

Estudio de las propiedades de los lodos residuales de la cantera La Inagua como alternativas para su utilización

Yanisleidy Mosqueda Rodríguez

ymrodriguez@minas.ismm.edu.cu

Yaritza Cabrales Caplé

ycabrales@ismm.edu.cu

Universidad de Moa (Cuba)

Resumen: Se caracterizaron los lodos de la planta procesadora de áridos La Inagua de la provincia Guantánamo para determinar alternativas de utilización. Sus características y propiedades esenciales se determinaron a través de ensayos químicos, ensayos físicos y análisis granulométricos. Se obtuvo que los lodos residuales de esta planta de áridos pueden utilizarse como materia prima para la elaboración de cal, cemento y neutralizante en la industria del níquel y como materia prima en diversas aplicaciones en la industria de materiales de la construcción. Se evidenció que la utilización de los lodos residuales de la planta procesadora de áridos La Inagua puede constituir una alternativa para mitigar el impacto negativo que esta provoca sobre el medio ambiente y el ecosistema de la región.

Palabras claves: Residuos; reutilización de lodos; canteras de áridos; materiales de la construcción.

Recibido: 13 enero 2023/ Aceptado: 10 abril 2023.

Study of the properties of residual sludge from the La Inagua quarry as alternatives for its use

Abstract: The sludge from the La Inagua aggregates processing plant in Guantánamo province was characterized to determine alternative uses. Its essential characteristics and properties were determined through chemical tests, physical tests and granulometric analysis. It was obtained that the residual sludge from this aggregate plant can be used as raw material for the production of lime, cement and neutralizer in the nickel industry and as raw material in various applications in the construction materials industry. It was evidenced that the use of residual sludge from the La Inagua aggregates processing plant can constitute an alternative to mitigate the negative impact that it causes on the environment and the ecosystem of the region.

Keywords: Waste; sludge reuse; aggregate quarries; construction materials.

Introducción

La producción de áridos es uno de los procesos de mayor contaminación al medio ambiente, y a pesar de que existen políticas encaminadas a mitigar su impacto, se presentan dificultades debido a las deficiencias en el diseño de los procesos tecnológicos, el desconocimiento de las vías para encausar el desarrollo sostenible y los malos hábitos empresariales. Para evitar los efectos negativos sobre el medio, se potencian medidas correctoras del impacto ambiental que puede causar el vertido incontrolado de fangos de lavado de áridos en los ríos.

El tratamiento de lodos residuales ha sido analizado por diversos autores (Ferro *et al.*, 2019; Castillo *et al.*, 2020; Fuentes, Cujia & Robles, 2021; Cárdenas & Molina, 2022, León, Godoy & Tixi, 2023) validando su aprovechamiento de disímiles formas.

En análisis realizados en la planta La Inagua, se han determinado como principales problemas medioambientales la generación de polvo, ruido, vibraciones, y el vertimiento de lodos residuales. Este último acrecienta sin encontrar una solución, debido a que se desconocen sus posibles usos. Por esta causa se depositan en una laguna de sedimentación que sobrepasó la capacidad de diseño y fueron transitando directamente al río, por esta razón se necesita una solución que resuelva esta problemática.

El objetivo de este estudio es caracterizar los lodos generados por la planta procesadora de áridos La Inagua que permita seleccionar alternativas para su utilización.

La cantera La Inagua es una concesión minera perteneciente a la Empresa de Materiales de la Construcción en la provincia Guantánamo. Entre sus objetivos fundamentales se encuentra la producción de áridos como arena, grava artificial, granito, entre otros. Por el volumen de áridos que aporta para las construcciones está considerada de gran importancia para el desarrollo socioeconómico de la región (Hernández & Guilarte, 2018).

Metodología

Se determinaron las propiedades físico y química de los lodos y se analizaron sus resultados.

Se tomaron muestras de 5 kg en la descarga de la línea conductora de lodos hacia el depósito (laguna de sedimentación) durante 10 días. Posteriormente se sometieron a una sedimentación-clarificación, y luego fueron secadas en la estufa durante 12 horas a temperatura entre 110 ± 5 °C. En este intervalo fue necesario ir desmenuzando las muestras con el objetivo de eliminar los aglomerados que se forman, producto a la humedad que estas poseen. Una vez homogéneas las muestras, se tomaron las porciones para la caracterización.

