

Bohemita de tamaño micrométrico obtenida a partir de desechos urbanos Micrometric-sized Boehmite obtained from urban waste

L. Ibarra-Cruz ^a, F. Legorreta-García ^a, J. Juárez-Tapia ^a, J. Cobos-Murcia ^a, Y. Rosario-Olguin ^{a,*}

^aLaboratorio de Tecnología de Cerámicos, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

En este trabajo se investigó la obtención de hidróxido de aluminio mediante la lixiviación de chatarra de aluminio en una solución alcalina de NaOH. Se realizaron dos precipitaciones a diferentes valores de pH. En la primera precipitación se separaron las impurezas de la chatarra de aluminio; en la segunda precipitación se obtuvieron partículas de hidróxido de aluminio de tamaño micrométrico. Se demostró que los diagramas de equilibrio químico son útiles para explicar la formación de diferentes especies químicas durante el tratamiento de la chatarra de aluminio, incluyendo especies químicas sólidas, iónicas y acuosas. Las especies químicas sólidas, mayoritariamente impurezas, se separaron mediante filtración, mientras que las iónicas y acuosas se utilizaron para producir una solución de hidróxido de aluminio. Las partículas de hidróxido de aluminio de tamaño micrométrico se obtuvieron mediante la neutralización de la solución, seguida de la separación y el secado. La superficie específica de los polvos fue de 69.83 m²/g, resultados acordes con los resultados del análisis cristalográfico. Estos resultados sugieren que este proceso podría ser una forma eficaz de producir partículas de hidróxido de aluminio de tamaño micrométrico a partir de un desecho urbano.

Palabras Clave: hidróxido de aluminio, bohemita, chatarra de aluminio, diagramas de equilibrio químico.

Abstract

In this work, the production of aluminum hydroxide by leaching aluminum scrap in an alkaline NaOH solution was investigated. Two precipitations were carried out at different pH values. In the first precipitation, the impurities of the aluminum scrap were separated; in the second precipitation, micron-sized aluminum hydroxide particles were obtained. Chemical equilibrium diagrams were shown to be useful in explaining the formation of different chemical species during aluminum scrap treatment, including solid, ionic, and aqueous chemical species. The solid chemical species, mostly impurities, were separated by filtration, while the ionic and aqueous ones were used to produce an aluminum hydroxide solution. Micron-sized aluminum hydroxide particles were obtained by neutralizing the solution, followed by separation and drying. The specific surface of the powders was 69.83 m²/g, results consistent with the results of the crystallographic analysis. These results suggest that this process could be an efficient way to produce micron-sized aluminum hydroxide particles from urban waste.

Keywords: aluminum hydroxide, boehmite, aluminum scrap, chemical equilibrium diagrams.

1. Introducción

De acuerdo con la literatura disponible (World Aluminum, 2023), en los últimos cinco años se han generado más de 270 millones de toneladas métricas de aluminio primario en todo el mundo. Su reciclaje por fundición, disminuye la energía necesaria comparada con la que se utiliza para obtenerlo a partir de la bauxita mineral (Padamata et al. 2021), (Meshram et al., 2018), (Liu et al., 2009), (David et al., 2013), (Das et al.,

2007). Sin embargo, el consumo de Al está aumentando y el proceso de reciclaje es perjudicial para el medio ambiente debido a la gran cantidad de gases tóxicos que se emiten a la atmósfera (Meshram et al., 2018), (David et al., 2013), (Grimaud et al., 2016). Por otra parte, uno de los principales problemas del reciclaje de Al es la dificultad para eliminar los elementos de aleación tales como Cu, Fe, Mn, Mg, Si y Zn (Zhou et al., 2006), (Springer, 2018), (Xiao et al., 2002), (García-Mayorga et al., 2018). La separación de estas

*Autor para la correspondencia: ro450517@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ro450517@uaeh.edu.mx (Yaneth Rosario-Olguin), ib368339@uaeh.edu.mx (Luz E. Ibarra-Cruz), profe_974@uaeh.edu.mx (Felipe Legorreta-García), Julio C. Juárez-Tapia (jcjuarez@uaeh.edu.mx), José Á. Cobos-Murcia (jose_cobos@uaeh.edu.mx).

