

**Artículo Original**

***RECUPERACIÓN DE VANADIO DE CATALIZADORES AGOTADOS:  
UNA SOLUCIÓN TÉCNICA, AMBIENTAL  
Y ECONÓMICA PARA CUBA***

***VANADIUM RECOVERY FROM SPENT CATALYSTS: A TECHNICAL,  
ENVIRONMENTAL, AND ECONOMIC SOLUTION FOR CUBA***

Laura Ailin Perdomo Gómez<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8374-3015>  
Lorenzo Perdomo González<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3425-1487>  
Manuel Rodríguez Pérez<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4092-3470>  
Lorena Hernández Pérez<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4385-4079>

<sup>1</sup> Departamento de Licenciatura en Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 12, 2026; Revisado: Febrero 20, 2026; Aceptado: Marzo 3, 2026

**RESUMEN**

**Introducción:**

Los residuales catalíticos generados en la producción de ácido sulfúrico en Cuba contienen vanadio, un metal clasificado como crítico y sin yacimientos naturales en el país, los cuales representan un problema ambiental y económico. Estos residuos contaminantes, son almacenados en condiciones inseguras o confinados en instalaciones de capacidad limitada, lo que obliga a buscar soluciones sostenibles.

**Objetivo:**

Exponer las consideraciones técnico - económicas y medio ambientales sobre la recuperación del vanadio contenido en residuales catalíticos de la fabricación de ácido sulfúrico.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Laura A. Perdomo, Email: [laperdomo@uclv.edu.cu](mailto:laperdomo@uclv.edu.cu)



### **Materiales y Métodos:**

En la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se ha desarrollado un proceso tecnológico, basado en trituración, lixiviación ácida, filtración, precipitación y calcinación, utilizando para ello reactivos nacionales.

### **Resultados y Discusión:**

Como resultado se obtiene un concentrado con 37,8 % de  $V_2O_5$ , que puede comercializarse o transformarse en ferrovandio para la fabricación de electrodos de recargue, insumo industrial que actualmente Cuba importa a elevados costos. La investigación demuestra que el procesamiento de estos catalizadores permite convertir un desecho peligroso en una materia prima estratégica, reduciendo la dependencia del mercado internacional y aplicando principios de economía circular y producción más limpia. Se plantean alternativas para aprovechar los subproductos sólidos y líquidos obtenidos, minimizando la generación de nuevos residuos

### **Conclusiones:**

Desde el punto de vista social y económico, la propuesta contribuiría a la sustitución de importaciones, al fortalecimiento de la industria nacional y a la sostenibilidad ambiental, al tiempo que genera un impacto positivo en sectores estratégicos, integrando ciencia, innovación y desarrollo sostenible en Cuba.

**Palabras clave:** economía circular; electrodos de recargue; medio ambiente; residuales catalíticos; vanadio.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

Catalytic residues generated in the production of sulfuric acid in Cuba contain vanadium, a metal classified as critical and without natural deposits in the country, which represents an environmental and economic problem. These polluting residues are stored in unsafe conditions or confined in facilities with limited capacity, which makes it necessary to seek sustainable solutions.

### **Objective:**

To present the technical, economic, and environmental considerations regarding the recovery of vanadium contained in catalytic waste from sulfuric acid production.

### **Materials and Methods:**

At Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, a technological process has been developed based on crushing, acid leaching, filtration, precipitation, and calcination, using domestic reagents.

### **Results and Discussion:**

The result is a concentrate with 37.8%  $V_2O_5$ , which can be marketed or transformed into ferrovandium for the manufacture of recharge electrodes, an industrial input that Cuba currently imports at high cost. The research shows that processing these catalysts makes it possible to convert hazardous waste into a strategic raw material, reducing dependence on the international market and applying principles of circular economy and cleaner production. Alternatives are proposed for utilizing the solid and liquid by-products obtained, minimizing the generation of new waste.

---

## **Conclusions:**

From a social and economic point of view, the proposal would contribute to import substitution, the strengthening of national industry, and environmental sustainability, while also generating a positive impact on strategic sectors, integrating science, innovation, and sustainable development in Cuba.

