

Recuperación de hierro magnético contenidos en arenas de playa

Recovery of magnetic iron contained in beach sands

Luis Valderrama C.^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-3926-9811>

Juan Chamorro G.¹  <https://orcid.org/0009-0004-3049-9989>

Ana Rivera V.¹  <https://orcid.org/0000-0003-0954-3610>

Catherine Diaz R.¹  <https://orcid.org/0009-0007-4917-0229>

Recibido 12 de octubre de 2024, aceptado 02 de diciembre de 2024

Received: October 12, 2024 Accepted: December 02, 2024

RESUMEN

La preconcentración implica descartar una fracción de la alimentación antes del procesamiento del mineral, para que contenga la menor o ninguna cantidad de mineral de interés. Con ello se reduce la masa a ser procesada en las operaciones posteriores, así como bajar los costos de capital y operación. Este estudio busca evaluar la posibilidad de obtener un beneficio a partir de muestras de arenas de playa mediante pruebas de separación gravitacional, para separar los minerales densos, seguido de una etapa de molienda y separación magnética en baja intensidad para concentrar la magnetita. La muestra analizada presenta minerales opacos como magnetita, ilmenita, rutilo, hematita, titanita, y titano-magnetita. El análisis químico revela que la arena contiene 62,3% de SiO₂, 8,2% de CaO, 8,6% de Fe, 1,8% de K₂O, 2,0% de TiO₂ y 0,23% de P₂O₅. El tratamiento aplicado a la arena permitió recupera un 39,3% de hierro magnético, con una ley de 56,6% y un 23,4% de TiO₂ con ley de 8,1%. Los resultados obtenidos indican que es posible descartar más del 64,7% de la ganga. Este estudio demuestra que los procesos de separación física permiten remediar arenas contaminadas, entregando un producto que puede ser rentable.

Palabras clave: Arena de playa, caracterización, hierro magnético.

ABSTRACT

Preconcentration involves discarding a fraction of the feed prior to mineral processing so that it contains the smallest or least amount of mineral of interest; this reduces the mass to be processed in subsequent operations, lowering capital and operating costs. This study seeks to evaluate the possibility of obtaining a benefit from beach sand samples through gravitational separation tests to separate the dense minerals, followed by a low-intensity grinding and magnetic separation stage to concentrate the magnetite. The analyzed sample presents opaque minerals such as magnetite, ilmenite, rutile, hematite, titanite, and titano-magnetite. Chemical analysis reveals that the sand contains 62.3% SiO₂, 8.2% CaO, 8.6% Fe, 1.8% K₂O, 2.0% TiO₂ and 0.23% P₂O₅. The treatment applied to the sand allowed the recovery of 39.3% of magnetic iron, with a grade of 56.6%, and 23.4% of TiO₂, with a grade of 8.1%. The results indicate that discarding more than 64.7% of the gangue is possible. This study demonstrates that physical separation processes allow the remediation of contaminated sand, delivering a profitable product.

Keywords: Beach sand, characterization, magnetic iron.

¹ Universidad de Atacama. Departamento de Ingeniería en Metalurgia. Copiapó-Chile.

Email: luis.valderrama@uda.cl; juan.chamorro@uda.cl; ana.rivera@uda.cl; catherine.diazr@alumnos.uda.cl

* Autor de correspondencia: luis.valderrama@uda.cl

INTRODUCCIÓN

Los depósitos de arenas de playa son acumulaciones de minerales pesados que se forman como resultado de procesos de erosión mecánica, transporte, clasificación hidrodinámica (el viento en el caso del transporte eólico) y, en última instancia, acumulación en sitios adecuados, lo que conduce a la concentración preferencial de minerales de mayor densidad que son resistentes a la meteorización química [1], [2]. La arena negra se encuentra en todo el mundo, y contiene diferentes minerales presentes debido a factores geográficos [3]. Se clasifican en el grupo de minerales pesados, porque tienen una gravedad específica alta (superior a 4 kg/L) y son de color oscuro, lo que hace que también se llamen depósitos de arenas negras. Los minerales pesados valiosos asociados con tales arenas son principalmente oro, casiterita, ilmenita, rutilo, magnetita, monacita, cianita, silimanita, turmalina, circón y granate [4]. Para recuperar estos minerales, es muy importante caracterizar y realizar pruebas, por lo que en los últimos tiempos se han hecho muchos estudios con arenas de diferentes partes del mundo [5].

Varios depósitos de arenas de playa son procesados en los Estados Unidos [6], Australia [7], Sudáfrica [8], Siria [9], India [10] y Ecuador [11], para obtener hierro, titanio, circonio y monacita (mineral de tierras raras rico en Ce).