Historial del manuscrito: recibido el 24/04/2023, última versión-revisada recibida el 05/09/2023, aceptado el 07/09/2023 en línea (postprint) desde el 07/09/2023, publicado el 05/01/2024. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11026>



impurezas es compleja, y al realizarlo incrementan los costos del reciclaje (Hiraki *et al.*, 2007), (Grimaud *et al.*, 2016). A pesar de la optimización de la tecnología, una fracción de metal no es reciclable y algunos elementos de la aleación permanecen, afectando la calidad del producto (Xiao *et al.*, 2002), (García-Mayorga *et al.*, 2018). Existen alternativas para el uso de chatarra de aluminio como son: la producción de hidrógeno y la síntesis de especies químicas de aluminio como la bauxita, bayerita o bohemita (Hiraki *et al.*, 2007), (García-Mayorga *et al.*, 2018), (Hiraki *et al.*, 2005), (Asencios *et al.*, 2012).

En el año 2008, se encontraron reservas de bauxita económicamente viables, calculado que éstas se agotarían en aproximadamente 100 años (Liu *et al.*, 2009). No obstante, el último estudio encontrado y desarrollado en 2004, tras evaluar y comparar las características de la bauxita en los depósitos actualmente explotados y las perspectivas de futuros yacimientos, se sugiere que existe un potencial adecuado para mantener, al menos, el nivel actual de calidad y cantidad de bauxita durante los próximos 20 a 25 años. Lo anterior se explica a que el empleo de este mineral ha aumentado de manera exponencial (David *et al.*, 2013) y actualmente es considerado dentro de la lista de minerales críticos a desaparecer (Fortier *et al.*, 2018), (Prosser *et al.*, 2017). Además, aproximadamente el 85% de la bauxita extraída de minas se refina en alúmina (o productos químicos de alúmina), que posteriormente se funde para obtener aluminio; el 8% se emplea para producir compuestos químicos de alúmina y el 7% se usa para la elaboración de abrasivos, materiales refractarios, en la industria médica dental y del cemento (Fortier *et al.*, 2018), (Meyer, 2004).

En años recientes, ha estado siendo de interés científico la obtención de $\text{Al}(\text{OH})_3$ a partir de residuos inorgánicos (Shi *et al.*, 2020) (García-Mayorga *et al.*, 2018). Se han propuesto métodos de electrólisis para la extracción de $\text{Al}(\text{OH})_3$ poroso a partir de cenizas volantes, obteniendo productos electrolíticos con una pureza de 86.43 % en masa de $\text{Al}(\text{OH})_3$, y otras impurezas como Ca, Fe y SO_3 . (Shi *et al.*, 2020). En otro trabajo García-Mayorga et al., obtuvieron $\text{Al}(\text{OH})_3$ empleando técnicas de electrosíntesis catódica en corriente continua, obteniendo principalmente una fase de bayerita cristalina (García-Mayorga et al., 2018). Es posible obtener las fases cristalinas gibbsita y bayerita, ambos hidróxidos de aluminio, a partir del polvo de aluminio. En el caso de la gibbsita, se logró su síntesis mediante la disolución del polvo de aluminio en una solución de NaOH y posterior precipitación con la adición de metanol. En contraste, al utilizar etanol y HNO_3 para la precipitación, se obtuvo la fase bayerita en lugar de la gibbsita (Prabu *et al.*, 2021). Trejo y colaboradores, realizaron una disolución de escoria de aluminio con NaOH y neutralizaron con HCl, para después calcinar y obtener alúmina/mullita/jadeíta (Trejo-Trejo *et al.*, 2021).

Dentro de las aplicaciones del $\text{Al}(\text{OH})_3$ recientes, se ha demostrado que es un auxiliar efectivo en los coagulantes comerciales debido a que forma diversas especies químicas que precipitan con facilidad (Chen, *et al.*, 2020). También, la aplicación de la mezcla de $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{NaOH}$ durante la tostación de carbonatos de tierras raras, forma óxidos de Ce, La y Nd (Li *et al.*, 2020). Otra aplicación, es el uso de nano placas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ con hidroxiapatita, para la desfluorización del agua de uso doméstico (Huang *et al.*, 2020).

Asimismo, se han utilizado partículas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ con la finalidad de elaborar cerámicas refractarias porosas base alúmina, mullita y composites alúmina mullita, logrando una variación del porcentaje de porosidad, dependiendo de la proporción adicionada de partículas y de la temperatura de sinterización. (Ahmad *et al.*, 2016), (Cho *et al.*, 2004), (Chen *et al.*, 2021).

