

Artículo de Revisión

TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO: UNA REVISIÓN

TECHNOLOGIES FOR PHOSPHORIC ACID PRODUCTION: A REVIEW

Yosviel Reyes Delgado^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9344-2304>

Lietty Cedré López² <https://orcid.org/0009-0002-8096-3247>

Luis Andrés Gómez Rodríguez¹ <https://orcid.org/0000-0003-4264-1693>

¹ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Empresa Agroindustrial Azucarera Francisco Gómez Toro, Quemado de Güines, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Mayo 16, 2026; Revisado: Julio 8, 2026; Aceptado: Agosto 21, 2026

RESUMEN

Introducción:

El ácido fosfórico es materia prima estratégica para fertilizantes, la industria alimentaria y baterías de litio, la selección de su tecnología de producción constituye una decisión multidimensional condicionada por insumos locales, calidad y sostenibilidad.

Objetivo:

Comparar las principales tecnologías para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica y su adaptación al contexto cubano.

Materiales y Métodos:

Revisión narrativa cualitativa mediante búsqueda sistemática en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed Central, ACS Publications y Google Scholar, complementada con informes técnicos y patentes.

Resultados y Discusión:

Se analizaron cuatro tecnologías: proceso húmedo con ácido sulfúrico (dihidrato y hemihidrato-dihidrato), ruta con ácido clorhídrico y extracción por solventes, proceso térmico en horno de arco eléctrico, y biolixiviación microbiana. El proceso húmedo, dominante mundialmente (>90 %), presenta barreras críticas para Cuba: dependencia de H₂SO₄ importado, baja ley de la roca local (15-22 % P₂O₅) y generación de fosfoyeso. La ruta HCl elimina fosfoyeso, es compatible con roca de alto Fe/Al y aprovecha HCl



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: Yosviel Reyes, Email: yreyes@uclv.edu.cu



disponible localmente. El proceso térmico requiere consumos energéticos prohibitivos. La biolixiviación es emergente, de bajo impacto ambiental, pero con madurez tecnológica insuficiente para escala industrial inmediata.

Conclusiones:

Ninguna tecnología es universalmente óptima, la ruta del ácido clorhídrico es la más adecuada para Cuba, y la biolixiviación con microbiota endémica constituye la línea de innovación de mayor potencial a mediano y largo plazo.

Palabras clave: ácido fosfórico; ácido clorhídrico; biolixiviación; Cuba; extracción por solventes; proceso húmedo.

ABSTRACT

Introduction:

Phosphoric acid is a strategic raw material for fertilizers, the food industry, and lithium batteries. The selection of its production technology constitutes a multidimensional decision conditioned by local inputs, quality, and sustainability.

Objective:

To compare the main technologies for phosphoric acid production from phosphate rock and their adaptation to the Cuban context.

Materials and Methods:

A qualitative narrative review through systematic search in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed Central, ACS Publications, and Google Scholar, complemented with technical reports and patents.

Results and Discussion:

Four technologies were analyzed: wet process with sulfuric acid (dihydrate and hemihydrate-dihydrate variants), hydrochloric acid route with solvent extraction, thermal process in an electric arc furnace, and microbial bioleaching. The wet process, dominant worldwide (>90 %), presents critical barriers for Cuba: dependence on imported H₂SO₄, low grade of local rock (15-22 % P₂O₅), and phosphogypsum generation. The HCl route eliminates phosphogypsum, is compatible with high Fe/Al rock, and utilizes locally available HCl. The thermal process requires prohibitive energy consumption. Bioleaching is emerging, with low environmental impact, but insufficient technological maturity for immediate industrial scale.

Conclusions:

No technology is universally optimal; the hydrochloric acid route is the most suitable for Cuba, and bioleaching utilizing endemic microbiota constitutes the innovation line with the greatest potential in the medium and long term.

Keywords: phosphoric acid; hydrochloric acid; bioleaching; Cuba; solvent extraction; wet process.