Chile es reconocido como un país minero, y aportó 14,6% del PIB; es el primer productor de cobre y ocupa el segundo lugar en molibdeno. En cuanto a minerales industriales, es el primero a nivel mundial en producción de yodo y el segundo en litio [12]. Este liderazgo no se encuentra garantizado, y en ello influyen la disminución gradual de las leyes de los minerales y el agotamiento de los recursos de las empresas mineras. El futuro de la actividad minera chilena solo puede asegurarse si se logra una reducción significativa de costos, el uso de energías limpias y renovables y la incorporación de tecnologías de última generación en todos sus procesos.

En este escenario es inevitable la búsquedas de nuevos yacimientos, e incluir la minería oceánica, razón por la cual las arenas de playas cobran real importancia, puesto que constituyen una alternativa real para el desarrollo de una actividad esencial, en

relación a que hoy existe desconocimiento técnico y falta de certeza de los ordenamientos jurídicos. Los estudios realizados están restringidos a la geología, geofísica y caracterización geoquímica de arenas de playas, pero no existe literatura sobre estudios de factibilidad para el beneficio de las mismas [13], [14].

Las arenas de playa, por su baja ley, rara vez se utilizan como materia prima para recuperar hierro, pero las reservas de arena con contenidos de hierro son muy abundantes. Por lo tanto, se necesita aplicar métodos de beneficio adecuados para aumentar el contenido de hierro en las arenas. A modo de ejemplo [15], concentraron el mineral de hierro presente en arenas, usando mesa de concentración gravitacional y separación magnética. La recuperación obtenida fue de 96,75% con un contenido 59,78% de Fe, para un tamaño de partículas menor a 74 micrómetros, con una inclinación de la mesa de 4° y una intensidad magnética de 0,15 T.

Las arenas de playa también contienen minerales de titanio como ilmenita (FeTiO_3), titanita (CaTiSiO_4) y óxidos de titanio (TiO_2) como rutilo, anatasa y la brookita, que tienen la misma fórmula química pero difieren en su estructura cristalina. La relación entre el hierro y el titanio en la ilmenita varía simplemente por el contenido de óxido férrico. La forma cristalina de la ilmenita es alterada a una mezcla amorfa de FeO , Fe_2O_3 y TiO_2 según un proceso de intemperismo y de esta alteración puede resultar rutilo, anatasa y leucoxeno. Las especies resultantes de la alteración de la ilmenita son conocidas como minerales secundarios de titanio [16].

En algunos casos, la magnetita y la ilmenita están asociadas tan estrechamente que se necesita una pulverización muy fina para separarlos. El tiempo de molienda tiene un impacto significativo en los costos de tratamiento y en la recuperación y ley de Fe y TiO_2 durante el proceso de separación magnética. En tales casos, la separación por métodos magnéticos o gravimétricos es difícil, por lo que resulta más adecuado una etapa de flotación. La concentración electrostática también es utilizada en algunos casos [17]. Cuando la ilmenita está asociada con la magnetita, la concentración tiene dos objetivos: uno es la producción de un concentrado de ilmenita de alta calidad y el otro es la generación de una magnetita lo suficientemente baja en titanio para ser

venta como un mineral de hierro. En un estudio realizado en arenas de playa en Corea del Sur, se concentró magnetita a una intensidad magnética de 0,05 T, obteniendo una recuperación de 23,4% y una ley del 95,1%. La ilmenita se concentró a una intensidad magnética a 0,4 T, alcanzándose una recuperación del 55,2% y una ley del 84,2% [18].

Otros estudios han mostrado que es posible concentrar óxidos de hierro y titanio (Fe-Ti) contenidos en depósitos de arenas negras del Ecuador [11]. Este estudio considera un diseño preliminar eficiente y sostenible para concentrar los minerales titaníferos de hierro en cuatro etapas para el proceso, que involucran colección, secado, tamizado y separación magnética. Esta propuesta devuelve las partículas $>150\ \mu\text{m}$ y la fracción no magnética al lugar original, generando un mínimo impacto ambiental con el apoyo de procesos naturales marinos y costeros. El análisis económico determinó la rentabilidad de la planta industrial de separación magnética, considerando la demanda nacional e internacional, inversión inicial, costo operativo total, tasa de inflación, impuestos e ingresos netos.

En los últimos años se han realizados diversos estudios con arenas de playa. Por ejemplo, en India, arenas que contienen 26,8% de Fe y compuesta por magnetita, ilmenita, rutilo, hematita, goethita y cromita como minerales de valor, fueron beneficiadas por concentración magnética de baja y alta intensidad, separación a alta tensión y molienda, obteniendo un concentrado que contiene 65,2% de Fe_2O_3 con un rendimiento total del 37,8% y una recuperación del 86%. Este producto se puede utilizar como alimentación para la fabricación de acero después de una mezcla adecuada con finos de mineral de hierro de alta ley [19].