De todas las investigaciones de obtención de $\text{Al}(\text{OH})_3$ revisadas, ninguna explica el origen ni la formación de las impurezas de los productos. En este trabajo de investigación, se obtuvo un polvo de hidróxido de aluminio a partir de chatarra de aluminio y se hizo uso de diagramas de equilibrio químico que permiten explicar las especies químicas que se forman durante el proceso, esclareciendo el origen de los óxidos metálicos contenidos tanto en los precipitados, como en el producto final.

2. Metodología

2.1. Disolución de la chatarra de aluminio y precipitación de las impurezas

La limadura de la chatarra de aluminio se obtuvo del cuerpo de latas de aluminio, la tapa se desechó. La muestra fue reducida de tamaño mediante un molino de cuchillas de acero inoxidable. Las partículas de aluminio se tamizaron a fin de obtener partículas inferiores a 1.2 mm.

Para elaborar la solución alcalina se empleó NaOH (Meyer, 97%) y para neutralizar la solución, se adicionó HCl (Baker, 38%). Las diluciones y enjuagues se hicieron con agua destilada.

En un reactor de 1 L se adicionaron 500 mL de solución de NaOH 2.5 M con agitación constante a 200 rpm, se agregaron 5.0 g de limadura de chatarra de aluminio, y se dejó reaccionar durante 24 h a temperatura ambiente hasta lograr la disolución total, obteniendo una suspensión translúcida y precipitados de color café. El pH de la suspensión fue de 14 +/- 0.2.

Posterior a la disolución, se realizó el filtrado de la suspensión obteniendo dos productos: un precipitado color café y una solución translúcida. El primer producto se desechó y a la solución se le agregó poco a poco HCl concentrado hasta tener un valor de pH de 7 +/- 0.2, formándose un precipitado de color blanco con consistencia de gel.

Posteriormente, la suspensión se filtró y se enjuagó con agua destilada caliente a 60 °C, hasta que el agua de lavado ya no tuviera conductividad.

Finalmente, el sólido de color blanco contenido en el papel filtro se secó a 90 °C durante 24 h en una estufa de laboratorio.

El pH de la solución y la conductividad, se registraron utilizando un medidor de pH de la serie Oakton 1000, con una precisión de ± 0.01 . El diagrama de la estrategia experimental se presenta en la Figura 1.

2.2. Aplicación de los diagramas de equilibrio químico

Se realizó el análisis de las especies elaborando los diagramas de equilibrio químico en el software libre Hydra-Medusa (Puigdomenech, 2018). El programa contiene una base de datos de una gran cantidad de condiciones de equilibrio para diferentes compuestos (log K a 273,15 K). Este programa usa los datos para crear diferentes tipos de diagramas. Las molaridades se calcularon a partir del análisis químico del

polvo utilizando valores de pH de 7 y de 14, a una temperatura constante de 25 °C. Los análisis de las especies del sistema metal-Al-Si(OH)₄ también fueron investigadas para estudiar la formación de los precipitados que se formaron a partir de los metales disueltos y la solución alcalina empleada, serán presentados más adelante.

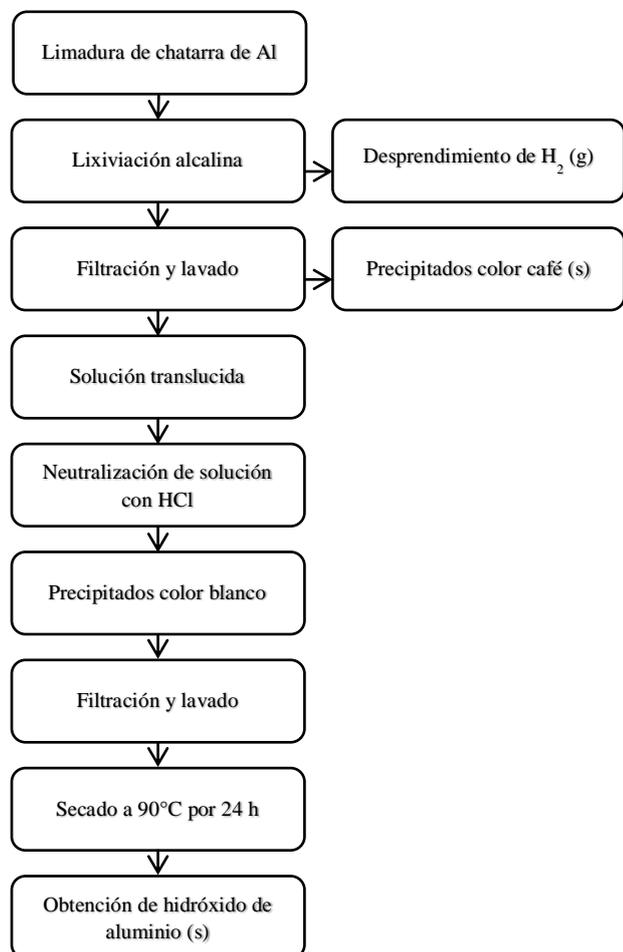


Figura 1. Proceso de obtención de Al(OH)₃.