1. INTRODUCCIÓN

El ácido fosfórico (H₃PO₄) ocupa una posición nodal en la cadena de valor de la industria química global. Es la materia prima fundamental para la fabricación de fertilizantes

fosfatados, que representan más del 75% de su consumo total, nutrientes para la industria animal, aditivos alimentarios, agentes antiincrustantes para el tratamiento superficial de metales, retardantes de llama, detergentes y ésteres de fosfato empleados como plaguicidas, entre otras aplicaciones (Wu et al., 2025); (Bertau et al., 2025). Más recientemente, ha emergido una demanda creciente de ácido fosfórico de alta pureza para la síntesis de litio ferrofosfato (LiFePO_4 , LFP), material catódico de baterías de litio para vehículos eléctricos y almacenamiento de energía a gran escala, lo que está diversificando y revalorizando el mercado hacia grados técnicos de mayor precio (Global Growth Insights, 2025).

La selección de la tecnología de producción de ácido fosfórico no es un problema de optimización técnica simple: es una decisión estratégica multidimensional que involucra la disponibilidad y calidad de las materias primas locales, el acceso a insumos auxiliares (ácidos, solventes, energía) (Reyes et al., 2025), los estándares de calidad requeridos, el marco regulatorio ambiental vigente y los objetivos de desarrollo productivo de largo plazo del país o empresa. Esta perspectiva guía el enfoque analítico, el objetivo que sigue este trabajo es comparar las principales tecnologías para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica y su adaptación al contexto cubano.

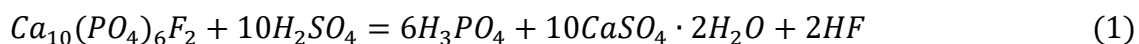
2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación constituye una revisión narrativa de tipo cualitativo-descriptiva, enfocada en el análisis crítico-comparativo de tecnologías de producción de ácido fosfórico. La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos como *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *PubMed Central*, *ACS Publications* y *Google Scholar*, así como repositorios de tesis y libros especializados, priorizando documentos con rigor de los últimos 20 años. Los resultados se organizan en cuatro subsecciones temáticas correspondientes a las cinco tecnologías identificadas: (1) proceso húmedo con ácido sulfúrico (incluyendo las variantes dihidrato y hemihidrato-dihidrato como una única ruta tecnológica con dos configuraciones operacionales); (2) ruta con ácido clorhídrico y extracción por solventes; (3) proceso térmico en horno de arco eléctrico; y (4) biolixiviación microbiana.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Proceso húmedo con ácido sulfúrico

El proceso húmedo con H_2SO_4 domina la producción mundial (>90% de capacidad instalada), basado en la reacción de fluorapatita con ácido sulfúrico concentrado (Ecuación 1):



La variante dihidrato (DH) opera a 70-80°C, produciendo ácido con 26-30% P_2O_5 y fosfoyeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de buena filtrabilidad. La variante hemihidrato-dihidrato (HH-DH) opera a 90-110°C, alcanzando 40-42% P_2O_5 mediante recristalización controlada del sólido a dihidrato para mejorar filtrabilidad y pureza, con eficiencias de recuperación >96% en plantas >1.200 t/día de P_2O_5 (Huo et al., 2023a); (Dong et al., 2024); (Huo et al.,

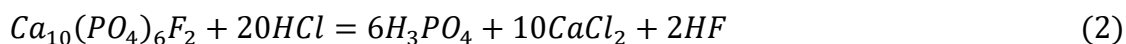
2023b)).

La hegemonía del proceso húmedo se explica por su madurez tecnológica (>100 años), adaptabilidad a distintos tipos de roca y bajo costo histórico del H_2SO_4 . Sin embargo, tres factores estructurales cuestionan su sostenibilidad: (i) dependencia del H_2SO_4 vinculado a combustibles fósiles; (ii) generación de 4-6 t de fosfoyeso/t P_2O_5 , con <15% valorizado globalmente, conteniendo metales pesados (Cd, As, Cr) y trazas radiactivas (^{226}Ra); y (iii) volatilidad de precios del H_2SO_4 (~350 USD/t en 2022, ~210 USD/t en 2024) (Bertau et al., 2025; Guan et al., 2024; Lou et al., 2024)).

Para Cuba, el proceso húmedo enfrenta barreras críticas: (1) necesidad de importar H_2SO_4 o disponer de capacidad local de producción a partir de azufre elemental o pirita, insumos no producidos industrialmente; (2) baja ley de P_2O_5 de la roca cubana (15-22%), que eleva la relación ácido/producto y la generación específica de fosfoyeso; y (3) alta concentración de impurezas de Fe_2O_3 (3-8%) y Al_2O_3 (2-6%), que interfieren negativamente con la cristalización del fosfoyeso en proceso DH, reduciendo eficiencia de filtración. Estos factores posicionan al proceso húmedo convencional como la opción menos recomendable para Cuba.