**Keywords:** circular economy; recharge electrodes; environment; catalytic residues; vanadium.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Para la fabricación de ácido sulfúrico se utilizan catalizadores que contienen vanadio, elemento químico clasificado como peligroso (Rodríguez & Altamirano, 2006; Rojas, et al., 2024), los cuales una vez agotados se convierten en residuales industriales peligrosos, por lo que no pueden ser vertidos al medio ambiente, siendo necesario almacenarlos en instalaciones seguras con los correspondientes efectos económicos asociados a estas operaciones. En Cuba existen dos plantas dedicadas a la fabricación de ácido sulfúrico que generan estos residuales: Rayonitro en Matanzas y Alfredo Carralero en la Empresa mixta Pedro Soto Alba de Moa, además aún están almacenados, en condiciones inseguras, los residuales de la Planta Patricio Lumumba de Pinar del Río, la que dejó de operar desde 1999 (Perdomo et al., 2021).

Por otro lado, el recargue por soldadura es una de las técnicas más eficientes para la protección de elementos de máquinas contra diferentes mecanismos de desgaste, lo que permite recuperar partes y piezas de maquinarias y extender su vida útil. En Cuba, la industria azucarera, materiales de la construcción, minería, etc., son sectores donde las partes y piezas de las maquinarias se ven seriamente afectadas por la rotura de algunos de sus componentes, ya que se encuentran expuestos a severas condiciones de desgaste, siendo necesario buscar soluciones rápidas, simples, eficaces y al menor costo posible.

Entre los elementos de aleación mayormente utilizados en los consumibles de soldadura para el recargue se encuentran: C, Cr, Mn, V, Mo, W, Ni, etc. (CODESOL, 2025; Rodríguez et al., 2019). Sin embargo, los electrodos utilizados para esta operación son importados a elevados precios, siendo hasta 10 veces más costosos que un electrodo convencional, de ahí la necesidad de fabricarlos en Cuba, donde existen dos fábricas dedicadas a la fabricación de electrodos convencionales, la Unidad Empresarial de Base (UEB) Metalúrgica de Camagüey "Gonzalo Esteban Lugo" y COMETAL S.A. en la Habana, las cuales tienen condiciones para producir electrodos especiales (Oñoz et al., 2021).

Entre los elementos anteriormente mencionados se encuentra el vanadio, del cual no existen yacimientos en Cuba y constituye un metal estratégico que se encuentra en la lista de materias primas en estado crítico (Geological Survey, 2022). Sin embargo, los residuales catalíticos de la fabricación de ácido sulfúrico contienen vanadio, el cual es factible de recuperar si se establecen tecnologías adecuadas para este fin (Nasimifar & Mehrabani, 2022; Perdomo et al., 2024; Shilmyrzayevich et al., 2025).

Teniendo en cuenta la cantidad de estos residuales que existen en Cuba y la ausencia de una estrategia de tratamiento definida, la dirección del país decidió su confinamiento en el Confinatorio Nacional de Desechos Peligrosos, ubicado en la Antigua Central

---

Electronuclear de Cienfuegos, seleccionándose los residuales de vanadio entre las cinco primeras corrientes a confinar en dicha instalación (Estrategia Ambiental, 2016).

El confinamiento de estos residuales constituye una solución al problema ambiental a corto plazo, pero se trata de un espacio de capacidad limitada, lo cual valida la necesidad de buscar alternativas que permitan el procesamiento de los catalizadores agotados con el objetivo de reducir o eliminar totalmente la cantidad a confinar, evitando así que contaminen el medio ambiente. Por otro lado, al ser el vanadio un elemento estratégico, se desarrollan estudios encaminados a su recuperación y uso en aplicaciones demandadas por el sector industrial. Por tanto, el objetivo del trabajo es exponer las consideraciones técnico - económicas y medio ambientales sobre la recuperación del vanadio contenido en residuales catalíticos de la fabricación de ácido sulfúrico.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1. Materiales y muestras***

Se estudiaron muestras de catalizadores agotados procedentes de la antigua Planta Sulfometales (Pinar del Río). Para los ensayos de lixiviación y precipitación se utilizaron reactivos de producción nacional, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio.

