

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMENEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO

DE

INGENIERO EN GEOLOGÍA

**IDEAS CONCEPTUALES ACERCA DEL POTENCIAL DEL DEPÓSITO
ARCILLOSO CENTENO PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO DE BAJO
CARBONO EN EL MUNICIPIO MOA.**

AUTOR: Rodrigues Cardoso da Silva

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO

DE

INGENIERO EN GEOLOGÍA

**IDEAS CONCEPTUALES ACERCA DEL POTENCIAL DEL DEPÓSITO
ARCILLOSO CENTENO PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO DE BAJO
CARBONO EN EL MUNICIPIO MOA.**

AUTOR: Rodrigues Cardoso da Silva

TUTORES: Prof. Ing. Luis Alberto Pérez García (Prof. Inst.)

Prof. Ing. Carlos Alberto Leyva Rodríguez (Dr. C. Prof. Tit)

CO-TUTORA: Prof. Ing. Marianela Crespo Lambert

Declaración de Autoría:

Yo: Rodrigues Cardoso da Silva, autor de este Trabajo de Diploma que tiene como tema: Ideas conceptuales acerca del potencial del depósito arcilloso centeno para la producción de cemento de bajo carbono en el municipio Moa. Los tutores: Ing. Luis Alberto Pérez García, Dr. Carlos Alberto Leyva Rodríguez y Co-tutora: Marianela Crespo Lambert, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio de la Universidad Minero Metalúrgico de Moa para que el mismo disponga de su uso cuando estime conveniente.

Para que así conste el presente a los ____ días del mes de_____ 2019

Diplomante: Rodrigues Cardoso da Silva

PENSAMIENTOS

Tenemos que dar nuestros pasos de avance en sentido tecnológico, crear nuestra técnica, la técnica que son nuestros propios técnicos, suministrar la base para que avancemos nosotros por nuestra propia cuenta, para que no tengamos que recibir siempre técnicos de países amigos que vengan a enseñarnos cada cosa como hay que hacerla, para que después caminemos con nuestros propios pies.

Ernesto "Che" Guevara

DEDICATORIA

A Dios, a la Revolución cubana y a todos los angolanos, a mis padres, hermanos, familiares, profesores y amigos, en especial a mi primogénita hija Rodrianis.

AGRADECIMIENTOS

Antes de todo agradezco infinitamente a Dios por las maravillas que ha hecho en mi vida, agradezco a la Revolución cubana y al Gobierno angolano por haberme dado la oportunidad de estudiar y graduarme como ingeniero en esta universidad.

Son muchas las personas e instituciones que directa e indirectamente han contribuido a la exitosa realización de este trabajo, el aporte de cada uno de ellos, cualquiera que sea su magnitud, merece mi agradecimiento y gratitud eterna. Sin embargo, quisiera destacar de manera especial a mis padres, a mi querida hija Rodrianis, y a toda familia por el apoyo y por ser el gran incentivo de mi graduación. Agradezco al Ing. Luis Alberto Pérez García, Dr. C Carlos Alberto Leyva Rodríguez, que han sido más que un tutor, cuyos conocimientos y consejos han contribuido profundamente a mi formación a pesar de los contratiempos. A Miguel Salgado, compañero hermano y amigo, por la paciencia y la ayuda incondicional te agradezco por todo, Anabela Salgado, Desejo Cardoso, Antonio Cardoso, Manuel Cardoso, Alberto Cardoso, a toda familia Cardoso da Silva y a toda familia Cabrera Guzmán, (Luisa María Cabrera Guzmán, Lidia Guzmán y Yunior) gracias por vuestro apoyo moral y económico sin olvidar a Ramón Guílarte y a sus hermanos Ramiro Guílarte, Tito y al vecino Roja por todo el apoyo que me han dado y a mi hija. Quiero reconocer además a mis

compañeros del aula y al estudiante de la carrera de Eléctrica Edson Correa, a todos los profesores de la Universidad principalmente del Departamento de Geología, mis gratitudes, gracias a ustedes hoy soy lo que soy con puertas abiertas para el futuro. De una manera muy especial agradezco al profesor Dr. José Nicolás Muñoz Gómez, que para mí ha sido más que un profesor, cuyos conocimientos y consejos han contribuido profundamente a mi formación como ingeniero.

Sin olvidar la Ing. Marianela Crespo Lambert por dedicar su tiempo en la revisión de la parte metodológica del trabajo, mi gratitud.

Finalmente, agradezco al colectivo de estudiantes angolanos y extranjeros, a todos trabajadores de la universidad mi gratitud.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo establecer ideas conceptuales para el uso de las arcillas caoliniticas del depósito Centeno como materia prima para la producción de cemento de bajo carbono. Se realiza una caracterización de las arcillas por DRX, antes y después de calcinarlas. Se evalúan las pérdidas por ignición y el contenido de caolín equivalente. Finalmente se evalúan las potencialidades según la metodología de Almenares Reyes, 2017. Se concluye que las principales fases minerales identificadas por DRX en la arcilla de Centeno son Cuarzo (SiO_2), caolinita [$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], Hematita [Fe_2O_3] y la Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). La caracterización química arrojó como resultados valores dentro de los límites aceptables para las producciones de cemento LC3. Se logró determinar de las pérdidas por deshidroxilación de la materia arcillosa en cada muestra, se constató un promedio final 9.0633 %. Los valores de caolín equivalente promedian un 64,92 % de caolín equivalente. Se logró determinar las potencialidades del depósito arcilloso siendo del tipo IV, que deben ser evaluadas de manera individual dado el contenido de minerales acompañantes.

ABSTRACT

The present work has as objective to establish conceptual ideas for the use of the kaolinitic clays of the Centeno deposit as raw material for the production of low carbon cement. A characterization of the clays is performed by XRD, before and after calcining them. The losses due to ignition and the equivalent kaolin content are evaluated. Finally, the potentialities are evaluated according to the methodology of Almenares Reyes, 2017. It is concluded that the main mineral phases identified by XRD in Centeno clay are Quartz (SiO_2), kaolinite [$\text{Al}_2 (\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4$], Hematite [Fe_2O_3] and Nacrite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$). The chemical characterization resulted in values within the acceptable limits for LC3 cement productions. It was possible to determine the losses by dehydroxylation of the clay matter in each sample, a final average of 9.0633% was found. The equivalent kaolin values average 64.92% kaolin equivalent. It was possible to determine the potentialities of the clay deposit being type IV, which must be evaluated individually given the content of accompanying minerals.

INDICE

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
Introducción	4
Cemento.	4
El cemento Portland. Generalidades.....	4
Fabricación del Cemento portland.	6
Producción de cemento a nivel mundial, Historia.....	7
Materiales Cementicios Suplementarios.	9
Definición de los (MCS).	9
Definición y clasificación de las puzolanas.	10
Puzolanas naturales.	11
Puzolanas artificiales.	12
Puzolanas Naturales y sus orígenes.	15
Causas de la actividad puzolánica.....	16
Evolución de los materiales cementicios suplementarios en Cuba.....	16
Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario.....	18
Características generales, composición química, estructura y clasificación.	18
Clasificación de los minerales arcillosos más comunes.....	19
Activación térmica de las arcillas.	20
Evaluación de la reactividad de los productos de calcinación.....	22
Reacción puzolánica.....	22

Métodos para la evaluación de la reactividad puzolánica.....	24
Potencialidades de utilización de las arcillas calcinadas como MSC en Cuba.	26
CAPÍTULO I: CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DE LA REGIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO	29
1.1. Introducción.....	29
1.2. Características físico- geográficas	29
1.3 Ubicación geográfica de la región	29
1.4. Relieve	30
1.5. Clima.....	31
1.6. Humedad relativa	31
1.7 Red hidrográfica.....	31
1.8 Vegetación.	33
1.9 Demografía	34
1.10 Desarrollo económico de la región.....	35
1.11 Características geológicas del territorio.	36
1.12 Estratigrafía.....	37
1.12.1 Tipos de formaciones.....	40
1.13. Tectónica.....	41
1.14. Principales sistemas de fallas del territorio.	42
1.15 Magmatismo.....	44
1.16 Características geomorfológicas.	45
1.17 Caracterización del área de estudio.....	45
1.17.1Ubicación geográfica de la región de estudio	45
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN ..	50
2.1. Introducción.....	50

2.2 Etapa I: Preliminar.....	50
2.3 Etapa II: Trabajo de campo.....	51
2.4 Toma de muestras	51
2.5 Etapa III: Preparación y ensayo de las muestras.....	52
2.6 Etapa IV: Trabajo de laboratorio.	53
2.7 Método de Difracción de Rayos X (DRX).....	54
2.8. Determinar la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet.....	55
Capítulo III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	57
3.1. Introducción.	57
3.2. Composición química de las arcillas de la región de Centeno.	57
3.3. Análisis de los resultados de DRX.	57
3.4. Resultados del cálculo de caolín equivalente.	59
3.5. Resultados correlación de resistencia a la compresión según el contenido de caolín equivalente.	59
3.6. Análisis y discusión de los resultados de la evaluación de potencialidades.	60
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES	63
Bibliografía.	64
Anexos	69

INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material más adecuado para satisfacer la creciente demanda constructiva asociada al desarrollo de la sociedad, por su flexibilidad, prestaciones en uso, disponibilidad de materias primas y bajos costos en comparación con otras alternativas. Sin embargo, la fabricación de su principal componente, el cemento Portland (CPO), consta de 6 etapas importantes: obtención de materias primas, preparación de las materias primas, molienda de crudo, cocción en el horno rotativo, molienda de cemento (Clinker + adiciones), almacenamiento y expedición. Esto asocia a un alto consumo energético, principalmente en la forma de combustibles fósiles, y a grandes volúmenes de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), factores que influyen negativamente en sus costos y sostenibilidad ambiental (F. Martirena, 2004).

Entre las mejores soluciones a este problema se encuentra el empleo de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del CPO, lo cual favorece la disminución en el consumo energético y en las emisiones de gases de efecto invernadero por volumen del aglomerante, al mismo tiempo que permite el mantenimiento o incremento de las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón frente a un determinado número de agentes ambientales, con lo cual se obtienen notables beneficios desde el punto de vista ingenieril, económico y ecológico (Papadakis & Tsimas, 2002).

Existe una amplia variedad de materiales que pueden ser empleados como puzolanas. Algunos se encuentran ya en explotación como es el caso de las cenizas volantes, las escorias siderúrgicas o el humo de sílice. Sin embargo, se conoce que las reservas de estos materiales son insuficientes para suplir a largo plazo su creciente demanda, además de que el acceso a estas fuentes está limitado por factores económicos y regionales (Sabir, Wild, & Bai, 2001). Es entonces que se hace necesaria la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos que permitan el reemplazo parcial de significativas porciones de CPO en el aglomerante, manteniendo o mejorando su resistencia y durabilidad.