3.2 Proceso vía ácido clorhídrico con extracción por solvente

La producción de ácido fosfórico mediante acidulación con ácido clorhídrico (ruta HCl) elimina por definición la generación de fosfoyeso, dado que el calcio de la roca queda en solución acuosa como CaCl_2 en lugar de precipitar como sulfato. La reacción principal con la fluorapatita la describe la ecuación 2:



La disolución de la roca fosfórica en HCl es más rápida que en H_2SO_4 para minerales de grado medio y bajo, ya que el HCl es un ácido fuerte monoprótico que ioniza completamente en solución diluida sin precipitar sulfatos que puedan encostar la superficie mineral y ralentizar la reacción. (Li et al., 2021) desarrollaron un modelo cinético segmentado relacionado con la estructura mineralógica de la roca, en el que la etapa inicial de disolución de la fase apatítica dominante sigue una cinética de shrinking core controlada por difusión en capa de producto, mientras que la disolución de fases accesorias (calcita, dolomita, silicatos) contribuye con una cinética de reacción superficial de mayor velocidad específica.

El HCl puede emplearse en solución acuosa (20% en masa o superior) o en forma gaseosa combinando la absorción con la reacción (Ayinla et al., 2018; Azeez et al., 2024). Por razones económicas y operativas se prefiere el ácido concentrado, dado que el agua presente debe evaporarse en etapas posteriores. El consumo de HCl depende de la composición de la roca: para una fluorapatita pura, la relación estequiométrica es de ~1,63 kg HCl/kg P_2O_5 , pero las impurezas carbonatadas y de álcalis consumen HCl adicional, elevando el consumo real entre un 10 y un 25% sobre la estequiometría teórica.

3.2.1. Extracción por solventes y purificación del ácido

La separación $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{CaCl}_2$ mediante extracción líquido-líquido es la etapa central. Los solventes principales son: alcohol isoamílico (IA) y n-butanol, de bajo costo y buena

selectividad, pero requiriendo múltiples etapas; y fosfato de tri-n-butilo (TBP) de mayor selectividad y menor arrastre de CaCl_2 , referencia para alta pureza, aunque de mayor costo (Arce et al., 2022; Chengqi et al., 2014; Wang et al., 2024). Wu et al. (2023) optimizaron la extracción con mezcla TBP-isopropil éter (TBP-IPE), superando en eficiencia al TBP puro para concentraciones intermedias de H_3PO_4 , al mejorar separación de fases y reducir viscosidad del extracto.

La eliminación de Fe^{3+} es crítica para la calidad del producto. La extracción con D2EHPA en queroseno permite eliminar Fe^{3+} con eficiencias del 96,5% en ácido real de ruta HCl, mediante proceso de tres etapas en contracorriente. Abilkasova et al. (2025) reportaron la combinación de extracción en contracorriente y destilación azeotrópica para abordar contaminación por impurezas fluoradas, resolviendo el problema de corrosión por HF residual.

3.2.2. Gestión del CaCl_2 como subproducto clave

El principal reto económico y ambiental de la ruta HCl es la gestión del cloruro de calcio generado como corriente acuosa tras la extracción. La cantidad de CaCl_2 generada es aproximadamente 5-7 toneladas por tonelada de P_2O_5 producida. Las opciones de valorización incluyen: (a) producción de CaCl_2 granulado o en solución para aplicaciones industriales (tratamiento de hielo en carreteras, industria del petróleo, control de polvo), cuya demanda local puede ser insuficiente en economías de escala media; (b) conversión a CaSO_4 (yeso) mediante reacción con H_2SO_4 , regenerando simultáneamente HCl para reciclo al proceso, opción que recupera el cloro pero requiere disponibilidad de H_2SO_4 ; y (c) electrólisis de la solución de CaCl_2 para regenerar HCl y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utilizando energía eléctrica, opción que cierra completamente el ciclo del cloro pero con elevado costo energético específico (Younes et al., 2025).

Younes et al. (2025) demostraron que la lixiviación HCl de rocas fosfáticas de grado medio en condiciones optimizadas alcanza rendimientos competitivos con el proceso húmedo y permite la recuperación adicional de dicalciofosfato (DCP) de alta pureza para alimentación animal, lo que diversifica los flujos de ingreso y mejora la economía global del proceso. Además, la menor concentración de tierras raras en el lixiviado HCl, comparado con el lixiviado H_2SO_4 , facilita su recuperación como subproducto, añadiendo valor adicional al proceso.