Los resultados obtenidos fueron procesados a través del *software* estadístico STATGRAPHIC Centurion XV 15.2.14. Para la determinación de diferencias significativas entre las medias se empleó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) o método de Fisher, para un riesgo del 5,0 %.

Determinación de la composición granulométrica

Para la determinación de la composición de los lodos se empleó el análisis granulométrico en un analizador de tamaño de partículas HORIBA LA-910 para 12 muestras. El análisis permite obtener la distribución sumaria por clases, el tamaño de partículas predominantes y la superficie específica.

Determinación de la composición química de las muestras

Las muestras de lodos se caracterizaron mediante el método de fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar la composición química cuantitativa de las muestras de lodo utilizadas en los experimentos.

Determinación de la reactividad

Se aplicó el método análisis de neutralización o reactividad con ácidos. En un beaker de 250 mL se añadieron 40 mL de ácido sulfúrico 0,5 mol/L con agitación constante y 3 g de la muestra previamente pulverizada, y se midió el pH durante cinco minutos, lo

que permitió evaluar el material de acuerdo a la clasificación existente de la reactividad de los carbonatos frente al ácido sulfúrico.

Determinación de la densidad del material

Se tomó una muestra del material a ensayar de 5 g y luego se coloca en una cápsula de porcelana o pesa filtro de 50ml y se introduce en la estufa hasta tener una masa constante. Pasado ese tiempo se extrae y se coloca en una desecadora. Se determinó con apreciación de 0,001 g una masa tal que desplace aproximadamente un volumen de 20 ml. Se añadió agua al frasco de L' Chatelier hasta que el nivel estuviera entre la marca de 0 y 1ml. Se midió la temperatura con apreciación de 0,5 ° C. Se midió el volumen inicial del líquido utilizando el embudo se introdujo lentamente la muestra en el frasco y se tapó para la realización de la lectura del volumen final. La densidad del material real se determina por medio de la expresión 1:

$$D = \frac{m}{V_r} \quad (1)$$

Dónde:

D : Densidad real en g / cm³

M : masa de la muestra en g

V_r : volumen real en cm³

Determinación del peso volumétrico

El peso volumétrico se determinó por el método de la pesada hidrostática que se recoge en la norma NC 181: 2002 (2002).

Se prepararon muestras de 10 g. La muestra se secó en una estufa de 107 °C hasta obtener un peso constante. Posteriormente se amarró con hilo y se sumergió en parafina derretida a una temperatura de 80-90 °C. Se pesó la muestra parafinada en el aire (G_1) y se pesó la muestra parafinada sumergida en agua destilada (G_2). El peso volumétrico se calculó por la ecuación 2.

$$N = \frac{G}{G_1 - G_2 - K(G_1 - G)}, \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

Dónde:

K: Constante que depende del peso de la parafina 1,07

G: Peso de la muestra en el aire, g

G₁: Peso de la muestra parafinada en el aire, g

G₂: Peso de la muestra parafinada en el agua, g

Determinación de la humedad

Para la determinación de la humedad se empleó el procedimiento de la norma NC-67 (2000). Se prepararon muestras de 100 g. Las muestras de ensayo se secaron a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ se determina por la diferencia del peso antes y después del secado. Posteriormente cada muestra, de forma independiente, se pesó cada dos horas hasta obtener un peso constante. La humedad para cada muestra se calculó a través de la ecuación (3).

$$W_H = \frac{g_n - g_s}{g_s} \quad (3)$$

Donde:

g_s: Masa de la muestra secada a temperatura de $107 \pm 3^\circ\text{C}$, g.

g_n: Masa de la muestra en estado natural, g.

Pérdidas por ignición

Las pérdidas por ignición (PPI), agua, carbonato hídrico y material carbonoso que se evapora cuando la muestra es calentada a una temperatura dada, fue determinada por el método reportado por Bengtsson y Enell (1986).