La mayor parte de los estudios publicados sobre el empleo de arcillas calcinadas como materiales puzolánicos parten del uso de minerales arcillosos de alta pureza, principalmente caolines. Sin embargo, las arcillas se presentan comúnmente en la naturaleza como depósitos donde se combinan varios tipos de minerales arcillosos con diversos minerales acompañantes y no como fases arcillosas puras, factores que afectan su potencial uso como materiales puzolánicos (Habert, Choupay, Montel, Guillaume, & Escadeillas, 2008).

En Cuba, el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, en la provincia de Villa Clara, ha desarrollado un nuevo tipo de cemento, conocido como el cemento de bajo carbono LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). Este cemento permite sustituir hasta un 50% del clínker por una mezcla de dos partes de arcilla calcinada a temperaturas entre 700 °C-850 °C, y una parte de carbonato de calcio o piedra caliza, estos estudios en los últimos años han empleado las arcillas calcinadas como fuente de materiales cementicios suplementarios (CIDEM, 2011).

Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente y las características propias del país donde urge la necesidad de potenciar investigaciones enfocadas en la explotación de nuevas fuentes de materiales puzolánicos que permitan la producción de aglomerantes en cantidades suficientes y a un costo asequible desde el punto de vista económico, energético y medioambiental, debe centrarse la atención en el estudio y empleo de las fuentes de materiales localmente disponibles, en particular, aquellas que permitan su utilización como fuente de materiales puzolánicos, entonces se plantea el siguiente: **problema científico de la investigación:** ¿Cómo influyen las características mineralógicas de las arcillas procedentes del depósito de Centeno y sus productos de calcinación, en la obtención de cemento de bajo carbono en el municipio de Moa?

Hipótesis: Si se caracterizan mineralógicamente las arcillas calcinadas procedentes del depósito de Centeno en el municipio de Moa, permiten su

utilización como material cementicio suplementario (MCS) en la obtención de cemento de bajo carbono.

Objeto de investigación: Los depósitos de arcillas de Centeno del municipio de Moa

Campo de acción: Características mineralógicas, puzolánicas y térmicas de las arcillas del depósito de Centeno municipio de Moa.

Objetivo general:

Evaluar la actividad puzolánica y el comportamiento térmico de la materia arcillosa del depósito de Centeno municipio de Moa para su utilización como materia prima en la fabricación de cemento de bajo carbono.

Objetivos específicos:

- Sistematizar el conocimiento sobre el empleo de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario en la fabricación de cemento.
- Caracterizar química y mineralógicamente las arcillas del depósito de Centeno del municipio de Moa.
- Evaluar el contenido de caolín equivalente por el método térmico.
- Determinar las pérdidas por desidroxilación de la materia arcillosa.
- Determinar las potencialidades del depósito.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.

Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis conceptual y bibliográfico sobre diferentes términos que fundamentan las prácticas de la presente investigación, profundizando esencialmente en las definiciones referentes al cemento Portland, materiales cementicios suplementarios, evolución de los materiales cementicios suplementarios en Cuba, arcillas calcinadas, evaluación de la reactividad de los productos de calcinación y las potencialidades de utilización de las arcillas calcinadas como MCS en Cuba, con el objetivo de describir las principales herramientas que apoyan el desarrollo de la investigación.

Cemento.

El **cemento** es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. El producto resultante de la molienda de estas rocas es llamada Clinker y se convierte en cemento cuando se le agrega yeso para que adquiera la propiedad de fraguar al añadirle agua y endurecerse posteriormente. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada hormigón (en España, parte de Suramérica y el Caribe hispano) o concreto (en México, Centroamérica y parte de Suramérica). Su uso está muy generalizado en construcción e ingeniería civil (Cembureau, 2011).

El cemento Portland. Generalidades.

El cemento es un material inorgánico, no metálico, finamente molido que cuando se mezcla con agua y áridos forma una pasta que fragua y endurece (morteros y hormigones). Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados como resultado de una reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de conglomerante hidráulico le ha convertido en un material básico de construcción, imprescindible

para la edificación y la realización de infraestructuras. El cemento Portland fue patentado en 1824, y es el cemento más ampliamente empleado en la actualidad en la fabricación del hormigón y su consumo y producción están directamente relacionados con la marcha del sector de la construcción y, por tanto, con la coyuntura económica general (Taylor, M., C. Tam, and D. Gielen, 2006).

Tabla 1.1. Composición mineralógica del cemento P-35

Fase	(%)
Silicato tricálcico (C_3S)	54.44
Silicato dicálcico (C_2S)	18.56
Aluminato tricálcico (C_3A)	6.29
Ferrito aluminato tricálcico (C_3AlFe)	11.03

Tabla 1.2. Composición química del cemento P-35

Componentes	(%)
Dióxido de Silicio (SiO_2)	21.32
Óxido Férrico (Fe_2O_3)	3.35
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	4.71
Óxido de Calcio (CaO)	62.98
Óxido De Magnesio (MgO)	2.01
Trióxido de Azufre (SO_3)	2.58
Perdida por Ignición (PPI)	2.18

Tabla 1.3. Fábricas de cemento en operación en Cuba (tomado de anuario estadístico de GECEM).

Fabrica	Ubicación
Mártires de Artemisa	Artemisa
Rene Arcay	Mariel, Artemisa
Karl Marx	Guabairo, Cienfuegos
Siguaney	Siguaney, Sancti Spíritus
26 de Julio	Nuevitas, Camagüey
José Merceron	Santiago de Cuba

Fabricación del Cemento portland.

El comercio mundial de cemento supone tan sólo el 6% - 7% de la producción, en su mayoría transportado por mar. Hay generalmente poca importación y exportación de cemento, principalmente como resultado del alto costo del transporte por carretera, (los suministros de cemento por carretera suelen ser por lo general a distancias no mayores de 150 km). Aunque estos costes han hecho que históricamente los mercados del cemento hayan sido predominantemente locales, la progresiva globalización de la economía y la consiguiente desaparición de las trabas al comercio internacional suponen un reto para la fabricación de cemento en la Unión Europea, que sufre la presión de importaciones a bajo precio desde países de la cuenca mediterránea y de Europa del este, e incluso desde países asiáticos. <http://www.cementosinka.com.pe/blog/produccion-cemento-mundo/>

Su proceso de producción es considerado el responsable de entre 5 – 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera debido a los elevados volúmenes de producción a escala global (Müller & Harnisch, 2008), además de algunos autores como Taylor, Tam, and Dolf (2006) y EIA (2013)

demuestran que puede ser una industria altamente consumidora de energía, con alrededor de 6 % del consumo de energía total en el sector industrial.

Las principales razones por las que el cemento promete seguir siendo el aglomerante más importante en el sector de la construcción, es debido a que las materias primas para su producción son geológicamente extensas y abundantes, y su agotamiento es poco probable en los próximos años (U.S., 2017) y (Tironi, Trezza, Irassar, & Scian, 2012). La reducción del factor de clínker en el cemento, a través del empleo de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) es una de las alternativas más prometedoras, para su desarrollo a corto y a mediano plazo, entre las definidas por la industria del cemento para lograr la sostenibilidad ecológica y medio ambiental de su producción (WBCSD, 2015; WBCSD & IEA, 2009). Diferentes subproductos industriales y materiales naturales pueden ser utilizados en la sustitución parcial de clínker en el cemento (CEMBUREAU, 2013). De este modo se reducen los volúmenes de clínker en el aglomerante y el consumo específico de energía, y se logran mitigar las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de producción.

La producción de cemento mundial crece de forma espectacular. Esta alcanzó en el año 2002 1.75 109 ton, con un crecimiento promedio anual del 3.5%, medido desde 1970. (Hendriks, Worrell, Jager, Blok, & Riemer, 2004), (Roessler & Stark, 2003), Estos volúmenes de producción deberán seguir aumentando en los próximos años, con estimados de crecimiento entre el 120-180% para el año 2020. (Vanderley, 2002).

Producción de cemento a nivel mundial, Historia.

Las primeras referencias que se tienen del empleo de materiales cementantes, se remontan a la civilización Egipcia (3000 ANE), en la que se usaba barro mezclado con paja para pegar ladrillos. Fue en la Antigua Grecia cuando empezaron a usarse tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, los primeros cementos naturales. En el siglo I a. C. se empezó a utilizar el cemento natural en la Antigua

Roma, obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio. Luego, en el siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el Cemento Portland, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura. En el siglo XX entra en auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar hormigón fresco ideados por Juergen Hinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907.

En la actualidad el Cemento Portland se encuentra entre los materiales para la construcción más empleados a escala mundial, fabricándose en más de 150 países y con mayor nivel de producción a nivel mundial.

Se estima que la producción global de cemento en el año 2012 alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3% en comparación al año anterior. China representó el 59,3% del total de la producción global de cemento, por encima del 56% alcanzado en 2011. Excluyendo a China, la producción global de cemento aumentó en un 1,8%, inferior al crecimiento del 2,8% registrado en 2011. De acuerdo a cifras provisionales, las tasas más altas fueron registradas en Suráfrica, Indonesia, Brasil y la India, en tanto que la Federación Rusa y Argentina, en donde la producción de cemento aumentó a altas tasas en años anteriores, sufrieron una recesión. En Canadá, la producción de cemento registró un aumento moderado de 1,6%, mientras que los países europeos reportaron fuertes retrocesos en las tasas anuales de crecimiento. La producción continuó en aumento en 2012 en comparación con los años anteriores en América del Sur, África y Asia. Estas regiones fueron responsables del 3%, 4% y 80% de la producción de cemento respectivamente (Molina, J.V., 2014). Ya para el año 2013 la producción de cemento se comportó como muestra el siguiente gráfico:

Países líderes en producción de cemento a nivel mundial en 2015 (en millones de toneladas métricas)