3. Caracterización

3.1. Estudio cristalográfico (DRX)

El aluminio pulverizado y el polvo obtenido se caracterizaron por difracción de rayos X a temperatura ambiente para identificar las fases cristalinas, con un difractómetro marca INEL modelo Equinox 2000, la fuente de irradiación fue de Co K α 1 ($\lambda=1.789010$ Å), con un detector curvo, aplicando un voltaje de 10 kV. Los patrones de difracción de rayos X se indexaron con el programa Match.

3.2. Composición química elemental del polvo obtenido por fluorescencia de Rayos X (FRX)

El producto obtenido se analizó por fluorescencia de Rayos X para determinar la composición química de los elementos mayoritarios de las muestras. El análisis se realizó secando las muestras 110 °C durante 2 h. Se tomaron 0.8 g de polvo seco y se mezcló con 7.8 g de Li₂B₄O₇ para su fusión y obtención

de una perla. La pérdida por calcinación (PXC) se determinó calentando 1.0 g de muestra molida seca a 950 °C por 1 h, y midiendo posteriormente el porcentaje de pérdida de peso.

3.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El Al(OH)₃ obtenido, se estudió por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB), en un equipo JSM-IT300 (JEOL Ltd., Tokio, Japón) que posee un detector de rayos X OXFORD (OXFORD Instruments, Oxford, Reino Unido). Se aplicaron con 30 kV de tensión de aceleración. Se realizaron análisis puntuales semicuantitativos en áreas de barrido de aproximadamente 4.5 mm².

3.4. Fisisorción de nitrógeno

Las mediciones del área superficial específica del polvo obtenido, se realizaron en el equipo Quantachrome AsiQwin Instrumets Versión 4.0, utilizando el método BET ($\pm 5\%$ de error). Pevio a la adsorción de nitrógeno, la muestra fue desgasificada mediante un flujo de argón a una temperatura de 200 °C durante 2 h.

4. Discusión de resultados

4.1. Análisis cristalográfico y análisis químico elemental de la chatarra de Al

El difractograma de la lata de aluminio pulverizada se muestra en la Figura 2. Se detectaron los planos cristalográficos característicos (111), (200) y (220) del Al, con la ficha PDF 96-431-3211, confirmando que la aleación posee altos contenidos de aluminio metálico.

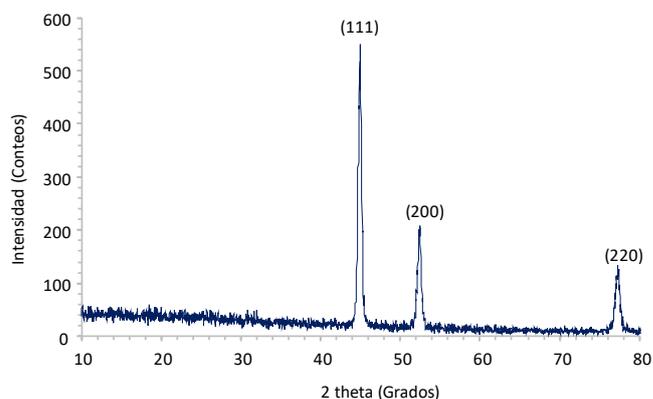


Figura 2. Difractograma de los polvos de lata de Al.

La composición química elemental de la chatarra de aluminio, es mostrada en la Tabla 1 y expresada en porcentaje en masa. Tiene una gran variedad de metales contenidos en la aleación de la lata de aluminio, siendo valores típicos para este tipo de aleaciones (Davis et al., 2001). El contenido de 95.89% en masa de aluminio metálico en la muestra, es concordante con los resultados obtenidos del análisis cristalográfico. Nótese la presencia de Mg, Mn con aproximadamente 1 % en masa, así como de Si y Fe con valores cercanos al 0.5 % en masa.

Tabla 1: Análisis químico de la chatarra de Al

Componente	% masa
Al	95.89
Si	0.474
P	0.0161
S	0.0926
Cl	0.1182
Na	0.0048
Mg	0.9869
K	0.0132
Ca	0.0542
Ti	0.1139
V	0.0095
Cr	0.0212
Mn	1.1707
Fe	0.6798
Ni	0.0114
Cu	0.2642
Zn	0.0501
Ga	0.0208
Total	99.9916

demás elementos fueron separados como óxidos u hidróxidos en estado sólido al realizar la separación por filtración.

