Mly7SkAAAAJ&hl=es&oi=ao>

Edwilde Yoplac Castromonte

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Docente Universitario en el Área de Metalurgia Extractiva y Ambiental. Investigador en el Área de Metalurgia Extractiva y Ambiental. Profesionalmente se desempeñó como metalurgista, llegando a ser Gerente del Dpto. de Investigaciones en el Área de Metalurgia Extractiva en el Banco Minero del Perú y como jefe del Dpto. de Investigaciones Metalúrgicas de SGS del Perú; actualmente se desempeña como consultor en el área de Metalurgia Extractiva en diversas empresas mineras y Doctorando en Ingeniería y Ciencias ambientales en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad de Concepción Chile. Ingeniero Metalurgista egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería.

eyoplacc@uni.edu.pe

Índice H: 1

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-0288-0008>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193771071>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=ypjtanQAAAAJ&hl=es>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Edwilde-Yoplac>

Academia.edu: <https://uni.academia.edu/EdwildeYoplac?swp=rr-ac-122581928>

Julio Uza Teruya

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería. Ingeniero metalúrgico, trabajó en proyectos de Evaluación de Impacto ambiental-EIA y programa de adecuación y manejo ambiental-PAMAS, para las minas de Centromin, Cerro de Pasco, Mhar Tunel y Minsur; y en la fiscalización de medio ambiente a las mineras Minsur y Andaychahua. Actualmente es profesor de cursos de especialización en Medio Ambiente en la Pontificia Universidad Católica y profesor principal y Director de Investigación en la Escuela Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería del Perú.

juza@uni.edu.pe

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0001-0751-1570>

Academia.edu: <https://independent.academia.edu/JulioUzaTeruya>