3.2.3. Implicación de la introducción de la tecnología por HCl en Cuba

El principal reto es la gestión de 5-7 t CaCl_2 /t P_2O_5 producida. Las opciones incluyen: (a) producción de CaCl_2 granulado para tratamiento de hielo, industria petrolera y control de polvo; (b) conversión a CaSO_4 mediante reacción con H_2SO_4 , regenerando HCl para reciclo; y (c) electrólisis para regenerar HCl y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cerrando el ciclo del cloro pero con alto costo energético (Younes et al., 2025).

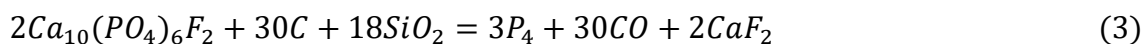
Younes et al. (2025) demostraron que la lixiviación HCl de rocas fosfáticas de grado medio alcanza rendimientos competitivos con el proceso húmedo y permite recuperación adicional de dicalciofosfato (DCP) de alta pureza para alimentación animal. Además, la menor concentración de tierras raras en lixiviado HCl facilita su recuperación como subproducto.

La ruta HCl constituye la tecnología de referencia para Cuba por convergencia de

ventajas: (1) disponibilidad de HCl como subproducto de la electrólisis de NaCl en la industria clorodica cubana, donde frecuentemente no encuentra destino industrial (Reyes et al., 2025); (2) compatibilidad con roca cubana de alto Fe/Al, ya que los cloruros formados son solubles y no interfieren en separación sólido-líquido; (3) eliminación de generación de fosfoyeso, ventaja ambiental de primer orden; y (4) ácido de pureza suficiente para fertilizantes de alta eficiencia y productos de valor agregado. La gestión del CaCl_2 puede resolverse mediante valorización en secado de gas natural, conservación de alimentos y control de polvo en carreteras, o conversión a yeso con H_2SO_4 importado en volúmenes menores que los requeridos por el proceso húmedo convencional.

3.3 Proceso térmico en horno de arco eléctrico

El proceso térmico implica reducción carbotérmica de roca fosfórica con coque y sílice en horno eléctrico a 1200-1500°C, produciendo fósforo elemental (P_4) gaseoso, su condensación, combustión a P_2O_5 e hidratación a H_3PO_4 (Ecuaciones 3-5):



El ácido térmico alcanza hasta 85% P_2O_5 con impurezas metálicas extremadamente bajas, siendo el único método que satisface estándares de farmacopeas para aplicaciones farmacéuticas y electrónicas (EPA, 2023). La escoria de CaSiO_3 tiene menor carga ambiental que el fosfoyeso.

El consumo energético (12-14 kWh/kg P_4) constituye su principal debilidad. Los esfuerzos de optimización se orientan hacia recuperación de calor residual mediante sistemas de caldera de combustión con recubrimiento cerámico anticorrosivo, aunque persisten pérdidas de exergía considerables por la temperatura adiabática de llama del P_4 (~2500°C) difícil de aprovechar (Zan et al., 2006). Una patente reciente propone circuito integrado de torre de combustión, hidratador, absorbedor y economizador para mejorar eficiencia global (Mei et al., 2024).

El proceso térmico no representa opción viable para Cuba en corto-medio plazo por su alta demanda eléctrica e inexistencia de industria de fósforo elemental; su relevancia es fundamentalmente académica y comparativa.

3.4 Tecnología emergente: biolixiviación microbiana

La biolixiviación microbiana de la roca fosfórica constituye la frontera de investigación de mayor dinamismo en la producción de ácido fosfórico sostenible. Su fundamento es la capacidad de microorganismos específicos para solubilizar minerales fosfatados mediante: producción de ácidos orgánicos (cítrico, glucónico, oxálico, succínico); excreción de protones que desplazan el equilibrio de disolución de la apatita; secreción de sideróforos que complejan el Ca^{2+} liberado; y reacciones redox que atacan las fases accesorias de la roca (Vijayarathna et al., 2026).