### ***2.2. Procedimiento experimental***

El procesamiento de los catalizadores se realizó siguiendo la secuencia experimental desarrollada en investigaciones previas de la UCLV (Perdomo et al., 2021; Perdomo et al., 2024). Las etapas fundamentales incluyeron:

- Trituración y molienda.
- Lixiviación ácida: se empleó  $H_2SO_4$ .
- Filtración: separación del residuo sólido (rico en sílice) de la solución lixiviada.
- Precipitación: adición de NaOH.
- Segunda filtración y calcinación: obtención de un concentrado en polvo de  $V_2O_5$ .

### ***2.3. Evaluación de alternativas de uso de los productos***

El concentrado puede ser usado para la obtención de ferrovandio por aluminotermia para la fabricación de electrodos de soldadura o comercializado directamente.

Con el fin de minimizar la generación de nuevos residuales, se proponen vías de aprovechamiento para los subproductos del proceso:

- El residuo sólido de la lixiviación, rico en sílice, como posible materia prima en la fabricación de materiales de construcción.
- El residual líquido, con alto contenido de sulfato de sodio, como potencial activador alcalino en mezclas cementicias.

### ***2.4. Valoración del impacto económico y ambiental***

A partir de los resultados experimentales se realizó una estimación del potencial impacto económico del procesamiento de residuales de vanadio en Cuba, considerando:

- Sustitución de importaciones de consumibles de soldadura.
  - Ahorro por eliminación de costos de almacenamiento y gestión de residuos peligrosos.
-

- Aplicación de principios de economía circular y producción más limpia.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### ***3.1. Aplicaciones industriales del vanadio y sus compuestos***

La principal demanda de vanadio está en la industria del acero, consumiéndose aproximadamente el 85 – 89 % del vanadio producido, el cual se adiciona como elemento de aleación de varios tipos de acero (Makhotkina & Shubina, 2017; LARGO, 2024).

El vanadio es un desoxidante muy fuerte que promueve un tamaño de grano fino. Su efecto sobre la templabilidad es dependiente de la temperatura de austenización: puede disminuirla si los carburos no se disuelven, o aumentarla cuando está en solución sólida. Aumenta la resistencia a los impactos, a la fatiga y se ha utilizado con resultados satisfactorios en consumibles para el relleno superficial, puede disminuirla si los carburos no se disuelven, o aumentarla cuando está en solución mediante diferentes procesos de soldadura, así como en la fabricación de piezas fundidas expuestas al desgaste abrasivo (Rodríguez et al., 2019). En estos aceros el contenido de vanadio va desde 0,5 a 20 % dependiendo del tipo del acero. Cantidades en el orden de 0,5 % de este elemento da lugar a la posibilidad de la formación de precipitados de alta dureza en los límites de grano, y por tanto la aleación brinda efectos importantes ante determinados mecanismos de desgaste (Makhotkina & Shubina, 2017; Rodríguez et al., 2019).

Los compuestos oxidados del vanadio se utilizan en la fabricación de vidrios, barnices y esmaltes para porcelana y cerámica, en lacas y pinturas, como aditivos para hule sintético, en la fabricación de catalizadores para diferentes procesos industriales, entre otros. Además, se está desarrollando su aplicación en baterías redox (Makhotkina & Shubina, 2017). De forma general, alrededor del 4 % de su producción se consume en la industria química y los catalizadores, 4 % en la producción de baterías de flujo redox y un 3 % en la industria aeroespacial (LARGO, 2024).

#### ***3.2. Principales fuentes de vanadio. Opciones para Cuba***

El vanadio industrialmente se extrae a partir de fuentes naturales (minerales), donde su contenido no supera el 3 % y de residuales industriales (fuentes secundarias). Los recursos primarios actuales no son suficientes para satisfacer la demanda debido al creciente interés industrial en sus aplicaciones, por lo que muchos países utilizan ampliamente recursos secundarios que contienen vanadio (Shao et al., 2009; Romanovskaia et al., 2021).