Los depósitos de playa también contienen elementos de tierras raras (ETR). La monacita ha sido recuperada como subproducto de arenas de playa de Australia, Brasil, India, Malasia, Tailandia, China, Nueva Zelanda, Sri Lanka, Indonesia, Zaire, Corea y los Estados Unidos. Los depósitos de playa ricos en minerales pesados han experimentado una renovada exploración y desarrollo, en parte para recuperar monacita por su contenido de elementos de tierras raras [20].

Un estudio realizado por Saha, Eliason, Golui, Masud, Bezbaruah y Iskander [21], señala una fácil

separación de compuestos magnéticos de muestras de arena de siete playas del sur de California, seguida de una digestión con ácidos y oxidantes concentrados. Se identificaron dieciséis elementos de tierras raras en las muestras de arena con predominio de tierras raras ligeras. La separación inicial de los compuestos magnéticos de la arena, y la posterior recuperación de las tierras raras, pueden reducir potencialmente el uso de productos químicos y el costo durante la recuperación de tierras raras de la arena [21].

De igual manera, un estudio realizado por Petrache, Santos, Fernández, Castillo, Tabora, Intoy y Reyes [22], en arenas de playas de Filipinas, demostró la presencia de minerales de tierras raras que contenían allanita y pequeñas cantidades de monacita. La muestra recolectada se concentró mediante bromoformo para separar los minerales pesados de la ganga. Luego fue molida a un tamaño de 0,044 mm, para liberar los minerales antes de la lixiviación con una mezcla de HCl y HNO_3 . A la solución ácida se agregó hidróxido de amonio para precipitar las tierras raras, que luego se secaron en un horno. El precipitado se calcinó hasta la formación de óxidos. Los resultados del análisis XRD evidenciaron la presencia de óxido de lantano con un contenido aproximado de 26% de ETR [22].

Las arenas de playas de Indonesia también contienen hierro y otros minerales. Por lo cual se requiere aumentar el contenido de hierro presente en las arenas de playa, para que puedan ser usadas como materia prima en la industria siderúrgica. El método utilizado fue la separación magnética para concentrar el hierro en las diferentes fracciones granulométricas. Los mejores resultados se obtuvieron para una granulometría de la arena menor a 149 micrómetros, con una intensidad de corriente de 5 amperios y una recuperación de 65,041% [23].

La arena roja de la India que contiene un 5,5% de minerales pesados, de los cuales el 3,7% corresponde a ilmenita, y otros minerales como circón, silimanita y granate, son concentradas gravitacionalmente en espirales, seguidas de una separación magnética en seco de alta intensidad y luego una separación electrostática. El concentrado de ilmenita obtenido contiene un 99,1% de ilmenita con una recuperación del 94% [24].

De igual manera, arenas negras de playas ecuatorianas contienen entre 25 y 28% de TiO_2 y su proceso

de concentración no tiene buenos resultados metalúrgicos en la remoción de impurezas por tratamientos físicos o mecánicos convencionales. Por sus características no es posible obtener un concentrado de ilmenita con un porcentaje superior al 75% [25]. Por tal motivo, Perez and Sharadqah [26], sometió dichas arenas a un tratamiento térmico, químico y de intercambio iónico, obteniendo un producto final (TiO_2) con una pureza del 92% [26].

Chile, cuenta con 6.435 km de costa, y en algunos lugares las arenas costeras contienen minerales pesados, que se han acumulado allí debido a su enriquecimiento en óxidos de hierro, hierro-titanio, circón y otros minerales pesados. Constituyen por tanto depósitos de interés económico diverso. Por tal razón, este estudio tiene como objetivo caracterizar y proponer un esquema tecnológico para recuperar el hierro magnético contenidos en arenas de la playa Las Salinas, Región de Atacama, visualizando recuperar además otros minerales, tales como ilmenita, titanita, circón y minerales que contienen elementos de tierras raras, como una forma de activar el interés en el procesamiento de arenas de playa.

PARTE EXPERIMENTAL

Las muestras de arena fueron colectadas en la playa Las Salinas de la comuna de Caldera de la Región de Atacama. Por muestreo se recolectaron alrededor de 232 kg de arena, los que fueron harneados en la malla 18 (1 mm) para eliminar conchas, plásticos, latas y madera. Posteriormente la arena fue homogenizada, mediante el método de cono y cuarteos sucesivos, hasta obtener muestras para análisis granulométrico, análisis químico, peso específico y para la realización de las diferentes pruebas.

