

Especialidad - Minas

Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniero en Minas

Caracterización de lodos residuales en la cantera La Inagua de la
provincia de Guantánamo

Autora: Yanisleydis Mosqueda Rodríguez

Curso: 2018 - 2019

“Año 61 de la Revolución”

Especialidad - Minas

Trabajo de Diploma en opción al título de

Ingeniero en Minas

Caracterización de lodos residuales en la cantera La Inagua de la
provincia de Guantánamo

Autora: Yanisleydis Mosqueda Rodríguez

Tutora: M S. c. Yaritza Cabrales Caplé

Curso: 2018-2019

“Año 61 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Yanisleydis Mosqueda Rodríguez, autora de este Trabajo de Diploma y la tutora M S. c. Yaritza Cabrales Caplé certificamos la propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", hacer uso del mismo en la finalidad que estime conveniente.

Diplomante: Yanisleydis Mosqueda Rodríguez

Tutora: M S. c. Yaritza Cabrales Caplé

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a quienes confiaron en mí y me apoyaron constantemente.

A mis padres Carmelina Rodríguez Blanco y William Mosqueda Matos, por darme todo el amor del mundo y que con su amor y confianza pusieron todo su empeño para mi realización.

A mi tutora M. Sc. Yaritza Cabrales Caplé

A mi esposo A mis amistades más cercanas y familiares

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo lleva implícito una serie de gratos esfuerzos y apoyos que de no ser así no hubiese sido posible. Ha llegado el momento de expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una manera u otra, lo han hecho posible.

Por supuesto a mis padres y familiares: Por haber confiado siempre en mí, darme las fuerzas para llegar hasta aquí y alcanzar las metas trazadas. Gracias a ti papá, más que nadie has deseado que este trabajo llegara hasta el final. Gracias a ti mamá porque has sido y serás siempre un gran apoyo en mi vida, en todo lo que hago siempre puedo contar contigo, y pase lo que pase, siempre estás ahí para ofrecermelo mejor de tí.

A mi tutora M. Sc. Yaritza Cabrales Caplé haber puesto todo su empeño durante el desarrollo de este trabajo

A mi esposo por estar siempre a mi lado y apoyarme siempre en los momentos más difíciles...

A mis amistades, familiares y demás personas en mi vida en general a todos ellos gracias por haberme apoyado para llegar hasta aquí.

Pensamiento



*“La alegría es inmensa y sin embargo, queda mucho por hacer todavía.
No nos engañemos creyendo que en lo adelante todo será fácil; quizás
en lo adelante todo será más difícil.”*

Fidel Castro Ruz

R E S U M E N

El vertimiento de lodos residuales de la planta procesadora de áridos "La Inagua" provoca efectos ambientales y ecológicos negativos, al acumularse importantes volúmenes en una laguna de sedimentación, que en la actualidad no encuentran aplicación. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar los lodos de la planta procesadora de áridos 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. Además 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, lodos, canteras de áridos, medio ambiente.

A B S T R A C T

The dumping of residual sludge from the aggregate processing plant "the Inagua" causes negative environmental and ecological effects, as important volumes accumulate in a sedimentation dam, which currently do not find application. The objective of this work is to characterize the sludge from the aggregates processing plant to propose alternative uses. Its characteristics and essential properties were determined through chemical analysis, physical tests and granulometric analysis. It was obtained that the residual sludge from this aggregate plant can be used as a raw material for lime processing, cement and as a raw material in various applications in the construction materials industry. It was also shown that the use of the residual sludge from "the Inagua" aggregate processing plant can be an alternative to mitigate the negative impact that this causes on the environment and the ecosystem of the region.

Key Words: Waste, reuse, sludge, aggregate quarries, environment.



ÍNDICE	PÁG.
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO CONCEPTUAL DE LODOS RESIDUALES	7
1.1 Antecedentes y actualidad del tema en el mundo	7
1.2 Antecedentes y actualidad del tema en Cuba	10
1.3 Aspectos legales del aprovechamiento de residuos mineros	14
1.4 Caracterización de la cantera La Inagua	17
1.4.1 Situación geográfica del yacimiento	17
1.4.2. Vías de comunicación	18
1.4.3. Características geológicas del área de estudio	18
1.4.4. Hidrografía	19
1.4.5. Propiedades físico- mecánicas y químicas fundamentales	20
1.4.6. Relieve	21
1.4.7. Clima	22
1.5. Sistema de explotación de la cantera	22
1.5.1. Análisis del proceso tecnológico	22
1.5.2 Impacto ambiental producido	23
1.5.3 Residuos generados en el proceso productivo	23
1.5.4 Sistema de tratamiento de los lodos residuales	23
CAPÍTULO II. ETAPAS METODOLÓGICAS DE LA INVESTIGACION	26
Introducción	26



2.1 Etapas metodológicas de la investigación	26
2.1.1 Etapa I. Recopilación de datos	28
2.1.2 Etapa II. Trabajo de Campo	28
2.1.3 Etapa III. Trabajos de laboratorio	28
2.1.4 Etapa IV. Evaluación y selección de alternativas de utilización a partir de parámetros normalizados	33
CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.1 Resultados experimentales y sus análisis	34
3.1.1. Caracterización granulométrica de los lodos	34
3.1.2. Caracterización química	36
3.1.3 Reactividad	37
3.1.4. Características físicas de los lodos	38
3.2. Selección de alternativas de utilización de los lodos	39
3.2.1 Obtención de cal	39
3.2.2 Industria del cemento	40
3.2.3 Neutralizante en la industria del níquel	42
3.3 Consideraciones sobre la utilización de los residuales	44
3.4 Contribución económica, social y ambiental de la investigación	46
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	48



B I B L I O G R A F Í A

A N E X O S

I N T R O D U C C I Ó N



Desde sus comienzos, el ser humano ha modificado su entorno para adaptarlo a sus necesidades. Para ello ha hecho uso de todo tipo de materiales naturales que, con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología, se han ido transformando en distintos productos mediante procesos de manufactura con un creciente desarrollo tecnológico (Bendler, 2009; citado por Rilva 2012).

Casado (1996) considera que la producción de estos materiales requiere cada vez más de la extracción y procesamiento de materias primas naturales, lo cual conduce al agotamiento de los mismos; y finalmente, en el aumento de la contaminación producida por las emisiones de contaminantes de esta industria. Este impacto tiene su origen en la extracción de los recursos naturales necesarios para su elaboración, incluyendo el proceso de fabricación y el consumo de energía.

Casado (1996) hace plantear que los principales efectos de la industria de materiales de construcción están dados por el consumo energético, la generación de residuos sólidos, la incidencia en el efecto invernadero, y otros factores de contaminación ambiental

Cuba, a partir del triunfo de la Revolución presta especial atención a la protección del medio ambiente. En la Constitución de la República se expresa en el artículo 27 que: "Es necesario consagrar, como un derecho elemental de la sociedad y los ciudadanos, el derecho a un medio ambiente sano y a disfrutar de una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza, en tanto los seres humanos constituyen el objetivo esencial del desarrollo sostenible. Es deber de los ciudadanos contribuir a la protección del agua, la atmósfera, la conservación del suelo, la flora, la fauna y todo el rico potencial de la naturaleza".

La producción de áridos del país es uno de los procesos de mayor contaminación al medio ambiente, y a pesar de que la política está encaminada a mitigar su impacto negativo, en la actualidad se presentan dificultades debido,



fundamentalmente, 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, lo que convierten al sector de la construcción un consumidor de materia prima y energía, que además de ser un potencial en la generación de residuos, y al mismo tiempo engendra afectaciones al medio ambiente.

Baldwin (1996) plantea que dentro de estas alternativas encontramos la utilización de materiales reciclables para la producción de los agregados del hormigón en lugar de utilizar materias primas naturales. La reutilización de residuos industriales de algunos materiales tiene aplicación en la construcción de paredes, techos, entre otros

Speare (1995) considera que una estrategia óptima para minimizar el impacto ambiental es aquella que se utilice en soluciones que minimicen de manera equilibrada los efectos que éstos producen sobre el medio ambiente, es decir, sobre el consumo de energía, la producción de residuos y la contaminación

Actualmente un caso particular es la planta de producción de áridos "La Inagua", en la provincia de Guantánamo, en la cual la generación de residuales sólidos daña y destruye la biodiversidad y afecta la salud de las personas.

En análisis realizados en la planta "La Inagua", en la provincia de Guantánamo, 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 tal problemática. En consecuencia, con lo antes expuesto, se formula como **problema científico** el insuficiente conocimiento sobre las características de los lodos residuales



generados por la planta procesadora de áridos “La Inagua”, en Guantánamo, lo cual limita seleccionar alternativas para su utilización”.

El **objeto de estudio** está dado por las propiedades de los lodos de la planta procesadora de áridos “La Inagua”.

El **campo de acción** de esta investigación lo constituyen los lodos residuales de la planta procesadora de áridos.

El **objetivo general** es caracterizar los lodos generados por la planta procesadora de áridos “La Inagua” que permita seleccionar alternativas para su utilización.

Hipótesis a defender: Si se analizan las características de las condiciones minero – técnica de la planta procesadora de áridos “La Inagua”, se determinan las propiedades químicas, físicas y granulométricas de los lodos residuales y se evalúan las alternativas de utilización a partir de los parámetros normalizados, entonces se podrá caracterizar los lodos generados por la planta procesadora de áridos “La Inagua” que permita seleccionar alternativas para su utilización.

Lo cual da lugar a establecer como **objetivos específicos:**

1. Analizar las características minero - técnico de la planta procesadora de áridos “La Inagua”.
2. Determinar las propiedades químicas, físicas y granulométricas de los lodos residuales de la planta procesadora de áridos “La Inagua”.
3. Evaluar las alternativas de utilización de los lodos residuales a partir de los parámetros normalizados.
4. Seleccionar alternativas de utilización de los lodos residuales de la planta procesadora de áridos “La Inagua”.



CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO CONCEPTUAL DE LODOS RESIDUALES

Este capítulo tiene como objetivo ofrecer el problema de los residuos generados en la minería y de las estrategias para enfrentarlo, referido por la literatura especializada, de modo, que pueda servir como referencia en los esfuerzos por contrarrestar el problema en Cuba, principalmente en la Industria extractiva de Materiales de Construcción.