Tabla 2: Análisis químico del polvo obtenido

Componente	Bohemita
Al ₂ O ₃	74.400
SiO ₂	1.58
MgO	0.254
CaO	0.554
Na ₂ O	1.06
Fe ₂ O ₃	0.027
Cl	0.682
P ₂ O ₅	0.011
SO ₃	0.336
CuO	ND
MnO	ND
ZnO	ND
PXC	21.1
Suma	100.00

4.3. Aplicación de los diagramas de equilibrio químico

La presencia de especies químicas del precipitado de color café generadas después de la lixiviación en NaOH y la generación de las impurezas de metales en el producto final, son explicados a continuación. Se construyeron y analizaron los diagramas de equilibrio químico con el software Hydra-Medusa, los cuales indicaron que, a un valor de pH de 14, muchos de los metales de aleación se convierten en especies sólidas, pudiéndose separar por filtración, además se observa que, al modificar el pH de 14 a 7, la especie Al(OH)₄⁻ se convierte a Al(OH)_{3(s)}. Además, se consideraron concentraciones constantes de Al = 355 mM, de Na = 2500 mM y de Si(OH)₄ = 1.69 mM. En la Tabla 3, se presentan las especies químicas formadas del precipitado resultado de la disolución de la aleación de aluminio. Bajo las condiciones mencionadas, las combinaciones de los elementos forman diversos precipitados sólidos de un color café oscuro, que son los que se quedan acumulados sobre el papel filtro.

Tabla 3: Estudio de los iones involucrados con el software Hydra-Medusa, se presentan las especies insolubles a pH = 14.

Ion metálico	Concentración (mM)	Especies formadas
Al ³⁺	6.50	NaAlSiO _{4(cr)}
Fe ³⁺ / Cu ⁺	0.14	CuFeO _{2(s)}
Fe ³⁺ / Cu ²⁺	0.14	CuFe ₂ O _{4(s)}
Fe ²⁺ / Cu ⁺	0.24	Fe ₃ Si ₂ O _{5(OH)} _{4(cr)}
Fe ²⁺ / Cu ²⁺	0.24	CuO _(cr) , CuFe ₂ O _{4(s)}
Mg ²⁺	0.40	(Mg ₅ Al ₂ Si ₃)O _{10(OH)} ₈ .Si(OH) _{4(cr)}
Mn ³⁺	0.24	Mn ₂ O ₃
Mn ²⁺	0.24	Mn(OH) _{2(aq)}
Zn ²⁺	0.07	ZnSiO _{3(cr)}
Ca ⁺⁺	0.14	Ca SiO _{3(cr)}

Por otro lado, las especies iónicas y acuosas que se formaron en la solución translúcida, es decir, que pasaron a través del papel filtro, se muestran en la Tabla 4. Tras la modificación del pH a un valor de 7, estas especies fueron precipitadas formado parte del polvo final de Al(OH)₃. Las

4.2. Análisis cristalográfico, análisis químico elemental y propiedades texturales del polvo obtenido.

El difractograma del polvo obtenido se muestra en la Figura 3. Las señales identificadas corresponden a la fase cristalina principal de bohemita, γ -AlO(OH) con estructura cristalina ortorrómbica (ficha PDF 96-901-2276). El ancho y la altura de los picos indica un tamaño de cristal muy pequeño y por lo tanto podría poseer una superficie específica elevada.

Una fase bohemita similar, también fue identificada por Abdelkader, al disolver, saturar y precipitar nitrato de aluminio con amoníaco (Abdelkader et al., 2021).

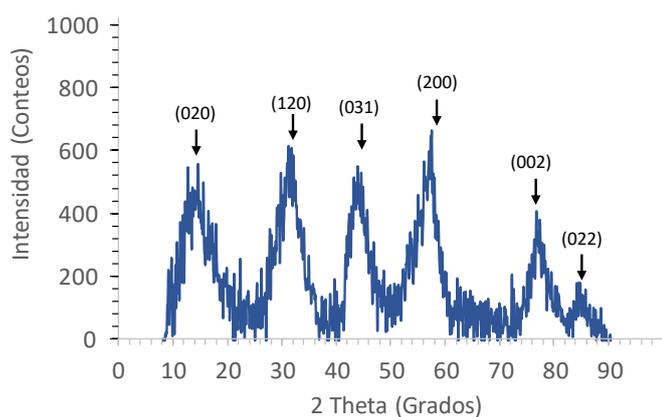


Figura 3. Identificación de las fases presentes en los polvos obtenidos.