El análisis granulométrico de la muestra se llevó a cabo utilizando una serie de tamices estándar. Para determinar la densidad de la arena y los productos obtenidos se usó el Matraz de Le Chatelier y el picnómetro. Cada determinación fue realizada en triplicado con el fin de ponderar una densidad del material a considerar dentro de las condiciones operacionales.

La caracterización química y física de la arena y cada producto obtenido en las pruebas se realizó mediante análisis químico volumétrico, difracción

de rayos X y microscopía electrónica de barrido Zeiss EVO MA 10, con analizador de energía dispersiva de rayos X (EDS), analizador de bajo vacío para electrones secundarios y un analizador para modo STEM.

En las pruebas de concentración gravitacional se utilizó una mesa Wilfley de laboratorio (modelo 13A) con un porcentaje de sólidos de 20%. La pulpa se agitó durante 10 minutos para romper los agregados finos adheridos a las partículas gruesas. La mesa operó bajo las siguientes condiciones: alimentación 500 g min^{-1} , ángulo de inclinación 8° , agua de lavado 8 L min^{-1} , caudal de agua $3,0 \text{ L min}^{-1}$ y caudal de agua adicional $2,5 \text{ L min}^{-1}$. Las fracciones fueron recolectadas en diferentes baldes. Las fracciones tras el tratamiento, se filtraron, secaron y se refinaron haciéndolas pasar a través de un tamiz con una abertura de 53 micrómetros y finalmente se analizaron para cuantificar la prueba.

Las pruebas de concentración magnética se llevaron a cabo en un concentrador magnético de tambor en húmedo de baja intensidad (Metso-Outotec). El concentrado de la mesa molido es sometido a separación a una intensidad magnética de 0,070 T, velocidad del tambor de 25 rpm, flujo de alimentación de $1,2 \text{ L min}^{-1}$, flujo de agua de lavado de $1,0 \text{ L min}^{-1}$ y 30% de sólidos, en el cual se obtienen como producto el concentrado magnético y el relave no magnético.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En Tabla 1 se presentan los resultados del análisis granulométrico realizado a las arenas de playa de

Tabla 1. Análisis granulométrico de la muestra de arena de playa Las Salinas.

Tamaño (μm)	% en peso	% peso pasante
-1000 + 850	0,1	100,0
-850 + 600	1,1	99,9
-600 + 425	7,5	98,8
-425 + 300	19,2	91,3
-300 + 212	32,8	72,1
-212 + 150	26,9	39,3
-150 + 106	9,3	12,4
-106 + 75	2,9	3,1
-75	0,2	0,2
Total	100	—

Las Salinas. En ella se observa que 0,2% del material alimentado tiene un tamaño de partícula inferior a 75 micrómetros, verificándose que la arena no contiene partículas finas; condición beneficiosa para realizar procesos de concentración magnética.

De igual manera se deduce que el 80% de las partículas tiene un tamaño promedio de 348 micrómetros, mientras que el d_{50} pasante tiene un tamaño de 238 μm .

En Tabla 2 se registran las leyes de los diferentes elementos obtenidas del análisis químico realizado a la muestra de arenas de playa.

Se observa en la tabla un elevado porcentaje de sílice (62,3%), hierro (8,6%), cal (8,2%), titanio (2,0% TiO_2), potasa (1,8%), fósforo (0,1%), zirconio (0,05%), elementos de tierras raras (ETR) (0,0149%). El análisis mineralógico de la arena indicó la presencia de cuarzo, calcita, pargasita, ankerita, augita, epidota, giniita, phillipsita, illita, magnetita, labradorita, anortoclase, albita, ortoclase, hematita, ilmenita, rutilo, anatasa, zirconita y monacita, los cuales tienen una gran importancia en reservas y viabilidad económica [27].

La Figura 1 exhibe la distribución de Fe, P, SiO_2 , TiO_2 , K_2O y CaO en función de la granulometría, apreciándose una alta presencia de dichos elementos en la fracción gruesa (149 μm), que contiene el 94,4% de la sílice, 94% de los óxidos alcalinos (K_2O y CaO), 77,9% del fósforo, 57,9% de TiO_2 y 46,8% de Fe. Se observa también una alta concentración en el tamaño 105 μm . Dado que la granulometría de la arena de playa es bastante gruesa, se plantea como hipótesis que los minerales no se encuentran totalmente liberados, razón por la cual se deberá realizar una etapa de molienda que permita la liberación de estos minerales.