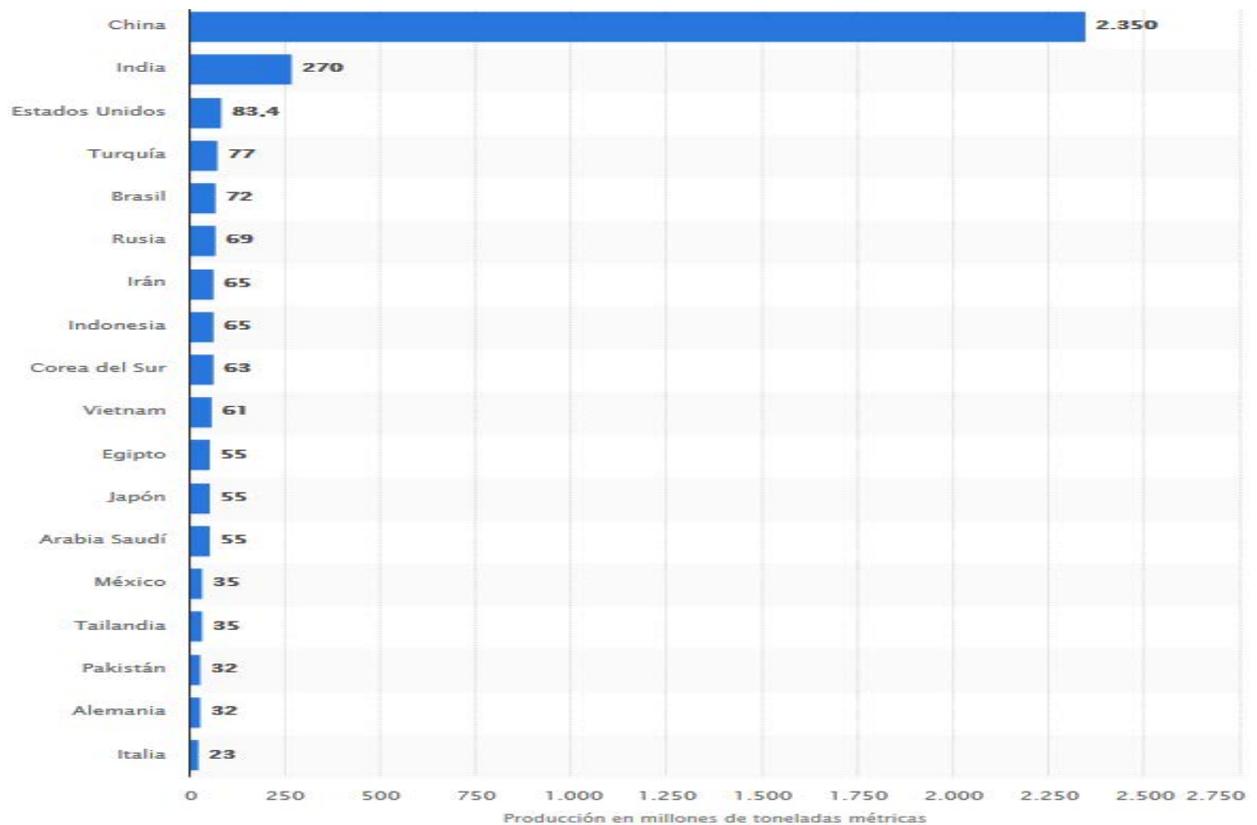


Figura 1.0. Producción en millones de toneladas métricas.

Materiales Cementicios Suplementarios.

Los materiales que se emplean actualmente en la industria de la construcción tienen sus raíces en el mundo antiguo, donde ya se utilizaban mezclas para mejorarlas propiedades de dichos productos. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX, la sustitución parcial del cemento Portland por materiales naturales o artificiales adquirió una renovada atención.

Definición de los (MCS).

La definición general de MCS abarca un gran número de materiales, que varían ampliamente en término de origen, composición química y mineralógica y características morfológicas. Los MCS comprenden aquellos materiales que

muestran comportamiento hidráulico, que se endurecen en presencia de agua para formar productos cementicios en una reacción de hidratación (Snellings, 2011) y aquellos que muestran comportamiento puzolánico.

La American Standard and Testing Materials (ASTM) define como materiales puzolánicos a aquellos materiales silíceos o aluminio-silíceos que por sí mismos posee poca o ninguna propiedad cementante, pero finamente divididos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio y forma compuestos de propiedades cementantes (Vizcayno, Gutiérrez, Castello, Rodríguez, & Guerrero, 2010). Cuanto mayor sea el contenido de sílice amorfa y menor la proporción de impurezas cristalinas, más reactiva resultará la adición (Baronio & Binda, 1997).

El uso de tales materiales, sin ningún proceso adicional en lo que a producción de clínker se refiere, lleva a una reducción significativa en las emisiones de CO₂ por tonelada de materiales que componen el cemento a obtener (en la molienda, mezclado y transporte, el uso de energía es muy pequeña comparada con el proceso del clinquerización) y también es un medio para utilizar derivados de procesos industriales (Hooton, 2011).

Definición y clasificación de las puzolanas.

Los materiales puzolánicos son una subcategoría dentro de los MCS. Se define como puzolanas a los materiales inorgánicos, naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminosos con pequeñas cantidades de calcio, magnesio, hierro, potasio y sodio, que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante. Están conformadas por partículas finamente divididas, amorfas o de muy pobre cristalinidad, que al entrar en contacto con un medio húmedo y a una temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento, formando silicatos dicálcicos hidratados (tobermorita) y aluminatos dicálcicos hidratados (gehlenita), encargados de la mayor parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las pastas de cemento (Tironi, 2013).

Puzolanas naturales.

Las puzolanas naturales son las rocas existentes en la naturaleza que no precisan para su empleo nada más que la molienda, siendo característico de ellas que en su composición química predomine la sílice, el aluminio y el hierro. Las mismas no están distribuidas uniformemente en el planeta, pero hay varias zonas donde estos materiales son abundantes, en especial en el llamado "cinturón de fuego" (F. Martirena, 2004).

Según Snellings (2011), ACI Institute (2000) y Ramezaniyanpour (2014), las cenizas volcánicas y tobas zeolíticas, vidrio volcánico inalterado, pumitas o piedra pómez, sílice opalina y tierras diatomeas, son los ejemplos más comunes de puzolanas naturales. Aunque se reporta que los recursos identificados y no identificados de estas puzolanas exceden los miles millones de toneladas en el mundo (U.S., 2017), su distribución no es homogénea (Scrivener, 2014).

Los depósitos de cenizas volcánicas se encuentran donde hay o recientemente hubo actividad volcánica, por ejemplo, en el Mediterráneo, en el África central y oriental, y en la región del Pacífico. La forma natural de estos depósitos varía bastante al igual que su reactividad puzolánica. Normalmente no requieren calcinarse de nuevo y, si se tiene la suerte de encontrarla ya en forma de polvo, no habrá necesidad de molerla. Las puzolanas volcánicas son explotadas comercialmente en varios países, por ejemplo: Alemania, Italia, Kenya, Rwanda, Vanuatu e Indonesia.

La distribución geográfica y calidad de las puzolanas naturales comúnmente empleadas también varían considerablemente, y su demanda en otros campos e industrias distintas a las del cemento también afecta su disponibilidad. En Cuba existe una amplia disponibilidad de estos materiales, pero debe señalarse que el desempeño físico – mecánico de los cementos con estas adiciones a edades tempranas es generalmente bajo, aunque se pueden alcanzar mayores prestaciones si la finura de estos se incrementa (South & Hinczak, 2001) y (Rosell, 2010). Otro de los materiales naturales que ha sido introducido como material

cementicio suplementario en pequeñas cantidades es la caliza pulverizada sin calcinar. (Ramezaniapour, 2014) y (Damtoft, Lukasik, Herfort, & Sorrentino, 2008).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación (Salazar, 2002).



Figura :1.2 Puzolana natural (pumita) de origen volcánico.

Puzolanas artificiales.

Las puzolanas artificiales más utilizadas son las cenizas volantes (fly ash FA), las escorias de fundición (blast furnace slag (BFS) y la micro sílice (silica fume(SF), se muestran como las de mayor aceptación para la producción de cementos mezclados (Papadakis & Tsimas, 2002), (J. F. Martirena, Middendorf, Gehrke, & Budelmann, 1998), (Toledo, Gonçalves, Americano, & Fairbairn, 2007).

Las FA son un subproducto sólido que se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbón y constituyen el MCS más empleado en la industria del cemento como sustituto de clínker (Ahmaruzzaman, 2010). La producción actual de cenizas volantes se estima en el orden de los 900 millones de toneladas a nivel mundial, además de los millones de toneladas que han sido acopiadas por muchos años (Ramezaniapour, 2014). Aunque estas se encuentran disponibles en grandes cantidades y constituyen

alrededor del 30 % de la producción de clínker en el mundo, su calidad dificulta en muchos casos su aprovechamiento en la producción de cemento (Scrivener, 2014), a lo que se le suma además, que alrededor del 90 % de la producción de cenizas volantes está centrada en Estados Unidos, Rusia, China, India, Australia y Sudáfrica, países donde se encuentran la mayor distribución de las reservas de carbón (Höök, Zittel, Schindler, & Aleklett, 2008).

Las BFS constituyen, después de las FA, el MCS más empleado en la producción de cemento (Humphreys & Mahasenana, 2002). Las escorias de alto horno pueden sustituir hasta un 70 % de clínker en el aglomerante, pero la cantidad de escorias disponibles en todo el mundo actualmente representa solo el 5 % de la cantidad de clínker producido (Scrivener, 2014) y su disponibilidad y localización dependen de los volúmenes de producción de hierro y de la existencia de industrias metalúrgicas generadoras a nivel local o regional. Valores estimados en el 2016 indican que se produjeron alrededor de 300 a 360 millones de toneladas de escorias de alto horno en todo el mundo (U.S., 2017), pero no todas ellas fueron escorias granuladas.

En el caso del SF, que es un subproducto de la producción de silicio o de ferro silicio y se considera uno de los MCS de mayor reactividad puzolánica (Khan & Siddique, 2011), su adición está limitada por la norma europea (UNE, 2011) a un 10 %, pero ha resultado muy eficaz en cementos que contienen otras adiciones minerales con una cinética de reacción más lenta (GBFS, PFA y puzolanas naturales), lo que permite incrementar el porcentaje de estos MCS en los cementos (Damtoft et al., 2008). Según datos del 2006, la producción de SF no superó el millón de toneladas, lo cual constituyó solo el 0,03 % de la producción de cemento de ese año. Su disponibilidad también depende de su alto precio en el mercado internacional, que llega hasta los US\$ 800/t (Damineli & John, 2012), y de la localización de la industria que los genera, pues actualmente cerca del 65 % de la producción de silicio y sus ferroaleaciones se concentra en China (U.S., 2017).