La muestra de ensayo se pulveriza hasta una granulometría máxima de 0,074 mm, se secó durante 1 h, a una temperatura de 105°C , se pesó 1 g de la muestra seca, se transfirió a un crisol de porcelana previamente tarado. Se calcinó en la mufla a 750°C durante 30 minutos, se extrajo de la mufla y se enfrió en una desecadora a temperatura ambiente, se pesó y se le restó la tara. Luego se determinó las pérdidas por ignición en las muestras por la ecuación

$$PPI = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100 \quad (4)$$

Dónde:

PPI: pérdida por ignición, %

M1: pérdida de masa entre 105 y 750 °C, g.

M2: Masa de la muestra libre de humedad, g

Resultados experimentales y sus análisis

A continuación, se exponen los resultados de la caracterización de los lodos, la cual permite valorar las potencialidades de los mismos para ser utilizados.

Caracterización granulométrica de los lodos

La figura 1 muestra las características de tamaño de los lodos. De acuerdo a la misma se observa que estos lodos poseen distribución granulométrica fina, el 80 % del material cernido se encuentra en el tamiz de diámetro 0,052 mm, con un diámetro medio de partículas de 0,037 mm.

Las curvas para los 12 ensayos granulométricos están prácticamente superpuestas, lo que demuestra que las distribuciones granulométricas de los materiales son muy similares, sus rangos de tamaños en el 50 % del material cernido oscilan de 0,0113 a 0,0132 mm.

De acuerdo a esta característica los lodos analizados presentan composición granulométrica adecuada, que le confieren perspectivas para ser empleados en diversas aplicaciones donde se requiera tamaño de partículas pequeñas. No obstante, para poder definir la utilización de este material se debe tener en cuenta otras propiedades.

Se puede determinar la superficie específica que brinda el análisis granulométrico en el analizador de partículas HORIBA LA-910, cuyo resultado es de $20434 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ donde la elevada superficie específica permite un mayor contacto entre las partículas. Esta propiedad superficial permite argumentar con mayor precisión los resultados de la característica de tamaño de partículas de los lodos.

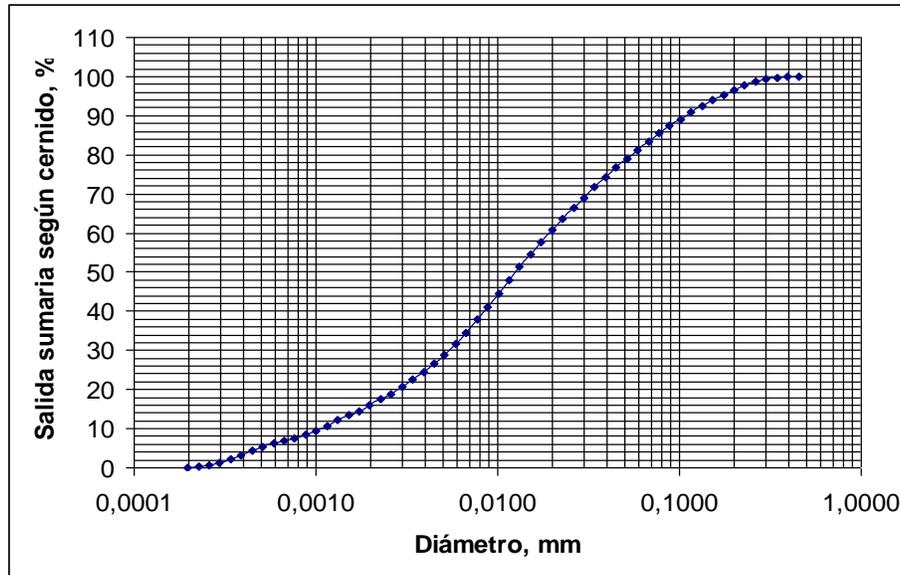


Figura 1. Característica de tamaño de los lodos.