La Figura 2 muestra la microscopía óptica de la arena, y permite apreciar los diferentes minerales, y ganga, forma de los granos y asociaciones. En ella se observan partículas de magnetita (Mt), cuarzo (Qz), carbonato (Car), ilmenita (Ilm) y monacita (mon).

La Figura 3 expone la microfotografía del análisis del microscopio electrónico de barrido, donde se logra visualizar minerales de magnetita (Mt), hematita (Hm) e ilmenita (Ilm). Se observa que el tamaño de granos se encuentra entre los 50 y 300 micrómetros. En base a las consideraciones

Tabla 2. Análisis químico realizado a la cabeza inicial de las arenas.

% SiO_2	%Fe	%CaO	% TiO_2	% K_2O	%P	% Zr	V	% ETR
62,3	8,6	8,2	2,0	1,8	0,1	0,05	0,04	0,0149

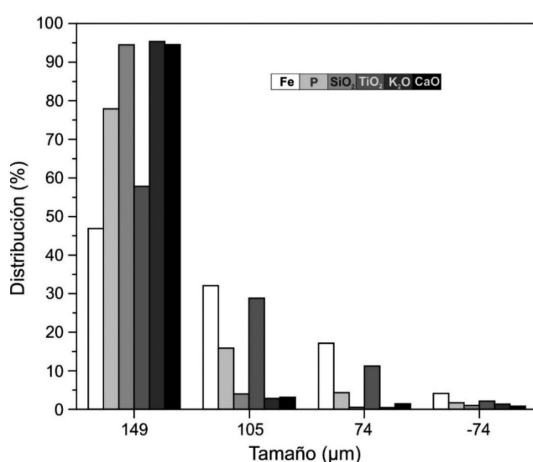


Figura 1. Distribución de los elementos por tamaño contenidos en arenas de playa.



Figura 2. Fotomicrografía de partículas de la arena de playa.

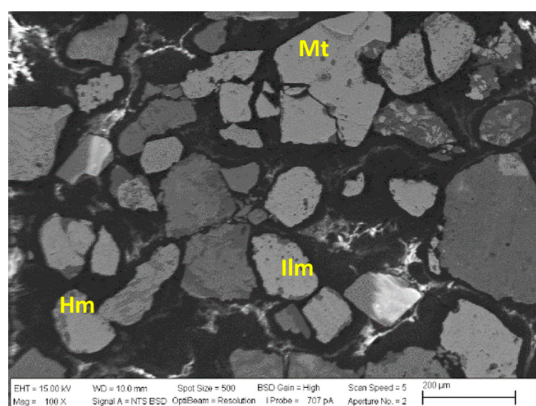


Figura 3. Imagen SEM de puntos de microanálisis.

anteriores, se establece que la arena de playa contiene: cuarzo, calcita, pargasita, ankerita, augita, epidota, illita, magnetita, labradorita, anortoclasa, albíta, ortoclasa, hematita, ilmenita, rutilo, anatasa, zirconita y monacita.

La Figura 4 muestra el tratamiento aplicado a la arena. Se inicia con la concentración gravimétrica en una mesa de separación gravitacional Wilfley, donde

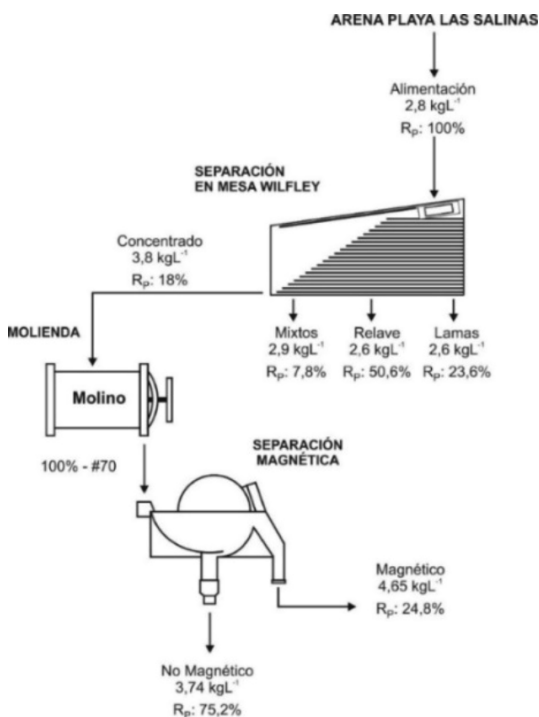


Figura 4. Esquema de concentración de arenas de playas Las Salinas.

el concentrado obtenido se somete a una etapa de molienda, para obtener una granulometría de 100% menor a 212 μm. Posteriormente el concentrado molido pasa por una etapa de separación magnética de baja intensidad en un concentrador magnético de tambor en húmedo, obteniéndose un concentrado magnético.