Los microorganismos con mayor potencial demostrado incluyen: hongos filamentosos del género *Aspergillus* (principalmente *A. niger*, *A. flavus*), *Penicillium bilaiae* y *Paecilomyces lilacinus* como productores prolíficos de ácido glucónico y cítrico (Chao

et al., 2026); y bacterias acidófilas quimiolitotróficas como *Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *Sulfurihydrogenibium spp.* como productoras de H_2SO_4 biogénico. El proceso en dos etapas propuesto por Calle-Castañeda et al. (2018) "crecimiento previo" del cultivo de *A. thiooxidans* sin la roca, seguido de la etapa de "recuperación" con la roca añadida alcanzó el 100% de solubilización del fósforo, frente al 56% máximo del proceso convencional en una sola etapa, representando un avance conceptual de primera magnitud (Vijayarathna et al., 2025).

Mendes et al. (2021) demostraron que filtrados de cultivo de *A. niger* con 100 mM de ácido oxálico, libres de biomasa, extraen ~74% del fósforo de la roca fosfórica, sugiriendo que la fase activa del proceso es el ácido orgánico secretado y no la biomasa microbiana en contacto directo. Esto abre la posibilidad de procesos desacoplados donde la producción de ácido orgánico y la lixiviación de la roca se optimizan en biorreactores independientes, lo que simplifica el control del proceso y reduce la inhibición microbiana por toxicidad mineral.

La biolixiviación microbiana representa una tecnología de alto impacto potencial, pero de madurez tecnológica insuficiente para la escala industrial en el horizonte de los próximos 5-10 años, en el contexto de un país en desarrollo como Cuba. Los principales obstáculos identificados son: (1) la velocidad de reacción de los procesos biológicos es 2-3 órdenes de magnitud inferior a la de los procesos químicos convencionales, requiriendo reactores de mayor volumen y mayor tiempo de residencia; (2) el control de la microbiota en sistemas abiertos o semicerrados a escala industrial es técnicamente complejo y susceptible a contaminaciones cruzadas; y (3) la eficiencia de extracción de los procesos biológicos aún no alcanza de forma consistente los valores superiores al 95% que son estándar en el proceso húmedo y la ruta HCl. Sin embargo, el estudio con cepas de *Acidithiobacillus thiooxidans* en los yacimientos del oriente cubano (Marrero et al., 2015) constituye un activo biotecnológico que puede servir como base y aprovecharse para estudios de pre-tratamiento biológico de la roca fosfórica local, con vistas a mejorar su reactividad frente a los ácidos minerales en la ruta HCl. Esta aproximación, consistente con una estrategia de biofortificación de la roca previa a la lixiviación química, podría reducir los requerimientos de ácido y mejorar los rendimientos de extracción, representando el camino de innovación más apropiado para Cuba en el horizonte 2025-2035.

3.5 Comparación cuantitativa y multicriterio de las tecnologías analizadas

La Tabla 1 sintetiza los parámetros operacionales y ambientales más relevantes de las tecnologías analizadas incluyendo las dos variantes tecnológicas de la tecnología del ácido sulfúrico, permitiendo una comparación objetiva de sus fortalezas y limitaciones relativas.

Tabla 1. Comparación de las principales tecnologías de producción de ácido fosfórico

Criterio	Proceso húmedo-DH (H₂SO₄)	Proceso húmedo-HH-DH	Vía HCl	Proceso térmico	Biolixiviación
Conc. P ₂ O ₅ (%) en ácido crudo	26-30 (Huo et al., 2023a)	40-42 (Wang et al., 2024)	25-35 (Younes et al., 2025)	hasta 85 (EPA, 2023)	5-15 (variable) (Mendes et al., 2021; Calle-Castañeda et al., 2018)
Recuperación P ₂ O ₅ (%)	92-95 (Huo et al., 2023a)	95-97 (Wang et al., 2024)	>98 (Younes et al., 2025)	~95 (EPA, 2023)	56-100 (Calle-Castañeda et al., 2018; Mendes et al., 2021)
Generación de fosfoyeso	Alta (5-6 t/t P ₂ O ₅) (Guan et al., 2024)	Media-Alta (4-5) (Lou et al., 2024)	Ninguna (CaCl ₂) (Younes et al., 2025)	Escoria CaSiO ₃ (EPA, 2023)	Mínima (Mendes et al., 2021)
Consumo energético	Bajo-Medio (Bertau et al., 2025)	Medio (Bertau et al., 2025)	Medio-Alto (Younes et al., 2025)	Muy alto (12-14 kWh/kg P) (Zan et al., 2006)	Bajo (Mendes et al., 2021)
Pureza del ácido final	Grado fertilizante (EPA, 2023)	Fertiliz./técnico (Wang et al., 2024)	Alta pureza (Wu et al., 2023)	Muy alta pureza (EPA, 2023)	Variable (Mendes et al., 2021)
Aptitud para roca cubana	Media (bajo P ₂ O ₅ , interferencia Fe/Al) (baja tolerancia a impurezas, requiere H ₂ SO ₄ importado)	Media (similar al DH, mayor complejidad operativa)	Alta (compatible con bajo P ₂ O ₅ , soluble Fe/Al, HCl disponible localmente)	Media (alta demanda energética incompatible con matriz energética cubana)	Por evaluar (potencial endémico confirmado, madurez insuficiente)