1.1 Antecedentes y actualidad del tema en el mundo

Se pudo apreciar que la generación de residuos es un problema que engloba a la mayoría de sectores de la sociedad actual, y su impacto va aumentando. El sector de la minería no se queda atrás respecto a la producción de residuos. Es del conocimiento que la sociedad no tiene una buena aceptación por la industria minera, y por consiguiente los residuos generados, son asumidos de tal manera, es por eso que las administraciones tienen el punto de mira en la gestión que realizan las empresas con sus residuos y los tratamientos que efectúan.

El reaprovechamiento de residuos en Brasil, se efectúa ya por la eventual recuperación de los depósitos de desechos. Modernamente, como consecuencia de presiones ambientales, algunas empresas de minería están procurando alternativas de utilización de residuos, como es el caso del fosfoyeso de Serrana de Cajati, São Paulo, que no tenía utilización; pero con el desarrollo de un proceso tecnológico y de empleo de técnicas mercadológicas hoy se consigue comerciar ese material (Sánchez, 2002).

Los materiales utilizados en la construcción tienen efectos en el medio ambiente, ya sea directa o indirectamente. El concreto es el material más usado en el mundo (WBDG, 2007), y aunque la materia prima que lo conforma es abundante (como la grava y arena) el problema que crea su consumo es el empleo del cemento como matriz de liga, y la extracción de las materias primas que lo componen, ya que



causan un severo daño al paisaje por la explotación de las minas. De igual manera, afectan los ecosistemas involucrados; de ahí que se tenga un impacto nocivo al ambiente de manera directa, pero si se re-usan los desperdicios del concreto mediante la recuperación de la grava (NABH, 2000), estos desperdicios se pueden emplear como agregado grueso para fabricar concreto nuevo (PNL, 1994). Otro aspecto importante en el impacto que causan los materiales al medio ambiente es la energía utilizada para explotar y transformar las materias primas en nuevos productos y también en su transporte.

La actividad de lavado de los áridos ha sido una preocupación que se ha resuelto parcialmente al aplicar sistemas de decantación y deshidratación, tales como: balsa o presa de decantación por sedimentación natural, balsa o presa de decantación por sedimentación forzada, celda de sedimentación forzada, sistema de tanque espesador o clarificador y filtros prensa. No cabe duda que estas alternativas introducidas, especialmente en el sector extractivo de la Rioja en España han contribuido a atenuar el impacto negativo sobre el medio, además de valorizar los residuos a través de la recuperación del agua para su empleo en el proceso de tratamiento, sistemas de control del polvo, sistemas de riego de áreas revegetadas, lavado de equipos de trabajo y la recuperación de la fase sólida para su utilización como material para la restauración (relleno o mejora del suelo), subproducto y materia prima para otros procesos (recuperación de arcillas). Pero consideramos que no se ha logrado potenciar el uso de estos residuos, dado el volumen que ocupan y el efecto que los mismos causan. (Manual de La Rioja, 2006)

Huillcañahui (2007), hizo una caracterización de residuos en la industria extractiva en España para evaluar la posibilidad de reutilización de los residuos minero metalúrgicos (industria de producción de plomo y zinc) y residuos calcáreos de la industria del mármol en la construcción de barreras de ingeniería. Además se estudió la posibilidad de neutralizar la acidez y lixiviación de sustancias



contaminantes al medio ambiente con el uso de mezclas de diferentes materiales. Los resultados han mostrado que estos residuos son viables, al menos a nivel de laboratorio por lo que queda la fase de extrapolarlos a escalas industriales o a nivel de terreno.

En España la problemática con los lodos que proviene del proceso de tratamiento del lavado de los materiales, se resuelve generalmente, con su utilización como material de relleno o mejora de suelos, en algunos casos para la recuperación de arcilla o subproductos (ANEFA, 2008).

La Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos - ANEFA, en España, resalta la labor de las empresas que han aplicado sistemas efectivos de gestión ambiental, reutilización y tratamiento de residuos de plantas de procesadoras de áridos.

La cantera de grava y arena El Castillo en Madrid, debido a la mala situación en la que se encontraba la zona, a causa de la empresa que gestionaba anteriormente la explotación, se vio obligada a una fuerte actuación medioambiental para salvar esta zona, siendo así, que para la restitución topográfica efectuada y su posterior cobertura con tierra vegetal, fue necesario, complementarla con la aportación de los lodos desecados resultantes del lavado del material en la nueva planta de tratamiento (Los Áridos y el Desarrollo Sostenible, 2005).

La compañía Aricemex, S.A. se hizo cargo de la cantera "Las Cubetas", que tiene desarrollada una línea de innovación y desarrollo ambiental con una rehabilitación de los espacios naturales acorde a los principios de conservación y mantenimiento del entorno que supone la utilización de medidas innovadoras para minimizar las afecciones al medio de su proceso productivo, estas iniciativas son la utilización de lodos de depuradora en algunas de las fases de restauración con el objetivo de conseguir una mayor valorización de los residuos. (Los Áridos y el Desarrollo Sostenible, 2009)



Promotora Mediterránea (PROMSA) inició la explotación de la cantera San Bernardo, ubicada en Zaragoza en su plan de restauración, tras la valorización última de la materia prima extraída, los materiales estériles que se obtuvieron, han sido procesados para un aprovechamiento, evitando que se conviertan en residuos. Este aprovechamiento ha sido llevado a cabo por una empresa subcontratada que destina los residuos generados a diferentes usos en jardinería. Con este sistema se ha conseguido evitar el envío a vertedero de 200.000 t de residuos (entre estériles y lodos). (Los Áridos y el Desarrollo Sostenible 2009)

Sepúlveda (2017), manifiesta que el proceso de reciclado ha logrado un gran posicionamiento dentro del sector minero, ya que se ha convertido en una alternativa de ahorro y comercialización: "Ahora las compañías mineras tienen la posibilidad de pagar menos al momento de disponer sus residuos, pues antes de ser trasladados a lugares autorizados por la normativa, son analizados para evaluar su comercialización y aplicación de minimización, las cuales están dirigidas a reducir su peligrosidad y volumen". Enfatiza en que "anteriormente, las minera chilena debían disponer casi el 100 % de sus residuos y, a través del reciclado, dicho costo se redujo a la mitad".

Estos autores coinciden en otorgarle un uso a los lodos en relleno de huecos y caminos, sin embargo no realizan análisis físicos químicos del que pudieran emerger propiedades que permitieran utilizarles de otro modo.

1.2 Antecedentes y actualidad del tema en Cuba

La industria de materiales de construcción tiene la necesidad de preservar de manera sustentable y poner a disposición de la economía nacional, todos los patrimonios geológicos con la agilidad que exige la dinámica para la toma de decisiones referente a la temática en Cuba

Cuba realiza grandes transformaciones en la rama de la construcción y realiza esfuerzos en obras sociales para incrementar la cultura y el conocimiento de



nuestro pueblo, el gobierno cubano ha puesto fundamental atención a las canteras de árido para materiales de construcción a lo largo y ancho del país.

Actualmente se presta especial atención por parte de los ministerios que cada empresa aplique la debida protección al medio ambiente y el cumplimiento de las legislaciones vigentes. Es por esto que cada empresa debe prestar importante atención a la protección del medio ambiente y el cumplimiento de las legislaciones cubanas. En Cuba ya se comienza a dar pequeños pasos al respecto. No obstante, persisten problemas con el tratamiento de los residuales de varias industrias, especialmente la industria de los materiales de la construcción, la cual ha tomado gran auge en los últimos tiempos por la demanda de los productos para la construcción de viviendas y otras obras sociales. Esta industria genera grandes volúmenes de residuos sólidos que impactan en un determinado grado al medio ambiente, por lo que el uso de estos materiales, en la medida de lo posible, sería de gran importancia para mitigar los problemas anteriormente señalados.

Salazar (2015), realiza un diseño de materiales compuestos para uso en la construcción, optimizando la participación del cemento Portland a través de la utilización de residuos sólidos industriales o escombros como matriz cementante o de relleno, se han utilizado, residuos de la industria cerámica roja y lodos de plantas de tratamiento de áridos. Algunos desarrollos o aplicaciones de los últimos 4 años son: producción de cementantes, elementos de mampostería, agregados para bases de vías, arenas de construcción, y hormigones.

A fin de dar respuesta a estos problemas ambientales, y para evitar sus efectos negativos sobre el medio, se están potenciando medidas correctoras del impacto ambiental que puede causar el vertido incontrolado de fangos de lavado de áridos en los ríos. En este sentido Savón (2015), realiza un diagnóstico ambiental en la Unidad Empresarial Básica Molino 200 mil de Gibara Holguín, la cual procesa un material representado por caliza y donde está instalado un sistema de lavado de árido, y se recomienda la búsqueda de alternativas para el uso de los lodos y otros



materiales no aprovechables, ya que poseen potencialidades para diferentes usos y que se consideran como uno de los principales problemas ambientales, que provoca serios problemas de contaminación (encharcamiento, vertimientos de residuos sólidos y líquidos en lugares no recomendados, tupiciones del sistema de drenaje, entre otros), y afecta el proceso productivo, así como el riesgo de desarrollo de vectores negativos para salud humana y la higiene ambiental de la instalación.

Vijaya, (2011) y Hernández, (2012) realizaron estudios sobre la utilización de residuos de la producción de níquel (material serpentinitico y colas generadas en el procesos de lixiviación) para la obtención de aditamentos para la construcción y prevén medidas para mitigar el impacto negativo que estos ocasionan al medio ambiente y disminuir el volumen de extracciones de los recursos naturales no renovable.

En la sociedad actual se tiene muy en cuenta la protección del medio ambiente, la reducción del consumo energético, la preservación de las fuentes de materias primas y la reducción de residuos. Los residuos deben ser estabilizados para así evitar su efecto nocivo. Se debe garantizar la seguridad ambiental en el vertido de aquello que, por razones tecnológicas o económicas, no haya podido ser reutilizado. Es muy alta la cantidad de residuos que no puede volver a incorporarse a los ciclos naturales o a las líneas de producción industrial, por las vías hasta ahora conocidas. Este puede llegar a ser un problema crítico si no hallamos una solución, y mayor será el problema cuanto más nos tardemos en llegar a ésta, por esta razón la investigación de nuevas vías de tratamiento resulta imprescindible (Crespo y Jiménez, 2012).