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos en la prueba de separación gravimétrica, donde el 18,0% en peso alimentado corresponde al concentrado, con una ley de hierro de 35,8% y recuperación de 79,6%, ley de TiO₂ de 8,6% y recuperación de 70,6%.

El concentrado obtenido en la mesa Wilfley fue sometido a una etapa de molienda. Los resultados de los análisis granulométricos del concentrado y el concentrado molido se muestran en la Figura 6. Se observa que el 53,6% de las partículas del concentrado tiene un tamaño bajo 150 micrómetros, mientras que el concentrado molido alcanza al 98,5%. Si bien la distribución granulométrica del concentrado molido es pequeña, estudios han mostrados que para que la molienda de la magnetita sea eficiente, esta se debe desmagnetizar y dispersar las partículas aglomeradas para producir una buena liberación [28].

El concentrado gravitacional molido fue sometido a concentración magnética de baja intensidad en húmedo, cuyos resultados se muestran en la Figura 7. En ella se presenta las leyes y recuperaciones metalúrgicas obtenidas a través del análisis químico realizado a la muestra de concentrado magnético.

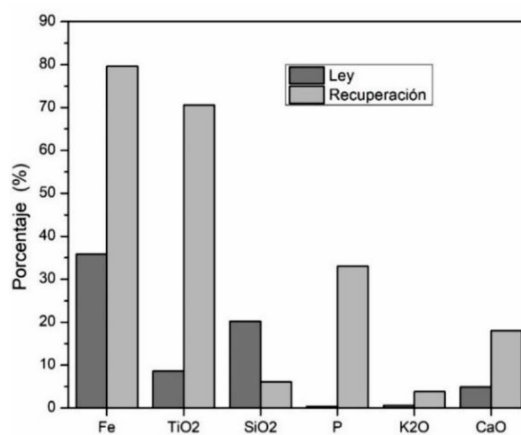


Figura 5. Resultados de la concentración gravimétrica en la mesa Wilfley.

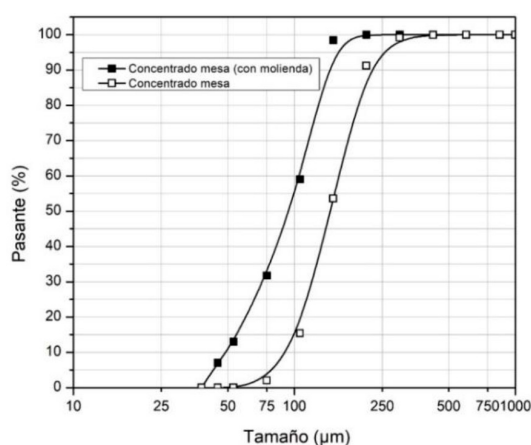


Figura 6. Análisis granulométrico del concentrado gravitacional y el concentrado molido.

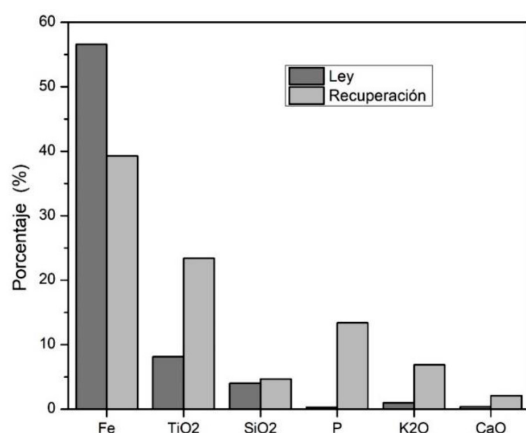


Figura 7. Resultados de la concentración magnética de la arena de playa.

Se observa que la ley de hierro en el concentrado magnético alcanza una ley de 56,6% con una recuperación de 39,3%. En el caso del TiO₂ se tiene una ley del 8,1% con una recuperación metalúrgica del 23,4%. La ley de hierro y la recuperación de hierro se pueden aumentar disminuyendo el tamaño de las partículas, pero se debe tener en cuenta los costos que se incurrirá en la molienda para tener tamaños menores a 74 micrómetros [29].

Como el concentrado magnético tiene un alto contenido de hierro y titanio, se deduce que la magnetita podría contener titanio dentro de su estructura. La disminución del contenido de titanio se puede realizar utilizando intensidad de campo

magnético de 0,07 T para concentrar la magnetita y a estos valores de intensidad magnética la ilmenita no podría ser concentrada; también sería aplicar la flotación al concentrado para flotar la ilmenita y/o someterlo a tratamiento térmico, lixiviación, extracción por solvente o intercambio iónico para obtener pigmento de TiO₂ [18], [19], [26].

CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento de los minerales que contienen hierro en arenas de playa Las Salinas-Región de Atacama, lográndose concentrados de hierro de calidad comercial (hasta un 56,6% de Fe) mediante concentración gravitacional en mesa Wilfley, molienda del concentrado y tratamiento en un separador magnético de tambor en húmedo. Se observó que más del 90% hierro contenido en las arenas se encuentra en la forma de magnetita. De igual manera, el análisis de difracción de rayos X para determinar los diferentes minerales que ocurren en el depósito de arena de playa, permitió confirmar la presencia de cuarzo, magnetita, ilmenita, rutilo, circón y monacita.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Atacama, por el aporte económico al proyecto DIUDA - REGULAR, Resolución Exenta N° 41, Registro C del 30/06/2021 y a las empresas que apoyaron esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] K.J. Stanaway, "Ten placer deposit models from five sedimentary environments," *Applied Earth Science*, vol. 121, no. 1, 2012, pp. 43-51, doi:10.1179/1743275812Y.0000000020.
- [2] C. Martínez, M. Contreras, P. Winckler, H. Hidalgo, E. Godoy, and R. Agredano, "Coastal erosion in central Chile: A new hazard?," *Ocean & Coastal Management*, vol. 156, pp. 141-155 2017, doi:10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011.
- [3] A. Filippidis, P. Misaelides, A. Clouvas, A. Godelitsas, N. Barbayiannis, and I. Anousis, "Mineral, chemical and radiological investigation of a black

- sand at Touzla Cape, near Thessaloniki,” Greece, *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 19, no. 2, pp. 83-88, 1997, doi: 10.1023/A:1018498404922.
- [4] M.F. Kaiser, A.M. Aziz, and B. Ghieth, “Environmental hazards and distribution of radioactive black sand along the Rosetta coastal zone in Egypt using airborne spectrometric and remote sensing data,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 137, pp. 71-78, 2014, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.06.006.
- [5] W. Zhang, Z. Zhu, and C.Y. Cheng, “A literature review of titanium metallurgical processes,” *Hydrometallurgy*, vol. 108, no. 3-4, pp. 177-188, 2011, doi:10.1016/j.hydromet.2011.04.005.
- [6] F.L. Pirkle, W.A. Pirkle, and F.J. Rich, “Heavy-mineral mining in the atlantic coastal plain and what deposit locations tell us about ancient shorelines,” *Journal of Coastal Research*, vol. 69, no. sp1, 2013, doi.org/10.2112/SI_69_11.
- [7] A. Reid, J. Keeling, D. Boyd, E. Belousova, and B. Hou, “Source of zircon in world-class heavy mineral placer deposits of the Cenozoic Eucla Basin, southern Australia from LA-ICPMS U-Pb geochronology,” *Sedimentary Geology*, vol. 286-287, pp. 1-19, 2013, doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.10.008.
- [8] C. Philander and A. Rozendaal, “Geology of the cenozoic Namakwa sands heavy mineral deposit, west coast of south Africa: A world-class resource of titanium and zircon,” *Economic Geology*, v. 110, no.6, pp. 1577-1623, 2015, doi: 10.2113/econgeo.110.6.1577.
- [9] B. Kattaa, “Heavy mineral survey of the Syrian beach sands, south of tartous: Their nature, distribution and potential,” *Exploration and Mining Geology*, vol. 11, no.1-4, pp. 31-41, 2002, doi:10.2113/11.1-4.31.
- [10] S. Routray, J. Vanamu, and R. Swain, “Placer deposits of brahmagiri coast, odisha - a new resource for industrial heavy minerals,” in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 338, Art. no. 012012, Rourkela, India, 2018, doi:10.1088/1757-899X/338/1/012012.
- [11] W. Trujillo, J. Cobo, D. Vera-Cedeño, A. Palma-Cando, J. Toro-Álava, A. Viloria, and M. Ricaurte, “Magnetic separation and enrichment of Fe–Ti oxides from iron titaniferous beach sands: Process design applied to coastal Ecuador,” *Resources*, vol. 11, no. 12121, doi: 10.3390/resources11120121.
- [12] Sernageomin, Anuario de la minería de Chile 2021. Servicio nacional de geología y minería, Santiago, Chile: Sernageomin, 2022. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.sernageomin.cl/items/67d9de30-9b9e-4d63-ada9-a52da0a16333>
- [13] R. Moscoso and C. Mpodozis, “Estilos estructurales en el norte chico de Chile (28-31°S), Regiones de Atacama y Coquimbo”, *Revista Geológica de Chile*, vol. 15. no. 2. pp. 151-166, 1988.
- [14] R. Paskoff, L. Cuitiño y H. Manríquez, “Origen de las arenas dunares de la región de Copiapó, Desierto de Atacama, Chile”, *Revista Geológica de Chile*, vol. 30, no. 2, pp. 355-361, 2003, doi: 10.4067/S0716-02082003000200012.
- [15] S. Oediyani, M. Ikhlusal Amal, N. Victoriyan, and A. Juniarsih, “Beneficiation of Kulon Progo iron sand by using tabling and magnetic separation methods,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering And Technology (Icommet 2017), Advancing Innovation in Materials Science, Technology and Applications for Sustainable Future*, vol. 1945, Surabaya, Indonesia, 2018, doi:10.1063/1.5030246.
- [16] W.A.P.J. Premaratne and N.A. Rowson, “The processing of beach sand from Sri Lanka for the recovery of titanium using magnetic separation,” *Physical Separation in Science and Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 13-22, 2003, doi: 10.1080/1478647031000101232.
- [17] J. Liu, Z. Xing, G. Cheng, X. Xue, and X. Ding, “Study on the grinding kinetics and magnetic separation of Low-Grade vanadiferous titanomagnetite concentrate,” *Metals*, vol. 12, no. 4, Art. 575, doi: 10.3390/met12040575.
- [18] F. Moscoso-Pinto and H.S. Kim, “Concentration and recovery of valuable heavy minerals from dredged fine aggregate waste,” *Minerals*, vol. 11, no. 1, Art. no.49, doi: 10.3390/min11010049.
- [19] D.S. Rao, R. Mohapatra, N. Vasumathi, and R.B. Rao, “Beneficiation studies on beach