En la Tabla 2 se presenta el análisis químico realizado por Fluorescencia de Rayos X (FRX) de los polvos obtenidos. El material contiene principalmente aluminio y una pérdida por calcinación de 21.1 % en masa. Este último resultado es similar al obtenido por Zhang (Zhang et al., 2006). También, se observan impurezas de 1.58% en masa de SiO₂ y Na₂O. Los

- transactions 46, 1052-1057.
DOI:<https://doi.org/10.2320/matertrans.46.1052>
- Hiraki, T., Yamauchi, S., Iida, M., Uesugi, H., Akiyama, T. (2007). Process for recycling waste aluminum with generation of high-pressure hydrogen. *Environmental science & technology* 41, 4454-4457. DOI:<https://doi.org/10.1021/es0628831>
- Huang, S., Hu, M., Li, D., Wang, L., Zhang, C., Li, K., He, Q. (2020). Fluoride sorption from aqueous solution using Al (OH)₃-modified hydroxyapatite nanosheet. *Fuel* 279, 118486. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118486>
- Li, J., Li, M., Zhang, D., Gao, K., Xu, W., Wang, H., Geng, J., Huang, L. (2020). Clean production technology of Baiyun Obo rare earth concentrate decomposed by Al (OH)₃-NaOH. *Chemical Engineering Journal* 382, 122790. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122790>
- Liu, W., Yang, J., Xiao, B. (2009). Review on treatment and utilization of bauxite residues in China. *International Journal of Mineral Processing* 93, 220-231. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.08.005>
- Meshram, A., Singh, K. K. (2018). Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 130, 95-108. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.026>
- Meyer, F. M. (2004). Availability of bauxite reserves. *Natural Resources Research* 13, 161-172.
- Padamata, S. K., Yasinskiy, A., & Polyakov, P. (2021). A review of secondary aluminum production and its byproducts. *JOM*, 73, 2603-2614. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04802-y>
- Prabu, S., Wang, H. W. (2021). Improved hydrogen generation from Al/water reaction using different synthesized Al (OH)₃ catalyst crystalline phases. *International Journal of Energy Research* 45, 9518-9529. DOI:<https://doi.org/10.1002/er.6478>
- Prosser, M., Johnson, M., Saptaji, K. (2017). Sustainable Bauxite Mining Guidelines. *Journal of Malaysian Critical Metals* 2, 1-4. DOI:<http://doi.org/10.15282/MyCM.v2.2017>
- Puigdomenech, I. (2018). Medusa, Hydra and Input-Sed-Predom. Royal Institute of Technology Se-100 44, Stockholm, Sweden.
- Shi, Y., Jiang, K. X., Zhang, T. A., Guo, J. H., Zhao, A. C. (2020). Clean production of porous -Al (OH)₃ from fly ash. *Journal of hazardous materials* 393, 122371. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122371>
- Springer, C. (2018). Assessing energy intensity and retrofit opportunities for the aluminum industry: Lessons from Vietnam. *Resources, Conservation and Recycling* 131, 235-246. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.020>
- Trejo-Trejo, L., Zurita-Álvarez, M. del C., Legorreta-García, F., Pérez-González, N. K., & Díaz-Guzmán, D. (2021). Obtención de α-Al₂O₃ a partir de escoria de aluminio. *Páidi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI* 9, 82-85. DOI:<https://doi.org/10.29057/icbi.v9iEspecial2.7998>
- World Aluminum. (2023). London: "World Aluminum", International Aluminum Institute, London, accessed feb. 2023.
- Xiao, Y., Reuter, M. A. (nov. 2002). Recycling of distributed aluminium turning scrap. *Minerals Engineering* 15, 963-970. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00137-1)
- Zhang, M., Zhang, R., Xi, G., Liu, Y., Qian, Y. (2006). From Sheets to Fibers: A Novel Approach to γ-AlOOH and γ-Al₂O₃ 1D Nanostructures. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 6,1437-1440. DOI:<https://doi.org/10.1166/jnn.2006.198>
- Zhou, B., Yang, Y., Reuter, M. A., Boin, U. M. J. (2006). Modelling of aluminium scrap melting in a rotary furnace. *Minerals Engineering* 19, 299-308. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.07.017>