A pesar que el desarrollo en la rehabilitación minera, reutilización de residuos, reciclado, entre otros, es insipiente, se vienen desarrollando algunas investigaciones en la búsqueda de vías alternativas de utilización de los lodos procedentes del lavado de áridos, entre las investigaciones más recientes se



conocen las de Crespo y Jiménez, (2012) los cuales investigan las posibles aplicaciones en la construcción de los lodos procedentes del lavado de áridos naturales de las cantera La Victoria II y Dragón Camoa, después de determinar las propiedades físicas y las características químicas y mineralógicas. En el trabajo exponen posibles usos como morteros y aditivos a mezclas con arcillas para la producción de ladrillos.

Cabrales (2012) y Garrido (2018), realizaron estudios sobre la caracterización física, química y granulométrica de los lodos de las plantas procesadora de áridos “El Cacao”, y “Los Caliches”, demostrando que posee perspectiva de utilización como materia prima para la elaboración de cal, cemento y en la industria del níquel como neutralizante en el proceso de lixiviación.

La empresa ERAL en los últimos cinco años, ha estado colaborando directamente con el Ministerio de la Construcción (MICONS), y han suministrado varias instalaciones para el procesamiento de áridos con tecnología de lavado de arena. Concretamente en las provincia de Holguín en Gibara y en Pílon, Mayarí, en la provincia de Guantánamo, en Baracoa, en Granma (El Cacao) y Las Tunas (Las Parras) y muchas otras en el resto de las provincias hasta Pinar del Río.

En todas estas instalaciones se ha logrado un avance fundamental en el sistema de almacenamiento de los residuos y la reutilización del agua de proceso. Sin embargo, el empleo de los lodos ha estado meramente discutido.

Los investigadores mencionados anteriormente aplican los lodos en diversos usos y sí realizan caracterizaciones desde el punto de vista físicas, químico y granulométrico que pudieran servir de base para la aplicación en el contexto objeto de estudio; pero teniendo en cuenta sus peculiaridades.



1.3 Aspectos legales del aprovechamiento de residuos mineros

En el mundo el índice de aprovechamiento de los residuales todavía es bajo. Muchos son los países que han establecidos decretos y leyes que tratan el tema del aprovechamiento de los residuos en la minería, como son:

En España (Ley 22/1973 y Real Decreto 2857/1978) exigen autorización para aprovechar los residuos mineros, que clasifica como recursos de la Sección B. Además de exigir la elaboración de un Plan de medidas preventivas y correctoras para recuperar el espacio natural afectado y previsiones para el almacenamiento de residuos mineros generados. El Plan de Restauración ha de contemplar un Proyecto de Almacenamiento de los Residuos Mineros que generen y sistemas previstos para paliar el deterioro ambiental por este concepto. (Real Decreto 2994/1982). (Manual La Rioja, 2006)

El Programa 21 adoptado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (CNUMAD) de Río de Janeiro en el año 1992 y ratificada en Johannesburgo en septiembre del año 2002, señala lo referente a la gestión ecológicamente racional de los desechos, también plantea que se debe ir más allá de la simple eliminación o el aprovechamiento por métodos seguros de los desechos producidos y procurar resolver la causa fundamental del problema intentando cambiar las pautas no sostenibles de producción y consumo. Ello entraña la aplicación del concepto de gestión integrada del ciclo vital que representa una oportunidad única de conciliar el desarrollo con la protección del medio ambiente. CNUMA (2002) propone para estos postulados la implementación de programas asociados con la reducción al mínimo de los desechos; el aumento al máximo de la reutilización y el reciclado, ecológicamente racionales de los desechos; la promoción de la eliminación y el tratamiento ecológicamente racionales de los desechos; y la ampliación del alcance de los servicios que se ocupan de los desechos.



El Plan de Implementación de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sustentable (Johannesburgo 2002) propone asimismo, prevenir y reducir al mínimo los desechos y aumentar en la medida de lo posible la reutilización y el reciclaje de materiales alternativos que no dañen al medio ambiente, con participación de los gobiernos locales y regionales y todos los interesados, con el objetivo de minimizar los efectos adversos sobre el medio ambiente y mejorar la eficiencia de los recursos, prestando asistencia financiera, técnica y de otra índole a los países en desarrollo. (CNA, 2005).

Por su parte México recientemente se aprobó la Norma Oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, relativa a las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura, obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos y posible utilización, que en coordinación con la "Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, han sido de vital importancia en la construcción de rellenos sanitarios (Battikhi, 2009)

La Constitución Política de Perú establece en su artículo 67 que el Estado determina la política nacional del ambiente y promueve el uso sostenible de sus recursos naturales, asimismo la Ley General de Residuos Sólidos de acuerdo a su artículo 4° se enmarca dentro de la política nacional ambiental. Plan Nacional de (Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2005)

En Argentina y Uruguay, Cementos Avellaneda S.A. y Cementos Artigas S.A., respectivamente, la consideración por el ambiente es entendida por la organización como un factor clave a tener en cuenta en la definición de políticas y estrategias en todas sus actividades. Para esto la organización establece y mantiene un Sistema de Gestión Ambiental de acuerdo a la Norma ISO 14001:2004, en progresiva integración con el Sistema de Gestión de Calidad de acuerdo a la Norma ISO 9001:2000; en el que se incluyen todos los aspectos que tengan repercusión sobre el ambiente. Entre sus principios ambientales está minimizar la



cantidad de residuos generados por sus operaciones, reciclando los mismos en la medida de lo posible. Además de propender a la utilización de tecnología, materia prima e insumos alternativos, minimizando riesgos e impactos negativos sobre el ambiente natural y social. (MGA, 2008)

La Constitución de la República de Cuba en su artículo sobre la Protección del Medio Ambiente después de la Cumbre de Río con su artículo No. 27, dispone que “El estado protege el Medio Ambiente y los recursos naturales del país”, reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras.

Ley 81 del Medio Ambiente se establece en el año 1997 y plantea en su capítulo I de disposiciones generales, artículo 81, inciso a), que se asegurará la racionalidad en el uso de los recursos naturales, para lo cual se cuidará su perdurabilidad cuantitativa y cualitativa, se desarrollará el reciclado y la recuperación y se salvaguardarán los ecosistemas a los que pertenezcan.

La ley 76 de Minas de enero de 1995 establece en sus artículos 40 y 42 que todos los concesionarios están obligados a preservar adecuadamente el medio ambiente y las condiciones ecológicas del área, elaborando estudios de impactos derivado de la actividad minera en los términos que establece la legislación.

Los Lineamientos de la Política Económica Social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021 en sus artículos 112, 191 y 193 respectivamente, se refieren a:

- ❖ El aprovechamiento de los residuos en la industria de materiales de la construcción y su impacto negativo que genera sobre el medio ambiente.
- ❖ La recuperación e incremento de la producción de materiales para la construcción que aseguren los programas inversionistas priorizados del país (turismo, viviendas, industriales, entre otros).



- ❖ La expansión de las exportaciones y la venta a la población. Desarrollar producciones con mayor valor agregado y calidad. Lograr incrementos significativos en los niveles y diversidad de producciones locales de materiales de construcción y divulgar sus normas de empleo.
- ❖ Promover la intensificación del reciclaje y el aumento del valor agregado de los productos recuperados.

A pesar de que en Cuba existen las legislaciones que establecen las normativas sobre minería y medio ambiente, son considerables los aspectos relacionados con la generación de residuos y su utilización lo cual es un tema que necesariamente debe ser tratado.

1.4 Caracterización de la cantera La Inagua

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.

1.4.1 Situación geográfica del yacimiento

El yacimiento La Inagua está situado en el municipio de Niceto Pérez, provincia de Guantánamo (Figura 2.1), en el flanco sur de la Sierra Canasta, a 2 km al Norte de la carretera Santiago-Guantánamo a 7 km de la ciudad de Guantánamo.

Las coordenadas geográficas del yacimiento son las siguientes:

20° 08' 30'' de latitud Norte

75° 17' 30'' de longitud Oeste

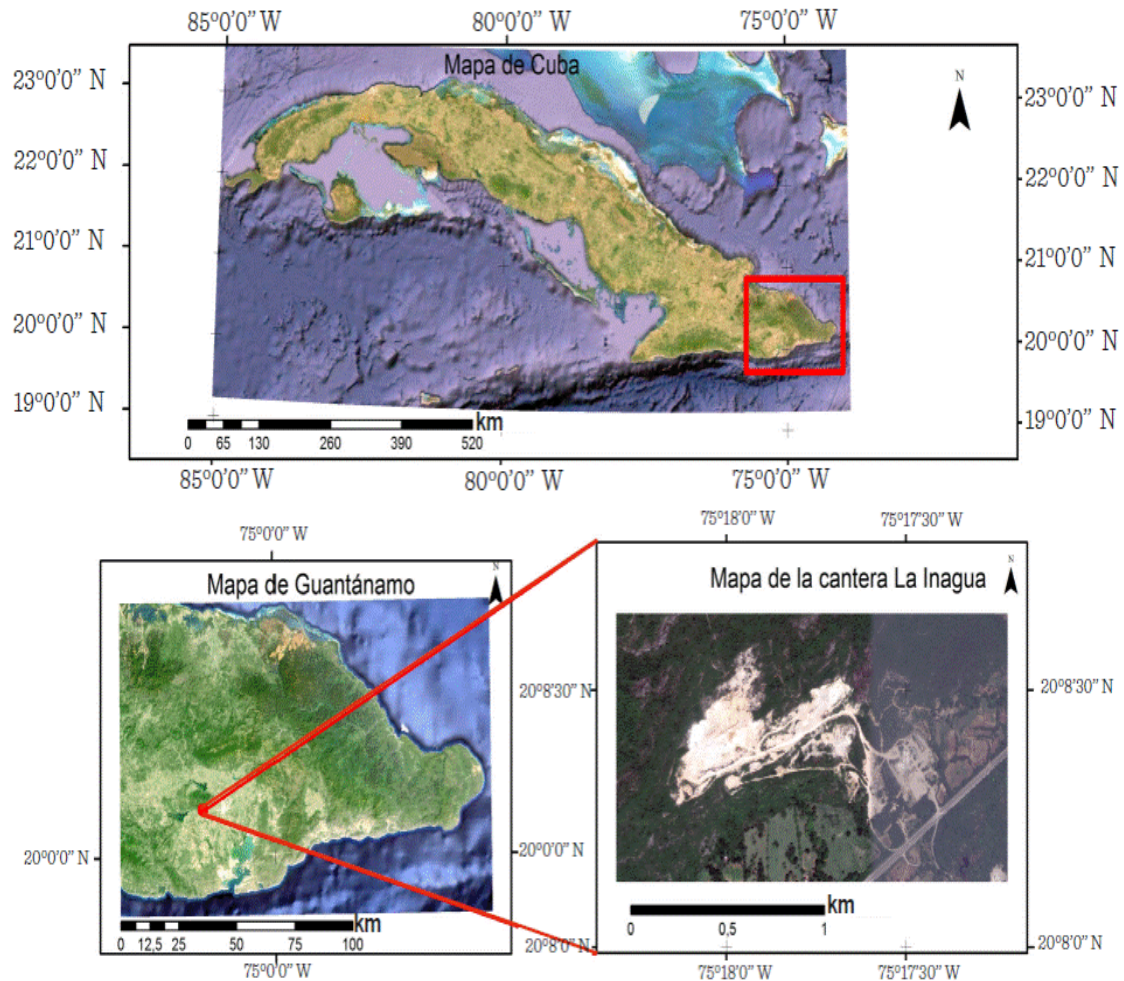


Figura 1.1. Ubicación geográfica del yacimiento de materiales de construcción “La Inagua”.

1.4.2. Vías de comunicación

La principal vía de comunicación la constituye la carretera Santiago - Guantánamo, la red de carreteras y caminos para la zona del yacimiento es buena.

1.4.3. Características geológicas del área de estudio

En el yacimiento de calizas La Inagua, donde se ubica la cantera Miguel Raposo (Figura 2.2), aparecen formaciones vulcanógenas de edad Paleoceno-Eoceno



Medio, representadas por el grupo El Cobre, sobreyacido por calizas de la formación Charco Redondo y San Luis, del Eoceno Medio (Iturralde-Vinent, 1996).

Las calizas se caracterizan por ser masivas y compactas, de color muy variable, llegando a tener tonos (blanco, beige, pardo amarillento, amarillo rosáceo, rojo amarillento); también aparecen arcillas de poca potencia rellenando oquedades o cubriendo las calizas en la superficie de algunas zonas (Das Neves, 2001).

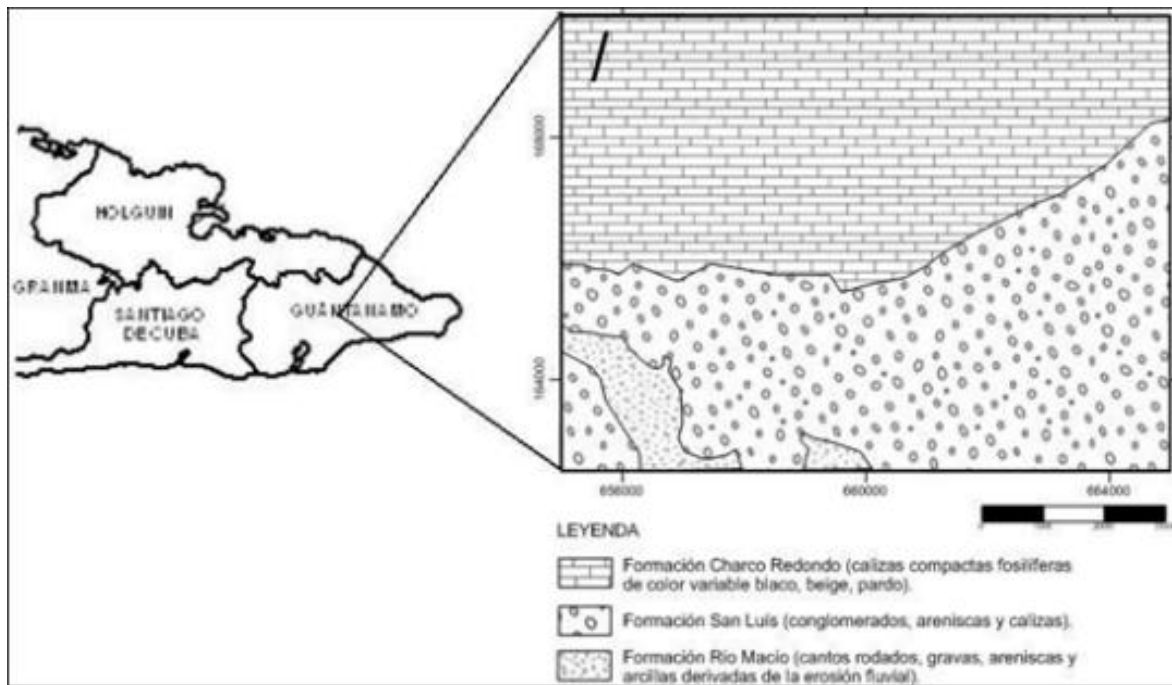


Figura 2.2 Ubicación geográfica y geológica del área.

1.4.4. Hidrografía

Desde el punto de vista hidrográfico, podemos plantear que la región se encuentra drenada por un gran número de ríos, arroyos y cañadas, destacándose como ríos principales el "Guantánamo", "Guaso", y "Jaibo".

La hidrografía del yacimiento es simple, resumiéndose a tres cañadas que conducen las aguas meteóricas a pequeños arroyos, los cuales desaguan en la margen izquierda del río "Guantánamo". Las cañadas que drenan este yacimiento



están orientadas de norte a sur con cause labrado en las calizas y siguiendo una orientación recta. Estas cañadas forman parte del sistema radical que presenta la red hidrográfica de la "Sierra Canasta".

1.4.5. Propiedades físico- mecánicas y químicas fundamentales

Para el Yacimiento "La Inagua" se obtuvieron los siguientes resultados de los análisis físicos mecánicos.

Tabla 2.1. Propiedades físico- mecánicas fundamentales

Propiedades	Unidad	V. Mínimo	V. Máximo	V. promedio
Peso Específico	g/cm^3	2.64	2.66	2.65
Peso Específico Saturado	g/cm^3	2.66	2.68	2.66
Peso Específico Aparente	g/cm^3	2.69	2.70	2.69
Peso Volumétrico Seco	g/cm^3	2.62	2.63	2.63
Peso Volumétrico Saturado	g/cm^3	2.64	2.65	2.64
Absorción	%	0.5	0.6	0.5
Porosidad	%	2.7	3.3	3.2
Resistencia a la compresión seco	Kg/cm^2	671	745	683
Resistencia a la compresión saturado	Kg/cm^2	541	633	557



Las calizas del yacimiento "La Inagua" las podemos catalogar de químicamente muy puras; presenta los siguientes componentes promedios para todo el yacimiento.

Tabla 2.2. Propiedades químicas fundamentales.

Componentes químicos	Valores promedios
CaCO_3	96.18 %
MgCO_3	0.47 %
SiO_2	0.48 %
Al_2O_3	0.10 %
Fe_2O_3	0.07 %
SO_3	0.07 %
P_2O_5	0.02 (impureza)
TiO_2	0.002 %
SO_3	Trazas (impureza)
P.P.I	42,34 %

1.4.6. Relieve

El relieve de la región es relativamente plano (valles de Guantánamo) con presencia de llanuras marinas antiguas, con elaboración fluvial, por lo que se encuentra relativamente diseccionado. Se observan sistemas de colinas de bordes de pendientes, en lo general suaves y aislados. Las cotas predominantes oscilan entre (40–80 m), con cotas máximas de 439 m al Noreste del yacimiento.



1.4.7. Clima

El clima de la región es bastante calurosa y húmedo con variaciones de la temperatura ambiente entre 17° y 35°C. La humedad promedio del aire es de 72.3% y la precipitación media anual alcanza aproximadamente los 1200mm.

El clima de esta región se clasifica como tropical oceánico con estaciones bien definidas.

La estación de lluvia comprende de marzo a octubre con temperaturas que oscilan entre 19° y 34°C. La humedad relativa del aire es de 69.7%. El más lluvioso y húmedo en esta estación de lluvia se considera el mes de octubre.

1.5. Sistema de explotación de la cantera

El laboreo del yacimiento se realiza a través del sistema de explotación banqueo descendente, y la altura total aproximada de los frentes es de 36 m.

1.5.1. Análisis del proceso tecnológico

El método de arranque que se emplea en la cantera La Inagua es perforación y voladura, debido a la dureza de la roca. Las fragmentaciones resultantes que se obtienen de las voladuras se encuentran alrededor de 14%, siendo lo establecido hasta un 10%.

El material se extrae con la granulometría primaria obtenida de los trabajos de voladura que se realiza a través de servicios contratados a EXPLOMAT, utilizando carretilla barrenadora Atlas Copco - 404 - A con diámetro de broca igual a 115 mm.

Para los trabajos realizados se contó con el equipamiento siguiente:

El desbroce y acarreo de las rocas voladas se realiza mediante el trabajo con un Buldócer SHANTUY en mal estado, para la carga de la roca tanto de estéril como de mineral se utiliza un Cargador LIUGONG en buen estado, mientras que la



transportación se realiza con camiones fuera de camino SINOTRUK, en buen estado.

1.5.2 Impacto ambiental producido

En el estudio realizado se estableció que las afectaciones principales ocurren durante el desbroce y destape, que los impactos más importantes son la producción de los desechos, el deterioro paisajístico del área, la emisión de polvo a la atmósfera y la destrucción de la flora y la fauna entre otros, y que los componentes ambientales más afectados son el suelo, el aire, el agua y que la economía recibe un efecto positivo.

1.5.3 Residuos generados en el proceso productivo

Los residuos generados en el proceso productivo son los siguientes:

Escombros del proceso de laboreo minero, almacenados en las escombreras.

Material estéril: Residuo grueso que se clasifica y separa en la trituración primaria. Contiene arcilla y fragmentos de rocas y tiene varios usos, principalmente como relleno de terraplenes y carreteras.