Estas puzolanas por su alta demanda y su limitada disponibilidad se han visto reflejadas en el incremento de los precios en el mercado. Es por eso que los países subdesarrollados productores de cemento, han tenido que desarrollar otras soluciones para no verse obligados a importar los productos anteriormente mencionados. Las adiciones a base de desechos agroindustriales provenientes tanto de la producción de azúcar como de la producción de arroz han constituido una de esas alternativas ya que han demostrado tener una excelente reactividad puzolánica (Alakhras, 2006); donde la cáscara de arroz se identifica por su disponibilidad en grandes cantidades en varias partes del mundo, típicamente contiene un 90% de sílice y cuando es quemada produce bastante ceniza (una tonelada por cinco de cáscara), la desventaja de la cáscara de arroz consiste en que, para hacerla altamente puzolánica, es necesario tener bien controlada su quema, la temperatura no debe pasar de 700°C, si no la sílice se cristaliza y pierde su grado de reactividad (Action, 2010). El uso práctico de estos desperdicios agrícolas se ve limitado principalmente por los costos asociados a la transportación y el procesamiento. Por lo que la adición de las arcillas calcinadas (metakaolin) a la producción de cemento ha resultado ser una alternativa a tener en cuenta para países tanto industrializados como en vías de desarrollo, ya que estos materiales componen el 75% de la corteza terrestre (Alakhras, 2006). Los minerales arcillosos en su estado natural presentan muy baja reactividad, pero su estructura cristalina puede ser alterada o destruida por medio de un tratamiento térmico a temperaturas entre 700- 850 oC, dando lugar a puzolanas muy reactivas (L. M. Vizcaíno, 2014).

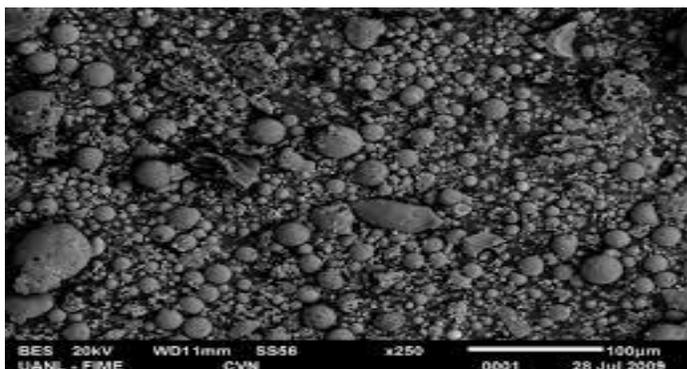


Figura 1.3. Micrografía (SEM) de una ceniza volante Fuente: Salazar, 2002.

Dado el incremento de la producción mundial de cemento se ha hecho necesario implementar nuevas técnicas de elaboración del producto para disminuir su costo y la contaminación ambiental que durante su producción se genera. Para solucionar este problema se han tomado distintas estrategias dentro de las que se encuentran la modernización tecnológica, el uso de combustibles alternativos y el empleo de materiales cementicios suplementarios (MCS) en sustitución del clínker; siendo esta última la opción más viable para la Industria cubana, pues requiere de menores inversiones a corto plazo. (A. Alujas, 2010); (Castillo, 2010); (Scrivener, 2008); (Fernández, 2013).

Puzolanas Naturales y sus orígenes.

Los materiales denominados puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico. Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación del polvo y “cenizas” volcánicas que, como materiales piroclásticos incoherentes procedentes de erupciones explosivas, ricos en vidrio y en estado especial de reactividad, son aptos para sufrir acciones endógenas (zeolitización y cementación) o exógenas (agilización), de las cuales las primeras son favorables y las segundas desfavorables. Por una continuada acción atmosférica (meteorización) se convirtieron en tobas, esto es en rocas volcánicas, más o menos consolidadas y compactas, cristalinas, líticas o vítreas, según su naturaleza. El origen volcánico de las puzolanas naturales es determinante de su estructura. La estructura de las rocas, que se han originado por el enfriamiento de grandes masas de lava que han fluido completamente, depende de la velocidad en que se ha producido el fenómeno. Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales (infusorios radiolarios) o plantas (algas diatomeas) (Guerra, 2015).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación. Los materiales puzolánicos naturales están constituidos principalmente por rocas eruptivas y en particular efusivas y volcánicas, y dentro de éstas, por extrusivas, salvo las de naturaleza orgánica que son de origen y formación sedimentaria (Guerra, 2015).

Causas de la actividad puzolánica.

La actividad puzolánica responde a un principio general. Dicho principio se basa en que la sílice y la alúmina, como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles. No pueden considerarse aparte las acciones de la sílice y de la alúmina, ya que la presencia de esta última favorece en gran medida la acción puzolánica, directamente por sí e indirectamente al implicar su presencia un mayor contenido de álcalis, que se fijan parcialmente en los nuevos productos resultantes de la reacción puzolánica, los cuales tiene el carácter de pseudogeles. El óxido de hierro se supone que actúa como alúmina, pero de una forma más atenuada y lenta. Las estructuras zeolíticas se atacan por la cal más rápidamente que las verdaderas puzolanas totalmente vítreas y la fijan en mayor cantidad que la correspondiente a un intercambio catiónico con álcalis, lo cual indica una ruptura de la estructura reticular y de los enlaces químicos, lo que da lugar a una participación de la sílice y de la alúmina, que es más fácil con las estructuras zeolíticas que en las vítreas.

En la actualidad, es también aceptada la clasificación basada en su origen (Massazza, 1976). En este sentido se clasifican en dos categorías fundamentales: aquellas que poseen origen natural y las artificiales creadas por el hombre. (Papadakis & Tsimas, 2002) y (Samanta & Chatterjee, 1981).

Evolución de los materiales cementicios suplementarios en Cuba.

Desde la época colonial en nuestro país se comenzaba a utilizar la roca zeolita como material de construcción en las edificaciones de la barriada del Vedado, como consecuencia de la crisis energética durante la Segunda Guerra Mundial. Las rocas zeolíticas de importancia industrial en Cuba data de la década del 70, donde Coutin y Brito publicaron los resultados de los estudios realizados durante varios años en Cuba oriental y central, y mencionaron la presencia de cuatro zeolitas: clinoptilolita, mordenita, heulandita y analcima y tres más: estilbita, thomsonita y laumontita rellenando vetillas, grietas y poros en rocas efusivas y piroclásticas. (Castillo, 2010).

A partir de 1972 se acometió la elaboración de un proyecto técnico-económico de búsqueda y explotación de zeolitas en Villa Clara y aunque a escala mundial no existía una metodología económica de evaluación de este tipo de yacimiento, en 1981 el colectivo de técnicos cubanos culminó el primer informe geólogo sobre reservas industriales y los recursos pronósticos. Esta determinación de reservas industriales, como tales, fueron las primeras que se calcularon en todo el campo socialista. Los yacimientos de zeolita cubanos son de alto rendimiento en clinoptilolita y modernita, llegando en algunos casos a más de 90% (Castillo, 2010) (Fernández, 2013).

En Cuba se conocen más de 25 yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales, distribuidas a todo lo largo y ancho del país. De acuerdo con datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales del Ministerio de la Industria Básica, estos yacimientos se encuentran distribuidos prácticamente en todo el territorio nacional: Pinar del Río, La Habana, Villa Clara, Cienfuegos, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y en Guantánamo. El periódico Juventud Rebelde en el artículo ("Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo," 2007) destaca que se han estudiado a profundidad 16 yacimientos que totalizan unos 20,9 millones de toneladas de recursos medidos, 69,95 millones de toneladas en recursos indicados y 214,61 millones de toneladas en recursos inferidos?

Existen experiencias de la explotación de fuentes de materiales puzolánicos en la isla, como las cenizas de bagazo y paja de caña para la fabricación de aglomerantes alternativos (F. Martirena, 2004). Las investigaciones llevadas a cabo por Fernández (2009), A. Alujas (2010), Castillo et al. (2010), reportan el potencial puzolánico que ofrece la activación de arcillas cubanas multicomponentes con bajos contenidos de caolinita para la fabricación de un aglomerante con rendimiento similar al cemento Portland. Sin embargo, los datos del Instituto de Geología y Paleontología consideran las reservas de arcillas caoliníticas como bajas, poco más de 65 MMt, pero su potencial no ha sido debidamente investigado, pues los cálculos han estado limitados a las características demandadas por las industrias de la cerámica y para la producción de cemento blanco (Batista, Coutin, & Mesa, 2013), que requieren de depósitos de arcillas de alta pureza de caolinita y/o bajo contenido de hierro.

Más reciente se ha reportado la activación térmica de arcillas multicomponentes y la producción de un aglomerante con solo 50 % de clínker mezclado con 30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza molida que mostró un comportamiento similar el cemento PP-35 y a menor costo que este (L. M. Vizcaíno, 2014). Es por ello que, el estudio de nuevas fuentes de materiales arcillosos con bajos contenidos de caolinita, material ampliamente diseminado y de menor competencia de utilización con otras industrias de mayor valor agregado, resulta una importante alternativa para suplir la demanda cemento, disminuir sus costos, mitigar las emisiones CO₂ de su producción, y en la medida de lo posible aprovechar las tecnologías existentes sin grandes inversiones. Extender estos estudios permite, además, tener un mayor grado de conocimiento de las reservas existentes en todo el país, vinculado particularmente al empleo de estos materiales arcillosos con características adecuadas para su uso como materiales cementicios suplementarios (L. M. Vizcaíno, 2014).

Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario.

Características generales, composición química, estructura y clasificación.

Actualmente existe un creciente interés en el empleo de las arcillas activadas en las investigaciones de nuevos materiales cementicios suplementarios. Por su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas una vez que son estructuralmente modificadas, estas representan una atractiva alternativa como fuente de puzolanas. Bajo el término arcillas se engloba un vasto grupo de minerales cuyos elementos predominantes son el Si, el Al y el O, y cuyas propiedades fisicoquímicas derivan de su composición química, de su particular estructura interna en forma de capas (filosilicatos) y de su tamaño de grano muy fino (Brown, 1961). Como consecuencia de estos factores, las arcillas presentan un valor elevado del área superficial y una gran cantidad de superficie activa con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades geológicas en suspensiones acuosas (Pusch, 2006).

El término arcilla puede ser también empleado para expresar un criterio granulométrico que designa a los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 5 μm . Este criterio no es adecuado desde el punto de vista mineralógico, pues presupone que incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos como cuarzos y feldespatos podrían ser considerados arcillas cuando sus tamaños son lo suficientemente pequeños. En dependencia de las condiciones de intemperismo y de la composición química de la roca original, varios minerales arcillosos son favorecidos en su formación. Dentro de ellos, los más comunes son la caolinita, que se forma con la unión de una capa tetraédrica y una octaédrica, y si se unen dos capas tetraédricas alterando con una octaédrica se da lugar a la formación de un mineral tipo esmectitas (montmorillonita), (Brindley & Brown, 1981) otros son la illita, clorita y palygorskita-sepiolita. Las illitas y las cloritas son formadas predominantes en climas fríos o templados, las esmectitas en climas

mediterráneos y zonas tropicales con diferencias entre las estaciones, mientras que la formación de caolinita es más común bajo condiciones húmedas tropicales y ecuatoriales (Brindley & Brown, 1981).

Clasificación de los minerales arcillosos más comunes.