Las fuentes secundarias incluyen los catalizadores agotados, proveniente de procesos tales como hidrodesulfuración, craqueo catalítico fluidizado y producción de ácido sulfúrico; cenizas volantes; escorias del acero, bauxitas, piedras de carbón, escorias ferrosas (U.S. Geological Survey, 2025). Los catalizadores agotados son una de las materias primas secundarias preferibles para la extracción de vanadio, ya que contiene entre el 4 – 9 % en peso de  $V_2O_5$  junto con otros componentes valiosos, en forma de óxidos o sulfatos, además, la vida útil promedio de estos catalizadores es de ~ 2 a 5 años, pudiendo llegar hasta 10 años (Romanovskaia et al., 2021). El catalizador agotado evaluado procede de la Planta de Sulfometales, el cual está formado en un 95,9 % por: 64,4 % de  $SiO_2$ , 17,9 % de  $SO_2$ , 10,2 %  $Fe_2O_3$ , 3,4 % de  $V_2O_5$  (Perdomo et al., 2024).

---

Procesar catalizadores agotados y cenizas de petróleo es la única vía factible para obtener vanadio en Cuba, elemento vital para su economía. Anualmente se generan ~7 t de residuales catalíticos en Rayonitro (Matanzas) y ~21 t en Alfredo Carralero (Holguín), donde además hay ~800 t almacenadas. En la antigua planta Sulfometales (Pinar del Río), las torres de adsorción permanecen expuestas al ambiente y existen nichos de confinamiento costeros con filtraciones que contaminan la región (Perdomo et al., 2021; Bruguera et al., 2022).

### ***3.3. Efectos contaminantes de los residuales catalíticos de pentóxido de vanadio***

Los catalizadores agotados de la fabricación de ácido sulfúrico, después de su utilización, se convierten en un residual sólido contaminante y consiste en una mezcla de  $V_2O_5$  y sales de vanadio, siendo clasificados como residuales peligrosos (Kaefer et al., 2020, Al Amayreh et al., 2023; Wu et al., 2021).

El principal riesgo ambiental del vertimiento de los residuales sólidos que contienen vanadio se debe a que se disuelve en agua formando mezclas tóxicas, las que pueden lixiviar al agua subterránea y superficial afectando la calidad del agua potable y los ecosistemas acuáticos. La toxicidad de los compuestos de vanadio se incrementa con el aumento del estado de oxidación, siendo el  $V^{5+}$  el más tóxico, el cual puede provocar afectaciones en los órganos respiratorios, cambios en el ritmo cardiaco, daños en el sistema nervioso, trastornos reproductivos, alteraciones bioquímicas en sangre y cambios en la concentración de la albúmina y del colesterol (Rodríguez & Altamirano, 2006; Wnuk, 2023). Por otro lado, la presencia de sulfato, sulfito libre y agua en los catalizadores gastados puede dar lugar a un lixiviado ácido (pH ~ 1 – 2), y afectar el pH del suelo donde se deposite (Kaefer et al., 2020).

### ***3.4. Recuperación de vanadio de residuales catalíticos***

El procesamiento de los catalizadores que contienen vanadio incluye las etapas de: trituración, lixiviación ácida, extracción por solventes, precipitación, entre otras, las cuales dependen de la finalidad del producto que se recupere (Nasimifar & Mehrabani, 2022). Este procesamiento permite reducir el impacto ambiental asociado con su disposición final como residuo, siendo necesario un análisis del mismo para evitar la liberación de compuestos tóxicos y contaminantes al medio ambiente y contar con tecnologías de procesamiento seguras y sostenibles, desde el punto de vista técnico, económico y medio ambiental.

Mientras que en otros países desarrollados se procesan los residuales industriales para extraer vanadio y reutilizarlo como materia prima, Cuba carece de la infraestructura para realizar esta actividad (Chaveco, 2023), por lo que los vende a precios muy bajos, eliminándose de esta manera la opción de recuperarlo en el país.