Material arcilloso o cocoa: Lodo que se obtiene del proceso de lavado de arena que se deposita en la laguna de sedimentación.

1.5.4 Sistema de tratamiento de los lodos residuales

Está constituido por un tanque de sedimentación para el tratamiento de las aguas residuales del proceso y una laguna de sedimentación.

Del proceso de lavado para la producción de arena se genera agua residual cargada de partículas finas de polvo de piedra que se envía a un tanque de sedimentación para ser tratada con floculantes, las partículas tienen un alto grado



de sedimentación y el agua clarifica rápidamente. Esta agua es almacenada en una cisterna y luego recirculada al proceso productivo.

El lodo que se obtiene en el fondo del sedimentador es enviado a la laguna de sedimentación que se encuentra aledaña a la planta de procesamiento.





CAPÍTULO II. ETAPAS METODOLÓGICAS DE LA INVESTIGACION

Introducción

En este capítulo se describen las etapas metodológicas de la investigación científica para la realización del trabajo, reflejando los diferentes trabajos a ejecutar para cumplir con el objetivo propuesto de caracterizar los lodos generados por la planta procesadora de áridos "La Inagua" que permita seleccionar alternativas para su utilización.

En el desarrollo del trabajo se emplearon métodos empíricos y teóricos de la investigación científica.

Dentro de los métodos teóricos:

Análisis y síntesis: en procesamiento de la información obtenida a partir de la revisión de la literatura, documentación especializada y la determinación de las propiedades de los lodos.

Inductivo- deductivo: Para la caracterización del lodo y la interpretación de los resultados obtenidos.

Dentro de los métodos empíricos

Se utilizó la observación para de manera consciente y planificada percibir visualmente las afectaciones al ecosistema de la región con los grandes volúmenes generados por la planta procesadora de áridos "La Inagua".

2.1 Etapas metodológicas de la investigación

La investigación se realizó a través de cinco etapas metodológicas:

- I. Recopilación de datos
- II. Realización de los trabajos de campo.
- III. Trabajos de laboratorios.
- IV. Evaluación y selección de alternativas a partir de parámetros normalizados para su utilización



En la figura 2.1 se muestra el flujograma de las etapas metodológicas de la investigación científica.

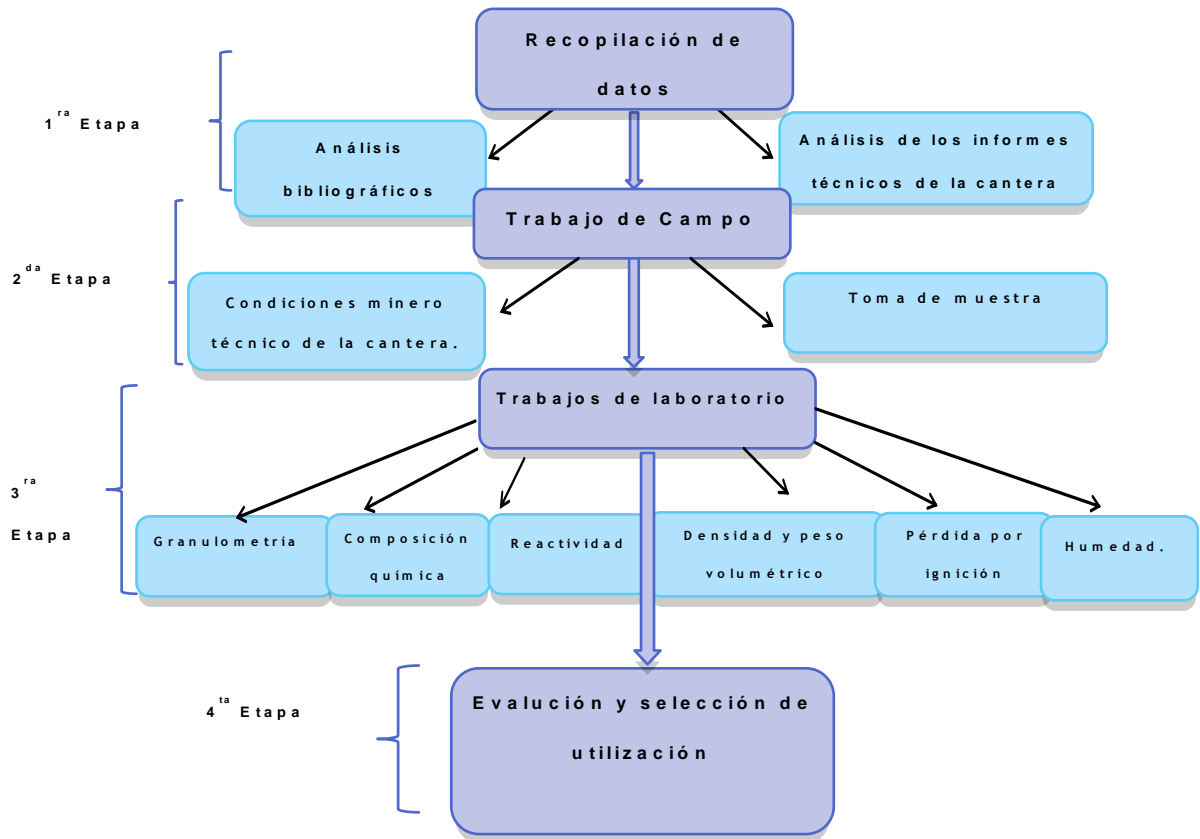


Figura 2.1. Etapas metodológicas de la investigación



2.1.1 Etapa I. Recopilación de datos

Es así que, se analizaron de forma general los documentos rectores y la literatura especializada, donde se tuvo acceso a libros, revistas, trabajos de diploma, tesis de maestría y doctorales, además de búsquedas en Internet que estudian el problema de los residuos generados en la minería y las estrategias para enfrentarlo, que pueda servir como referencia en los esfuerzos por contrarrestar el problema en Cuba, principalmente en la Industria extractiva de Materiales de Construcción.

2.1.2 Etapa II. Trabajo de Campo

Toma y preparación de las muestras de lodo

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 se trasladaron al laboratorio de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa para prepararlas y secarlas en la estufa durante 4 horas a temperatura entre 107 ± 3 °C.

Los resultados obtenidos fueron procesados a través del software estadístico STATGRAPHIC Centurion XV 15.2.14 (2007). 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 %.

2.1.3 Etapa III. Trabajos de laboratorio



Caracterización de las muestras de lodo

La característica de control más significativa y común es el análisis químico y físico de los minerales y los productos. Las técnicas aplicadas fueron realizadas en el laboratorio de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" y en la Empresa "Comandante Pedro Soto Alba".

Determinación de la composición granulométrica

El análisis granulométrico se empleó para la determinación de la composición granulométrica de los lodos. El mismo se realizó en un analizador de tamaño de partículas; HORIBA LA - 910, de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", cuyo procedimiento se expone a continuación:

- Preparación de la muestra de lodo que se desea analizar: Se pesaron 35 g de lodo, se transfirió a un molino planetario y se agitó durante 25 min con el objetivo de homogeneizar la muestra.
- Con una pipeta se tomaron 2 mL y se vertió en el posillo del equipo, donde permaneció durante 5 min.
- Todos los datos quedaron registrados en el sistema instalado en la computadora acoplada al analizador de tamaño de partículas, del cual se obtuvieron las curvas características de tamaño de los lodos.

Este procedimiento se realizó para 12 muestras de lodo. El análisis permite obtener la distribución sumaria por clases en las muestras analizadas, el tamaño de partículas predominantes en la muestra, la superficie específica, entre otros.

Determinación de la composición química de las muestras

Las muestras de lodos se caracterizaron mediante el método de fluorescencia de rayos X (FRX).

Este método fue empleado para determinar la composición química cuantitativa de las muestras de lodo utilizadas en los experimentos. Que consiste en hacer incidir



un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento, y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad. Mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos relacionándolos con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo.

Determinación de la reactividad

Se aplicó el método "análisis de neutralización o reactividad con ácidos", para lo cual se utilizó 3 g de la muestra pulverizada y ácido sulfúrico 0,5 mol/L.

En un beaker de 250 mL se añadió 40 mL de ácido sulfúrico 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

Esta norma NEIB 64-10-03 establece el método para la determinación de la densidad real de los materiales en forma de polvo mediante el frasco de L' Chatelier (Ver Anexo B). El procedimiento consiste en tomar una muestra del material a ensayar de 5 g y luego se coloca en una cápsula de porcelana o pesa filtro de 50 ml y se introduce en la estufa hasta tener una masa constante. Pasado ese tiempo se extrae y se coloca en una desecadora para que se enfríen. 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 1 ml. Se midió la temperatura con apreciación de 0,5 ° C. Se secó con un papel de filtro la boca del frasco de L'



Chatelier. Se midió el volumen inicial del líquido utilizando el embudo se introdujo lentamente la muestra en el frasco de L´ Chatelier y se tapó el frasco para la realización de la lectura del volumen final.

La densidad del material real se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Dónde:

D - Densidad real en g / cm^3

m - masa de la muestra en g

V_r - volumen real en cm^3

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 (NC 181 2002).

Se prepararon muestras de 10 g sin inclusiones de otros materiales y sin cavernas ni grietas. La muestra se secó en una estufa de 107 °C hasta obtener un peso constante, y se puso a enfriar en un secador. Posteriormente se pesó en una balanza técnica (G). Luego la misma se amarró con un hilo y se sumergió en parafina derretida a una temperatura de 80-90 °C. A continuación 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 de la siguiente forma:

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

Dónde:

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

G - Peso de la muestra en el aire, g



G_1 - Peso de la muestra parafinada en el aire, g

G_2 - 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 (NC 67 2000).

Se prepararon muestras de 100 g. Las muestras de ensayo se secaron en una estufa a temperatura 105 ± 2 °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).

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

g_s -Masa de la muestra secada a temperatura de 107 ± 3 °C, g.

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

Pérdidas por ignición

Las pérdidas por ignición (PPI) fue determinada por el método reportado por Dean (Dean 1974) y Bengtsson & Enell (Bengtsson y Enell 1986).

Las pérdidas por ignición son el agua, el carbonato hídrico y el material carbonoso que se evapora cuando la muestra es calentada a una temperatura dada.