Si bien la distribución granulométrica juega un importante papel en algunas propiedades de las arcillas, como su capacidad para formar suspensiones coloidales y manifestar un comportamiento plástico cuando son mezcladas con agua, es su particular estructura en forma de láminas lo que define su comportamiento y reactividad (Brown, 1961).

Las arcillas están ampliamente distribuidas como constituyente esencial de los suelos y sedimentos, debido a que son mayoritariamente los productos finales de los distintos procesos de degradación de los aluminosilicatos formados a mayores presiones y temperaturas y que constituyen más del 70% de la corteza terrestre. Cuando están presentes en gran cantidad se presentan bajo la forma de rocas arcillosas. La roca arcillosa puede a su vez subdividirse en la fracción arcillosa, que contiene a las fases minerales que responden a las características estructurales de las arcillas, y la fracción no arcillosa, constituida generalmente por minerales con una composición química similar a la de las arcillas, pero con una estructura cristalina diferente (Brown, 1961).

Tabla 1.4. Minerales con una composición química similar a la de las arcillas, pero con una estructura cristalina diferente (Brown, 1961).

Tipo de capa	Grupo	Carácter octaédrico	Carga (z)	Minerales más representativos
1:1	Caolinita	Dioctaédrica	~0	Caolinita, dickita, nacrita, halloysita
2:1	Esmectita	Dioctaédrica	~0,2 – 0,6	Montmorillonita, nontronita, beidelita, volkonskoita
		Trioctaédrica		Hectorita, saponita, sauconita, stevensita, swinefordita
	Vermiculita	Dioctaédrica	~0,6 – 0,9	Vermiculita dioctaédrica
		Trioctaédrica		Vermiculita trioctaédrica
	Illita	Dioctaédrica	~0,6 – 0,9	Illita, glauconita
	Mica flexible	Dioctaédrica	~0,6-1,0	Celadonita, muscovita, paragonita
		Trioctaédrica		Biotita, lepidolita, phlogopita
	Mica frágil	Dioctaédrica	~1,8-2	Margarita
		Trioctaédrica		Anandita, bityita, clintonita, kinoshitalita
	Clorita	Dioctaédrica	Variable	donbasita
Trioctaédrica		baileycloro, chamosita, clinocloro, nimita, pennantita		
Paligorskita – sepiolita	---	Variable	---	

Activación térmica de las arcillas.

Las arcillas no pueden ser empleadas como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. Su estructura en forma de capas propensas al deslizamiento y al agrietamiento, y la capacidad para inmovilizar grandes cantidades de moléculas de agua en su superficie son factores que pueden afectar de forma negativa la resistencia mecánica y la reología en un material cementicio, mientras que su alta capacidad de adsorción de iones puede modificar la composición química de las soluciones acuosas, afectando las propiedades tecnológicas del hormigón (Muller, 2005).

Teniendo presente las características antes mencionadas, se han obtenido evidencias de cierta reactividad puzolánica de arcillas no calcinadas en combinación con cal, pero el rango en que las reacciones se desarrollan es

demasiado lento y las resistencias no son lo suficientemente altas para que estas sean consideradas como MCS por la industria del cemento (Muller, 2005); (He, Osbaeck, & Makovicky, 1995). Para cumplir con las normativas actuales de resistencia a edades tempranas, demanda de agua y durabilidad consideradas para la fabricación de cemento, las arcillas deben ser modificadas estructuralmente (activadas) para aumentar su reactividad, rendimiento y ser empleadas como materiales puzolánicos.

El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales es la activación térmica la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Shi & Day, 2001). Durante la calcinación de las arcillas pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250 °C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400 °C y los 950 °C ocurre la remoción de los OH- estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Heller, 2006). Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse estructuralmente durante el proceso de desoxhidrilación. Para fases con un bajo grado de orden estructural la reactividad puzolánica se alcanza más rápido y a menores temperaturas que para fases minerales del mismo tipo, pero con un alto grado de orden en su estructura (He, Makovicky, & Osbaeck, 1996), (Samet, Mnif, & Chaabouni, 2007). Independientemente del tipo de mineral arcilloso, se ha observado que alrededor de los 950 °C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. La presencia de impurezas de tipo no arcilloso como cuarzo y feldespatos tienden a reducir la temperatura a la cual ocurre este fenómeno, acortando el intervalo para el cual es posible la activación térmica de la

arcilla. Por tanto, la temperatura de calcinación a la cual se obtiene la mayor reactividad puzolánica debe situarse dentro del intervalo que se extiende entre el final de la desoxhidrilación y el inicio de la recristalización, fenómenos que delimitan, desde el punto de vista estructural, el intervalo dentro del cual una fase arcillosa puede ser convertida en un material puzolánico mediante activación térmica (He et al., 1995).

Evaluación de la reactividad de los productos de calcinación.

Reacción puzolánica.

Las reacciones puzolánicas ocurren bajo las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido al igual que en el proceso de hidratación del cemento. La reacción puzolánica es lenta en comparación con la reacción de hidratación del cemento, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos. Diversos factores pueden modificar la actividad puzolánica de un material, estos factores pueden ser de tipo interno o externo (Costoya, 2008). Dentro de los factores internos que más influyen en la actividad puzolánica se encuentran la composición química y mineralógica, finura, morfología interna y grado de desorden estructural. Como factores externos se encuentran la humedad, la temperatura, así como la presencia de aditivos (Castillo et al., 2010).

A continuación, se representa de manera simplificada una reacción puzolánica, tomando como material base el metacaolín: $AS_2 + 5CH + 3H \rightarrow C_4AH_{13} + 2CSH$ (Metacaolín) (Portlandita) (Agua) (Tetracalcioaluminato hidratado) (Silicato de calcio hidratado) $AS_2 + 6CH + 9H \rightarrow C_3AH_6 + 2CSH$ (Metacaolín) (Portlandita) (Agua) (Tricalcioaluminato hidratado) (Silicato de calcio hidratado) $AS_2 + 3CH + 6H \rightarrow C_2ASH_8 + CSH$ (Metacaolín) (Portlandita) (Água) (Stratlingita o gehelenita) (Silicato de calcio hidratado) (Castillo et al., 2010).

Los C-S-H formados durante la reacción puzolánica presentan una composición similar a los formados durante la reacción de hidratación del cemento, aunque la

relación Ca/Si es generalmente más baja. En el caso de las puzolanas naturales o arcillas calcinadas con apreciables cantidades de alúmina reactiva, la presencia de esta tiende a favorecer la formación de fases de aluminato de calcio, así como también la sustitución parcial del Si por Al en la estructura de los C-S-H, incrementando la relación Al/Ca en esta fase (Fernandez, 2008). Esta reacción se ve limitada por la cantidad de hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del CPO, limitando el volumen de sustitución del Clinker a valores aproximados de un 30 % en el caso de las arcillas calcinadas.

La formación de productos adicionales de hidratación a partir del uso de las puzolanas como adiciones al cemento Portland permite mantener o mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón (en función de la reactividad del material utilizado y de su proporción en el aglomerante) a partir del refinamiento de la estructura de poros en el sistema. Adicionalmente, se mejoran la compacidad e impermeabilidad de la matriz del hormigón, lo que aumenta la resistencia y durabilidad ante el ataque de sustancias químicas agresivas. Finalmente, las adiciones minerales activas ayudan a disminuir el calor de hidratación del cemento, y disminuyen con esto las posibilidades de fisuración por efecto contracción. Desde el punto de vista económico, la sustitución de Cemento Portland por adiciones minerales permite obtener grandes ahorros energéticos y materiales en la producción de cementos y hormigones, más aún cuando las adiciones sean subproductos o desechos de otras producciones industriales, como es el caso de las cenizas volantes y los residuos agrícolas. Desde el punto de vista ecológico, el empleo de adiciones minerales activas puede ser una de las vías más importantes para contribuir a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la industria del cemento al disminuir el contenido de Clínter en el aglomerante (A. Alujas, 2010).

Métodos para la evaluación de la reactividad puzolánica.

Los diferentes métodos empleados para la medición de la reactividad de las puzolanas, se han clasificado en métodos directos e indirectos. Los métodos indirectos son aquellas técnicas que detectan los cambios en las propiedades

físico – químicas asociados al progreso de la reacción puzolánica, como la contracción química, la calorimetría isotérmica y la determinación de la resistencia mecánica y la porosidad en morteros y hormigones. A diferencia de estos métodos, los métodos directos están relacionados con la medición directa del grado de reacción puzolánica, fundamentalmente a partir del consumo de portlandita mediante diferentes técnicas instrumentales como el Análisis Termogravimétrico, la conductimetría y la Difracción de Rayos X (Donatello, Tyrer, & Cheeseman, 2010). En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos, pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o Ca (OH)₂-Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones (Pane & Hansen, 2005).

La determinación del índice de reactividad puzolánica mediante ensayos de resistencia a la compresión en morteros normalizados es, sin dudas, el método indirecto más extendido para la evaluación de la reactividad puzolánica y se encuentra referenciado en los documentos normativos de diferentes países (C311/C311M, 2016). Su principal ventaja consiste en la estrecha relación de sus resultados con el comportamiento de las puzolanas en la práctica, además, existe una dependencia de la relación agua/aglomerante para la misma consistencia, y la relación y tipo de MCS utilizado como sustituto en la mezcla modifica el contenido en agua en el mortero (Gava & Prudencio, 2007), (Pourkhorshidi, Najimi, Parhizkar, Jafarpour, & Hillemeier, 2010). Por tanto, este ensayo no arroja una información completa que permita entender la reacción puzolánica y por ello no pueden ser utilizados como la única manera de evaluar la reactividad puzolánica. Además, se requiere largo tiempo para su evaluación.

La hidratación mediante calorimetría ha cobrado mucha importancia en los últimos años (Pane & Hansen, 2005), en la cual se asume que la cantidad de calor total acumulado es directamente proporcional a la cantidad de productos de hidratación generados y puede tomarse como una medida del grado de reacción alcanzado por el sistema (A. Alujas, Fernández, Quintana, Scrivener, & Martirena, 2015), pero su aplicación está limitada a materiales de la misma composición. Sobre la

base de esta técnica ha sido desarrollado el método denominado ensayo o protocolo R³ por sus siglas en inglés (Rapid, Relevant, Reliable) fue desarrollado por un equipo conjunto de investigadores del Laboratorio de Materiales de Construcción del Instituto Federal Suizo de Investigaciones de Lausana, Suiza, y del Centro de Estudios de Química Aplicada de la UCLV “Marta Abreu” de las Villas (Avet, Snellings, Alujas, Ben, & Scrivener, 2016). Este ensayo ha sido validado para un numeroso grupo de arcillas calcinadas y se basa en medir el calor total liberado por la reacción puzolánica en un medio que simula el entorno químico de la arcilla calcinada en la solución de poros de un sistema mezclado cemento – puzolana, a partir de una mezcla de Ca (OH)₂, arcilla calcinada y LC₃, a la cual se le adicionan también álcalis y sulfatos. El calor liberado durante un período de tiempo determinado es directamente proporcional a la reactividad puzolánica de los productos de calcinación. Los resultados guardan una correlación lineal con los ensayos normalizados de resistencia a la compresión en los sistemas mezclados. (Avet, Snellings, Alujas, Ben, & Scrivener, 2016).