La propuesta de procesamiento evaluada en la UCLV consiste en: trituración, lixiviación ácida, filtración, precipitación, filtración y calcinación (Perdomo et al., 2021; Perdomo et al., 2024). De forma general, se trabaja en el establecimiento de una tecnología basada en el uso del 100 % de reactivos de producción nacional, lo cual permitiría lograr independencia del mercado internacional.

El procesamiento realizado permitió obtener un concentrado en polvo con 37,8 % de  $V_2O_5$ , el cual puede ser comercializado como concentrado o procesado posteriormente

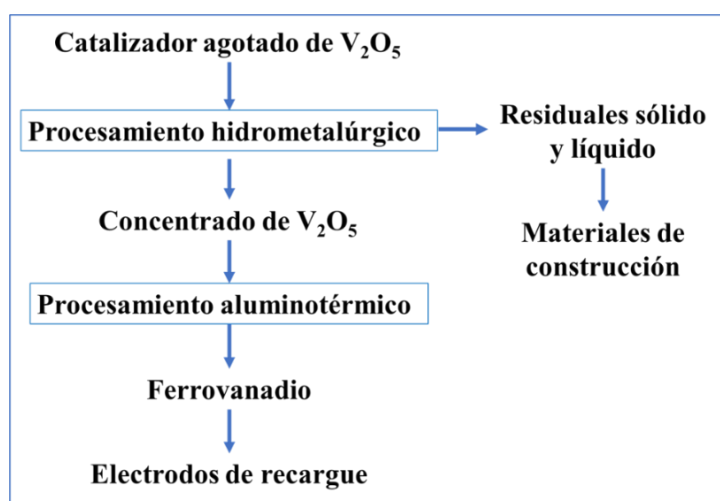
---

para obtener ferrovandio, variante esta que permite su empleo en la fabricación de consumibles especiales de soldadura (Perdomo et al., 2022; Perdomo et al., 2024). El mismo procedimiento puede ser aplicado a las cenizas de la combustión del petróleo, las cuales contienen altos valores de vanadio y constituyen también residuales industriales contaminantes.

El ferrovandio obtenido a partir del concentrado se ha utilizado como carga de aleación en electrodos para recargue superficial mediante soldadura manual (SMAW), donde este elemento favorece considerablemente las propiedades mecánicas de los depósitos obtenidos (Rodríguez et al., 2019). Los electrodos de recargue usados en Cuba son importados a elevados precios, a pesar de que existen en el país dos plantas con posibilidades reales para fabricarlos (Oñoz et al., 2021).

La ferroaleación obtenida permite formular mezclas para electrodos de recargue duro, producibles íntegramente en el país con la infraestructura existente, cerrando así el ciclo de transformación de residuos en un producto útil.

Como subproductos del procesamiento propuesto, en las etapas de lixiviación y precipitación, se generan dos nuevos residuales, uno sólido y uno líquido, constituidos fundamentalmente por sílice y sulfato de sodio, respectivamente. Para evitar su vertimiento, se estudian alternativas de uso para los residuales: el sólido en materiales de construcción y el líquido como activador alcalino, dado su alto contenido de sulfato de sodio (Perdomo et al., 2024; Perdomo et al., 2025). La figura 1 muestra un esquema de la tecnología propuesta.



**Figura 1.** Esquema de procesamiento de los catalizadores agotados

El principal aporte de procesar los catalizadores es medioambiental, pues busca dar solución al problema de los residuales con vanadio existentes en Cuba, los cuales son considerados contaminantes peligrosos (Rodríguez & Altamirano, 2006; Rojas et al., 2024). Por otro lado, la metodología propuesta constituye un aporte económico al recuperarse un elemento considerado estratégico, y convertirlo en un producto de utilidad práctica en el sector industrial, como es el caso de los consumibles de soldadura utilizados para la recuperación de partes y piezas.

### **3.5. Impacto económico y social de la investigación**

En los últimos cinco años, el precio del vanadio ha fluctuado entre los 12 y 20,5 USD/kg de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (U.S. Geological Survey, 2025). De acuerdo con la Lista Final de Minerales Críticos, publicada por el Registro Federal el 24 de febrero de 2022, el vanadio es considerado una materia prima en estado crítico (Geological Survey, 2022).