La muestra de ensayo se pulverizó 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

2.1.4 Etapa IV. Evaluación y selección de alternativas de utilización a partir de parámetros normalizados

En esta etapa se evaluó los resultados de la caracterización de los lodos residuales de la planta procesadora de árido La Inagua y se seleccionó alternativas de utilización a partir de parámetros normalizados. Se partió de las características de control más significativas y comunes, el análisis químico y físico de los minerales y los productos, las cuales permitieron valorar las potencialidades de los mismos para ser utilizados.



CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Introducción

Una de las líneas de desarrollo estratégico del país está relacionada con el uso y explotación de los residuos que se generan en los procesos de producción de materiales para la construcción en función mitigar el impacto negativo que genera sobre el medio ambiente.

En el presente capítulo se presentan los resultados de la investigación científica, el mismo está encaminado en función de los objetivos específicos del trabajo y de las cuatro etapas metodológicas de la investigación, explicadas en el capítulo II de este trabajo. Se fundamentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis científica sobre las potencialidades que poseen los lodos de la cantera “La Inagua” de la Empresa Materiales de la Construcción Guantánamo para su utilización en las industrias.

3.1 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.

3.1.1. Caracterización granulométrica de los lodos

La figura 3.1 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.

Según se observa en el anexo C, las curvas para los 12 ensayos granulométricos están prácticamente superpuestas, lo que demuestra que la distribución granulométrica 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 comportamiento que está en correspondencia con las investigaciones desarrolladas por Erdogdu (1996). No obstante, para poder definir la utilización de este material se debe tener en cuenta otras propiedades.

Además de estas características 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.

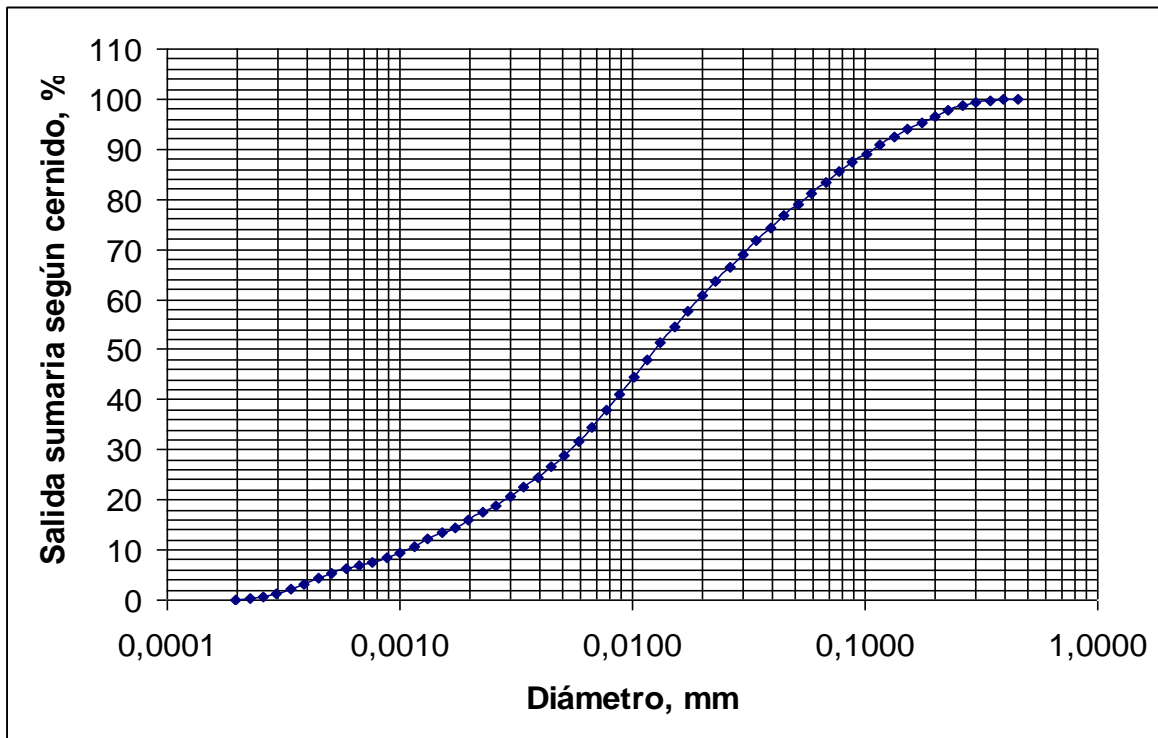


Figura 3.1. Característica de tamaño de los lodos



3.1.2. Caracterización química

La composición química promedio de los lodos empleados, determinada por fluorescencia de rayos x, se presenta en la tabla 3.1. 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. 3.1 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
SiO 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	93,32
PPI	15,61



En el anexo D se muestra la composición química para cada muestra individual. Los compuestos de mayor variabilidad fueron el óxido de calcio y el óxido de hierro III, junto a las pérdidas por ignición, aunque no se consideran representativas.

3.1.3 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 0,23 hasta 5,44 lo cual muestra la reactividad del material en el proceso de neutralización de ácido sulfúrico. El mejor registro se obtuvo en los primeros dos minutos. La reactividad promedio, en términos porcentuales es superior al 92%.

Como se observa en la figura 3.2, 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.

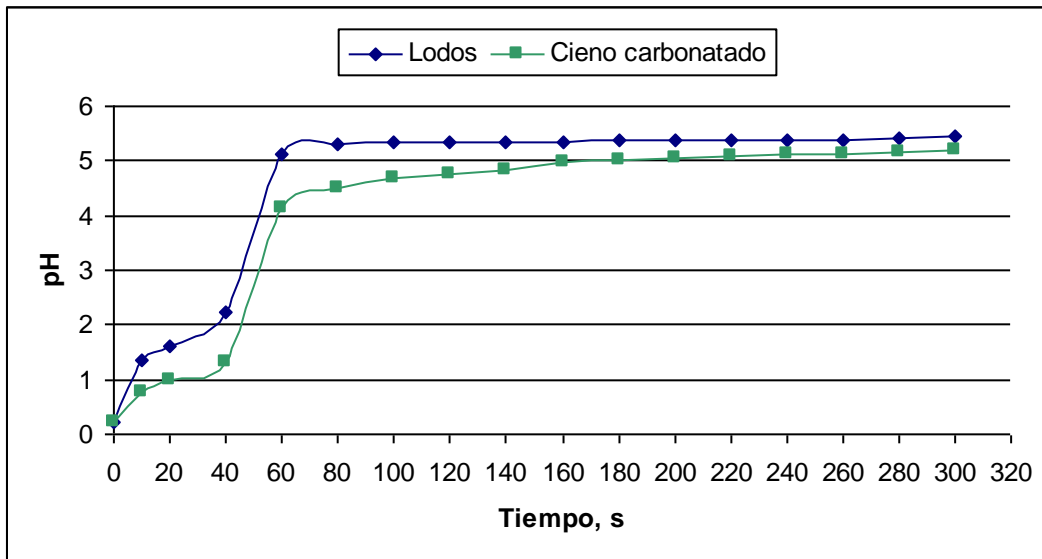


Figura 3.2. Variación del pH en función del tiempo

3.1.4. Características físicas de los lodos

Se determinaron las características físicas fundamentales de acuerdo a las posibles aplicaciones. En la tabla 3.2 se aprecian los resultados promedios de los ensayos realizados.

Tabla 3.2. 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 los anexos E, F y G se pueden apreciar las características físicas para cada muestra individual de lodo.



3.2. 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 el empleo de caliza en bruto. 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.

3.2.1 Obtención de cal

La cal es un óxido básico (CaO) denominado también cal viva que forma parte de las rocas carbonatadas. La producción de cales 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 (CaCO_3) de 90 % como mínimo y bajos contenidos de óxidos de silicio, aluminio, hierro, magnesio y de impurezas como azufre y fósforo (Rivera Carvajal 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 ácidas. 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.

3.2.2 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. Las materias primas para la industria de cemento se pueden dividir en cuatro tipos:



(1) Componentes calcáreos, (2) componentes ricos en alúmina (arcillas), (3) componentes silíceos (arenas) y (4) componentes ferruginosos.

Los componentes calcáreos usados frecuentemente en la industria del cemento son calizas y margas, entre otros.

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 %.

Tabla 3.3. Comparación de los requisitos exigidos para la producción de cemento

Requisitos químicos	Valor exigido, % *	Resultados para los lodos
---------------------	--------------------	---------------------------



Carbonato de calcio (CaCO_3)	Variable (75 - 100)	92,32
Óxido de Magnesio	< 3	0,123
Azufre	< 0,5	0,106
Cloruros	< 0,3	Insignificante
Fluoruros	< 0,08	Insignificante
Fósforo (P_2O_5)	< 0,25	0,011

* Tomado de Montserrat, (2004).

Esta aplicaciones encontradas (Tay y Show 1997) 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.

3.2.3 Neutralizante en la industria del níquel

La Empresa "Comandante Pedro Sotro Alba", M o a Níquel S.A. (PSA) 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 M o a.



Su principal constituyente, el carbonato de calcio se utiliza como materia prima para la neutralización de los ácidos contenidos en los licores a procesar para obtención final de sulfuro de níquel más cobalto.

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 (Hedin et al., 1994a, 1994b. Skousen, 1998, Zipper y Jage, 2001, y DEP, 2001).

Es evidente la perspectiva de este uso que poseen no sólo los lodos estudiados sino otros similares que se obtienen en la región oriental.

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.



Según Peña (2010) 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 dado que:

- 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/o clasificación, lo que representa un ahorro considerable de energía.

3.2.4 Otras aplicaciones

Los lodos objeto 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. (Tay y Show 1997; Betancourt et al. 2007; Díaz, Betancourt y Martirena 2011).

3.3 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 el 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.



3.4 Contribución económica, social y ambiental de la investigación

La acumulación de residuos sólidos es un serio problema en el sector minero y tiene gran importancia en la actualidad, por lo cual, la reutilización de éstos, produce impactos positivos y mejora la imagen del sector o empresa que lo realice.