Caracterización química

La composición química promedio de los lodos empleados, determinada por fluorescencia de rayos x, se presenta en la tabla 1. Según se aprecia los principales constituyentes son óxido de calcio, óxido de aluminio, óxido de hierro III, óxidos de silicio, óxido de magnesio, y en menores cantidades óxidos de sodio, potasio y manganeso y como otros elementos químicos constituyentes el cobre y el zinc, con una pérdida por ignición de 15,61 %, característico de este tipo de material, el cual posee en su composición un contenido considerable de dióxido de carbono.

Tabla 1. Composición química promedio de los lodos

Compuestos y elementos químicos	Contenido, %
CaO	50,98
Al ₂ O ₃	0,336
Fe ₂ O ₃	0,396
Si O ₂	0,233
MgO	0,123
Na ₂ O	0,027
KO	0,003
MnO	0,001
Zn	0,001
Cu	0,001
SO ₃	0,106
CaCO ₃	92,32
PPI	15,61

Reactividad

Este procedimiento se llevó a cabo para las 12 muestras de lodos y además, tres muestras de cieno carbonatado del proceso de Neutralización en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, lo que permitió posteriormente, una comparación de la reactividad entre el material a evaluar y el que se utiliza actualmente en la práctica.

El comportamiento de las muestras de lodos fue similar para todas las muestras durante 5 minutos. El pH varía de 0,23 hasta 5,44 lo cual muestra la reactividad del material en el proceso de neutralización de ácido sulfúrico. La reactividad promedio, en términos porcentuales es superior al 92%.

Como se observa en la figura 2, el lodo tiene excelentes cualidades en cuanto a su reactividad, pues ha superado la mostrada por el cieno carbonatado bajo las mismas condiciones de experimentación.

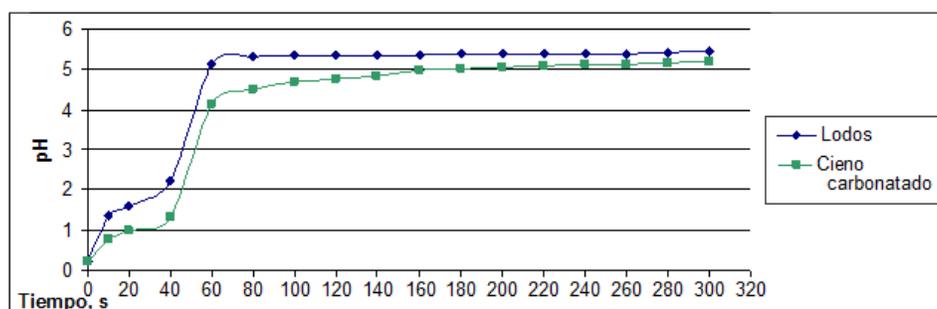


Figura 2. Variación del pH en función del tiempo.

Características físicas de los lodos

Se determinaron las características físicas fundamentales de acuerdo a las posibles aplicaciones. En la tabla 2 se aprecian los resultados promedios de los ensayos realizados.

Tabla 2. Propiedades físicas de los lodos

Propiedades	Unidad de medida	Valor promedio
Densidad	g/cm^3	4,25
Peso volumétrico	g/cm^3	2,36
Humedad	%	19,62

En la tabla 3 se pueden apreciar las características físicas para cada muestra individual de lodo.

Tabla 3. Resultados de las determinaciones para las muestras de lodo.

Muestras	Densidad	Humedad	Peso volumétrico
MQ1	2,50	19,31	2,40
MQ2	2,50	19,63	2,41
MQ3	2,63	19,85	2,45
MQ4	2,50	20,03	2,42
MQ5	3,2	20,33	2,45
MQ6	3,15	19,01	2,46
MQ7	2,50	19,04	2,47
MQ8	3,2	19,38	2,49
MQ9	2,70	19,33	2,45
MQ10	2,63	19,02	2,40
MQ11	2,40	19,58	2,30
MQ12	2,50	19,36	2,45

Selección de alternativas de utilización de los lodos

La caliza puede ser utilizada en gran número de industrias donde las propiedades químicas (óxido básico, agente neutralizante, contenido en calcio, fundente, entre otros), son importantes. La mayoría de los procesos requieren la aportación de cal o cal hidratada, o en la producción de hierro, vidrio y desulfuración. Por todo ello las características que puede tener los lodos residuales de la planta procesadora de árido La Inagua en este tipo de procesos puede ser de gran importancia.