La recuperación del vanadio a partir de los residuales catalíticos y demás fuentes secundarias reduce la dependencia de la minería primaria, lo que disminuye los costos asociados a la extracción y procesamiento de minerales vírgenes (Shao et al., 2009). Destacar en este sentido, que Cuba no reporta la presencia de yacimientos minerales que contenga el metal, por lo que los residuales industriales que lo contienen constituyen la única fuente de obtención del mismo sin depender del mercado internacional. Además, la recuperación del vanadio de residuos es más económica, ya que suelen tener concentraciones más altas en comparación con los minerales naturales y no se requiere utilizar otras etapas adicionales para su producción (Zharskiy et al., 2015; Shilmyrzayevich et al., 2025).

La instalación de una planta piloto en Cuba para procesar residuales con vanadio y su integración con una para obtener ferroaleaciones es viable técnico-económicamente. La Planta Piloto de abrasivos Dr. Cs. Rafael Quintana Puchol tiene condiciones para el procesamiento del concentrado, lo cual permitiría la obtención de una ferroaleación de vanadio (Martín et al., 2023).

### **3.6. Relación con los principios de la economía circular y producciones más limpias**

Las ferroaleaciones obtenidas del procesamiento de residuales reducirían importaciones, garantizaría independencia del mercado internacional y reactivaría plantas de fabricación de electrodos subutilizadas. Estos electrodos reparan piezas críticas de maquinaria pesada, extendiendo su vida útil y fomentando el mantenimiento preventivo. Entre los beneficios destacan el ahorro por reciclaje y la sostenibilidad ambiental, al recuperar un metal crítico de desechos peligrosos y fabricar productos de alto valor para sectores estratégicos.

La sociedad está impulsando la transición hacia una economía circular que promueva la reutilización, el reciclaje y la minimización de residuos en la producción y consumo de vanadio. Existe, además, una demanda creciente de productos y procesos que incorporen principios circulares para reducir el impacto ambiental y fomentar la eficiencia en el uso de los recursos. Al integrar estos principios se puede promover un uso más eficiente y sostenible de este metal, reduciendo los impactos ambientales asociados con su extracción y procesamiento. Además, puede fomentar la innovación y la colaboración entre diferentes sectores industriales para cerrar los ciclos de materiales y avanzar hacia una economía más circular y sostenible, reduciendo los costos asociados con la gestión de residuos peligrosos (Kaefer et al., 2020; Romanovskaia et al., 2021).

La estrategia integral de procesamiento y comercialización de los productos derivados de los residuales catalíticos de vanadio involucra a la Empresa Química de Cienfuegos (MINDUS), la Empresa de Materiales de Construcción de Villa Clara (MICONS), la Empresa de Derivados del Acero de Camagüey (MINDUS) y la UCLV (MES). Esta articulación exige un encadenamiento productivo que garantice la logística en todas las etapas del proceso.

---

#### 4. CONCLUSIONES

1. Los residuales catalíticos de la fabricación de ácido sulfúrico constituyen residuales industriales clasificados como contaminantes por lo que no pueden ser vertidos al medio ambiente, debiéndose almacenar en condiciones seguras con los respectivos gastos asociados a esta operación.
2. Los residuales catalíticos de la fabricación de ácido sulfúrico pueden ser considerados una fuente de vanadio, metal estratégico del cual no existen yacimientos en Cuba, y con una marcada importancia económica y social debido a su papel clave en industrias, donde su procesamiento y conversión de nuevos productos de uso industrial aplica los principios de economía circular.
3. La propuesta presentada permite recuperar vanadio de residuales catalíticos para fabricar consumibles de soldadura, reduciendo importaciones y beneficiando la economía y el medio ambiente. Sus principales aportes son el desarrollo de un proceso con reactivos totalmente nacionales y la validación del concentrado para electrodos.