Otro método es la determinación de la solubilidad alcalina de las especies ricas en sílice y alúmina (He et al., 1995); (He et al., 1996); (Panagiotopoulou, Kontori, Perraki, & Kakali, 2007). Los valores de aluminio y silicio disueltos se toman como criterio de evaluación de la reactividad puzolánica del material. Es un método rápido y sencillo, que correlaciona muy bien con la solubilidad particularmente de aluminio y silicio. En la mayoría de los casos, la relación entre los resultados obtenidos en las técnicas químicas y mecánicas ha sido pobres, por lo cual, ha sido necesario el uso combinado de varias técnicas, ofrece mayor información para poder comprender los fenómenos de actividad puzolánica.

Potencialidades de utilización de las arcillas calcinadas como MSC en Cuba.

En Cuba a lo largo de los años se han venido efectuando diferentes investigaciones sobre las potencialidades de utilización de las arcillas caoliníticas, desde la década del 70, con la elevación del conocimiento geológico del territorio nacional y las investigaciones a nivel de laboratorio; semi-industriales e

industriales en Cuba, se han validado las puzolanas naturales como las tobas, para producir aglomerantes tales como el cemento romano y adiciones o mezclas al cemento Portland (F. Martirena, 2004).

Es conocido a nivel mundial el uso del metacaolín como material cementicio suplementario. El inconveniente del uso de metacaolín se centra en la necesidad de arcillas puras en mineral caolín para su producción. Formas viables de disminuir estas desventajas sería el empleo de arcillas de más bajo grado de pureza. En trabajos anteriores desarrollados en Cuba, como parte de proyectos del Centro de Investigación y Desarrollo de estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Martha Abreu de Las Villas” en la autoría de (A. Alujas, 2010), (Castillo et al., 2010) y (F. Martirena, 2011), se han demostrado las potencialidades de activación térmica de arcillas cubanas de bajo grado para la obtención de un material puzolánico de alta reactividad y con ella producir materiales puzolánicos con un comportamiento similar al producto industrial conocido como metacaolín, que es producido con caolines de alta pureza.

En Cuba se encuentran reportados cerca de 45 depósitos donde hay presencia de arcillas caoliníticas con reservas inferidas en alrededor de treinta millones de toneladas, distribuidas generalmente en la región occidental y central. De este volumen, cerca de catorce millones se encuentran concesionados para su explotación a diferentes industrias. Las reservas de arcillas caoliníticas pueden incrementarse ostensiblemente si también se tienen en cuenta otros yacimientos arcillosos donde esta fase mineral está presente en bajas o moderadas cantidades. La mayor cantidad de depósitos de caolín se encuentra en el occidente del país, particularmente en la Isla de la Juventud y Pinar del Río; se ubican también depósitos con diferentes grados de interés en Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti-Spíritus y Camagüey (Igp, 2010). En el resto del territorio nacional, según la Oficina Nacional de Recursos Minerales, aparecen puntos y manifestaciones de forma diseminada. Existen muchos otros yacimientos, afloramientos y puntos de interés que necesitan un mayor grado de estudio, los de

mayor interés para la producción de puzolanas de alta reactividad son las de composición rica en caolín como mineral arcilloso. (Igp, 2010).

La necesidad de nuevas fuentes de MCS surge de la escasez relativa de los MCS clásicos (escoria, ceniza volante) o de su localización (puzolanas naturales en regiones muy alejadas) que ocasiona un importante consumo de combustible y elevado costo, debido al transporte. (A. Alujas, 2010), (Castillo et al., 2010) y (F. Martirena, 2011).

Las ventajas que presentan las arcillas calcinadas como fuente de puzolanas, unido a las deficiencias que se presentan en la producción de cemento a nivel nacional las hace poseer la mayor perspectiva de utilización para la producción de materiales cementicios suplementarios que permita orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso, no solo su empleo como adición puzolánica al CPO, sino también su empleo en la elaboración de nuevas fórmulas aglomerantes (L. M. Vizcaíno, 2014); (F. Martirena, 2004).

De mayores perspectivas, por su amplia disponibilidad en Cuba, son las tobas vítreas. Estudios realizados por Almenares (R.S. Almenares-Reyes, 2011) en la región nororiental de Cuba, de un grupo de tobas vítreas para su utilización como puzolana natural, demostraron que la baja reactividad puzolánica de este material limita los niveles de sustitución por encima de 15 %, y su empleo como materia prima en otras aplicaciones industriales limita su uso en el futuro como MCS.

Existen otras experiencias en la explotación de otras fuentes de materiales puzolánicos en la isla, como las cenizas de bagazo y paja de caña para la fabricación de aglomerantes alternativos (F. Martirena, 2004), pero estas fuentes presentan una disponibilidad limitada y solo una pequeña parte de estos residuos agrícolas cumple con los requerimientos establecidos para ser utilizados como MCS.

El surgimiento de la nueva familia de cementos CL3 permite incrementar los niveles de sustitución de clínker y mantener o superar el comportamiento del

cemento P-35, lo cual permite compensar los costos de la calcinación, a la vez que disminuye el impacto ambiental y sus costos de producción con respecto al CP (F. Martirena et al., 2016), (Sánchez et al., 2016), (L. M. Vizcaíno, 2014), y (L. Vizcaíno, Sánchez, Pérez, Damas, & Scrivener, 2015).

La prueba de producción industrial del cemento ternario de base clínker – arcilla calcinada – caliza, que tuvo como escenario la Fábrica de Cemento Siguaney en el 2013, convirtió a Cuba en la primera en producir este tipo de la aglomerante a escala industrial. Este sistema cementicio ternario, con alto nivel de sustitución de clínker, alcanza resistencias mecánicas a edades tempranas mayores que los cementos mezclados producidos tradicionalmente con otros tipos de puzolanas y alcanzan resistencias mecánicas superiores a los 35 MPa a los 28 días (L. M. Vizcaíno, 2014).

Los resultados han mostrado que los hormigones elaborados con este aglomerante son considerablemente menos permeables que aquellos realizados con CP, y aunque muestran una mayor tendencia a la carbonatación en comparación con el CP, la profundidad de carbonatación permanece por debajo del recubrimiento mínimo establecido en las normativas y no afectan la resistencia. El comportamiento ante la penetración de cloruros de este cemento ternario es diez veces superior que el cemento Portland usado como referencia, lo cual se atribuye a una estructura de poros más refinada y mayor tortuosidad. (L. M. Vizcaíno, 2014) y (Díaz et al., 2015).

Actualmente se realizan investigaciones para continuar profundizando en sus aplicaciones en la industria del cemento cubano, como puzolanas de alta reactividad teniendo en cuenta los minerales arcillosos que la componen y sin importar su localización geográfica sustitución de Clinker (A. Alujas, 2010).

CAPÍTULO I: CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DE LA REGIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO

1.1. Introducción.

En el presente capítulo se exponen las principales características físico – geográficas y económicas de la región del área en estudio.

1.2. Características físico- geográficas

1.3 Ubicación geográfica de la región

El área de estudio se encuentra enmarcada en zonas del municipio de Moa el cual se encuentra situado en el extremo este de la provincia de Holguín, en Cuba. Es esencialmente montañoso con una estrecha franja semi llana en la costa Atlántica limitando al norte, donde se asientan los principales conglomerados poblacionales. Su geografía se extiende en todo el macizo montañoso Sagua-Baracoa que forma parte del Parque Nacional Alejandro de Humboldt, rico en fauna y flora con numerosas especies autóctonas. En este hermosísimo paisaje, cuya altura mayor es el pico El Toldo con 1 117 metros de altura, están enclavados 4 asentamientos poblacionales rurales, los cuales tienen como actividad económica fundamental el cultivo del café, la silvicultura y la minería; en el municipio se encuentran los principales yacimientos de minerales lateríticos con altos contenidos de hierro, níquel, cobalto y otros minerales, en la que se ha desarrollado una poderosa industria niquelífera con un volumen productivo anual de más de 65 000 toneladas. La cabecera municipal es la ciudad de Moa clasificando en la categoría de ciudad de segundo orden conforme a la Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI, 2015)

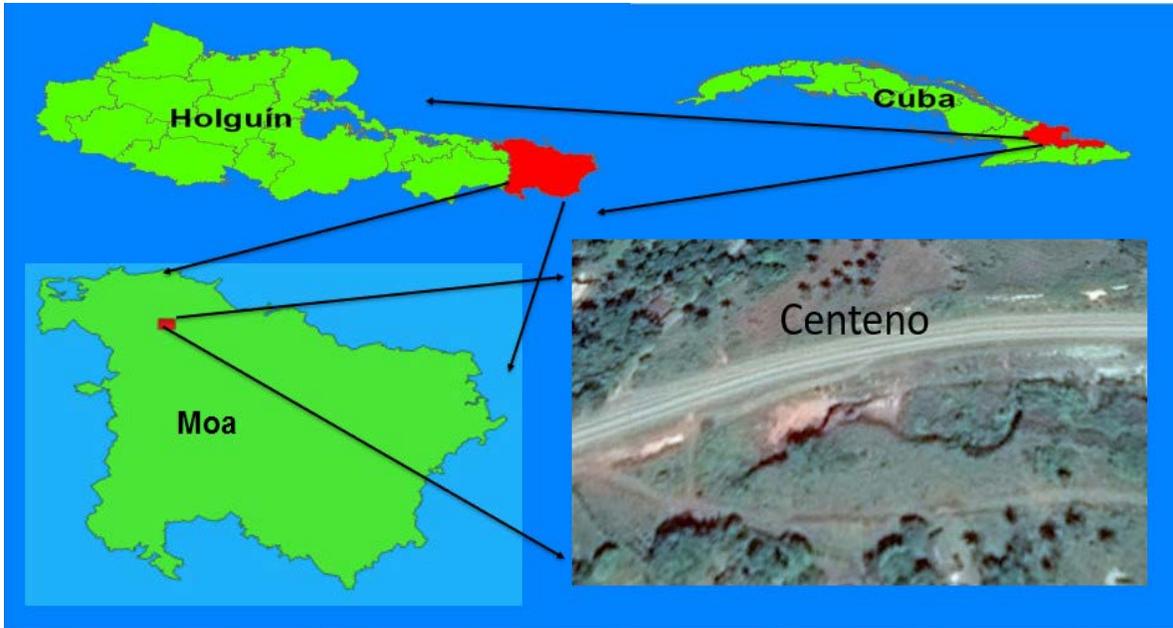


Figura 1.4. Mapa esquemático de ubicación geográfica.