Los lodos residuales de la planta procesadora de árido están constituidos básicamente por carbonato cálcico. Comprobado por las propiedades físicas y químicas, carecen de elementos tóxicos o nocivos. Desde el punto de vista químico, la aplicación en las industrias referentes es factible, siempre que se rija por las características técnicas de cada producto o uso industrial.

Obtención de cal

La cal es un óxido básico (CaO) denominado también cal viva que forma parte de las rocas carbonatadas. La producción de cal es uno de los principales usos al que se puede destinar los lodos residuales de la planta procesadora de árido La Inagua, los cuales deben poseer un contenido de carbonato de calcio (CaCO₃) de 90 % como mínimo y bajos contenidos de óxidos de silicio, aluminio, hierro, magnesio y de impurezas como azufre y fósforo (Rivera *et al.*, 2007). Las principales aplicaciones de la cal, donde podrían ser empleados los lodos como materia prima son las siguientes:

Tratamientos de aguas

Suavización: En la suavización del agua la función de la cal es remover temporalmente la dureza del agua (bicarbonato).

Neutralización de Aguas Ácidas: La cal es usada para combatir las condiciones del "agua roja", mediante la neutralización de ácidos en el agua y, por tanto, impidiendo una futura corrosión de conductos y tuberías de aguas ácida. Las aguas corrosivas contienen en exclusivas cantidades de dióxido de carbono. La cal absorbe el CO_2 para formar un carbonato de calcio, el cual provee una capa protectora en interior de la tubería de agua.

Tratamiento de desechos industriales

Plantas fabricantes de acero y metal: En las plantas de acero, el desecho de ácido sulfúrico base proveniente del baño químico, se neutraliza con cal, y las sales de hierro también son precipitadas. Así mismo, la cal es neutralizadora y precipitante de cromo, cobre y metales pesados en procesos para el tratamiento de niquelado antes de disponer de ellos.

Plantas químicas y de explosivos: En los procesos de muchos productos químicos y farmacéuticos, algunas plantas acumulan desechos muy ácidos que son neutralizados con cal antes de tirar tales desechos.

Industria del cemento

El cemento es una combinación de silicatos dicálcicos, silicatos tricálcicos, aluminato tricálcico, férrico, aluminato tetracálcico, etc. Por ello para su obtención se requiere de materia prima enriquecida en óxido de calcio, alúmina y óxidos de hierro.

La materia prima puede ser de origen natural y productos industriales. Los requerimientos químicos básicos para fabricar el cemento rara vez se encuentran en las proporciones deseadas en una sola sustancia; por lo tanto, en la mayoría de los casos es una combinación de tres o más sustancias.

La caliza es la materia prima más usada en el mundo, principalmente por su abundancia y su gran aporte de calcio. Raramente llega a tener 99 % de carbonato de

calcio; frecuentemente contiene cantidades de arcillas y arena, componentes que no son impurezas objetables para la fabricación de cemento por cuanto aportan alúmina, sílice y óxido de hierro.

Tomando en consideración que la caliza es la materia prima principal del cemento podemos deducir que la industria del cemento es la principal consumidora potencial de los lodos residuales de la planta procesadora de árido La Inagua.

Para que los lodos sean adecuados para la fabricación del cemento, tienen que poseer diámetro de partículas no superior a 20 mm. La cantidad de la materia prima a añadir está restringida por los contenidos de MgO, esta no debería sobrepasar el 5 % en el clínker, y debido a las pérdidas en peso, por eliminación en CO₂, el contenido en la mezcla cruda no debe ser mayor del 3 %.

Esta aplicación para lodos en su utilización como material cementante quedó comprobada de igual modo para los lodos evaluados los cuales presentan características adecuadas para ser empleado como adición en la producción de cementos mezclados según las normas NC 1208: 2017 y NC 95:2011 cumpliendo con los requisitos establecidos:

- Alto contenido de óxido de calcio (50,98 %)
- Elevado contenido de partículas finas (90 % < 0,09 mm)

Esta industria puede constituir una de las principales consumidoras potencial de los lodos residuales de la planta procesadora de árido La Inagua, incluso en la producción local de materiales.