La valoración de los lodos de la cantera "La Inagua" para seleccionar alternativas de usos, constituye una vía para reducir las afectaciones provocadas al ecosistema de la región y lograr una contribución a la economía, a la sociedad y al medio ambiente que se traduce en:

- Adelanto de la imagen de la industria minera, y en concreto del sector de los materiales de construcción gracias a la reutilización de los residuos generados y a una menor contaminación en el medio ambiente.
- Adelanto de la competitividad, valoración de los residuos y aumento de la nomenclatura de salidas para los productos generados en estas empresas.
- Aumento de ventas, reducción de los costos y aumento de los ingresos.
- Minimización de los residuos generados.
- Avance tecnológico de las empresas en cuestión de maquinaria para el tratamiento de lodos de proceso.
- Capacidad de generalización de esta investigación en otras empresas del sector, aplicando los mecanismos para el descenso y reutilización de los residuos.

El uso de los lodos de la cantera "La Inagua", permitirá a la empresa un ahorro más significativo, que debe abordarse en otra investigación más profunda y detalladamente, además de mejorar su imagen ambiental y la recuperación del ecosistema de la región afectado en la actualidad, lo que demuestra un fuerte impacto ambiental y económico social.



CONCLUSIONES

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. La utilización de a la mitigación del impacto negativo que ésta provoca sobre el medio ambiente, evidenciado en su alto impacto no solo económico, y social sino también ecológico.



RECOMENDACIONES

1. Realizar una investigación, con mayor grado de profundidad y extensión, sobre las posibilidades de reutilización de los residuos generados en la planta procesadora de áridos partiendo de la base de este trabajo.

2. Debido al amplio número de aplicaciones para los residuos generados en la planta procesadora de árido "La Inagua" es conveniente realizar las acciones necesarias para buscar un mercado competitivo para este tipo de residuos.



BIBLIOGRAFÍA

- Adasme, C. 2002. Consideraciones Ambientales y de uso del Territorio Relacionadas con Actividades Extractivas de Áridos. Simposio Internacional de Geología Ambiental para Planificación del Uso del Territorio Puerto Varas, 4-6 de Noviembre 2002.
- ANEFA (Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos). 2005. Gestión de residuos en explotaciones mineras a cielo abierto. España. 100 p.
- Battikhi Tulin. 2009. Gestión de residuos. México. 12 p.
- Casado Martínez, N .1996. Edificios de alta calidad ambiental. Ibérica, Alta Tecnología ISSN 0211-0776.
- CNA (Consejo Nacional del Ambiente). 2005. Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Perú. 53 p.
- Crespo Castillo, Rayda y Jiménez Chappotin, Rafael. 2012. Caracterización mineralógica y aplicaciones en la construcción de los lodos procedentes del lavado de áridos naturales. XXXIII CONVENCION PANAMERICANA DE INGENIERIAS, UPADI 2012. Memorias [CD - ROM], La Habana, Cuba, 9 -13 abril 2012.
- Crespo Castillo, Rayda y Jiménez Chappotin, Rafael. 2012. Caracterización mineralógica y aplicaciones en la construcción de los lodos procedentes del lavado de áridos naturales. XXXIII CONVENCION PANAMERICANA DE INGENIERIAS, UPADI 2012. Memorias [CD - ROM], La Habana, Cuba, 9 -13 abril 2012.
- Gallarday Bocanegra Tomás Exequiel. 2008. Propuesta para tratamiento de residuos sólidos en el distrito de Santa Rosa de Quives, prov. de Canta dpto. de Lima. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. Vol. 11, N.º 22, 7-12.



- García Bielsa, José Ignacio. Tratamientos de lodos de elaboración y aprovechamiento de residuos. En LÓPEZ JEMENO, CARLOS (Eds.). Manual de rocas ornamentales. Madrid, España. pp. 417-429.
- Generalitat de Catalunya. Departamento de Territorio y Sostenibilidad. 2009. La restauración ambiental en relación con el aprovechamiento de subproductos. [en línea], marzo 2009. Consulta: 10 junio 2012. Disponible en <http://www20.gencat.cat/portal/site/mediambient/menuitem>
- GÓMEZ MATEO, JOSÉ. 1992. Tratamiento de lodos y transporte hidráulico En: LÓPEZ JEMENO, CARLOS (Eds.). Manual de prospección, explotación y aplicaciones. Madrid, España. pp. 292-311.
- Hernández Moreno Silverio; de Hoyos Martínez Jesús E. y Delgado Hernández David J. 2010. Impacto Ambiental y Vida Útil de los Materiales más Comunes en la Industria de la Construcción. Tecnologías y materiales.
- Hernández Moreno, Silverio. 2001. Tecnología de materiales compuestos y sus posibilidades de aplicación en arquitectura; desarrollo tecnológico de un material cerámico de tipo reforzado, Tesis de doctorado en Arquitectura, área de Tecnología, Posgrado de Arquitectura de la UNAM, México, D. F.
- LEYVA RODRIGUEZ, CARLOS. Oct. 2007. Solución al déficit de áridos en el municipio de Moa empleando los desechos serpentiniticos de la Empresa Comandante Ernesto Guevara. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. Ponencia
- Manual de La Rioja. 2009. Conceptos básicos de la gestión de residuos. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA). 20 p.
- Montserrat M. M. 2004. Posibles aplicaciones de los residuos generados en el proceso de corte y elaboración de la piedra natural, para su utilización como materia prima en procesos industriales diversos. [en línea], octubre 2004.
- Ramiro Huillcañahui T. 2007. Caracterización de los residuos minero metalúrgicos y su posible uso en barreras de ingeniería. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 10, N° 19, 87-97

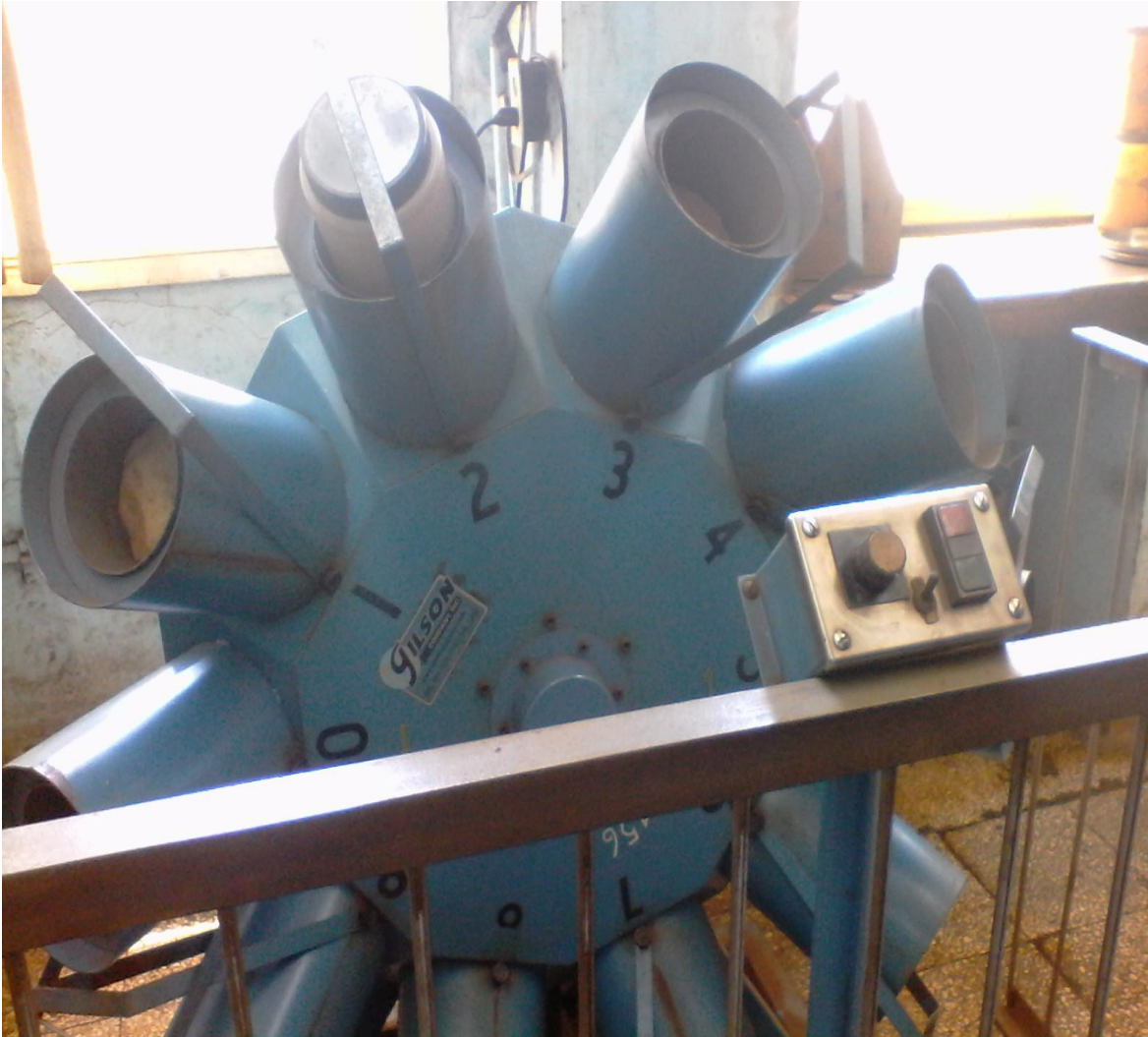


- Salazar J. A. 2005. Experiencia de Reciclaje en la Producción de Materiales de Construcción. V CONGRESO NACIONAL DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. 30 de septiembre de 2005. Pereira. 57 p.
- Sánchez L. E. 2002. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. Trabajo publicado en "Aspectos Geológicos de Protección Ambiental", Volumen I, UNESCO, 1995.
- Sarmiento Mora Yeimy Consuelo y Torres Merchán Nidia Yaneth. 2008. Restauración en Explotaciones de Minas Caliza. Revista Luna Azul ISSN 1909-2474. No. 27, julio - diciembre 2008.
- Savón Z. Y. 2011. Diagnóstico ambiental de la Unidad Empresarial Básica procesadora de áridos Molino 200 mil. Carmen M. Hernández Fernández (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 46 p
- Speare, R.S. 1995. Recycling of structural Materials. The Structural Engineer, Volume 73, N. 13.
- Vijaya Kattel. 2010. Valoración técnica de los desechos serpentiniticos de la Empresa Moa Nickel S.A. como material de construcción alternativo. (Eduardo Sario López (Tutor). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Trabajo de Diploma. 80 p.