1.4. Relieve

Es mayormente montañoso dado que Moa se encuentra situada en medio del Sistema Montañoso Nipe-Sagua-Baracoa. Se destacan algunas alturas superiores a los 1000 metros, la mayor de ellas es el pico El Toldo, en las cuchillas de Moa, con 1170 metros sobre el nivel del mar, espacio de interesantes variedades de helechos.

La franja costera tiene una profundidad de unos mil metros, llana y en ocasiones con ligeras alturas. Esa zona es seguida por un sistema pre montañoso que se prolonga hasta unos seis a diez kilómetros al sur de la costa con alturas medias entre 200 y 500 metros. Sus principales elevaciones son el [Cerro de Miraflores](#) al oeste, las minas de la fábrica [Pedro Sotto Alba](#) y las alturas de [Cayo Guam](#).

La otra característica del territorio es la parte montañosa, con alturas entre 500 y más de 1000 metros, que incluyen las Cuchillas de Moa, Calentura, Farallones y las de Gran Tierra.

La zona montañosa del territorio alcanza 363 km², el 50 % del total, se encuentra dentro del Plan Turquino y una gran parte de ella se encuentra dentro del Parque Nacional Alejandro de Humboldt, Patrimonio de la Humanidad.

1.5. Clima

Las condiciones climáticas se caracterizan por un elevado nivel de precipitaciones durante el año. El clima es tropical, este se ve influenciado por la orografía. Las barreras montañosas del grupo Sagua - Baracoa sirven de pantalla a los alisios del noreste, los cuales provocan la ocurrencia de abundantes lluvias en la parte norte del municipio Moa.

1.6. Humedad relativa

La humedad relativa de la zona es alta debido a la exposición marítima del territorio, incluyendo en este aspecto a las precipitaciones, las que son abundantes en todo el año. Los meses que poseen los mayores valores se ubican en noviembre-abril, alcanzándose los valores máximos de diciembre a enero, lo cual se debe al ascenso orográfico o forzado del viento que favorece las altas precipitaciones al inicio y final del período de transición verano - invierno. La humedad relativa media más alta se alcanza en el horario de la mañana (7:30AM) y es del 90 al 95 % y la más baja ocurre en el horario de la tarde (1:30PM) siendo de 70 al 75 %.

1.7 Red hidrográfica

La red hidrográfica es abundante, sobre todo al este, con ríos de mediano caudal como el Potosí, Jiguaní, Quesigua y Cayo Guam, que corren entre las montañas de abundante vegetación, lo que hace que sus aguas sean siempre de una temperatura agradable para los bañistas y campistas. Algunos tienen bellísimas cascadas en su recorrido al mar. Las costas alcanzan una longitud de 50,1 kilómetros, cuenta con sólo un área de playa, Cayo Moa. En toda la costa sólo existen pequeños espacios con posibilidades de usarse para el disfrute de la población.

El municipio cuenta con la Bahía de Moa donde se desarrolla la actividad portuaria de gran importancia económica en la importación y exportación de mercancías tanto para la industria como para el resto de la economía. Esta instalación portuaria ampliada en su objeto social podría aportar a la economía holguinera y del país sustanciales ahorros de combustible y otros recursos, ya que se utilizaría, además del sistema de la Industria del Nique para la importación de mercancías para toda la parte norte de esta región. También tiene enclavado en su litoral un puerto pesquero con un alto potencial por explotar.

La [presa Nuevo Mundo](#), nombre con el que se conoce la presa de Moa es una de las más importantes de la provincia y quizás única de su tipo por haberse construido entre montañas y a gran altura sobre el nivel del mar.

Estos ríos desembocan en el océano Atlántico formando deltas cubiertos de mangles, apreciándose en los mismos una zona de erosión y otra de acumulación. Los ríos forman terrazas al llegar a la zona de pie de monte y presentan no pocos meandros, sus orillas son abruptas y erosionadas en la zona montañosa mientras que en las partes bajas son llanas y acumulativas. Son alimentados por las precipitaciones atmosféricas teniendo como origen las zonas montañosas del grupo Sagua - Baracoa. Generalmente sobrepasan los 1.5 m/s de velocidad, los gastos oscilan entre 100 y 400 L/s, en periodo de estiaje y hasta más de 300 m³/s durante avenidas en períodos húmedos. Se puede decir que el nivel de los ríos cambia en dependencia de las precipitaciones, los niveles más bajos se observan en el período de seca, cuando los ríos se alimentan solamente de aguas subterráneas, correspondiente a los meses de julio a septiembre y los más elevados en la época de lluvias máximas, la cual está comprendida de octubre a enero. Producto de que los ríos anteriormente mencionados conforman las reservas naturales del municipio, los autores de esta investigación consideran necesario, dar una breve reseña de sus características generales.

reforestadas y sembradas con coníferas y latófilas como: caoba, cedro, majagua, ocuje, eucalipto y otras.

Los pinares de Moa son los de mayor endemismo en Cuba (70 %), están formados principalmente por el Pino de [Mayarí](#) o de Moa (*pinus cubensis*), la *dracaena cubensis*, la palma miraguano, jazmín de sabana y otras. En Moa se distinguen dos tipos de charrascales: los que se encuentran cerca de las costas y los charrascales de las alturas. Los primeros alcanzan una altura de cuatro a seis metros -con palmas- y tienen un 85 % de endemismo.

Los charrascales de altura son arbustos de 2 metros de altura, se pueden encontrar pinos de baja altura y de ramas extendidas, propio de estas alturas, con un 70 % de endemismo.

Por estas características específicas, la región presenta un alto índice de endemismo que abarca cerca de 200 especies, muchas de ellas exclusivas. La zona del [Parque nacional Alejandro de Humboldt](#) se destaca en cuanto a la naturaleza endémica.

La vegetación presente en el área es variada, encontrando formaciones vegetales tales como: pinares, bosque en galería, arbustivo xeromorfo subespinoso (charrascal) y vegetación secundaria. En estos suelos se desarrolla el pino *cubensis* (pino de Moa) y plantas latifolias, muchas de ellas endémicas de esta región, formando bosques típicos sobre las laderas, las cuales alternan de pinares a bosques latifolios a una mezcla de ambos y de nuevo a pinares en forma cíclica, (Téllez Salazar,2015).

En la parte Norte (zona costera) es predominante el mangle rojo, en ocasiones mangle prieto, patabán y llana. En costas bajas cambia a saladares y prados de saladares.

1.9 Demografía

En ella se encuentra también una exuberante vegetación que se ubica hacia la zona montañosa convirtiéndose en un importante hábitat de diferentes especies muchas de ellas como jutía, el gavilán caguarero, el almiquí, polímitas de brillantes colores y bellas mariposas, son partes de una fauna única en el país por lo que sus bosques son una importante reserva natural. La población a finales del año 2014 era de 75 202 habitantes, que lo sitúa en el cuarto lugar dentro de la provincia, con una densidad poblacional de 98,1 habitantes por kilómetro cuadrado, el sexto lugar a nivel provincial en este indicador. El grado de urbanización es el 83,6 por ciento, el tercero después de Holguín y Antillas. Por sexo el índice de masculinidad es de 988 por mil hembras. Tiene una tasa de crecimiento anual de -0,1 por mil habitantes.

Sus dos fábricas de [níquel](#) son la principal riqueza económica con un importante aporte al [PIB](#) de [Cuba](#) siendo uno de los primeros productores del mundo. Sus fábricas: [Ernesto Che Guevara](#) y [Pedro Sotto Alba](#) lideran la producción metalúrgica.

1.10 Desarrollo económico de la región.

La base económica fundamental depende de la minería. En los inicios de la revolución esta actividad fue sabotada por el imperialismo pero la labor del ingeniero cubano Demetrio Presilla López dio al traste con estas maniobras y logró hacer funcionar la industria niquelífera. Luego el estado cubano apoyado por el antiguo campo socialista llevó a cabo un gigantesco plan de inversiones que consistía en la construcción de otras dos plantas procesadores de Níquel, de ellas se terminó una, además de la industria mecánica de apoyo a la minería para lo que se construyó una moderna fábrica con ese objetivo.

Se amplió por completo la superestructura de la industria incrementándose la capacidad del puerto y en general todo el sistema de transportación del mineral y otros productos vinculados al proceso industrial del Níquel. Se hicieron inversiones

considerables en la industria del níquel. Como parte de esa modernización se instaló un aeropuerto y se construyeron carreteras, se destacan entre ellas la que une a Moa con Baracoa y a Sagua de Tánamo.

Económicamente está dentro de las más industrializadas del país; cuenta con dos plantas procesadoras de menas de níquel actualmente en producción, la Empresa Comandante Ernesto "Che" Guevara y la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa Níquel SA, con capacidades de diseño original de 30000 y 24000 t de concentrado de Ni+Co al año respectivamente.

1.11 Características geológicas del territorio.

La geología de la región se caracteriza por una gran complejidad condicionada por la variedad litológica presente y los distintos eventos tectónicos ocurridos en el paso del tiempo geológico, lo que justifica los diferentes estudios y clasificaciones realizadas, basadas en criterios o parámetros específicos.

La faja Mayarí-Baracoa a su vez la divide en tres macizos: Mayarí-Cristal, Sierra del Convento y Moa-Baracoa, el área de estudio se encuentra en el Macizo Moa-Baracoa localizándose en el extremo oriental de la Faja Mayarí-Baracoa. Ocupando un área aproximada de 1 500 km² donde se presenta un gran desarrollo de los complejos ultramáfico, máfico y vulcano-sedimentario mientras que el complejo de diques de diabasas está muy mal representado, apareciendo las diabasas descritas en la región en forma de bloques tectónicos incluidos en los niveles de gabros, sobre todo en la parte superior del complejo cumulativo. Se estima un espesor de aproximadamente 1000 metros para el complejo ultramáfico y 500 metros para el de gabros, mientras que para el complejo vulcano-sedimentario se ha estimado un espesor de 1200 metros.

Estas se describen según la información del Mapa esquemático geológico del municipio de Moa, (ver figura 2).