Neutralizante en la industria del níquel

La Empresa Comandante Pedro Sotto Alba opera con tecnología ácida a presión para la obtención de sulfuro de níquel más cobalto, en su proceso se emplea el cieno carbonatado que se extrae de la bahía de Moa.

La explotación de esta materia prima en la bahía de Moa, provoca un considerable impacto negativo al medio ambiente. Se presupone que la demanda de materiales neutralizantes se incrementará con el crecimiento de las producciones de esta industria.

El empleo de carbonato de calcio en la neutralización de la acidez, es uno de los métodos más comunes (Livia, Uribe & Martínez, 2022; Blanco & Rojas, 2023).

En este proceso se exigen parámetros y características químicas determinadas de la materia prima a utilizar en la neutralización de los ácidos para la producción de concentrados de níquel más cobalto:

Alta calidad para evitar que las impurezas se disuelvan y afecten la calidad de los productos finales.

Alta reactividad que aseguren que la neutralización del ácido sulfúrico sea mediante una reacción rápida y efectiva, la cual permitirá un consumo mínimo de material calcáreo.

Recursos de calidad uniforme para garantizar un suministro de material adecuado constantemente.

Condiciones mineras sencillas para su posible minería por métodos convencionales.

Granulometría adecuada, tamaño de 0,83 mm.

Las exigencias químicas preliminares del material calcáreo deseado serán:

- Reactividad del 90 % o más.
- Contenido de carbonato de calcio mayor de 80 %.
- Impurezas: óxido de hierro III 1,0 %, óxido de aluminio 2,0 %, cobre 0,03% y cinc 0,03 % en su contenido máximo.

Bajo estas condiciones el lodo evaluado posee perspectivas para su utilización. Desde el punto de vista químico, posee una reactividad promedio de 93 %, y el contenido de carbonato de calcio es superior a 92 %. Las impurezas están por debajo de los valores máximos admitidos.

La extracción no es compleja debido a la forma en que se encuentran dispuestos. Por otra parte, estos poseen granulometría fina, por lo que no es necesario someterlos a un proceso de reducción de tamaño de partículas y clasificación, lo que representa un ahorro considerable de energía.

Otras aplicaciones

Los lodos de la cantera La Inagua de estudio poseen características granulométricas y químicas apropiadas para ser empleados como adiciones a la masa de arcilla para producción de ladrillos cerámicos. Su adición mejora la resistencia a compresión de los ladrillos, disminuye el consumo energético en su producción y contribuye a la reducción de la plasticidad y facilita el secado del ladrillo.

Consideraciones sobre la utilización de los residuales

Composición química: Desde el punto de vista químico estos residuos poseen composición homogénea y adecuada para la producción de cal, cemento, así como para su posible empleo como aditivos o sustitutos de parte de cemento y/o arcilla.

Granulometría: Una condición indispensable para el posible uso de los residuos en aplicaciones específicas es su tamaño de partícula. En este caso el tamaño de partícula de los lodos es uniforme. Poseen granulometría fina, pero se necesitó del proceso de trituración y molienda, para conseguir un diámetro de partículas más pequeñas, lo cual cumple con las especificaciones técnicas requeridas para diferentes usos.

Secado: Uno de los problemas fundamentales que surgen a la hora de utilizar los lodos es el alto proporción de humedad que estos poseen. A la hora del aprovechamiento en los diferentes usos industriales el contenido en humedad dificulta su posible utilización, por lo que se necesita de un tratamiento previo de secado antes de su aplicación.

Para el uso en la industria cementera, y en la fabricación de cal la proporción de humedad aparentemente no es un problema importante, ya que, en el proceso de obtención de los productos, cemento y cal, se origina el quemado de las materias primas en hornos a temperaturas muy altas con lo que dicha humedad desaparece evaporándose, sin embargo, existe un pequeño aumento de energía que se tiene que producir en los hornos para evaporar la humedad contenida en los residuos.