#### REFERENCIAS

- Al Amayreh, H. H., Khalaf, A., Hawwari, M. I., Hourani, M. K., & Al Bawab, A. (2023). The Recovery of Vanadium Pentoxide ( $V_2O_5$ ) from Spent Catalyst Utilized in a Sulfuric Acid Production Plant in Jordan. *Materials*, 16(19), 6503. <https://doi.org/10.3390/ma16196503>
- Bruguera, N., Gallardo, D., Álvarez, J. R., Ramírez, R. & Hernández, L. I. (2022). Caracterización geoambiental del inventario de pasivos ambientales en la región minera de Santa Lucía, Cuba. *ECOVIDA*, 12(1), 14-30. <https://revistaecovida.upr.edu.cu/index.php/ecovida/article/view/242/0>
- Chaveco, O. (2023). *El vanadio: mineral útil, pero contaminante del medio ambiente*. Radio Ciudad del Mar. Consultado 3 de febrero de 2025. <https://www.rcm.cu/2023/07/11/vanadio-mineral-util-pero-contaminante-del-medio-ambiente-fotos/>
- CODESOL, 2025. *Catálogo Consumibles. Comercial de soldadura S.A. Barcelona*. [Archivo pdf]. [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://codesol.com/pdf/Descargas/01\\_CODE SOL%2520consumibles.pdf&ved=2ahUK EwiJKD37b2SAxWpSDABHVtTPHoQFnoECBwQAQ&usg=AOvVaw2JgMen PrNkNVh7vnYND0Gt](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://codesol.com/pdf/Descargas/01_CODE SOL%2520consumibles.pdf&ved=2ahUK EwiJKD37b2SAxWpSDABHVtTPHoQFnoECBwQAQ&usg=AOvVaw2JgMen PrNkNVh7vnYND0Gt)
- Estrategia Ambiental. (2016). *Estrategia Ambiental Nacional 2016-2020. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. República de Cuba*. [Archivo pdf]. <https://almacenesprimavera.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/09/estrategia-ambiental-nacional-2016-2020.pdf>
- Geological Survey. (2022). Final List of Critical Minerals. *Federal Register*, 87(37), 10381. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-02-24/pdf/2022-04027.pdf>
- Kaefer, L. F., Guimarães, R. B., Jerônimo, M. J. & de Araújo, H. (2020). Vanadium removal from spent catalyst used in the manufacture of sulfuric acid by electrical potential application. *Separation and Purification Technology*, 246, 116854.
-

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116854>

- LARGO. (2024). *Supporting the world's transition to a low carbon future with vanadium. A leading vanadium supplier with patented VRFB technology.* [Archivo pdf]. [https://s29.q4cdn.com/562286712/files/doc\\_presentations/2024/Feb/05/largo\\_corporatepresentation\\_feb2024.pdf](https://s29.q4cdn.com/562286712/files/doc_presentations/2024/Feb/05/largo_corporatepresentation_feb2024.pdf)
- Makhotkina, E. S. & Shubina, M. V. (2017). Industrial, Ecological and Resource-Efficient Aspects of Vanadium Production and Use of Technogenic Vanadium Sources. *Solid State Phenomena*, 265, 994-998. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.994>
- Martín, A., Perdomo, L., Coello, N. & Glistau, E. (2023). Obtaining a ceramic by aluminothermia for use as an abrasive material. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, XVI(4), 95-100. <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2023-4/ACTA-2023-4-15.pdf>
- Nasimifar, A. & Mehrabani, J. V. (2022). A review on the extraction of vanadium pentoxide from primary, secondary, and co-product sources. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(4), 361-382. <http://doi.org/10.22059/IJMGE.2022.319012.594893>
- Oñoz, P., Rodríguez, M., Perdomo, L., Quinta, F. & Acosta, U. (2021). Evaluación de las cromitas refractarias de Camagüey como fuente potencial de cromo para electrodos revestidos de recargue por soldadura. *Minería y Geología*, 37(1), 44-57. <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v37n1/1993-8012-mg-37-01-44.pdf>
- Perdomo, L. A., Perdomo, P., Quintana, R., Rabassa, D., Mollineda, A., Palacio, A. & Viera, O. (2021). Recuperación mediante lixiviación ácida del vanadio contenido en catalizadores agotados. *Minería y Geología*, 37(1), 74-89. <https://www.redalyc.org/journal/2235/223566343005/html/>
- Perdomo, L. A., Rodríguez, M., Perdomo, P., Quintana, R. & Miguel, J. V. (2022). Evaluación de un concentrado de vanadio, obtenido de catalizadores agotados, como carga de aleación de electrodos tubulares. *Minería y Geología*, 38(4), 363-377. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1993-80122022000400363](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122022000400363)
- Perdomo, L. A., Perdomo, P., Coello, N. & Glistau, E. (2024). Vanadium recovery from spent catalyst: from lab to industry. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, XXII(3), 59-70. <https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2024/ANNALS-2024-3-08.pdf>
- Perdomo, L. A., Perdomo, P., Coello, N. & Glistau, E. (2025). Perspectives of using liquid waste from the processing of vanadium catalytic residues in construction materials. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, XVIII(4), 89-97. <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2025-4/ACTA-2025-4-13.pdf>
- Rodríguez, J. J. & Altamirano, M. A. (2006). Vanadio: Contaminación, metabolismo y genotoxicidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22(4), 173-189. <https://www.revistascca.unam.mx/rca/index.php/rca/article/view/21681/21652>
- Rodríguez, M., Perdomo, L. & Alfonso, I. (2019). Mejora de la resistencia al desgaste abrasivo de un revestimiento Fe-Cr-Mn-C mediante la adición de V. *Revista Matéria*, 24(1), e-12328. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0610>
-