El análisis de la Tabla 1 permite derivar varias observaciones de relevancia para la toma de decisiones tecnológicas. El proceso por vía húmeda-DH presenta la menor concentración de P₂O₅ en el ácido crudo (26-30%) y la mayor generación de fosfoyeso, siendo la tecnología de mayor carga ambiental por unidad de producto. Sin embargo, es la de menor costo operativo y mayor base de conocimiento instalado. El proceso por vía húmeda-HH-DH mejora la concentración de ácido crudo y el rendimiento de P₂O₅, pero a expensas de mayor complejidad operativa y una generación de fosfoyeso que sigue siendo el principal pasivo ambiental del proceso.

La ruta HCl destaca por la máxima recuperación de P₂O₅ (>98%), la ausencia de fosfoyeso

y la alta pureza del ácido final, pero su madurez tecnológica (TRL 6-8 en instalaciones semi-industriales) es inferior a la de los procesos húmedos. El proceso térmico produce el ácido de mayor pureza, pero con el mayor consumo energético, haciéndolo dependiente de electricidad barata para su competitividad. Las tecnologías de biolixiviación presentan el menor impacto ambiental intrínseco, pero también el menor nivel de madurez y la mayor variabilidad en los parámetros operacionales.

Las condiciones específicas de Cuba conducen a la jerarquización tecnológica para el contexto nacional: (1) la ruta HCl con extracción por solventes es la primera opción para el desarrollo de una capacidad productiva propia de ácido fosfórico en Cuba, por su convergencia de ventajas en disponibilidad de insumos, compatibilidad con la roca cubana, ausencia de fosfoyeso y calidad del producto; (2) la biolixiviación microbiana acoplada al pre-tratamiento de la roca constituye la segunda línea de investigación de mayor potencial de innovación a mediano plazo; (3) el proceso húmedo-HH-DH podría considerarse como opción de respaldo si se resuelve la disponibilidad económica de H_2SO_4 de calidad, lo que en el horizonte actual no es previsible sin inversiones en capacidad de producción de ácido sulfúrico; y (4) el proceso térmico es descartable a corto-medio plazo por sus requerimientos de insumos y energía incompatibles con las capacidades actuales del sector industrial cubano. Esta jerarquización no pretende ser definitiva: debe validarse mediante estudios de caracterización exhaustiva de la roca fosfórica cubana, análisis de ingeniería de procesos a escala piloto y evaluación económica completa bajo condiciones de mercado actualizadas.

Cabe señalar como limitación de este trabajo que, si bien existen datos consolidados de costo de inversión (CAPEX) para el proceso húmedo (del orden de 1.000-2.000 USD por tonelada anual de capacidad instalada) y estimaciones parciales para el proceso térmico, no se dispone de información pública de CAPEX a escala comercial para la ruta HCl con extracción por solventes ni para la biolixiviación microbiana, dado que ninguna de las dos cuentas aún con plantas industriales de referencia. Esta ausencia de datos económicos consolidados debe considerarse en la interpretación de la jerarquización tecnológica propuesta y constituye, en sí misma, una necesidad de investigación futura.