Para el uso en la industria de materiales de la construcción, la materia prima necesita de unas especificaciones técnicas determinadas, las cuales en la mayoría de casos

necesitan de materia prima seca, por lo que los lodos tienen que cumplir un tratamiento previo de secado.

Conclusiones

El análisis de las características minero-técnico de los lodos residuales de la planta procesadora de árido La Inagua permitió determinar como uno de los principales problemas medioambientales el vertimiento de lodos residuales.

La determinación de las propiedades químicas, físicas y granulométricas de los lodos residuales de la planta procesadora de áridos La Inagua sirvió para evaluar las alternativas de utilización de estos lodos.

La evaluación de alternativas de los lodos residuales de la planta procesadora de áridos La Inagua permitió seleccionar los usos de los lodos objeto de estudio.

Los lodos residuales de la planta procesadora de áridos La Inagua demuestra que poseen perspectiva de utilización como neutralizante en la industria del níquel, materia prima para la elaboración cal y cemento, así como en la industria de materiales de la construcción.

Referencias bibliográficas

- BENGTSSON, L. Y ENELL, M. (1986). Chemical analysis. En: B. Berglund (ed.) Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. Chichester: John Wiley, p. 423–451.
- BLANCO, C. R. & ROJAS, N. (2023). Aplicación de un prototipo anóxico calizo para tratamiento de drenajes ácidos producidos de forma sintética, variando la concentración de Fe^{+2} . *Tecnología y ciencias del agua*, 14(1), 391-431. Disponible en: <http://evistatycya.org.mx/index.php/tyca/article/view/2812>.
- CÁRDENAS, G. & MOLINA, F. J. (2022). Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Ingeniería*, 27(3). Disponible en: <https://geox.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/17945>
- CASTILLO, J., BALAREZO, L., VINCES, M., & ZAMBRANO, H. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Revista *Riemat*, 5(1), 23-27. Disponible en:
<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat/article/view/2499>.

FERRO, D. E., CASTIBLANCO, J. C., AGUDELO, R. N., & RUIZ, L. E. (2019). Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre El Escorpión del municipio de Villapinzón, Cundinamarca. *Revista Vínculos*, 16(2), 242-251. Disponible en:
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/15188>.

FUENTES, N., CUJIA, D. & ROBLES. C. (2021). Análisis de las relaciones lodo cemento como material de construcción no estructural. *Información Tecnológica*, 32(6), 143-150. Disponible en:
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642021000600143&script=sci_arttext&tlng=es.

HERNÁNDEZ, N. & GUILARTE, I. (2018). Diagnóstico del desempeño de la cantera de áridos La Inagua, Cuba, utilizando una matriz de evaluación. *CienciaUAT*, 13(1), 06-18. Disponible en:
<https://revistaciencia.uat.edu.mx/index.php/CienciaUAT/article/view/923>.

LEÓN, J. G., GODOY, S. C. & TIXI, H. P. (2023). Sistema de tratamiento para lodos recolectados por el vehículo hidro succionador en la empresa de agua potable y alcantarillado del municipio de Guaranda. *Dominio de las Ciencias*, 9(4), 612-622. Disponible en:
<https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3239>.

LIVIA, W., URIBE, B. & MARTÍNEZ, C. (2022). Tratamiento de drenajes ácidos de Mina (DAM) mediante filtros elaborados con relave minero. *Revista Politécnica*, 18(36), 115-125. Disponible en:
<https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/2034>.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2002). NC 181, Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo. La Habana, Cuba. Disponible en:
<https://trid.trb.org/View/966862>.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2000). NC 67, GEOTECNIA: DETERMINACIÓN DEL contenido de humedad de los suelos y rocas en el laboratorio. La Habana, Cuba. Disponible en: <https://trid.trb.org/view/966387>.

RIVERA, P. S., ASELA, J. E., SUÁREZ, S. Y. & ZÚÑIGA, A. C. (2007). Evaluación de calizas para la obtención de una cal para el suavizamiento de aguas subterráneas a nivel de laboratorio, utilizadas para consumo humano en el municipio de Villa del Rosario, departamento Norte de Santander. *Respuestas*, 12(1), 46-52. Disponible en: <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/598>.