- Rojas, M., López, N., Bizarro, P., González, A. & Fortoul, T. I. (2024). Vanadio: exposición atmosférica, efectos en la salud y normatividad en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 181-191. <https://doi.org/10.20937/RICA.54869>
- Romanovskaia, E., Romanovski, V., Kwapinski, W. & Kurilo, I. (2021). Selective recovery of vanadium pentoxide from spent catalysts of sulfuric acid production: Sustainable approach. *Hydrometallurgy*, 200, 105568. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105568>
- Shao, Y., Feng, Q., Chen, Y., Ou, L., Zhang, G. & Lu, Y. (2009). Studies on recovery of vanadium from desilication residue obtained from processing of a spent catalyst. *Hydrometallurgy*, 96(1-2), 166-170. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.10.005>
- Shilmyrzayevich, B., Tursunovich, A., Abdullayevich, R. & Yeskermesovich, G. (2025). Resource-saving technology for processing of spent vanadium catalysts with vanadium pentoxide production and integrated utilization of secondary products. *Journal of Ecological Engineering*, 26(11), 258–268. <https://doi.org/10.12911/22998993/208082>
- U.S. Geological Survey. (2025). *Mineral commodity summaries 2025*. USGS science for a changing world. <https://doi.org/10.3133/mcs2025>
- Wnuk, E. (2023). Mobility, Bioavailability, and Toxicity of Vanadium Regulated by Physicochemical and Biological Properties of the Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 1386–1396. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01130-9>
- Wu, l., Dai, C. Wang, H., Wang, J. & Dong, Y. (2021). Leaching of vanadium, potassium, and iron from spent catalyst of the manufacture of sulfuric acid. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 905-913. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.072>
- Zharskiy, I. M., Kurilo, I. I., Kryshilovich, Y. V. & Kharitonov, D. S. (2015). Synthesis of pigments using products of vanadium containing industrial waste utilization. *Chemistry and technology of non-organic substances*, 3, 119-125. <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/15012/1/zharskiy-i.-m.-kurilo-i.-i.-kryshilovich-ye.-v.-kharitonov-d.-s.-synthesis-of-pigments-using.pdf>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc. Laura Ailin Perdomo Gómez. Conceptualización, investigación, metodología, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Conceptualización, investigación, metodología, supervisión, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Manuel Rodríguez Pérez. Investigación, redacción - revisión y edición.
  - Lic. Lorena Hernández Pérez. Investigación.
-