4. CONCLUSIONES

1. El proceso húmedo con ácido sulfúrico, a pesar de dominar el mercado mundial de producción de ácido fosfórico, resulta la opción menos adecuada para Cuba debido a la baja producción local de ácido sulfúrico, la baja ley de P_2O_5 de la roca fosfórica y el agravado problema de disposición de fosfoyeso generado.
 2. La ruta de producción de ácido fosfórico mediante acidulación con ácido clorhídrico y extracción líquido-líquido con solventes orgánicos constituye una alternativa tecnológica de mayor pertinencia estratégica para Cuba, al converger la disponibilidad de HCl, la compatibilidad del proceso con roca de alto contenido de Fe/Al, la no generación de fosfoyesos y la obtención de ácido de alta pureza.
 3. La tecnología de biolixiviación microbiana representa la dirección estructural hacia una producción sostenible de ácido fosfórico, cuya implementación en Cuba puede potenciarse mediante el aprovechamiento de microbiota acidófila endémica de los yacimientos pirolíticos del país como activo biotecnológico potenciador.
-

REFERENCIAS

- Abilkasova, S., Akhmetova, S., Kalimoldina, L., Suleimenova, M., Berkinbayeva, A., & Kabulova, G. (2025). Study on the purification process of phosphoric acid using organic solvents: a case of wet-process phosphoric acid based on karatau phosphorites. *The Open Chemical Engineering Journal*, 19, e1874123125000030. <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1874123125000030>
- Arce, A., Arce, A. Jr., & Rodriguez, O. (2022). Revising concepts on liquid–liquid extraction: data treatment and data reliability. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 67(1), 286-296. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00778>
- Ayinla, K. I., Baba, A. A., Oyinloye, J. S., Olaoluwa, D. T., Ibrahim, A. S., Raji, M. A., Abdulrahman, A., & Ajetomobi, O. O. (2018). Establishment of dissolution kinetics and mechanism of direct leaching of gagi phosphate rock in hydrochloric acid solution. *Al-Hikmah Journal of Pure & Applied Sciences*, 6(1), 37-46. <https://alhikmahuniversity.edu.ng/AJPAS/index.php/journal/article/view/177>
- Azeez, R. S., Tönsuaadu, K., Kaljuvee, T., & Trikkel, A. (2024). Kinetics of estonian phosphate rock dissolution in hydrochloric acid. *Minerals*, 14(3), 322. <https://doi.org/10.3390/min14030322>
- Bertau, M., Wellmer, F-W., Scholz, R. W., Mew, M., Zenk, L., Aubel, I., Fröhlich, P., Raddant, M., & Steiner, G. (2025). The future of phosphoric acid production – Why we have to leave trodden paths. *ChemSusChem*, 18(3), e202401155. <https://doi.org/10.1002/cssc.202401155>
- Calle-Castañeda, S. M., Márquez-Godoy, M. A., & Hernández-Ortiz, J. P. (2018). Solubilization of phosphorus from phosphate rocks with *Acidithiobacillus thiooxidans* following a growing-then-recovery process. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34, 17. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2390-7>
- Chao, Z., Li, H., Ji, J., Sun, X., Sun, Y., Xu, M., Wang, Y., Tian, D., Chen, H., Yu, D., & Li, Z. (2026). Bioextraction of residual phosphorus from phosphogypsum by phosphate-solubilizing fungus *Aspergillus niger*. *Environmental and Biogeochemical Processes*, 2, e002. <https://doi.org/10.48130/ebp-0025-0018>
- Chengqi, L., Yongsheng, R., Daqing, T., Xiaorui, Z., Ya'nan, W., Lingxin, K., & Wei, S. (2014). Equilibria of the quaternary system including phosphoric acid, hydrochloric acid, water and tri-n-butyl phosphate at T = 303.2 K and atmosphere pressure. *J. Chem. Thermodynamics*, 79, 118-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2014.08.003>
- Dong, W., Sun, N., Deng, X., Chen, Z., Zhang, Y., Chi, R., & Hu, L. (2024). Study on the occurrence state of main components of phosphogypsum dihydrate and its impurity distribution. *RSC Advances*, 14, 22280-22291. <https://doi.org/10.1039/D4RA03273J>
- EPA, (2023). Phosphoric acid supply chain profile. EPA Chemical Safety Document. – U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/Phosphoric%20Acid%20Supply%20Chain%20Profile.pdf>