- placer sample for steel making industries,” *Journal of Mining and Metallurgy*, vol. 46A, no. 1, pp. 11-21, 2010.
- [20] P. Luo, *et al.*, “Weathering co-mineralization of placer type ilmenite and ion-adsorption type rare earth elements in Guangxi, China: Nature, origin and exploration implications,” *Ore Geology Reviews*, vol. 163, Art. no. 105815, 2023, doi: 10.1016/j.oregeorev.2023.105815.
- [21] B. Saha, K. Eliason, D. Golui, J. Masud, A.N. Bezbaruah, and S.M. Iskander, “Rare earth elements in sands collected from Southern California sea beaches,” *Chemosphere*, vol. 344, Art. no. 140254, 2023, doi:10.1016/j.chemosphere.2023.140254.
- [22] C.A. Petrache, G.P. Jr. Santos, L.G. Fernández, M.K. Castillo, E.U. Tabora, S.P. Intoy, and R.Y. Reyes, “The recovery of rare earth elements (REE) from beach sands,” *Nucleus*, vol. 33, pp. 21-28, 2005.
- [23] I. Permatasari, C. Palit, and Subandrio, “Laboratory test and analysis of recovery from separation of iron sand using magnetic separator,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Seminar on Mineral and Coal Technology*, vol. 882, Art. no. 012015, Bandung, Indonesia, 2021, doi:10.1088/1755-1315/882/1/012015.
- [24] N. Babu, N. Vasumathi, and R. Bhima Rao, “Recovery of ilmenite and other heavy minerals from Teri sands (Red sands) of Tamil Nadu, India,” *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 8, no.2, 2009, doi: 10.4236/jmmce.2009.82013.
- [25] X.L. Xiong, Z. Yang, and H.Y. Ouyang, “Study on character of ilmenite modified by thermal treatment,” *Advanced Materials Research*, vol. 284-286, pp. 2090-2093, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.284-286.2090.
- [26] S.M. Perez and S. Sharadqah, “Successive methods for the separation of titanium oxide from the black sands of Ecuador,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 19, no. 1, 2018, doi.org/10.12911/22998993/79417.
- [27] A.R. Gujar, N.V. Ambre, P.G. Mislankar, and S.D. Iyer, “Ilmenite, magnetite and chromite beach placers from south Maharashtra, central west coast of India,” *Resource Geology*, vol. 60, no. 1, pp. 71-86, 2010, doi: 10.1111/j.1751-3928.2010.00115.x.
- [28] S. Wang, K. Guo, S. Qi, and L. Lu, “Effect of frictional grinding on ore characteristics and selectivity of magnetic separation,” *Minerals Engineering*, vol. 122, pp. 251-257, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.04.015.
- [29] J.A. Curry, M.J. Ismay, and G.J. Jameson, “Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding,” *Minerals Engineering* 2014, vol. 56, pp. 70-80, 2014, doi: 10.1016/j.mineng.2013.10.020.