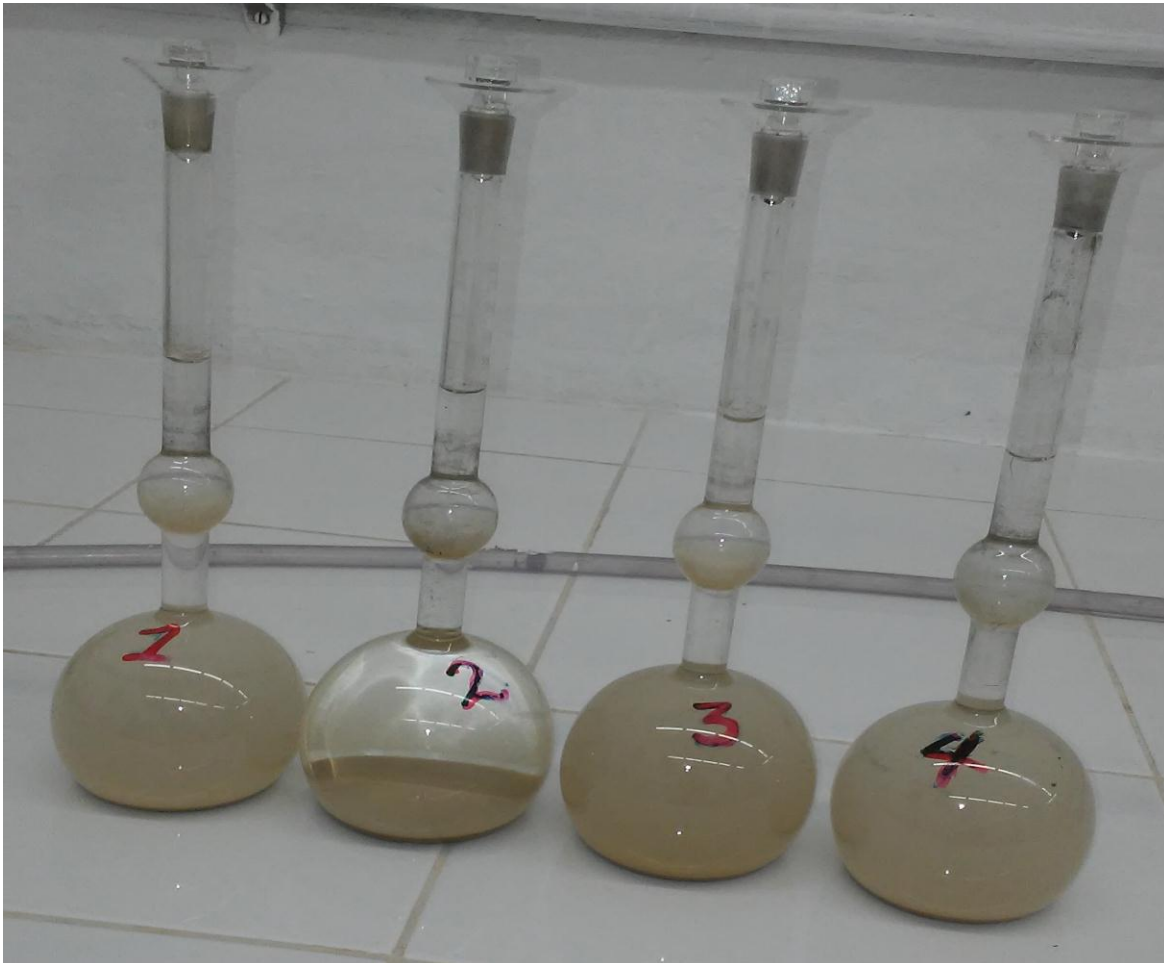
ANEXOS

ANEXO A. Molino planetario utilizado en los ensayos para homogenizar la muestra



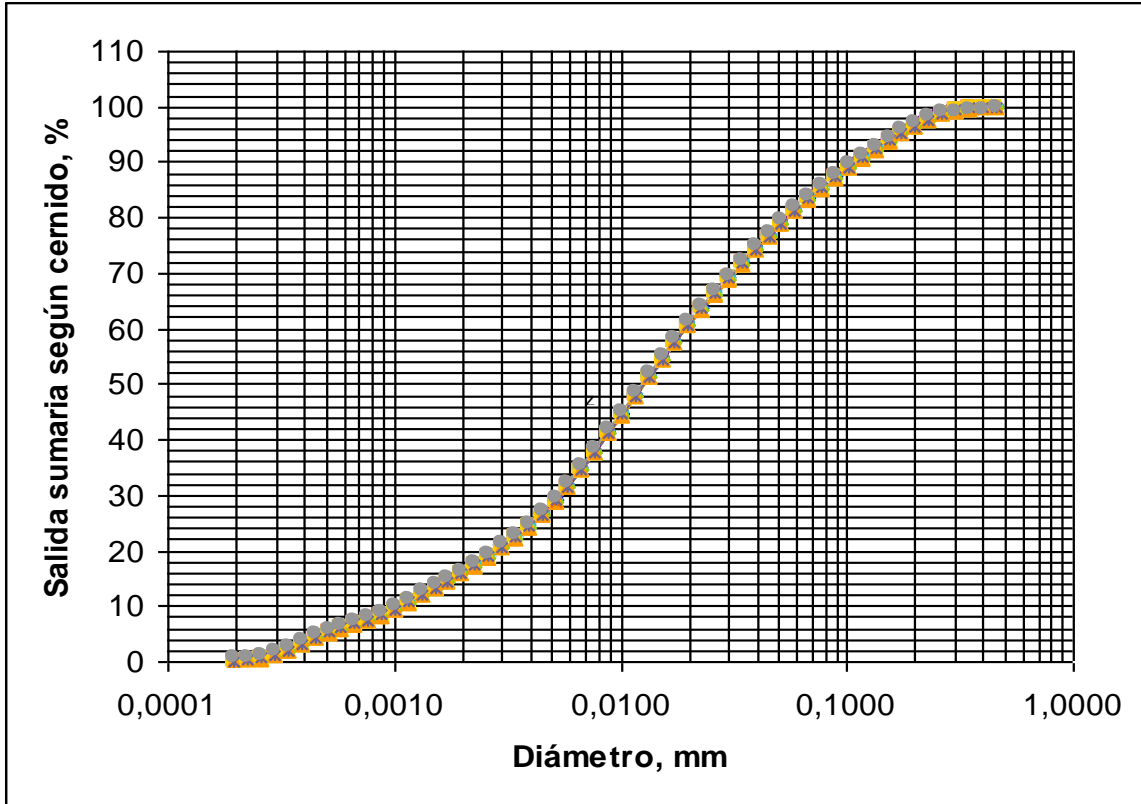


ANEXO B. Frasco de L' Chatelier utilizado en los ensayos para determinar densidad del material





ANEXO C. Características de tamaño de los lodos para 12 muestras





ANEXO D. Composición química de los lodos

Composición Química	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9	ML4	ML10	ML11	ML12	Promedio
CaO	50,543	50,324	51,2	51,46	49,5	49,3	50,67	49,14	51,5	51,3	49,04	51,2	49,01	50,98
Al ₂ O ₃	0,496	0,109	0,20	0,30	0,35	0,55	0,090	0,55	0,496	0,40	0,45	0,49	0,5	0,396
Fe ₂ O ₃	0,208	0,83	0,50	0,15	0,25	0,286	0,20	0,236	0,25	0,20	0,25	0,23	0,21	0,336
SiO ₂	0,2	0,3	0,30	0,155	0,2	0,20	0,25	0,30	0,155	0,25	0,2	0,2	0,25	0,233
MgO	0,141	0,12	0,2	0,10	0,12	0,20	0,12	0,13	0,123	0,161	0,017	0,017	0,016	0,133
Na ₂ O	0,05	0,02	0,028	0,03	0,02	0,023	0,022	0,02	0,023	0,029	0,03	0,03	0,023	0,027
K ₂ O	0,003	0,004	0,0038	0,0036	0,003	0,004	0,0031	0,0028	0,0033	0,0028	0,003	0,003	0,0029	0,003
MnO	0,0011	0,0013	0,0009	0,0011	0,0013	0,0016	0,0011	0,001	0,0012	0,0011	0,0009	0,0009	0,0013	0,001
Zn	0,001	0,0013	0,001	0,0011	0,0012	0,001	0,0013	0,001	0,0012	0,0015	0,0014	0,0014	0,0011	0,001
Cu	0,0010	0,0010	0,0009	0,0008	0,0006	0,0009	0,0012	0,0011	0,0013	0,0009	0,001	0,001	0,001	0,001



SCB	Q1	Q12	Q088	Q09	Q013	Q12	Q1	Q2	Q088	Q11	Q13	Q13	Q09	Q106
PP	12,36	15,66	15,32	12,03	12,38	16,66	15,2	15,38	12,27	13,36	15,5	15,5	13,63	15,612

**ANEXO E. Resultados de las determinaciones de la densidad**

Muestras	Resultado de las Determinaciones
M Q 1	2,50
M Q 2	2,50
M Q 3	2,63
M Q 4	2,50
M Q 5	3,2
M Q 6	3,15
M Q 7	2,50
M Q 8	3,2
M Q 9	2,70
M Q 10	2,63
M Q 11	2,40
M Q 12	2,50

ANEXO F. Resultados de las determinaciones de la humedad

Muestras	Resultado de las Determinaciones
M Q 1	19,31
M Q 2	19,63
M Q 3	19,85
M Q 4	20,03



M Q 5	20,33
M Q 6	19,01
M Q 7	19,04
M Q 8	19,38
M Q 9	19,33
M Q 10	19,02
M Q 11	19,58
M Q 12	19,36

ANEXO G . Resultados de las determinaciones del peso volumétrico

Muestras	Resultado de las Determinaciones
M Q 1	2,40
M Q 2	2,41
M Q 3	2,45
M Q 4	2,42
M Q 5	2,45
M Q 6	2,46
M Q 7	2,47
M Q 8	2,49
M Q 9	2,45
M Q 10	2,40



M Q 1 1	2 , 3 0
M Q 1 2	2 , 4 5