- Global Growth Insights. (2025). Phosphoric acid market size, share & trends analysis report, 2026–2035* (Market Report No. GGI-PA-106959). Global Growth Insights. <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/phosphoric-acid-market-106959>
- Guan, Q., Wang, Z., Zhou, F., Yu, W., Yin, Z., Zhang, Z., Chi, R., & Zhou, J. (2024). The impurity removal and comprehensive utilization of phosphogypsum: A review. *Materials*, 17(9), 2067. <https://doi.org/10.3390/ma17092067>
- Huo, X., Guo, L., Liu, R., Tao, C., & Xi, B. (2023a). Revealing mechanism of hemihydrate–dihydrate phosphogypsum transformation and minimizing phosphorus loss in wet process phosphoric acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(50), 21590-21598. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03040>
- Huo, X., Guo, L., Liu, R., Tao, C., & Xi, B. (2023b). Role of additives: modified hemihydrate phosphogypsum morphology and enhanced filtration performance of wet-process phosphoric acid. *ACS Omega*, 8(49), 47295-47303. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08259>
- Li, L., Zheng, D., Tang, S., Zhang, T., & Liu, W. (2021). Phosphate ore particles dissolution kinetics in hydrochloric acid based on a structure-related segmented model. *Powder Technology*, 392, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.015>
- Lou, X. Y., Liang, J., Liu, S., Wang, J., & Chen, H. (2024). From grave to cradle: Treatment, resource recycling, and valorization of phosphogypsum wastes. *Environmental Science & Technology Letters*, 11(9), 908-919. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00530>
- Marrero, J., Coto, O., Goldman, S., Graupner, T., & Schippers, A. (2015). Recovery of nickel and cobalt from laterite tailings by reductive dissolution under aerobic conditions using *Acidithiobacillus* species. *Environmental Science & Technology*, 49(11), 664-6682. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b009444>
- Mei, Y., Zhu, Y., Nie, Y., Long, P., & Xie, D. (2024). Total heat energy recovery system for furnace-process phosphoric acid (US12398039B2)). <https://image-pubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/12398039>
- Mendes, G. O., Dyer, T., Csetenyi, L., & Gadd, G. M. (2021). Rock phosphate solubilization by abiotic and fungal-produced oxalic acid: Reaction parameters and bioleaching potential. *Microbial Biotechnology*, 15(5), 1189-1202. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13792>
- Reyes, Y., Rodríguez, F., Alejo, L. & González, E., (2025). Prefactibilidad económica para la síntesis de H₃PO₄ mediante roca fosfórica y ácido clorhídrico cubanos. *Tecnología Química*, 45, 430-443. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5486/4932>
- Vijayarathna, S. P., Rathnayake, I. V. N., & Samarasekere, P. W. (2025). Mining with microbes: a systematic review of bioleaching of rare earth elements from phosphate rocks. *The Journal of Desk Research Review and Analysis*, 3(2), 177-192. <https://doi.org/10.4038/jdr.ra.v3i2.95>

- Vijayarathna, S. P., Rathnayake, I. V. N. & Samarasekere, P. W. (2026). Microbial bioleaching of rare earth elements from phosphate minerals: A biotechnology-driven systematic review of mechanisms, bioprocess determinants, and opportunities for sustainable recovery. *BMC Biotechnology*, 26, 40. <https://doi.org/10.1186/s12896-026-01125-1>
- Wang, Y., Zhou, Y., Chen, M., Li, J., & Jin, Y. (2024). Flow characteristics and mass transfer performance of phosphoric acid extraction in a T-type central plug-in microreactor. *Chemical Engineering and Processing -Process Intensification*. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109992>
- Wu, Z., She, L., Ye, P., Zhu, T., Li, Zhang, X., Ma, J., & Wang, T. (2023). Extraction of H₃PO₄ from low-grade phosphate rocks leachate of HCl-route by the mixture of TBP and IPE: Optimization, mass transfer and mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 370, 120861. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016773222202400X>
- Wu, F., Chen, D., Niu, Q., & Xiao, X. (2025). Current status of phosphoric acid preparation technology and future application directions of microbial methods. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 43, 101882. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554124004571>
- Younes, H., Qin, L., Ahmed, A., Jia, F., Song, S., & Zhan, W. (2025). Exploring phosphorus dissociation kinetics in HCl-leached moderate-grade phosphate ores: Towards high-quality dicalcium phosphate production. *Minerals Engineering*, 231, 109151. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109480>
- Zan, C., Shi, L., Song, Y. Z., & Zhu, M. S. (2006). Evaluation method for thermal processing of phosphoric acid with waste heat recovery. *Energy*, 31(14), 2791-2804. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.11.009>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Yosviel Reyes Delgado. Conceptualización, redacción- revisión y edición
 - Ing. Lietty Cedré López. Investigación, redacción-primera redacción.
 - Dr.C. Luis Andrés Gómez Rodríguez. Metodología, supervisión
-