1.12 Estratigrafía.

En 1989, F. Quinta en su según ocho asociaciones las cuales se mencionan a

1. (AEF) del Arco Insular \
2. (AEF) del Complejo Ofic
3. (AEF) del Arco Insular \
4. (AEF) de la Neoplatefor

Para la realización de la explica el origen y evoluci plataformas, las etapas e cada estadio. A continu

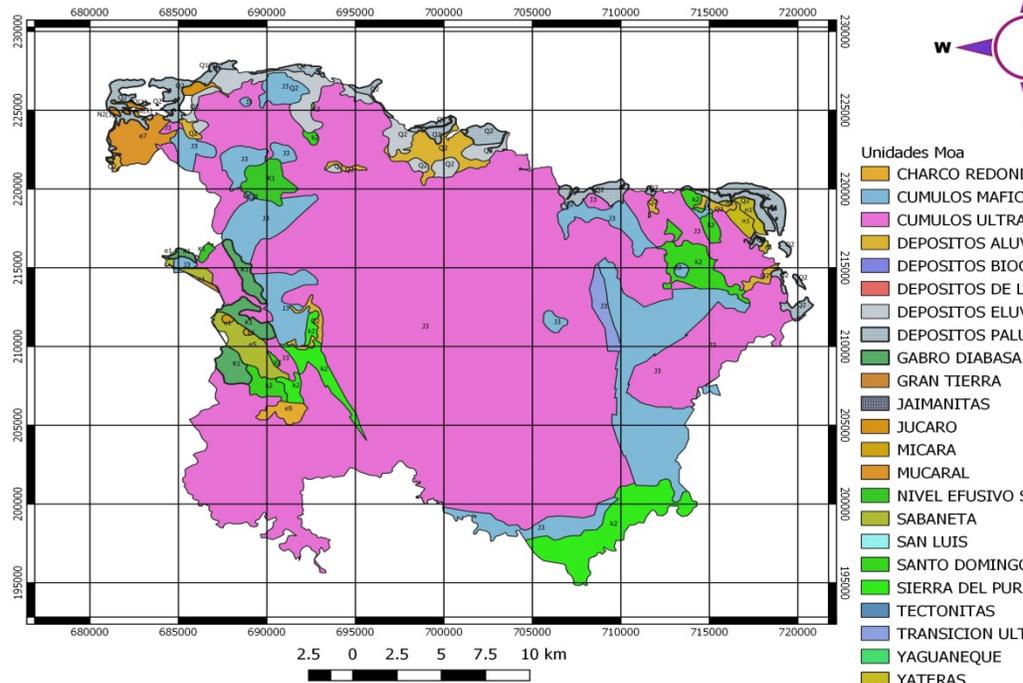
Estructuro- Formacionales (AEF) que se desarrollan en la región

1. AEF del Arco Insular Volcánico del Cretácico

indiferenciado. Probablemente pre-Coniaciano. Estas secuencias compuestas por tobas de diferentes tipos, basaltos, basaltos-andesitas y otras rocas. Esta AEF está bien representada en la región por la Formación Santo Domingo.

- **AEF del Arco Insular Volcánico del Cretácico**

En la región existe un amplio desarrollo de las secuencias volcánicas y vulcanógenas-sedimentarias del Cretácico Inferior pre-Aptiano-Cretácico Superior indiferenciado. Estas secuencias compuestas por tobas de diferentes tipos, basaltos, basaltos-andesitas y otras rocas. Esta AEF está bien representada en la región por la Formación Santo Domingo.



Formación Santo Domingo:

Única representante del Arco Volcánico del Cretácico en el área, está constituida por tobas, lavas, conglomerados, aparición de pequeños pórfidos dioríticos, andesitas y diabasas. Se incluye además en esta formación las calizas pizarrosas bien estratificadas y muy plegadas de color grisáceo. Las tobas ocupan más del 50% de la formación, apareciendo en la parte superior preferentemente, siendo comunes las variedades ristolovitroclásticas y vitroclásticas. Las lavas aparecen en ocasiones con textura amigdaloidal, predominando las variedades porfidíticas, yaciendo en forma de mantos interestratificados casi concordantes con las tobas. A menudo, junto con las lavas se observan aglomerados de composición dacítica y andesítica, muy alterados. Se le asigna una edad Cretácico Aptiano-Turoniano.

- **AEF del Complejo Ofiolítico**

Las rocas que predominan son las ultramáficas que aparecen serpentinizadas en mayor o menor grado, asociadas a gabros y diabasas, que en su conjunto forman la Asociación Ofiolítica.

Los contactos observados con las estructuras circundantes son tectónicos. Estas estructuras son complicadas debido al clásico emplazamiento que presentan, estando afectadas por dislocaciones plicativas y disyuntivas.

En Cuba, así como en el resto del mundo las ofiolitas constituyen parte de la corteza oceánica y participan en el emplazamiento de las rocas ultramáficas en estado frío. Los complejos que se mencionan a continuación son representativos de las secuencias pertenecientes a la asociación ofiolítica. Las secuencias de la asociación ofiolítica se encuentran representadas por los siguientes complejos:

1. Complejo Ultramáfico.
2. Complejo Acumulativo Máfico.
3. Complejo de Diques paralelos o Diabasas.

Complejo Ultramáfico: composición heterogénea, con gran predominio de las harzburgitas y en menor grado dunitas; además se han descrito dunitas plageoclásticas, wherlitas, iherzolitas y piroxenitas (Guild, 1947; Ríos y Cobiella,

1984; Heredia y Terepin, 1984; Fonseca et al, 1989). Lo que estos autores denominan dunitas plagioclásicas pudieran considerarse troctolitas. La mayoría de los trabajos diferencian en el complejo ultramáfico niveles de acumulado. Proenza (1997), considera todas las rocas ultramáficas presentes como restos litosféricos de mantos, aunque según otros especialistas (Quintas y Rodríguez A.) consideran que solo corresponden al manto la zona de tectonitas, puesto que las rocas del complejo cumulativo, pertenecen a la corteza. En el área las harzburgitas son las rocas dentro de la Asociación Ofiolítica, mayormente distribuidas, cubiertas por una potente corteza laterítica, todas estas rocas poseen diferente grado de serpentización.

Complejo Máfico: está representado de abajo hacia arriba por troctolitas, gabros olivínicos, noritas, anortositas y gabros normales de diferentes granulometrías.

Los cuerpos de gabroides tienen una estructura en forma de grandes bloques, aunque en la mayoría de los casos los cuerpos están incluidos en el complejo ultramáfico. En el complejo Moa-Baracoa están representados dos tipos de gabros: bandeados y masivos, en la parte alta, a los que se asocian cromitas y otros tipos de mineralizaciones dispersas.

- **AEF del Arco Insular Volcánico del Paleógeno**

Está representada en los flancos septentrionales y meridionales de la Sierra Cristal; así como en la cuenca de Sagua de Tánamo y otras áreas donde aparece la formación que a continuación se describe.

1.12.1 Tipos de formaciones

Formación Sabaneta

Pertenciente a la AEF del Arco de Isla Volcánico del Paleógeno (Neo arco), Sub-AEF de Retroarco, la misma está constituida por rocas vulcanógenas-sedimentarias de granos finos, frecuentemente zeolitizadas o montmorillonitizadas, con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, argilitas, margas, silicitas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos, ocasionalmente con pequeños cuerpos de

basaltos, andesitas, andesito-basaltos y andesito-dacitas, así como tobas cloritizadas. Las tobas son vitroclásticas y cristalolitoclásticas zeolitizadas, en menor grado bentonitizadas. Las calizas tobáceas y tufitas aparecen regularmente hacia la parte alta de la formación, como se observa en Farallones de Moa, puede destacarse además que la estratificación es buena, siendo frecuentemente gradacional.

- **AEF de la Neoplatформа.**

Está constituida por secuencias sedimentarias donde predominan las rocas carbonatadas sobre las rocas terrígenas, depositadas en régimen de plataforma continental, aparece representado en la región por la formación Majimiana que yacen discordantemente sobre las unidades del cinturón plegado. Estructuralmente estas secuencias se caracterizan por yacencia monoclinal suave u horizontal, con algunas perturbaciones en las zonas donde existen dislocaciones jóvenes.

Formación Majimiana

Está constituida por calizas órgano-detríticas típicas de complejos arrecifales y bancos carbonatados con intercalaciones de margas. Las secuencias de la misma experimentan bruscos cambios faciales en cortas distancias, contiene una abundante fauna de foraminíferos bentónicos y planctónicos, lo que ha permitido asociar su edad al Oligoceno Superior hasta el Mioceno.

1.13. Tectónica.

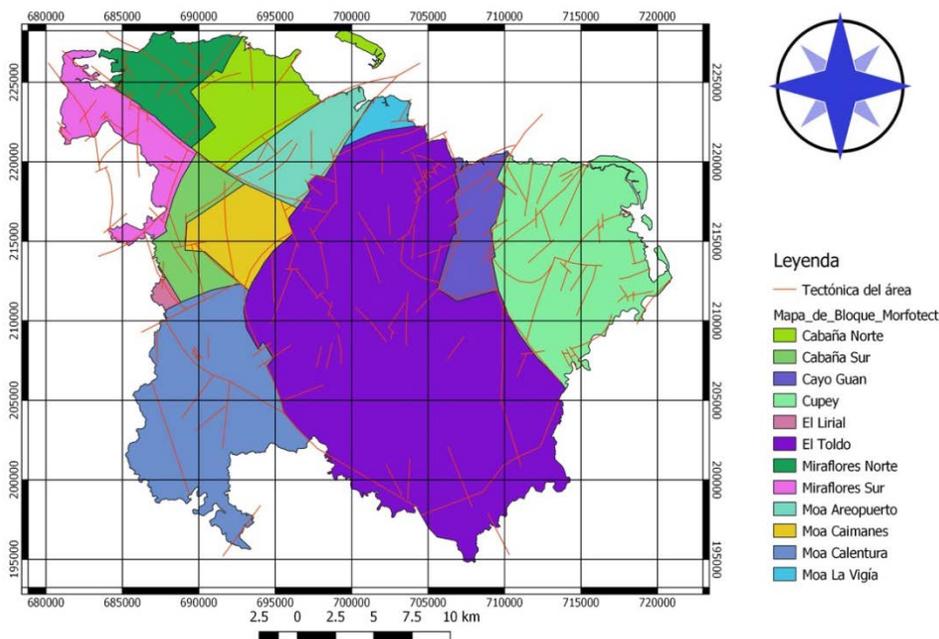


Figura 2.1. Mapa esquemático tectónico de Moa. Escala original 1:50 000, modificado de (Rodríguez Infante 2005).

La tectónica de la región es compleja, se pone de manifiesto la superposición de fenómenos tectónicos originados en condiciones geodinámicas contrastantes y en diferentes períodos, así el sistema de mantos tectónicos y el intenso plegamiento que caracterizan la estructura geológica de las secuencias más antiguas surgieron en un ambiente de compresión máxima.

En contraposición a esto los eventos tectónicos más jóvenes surgieron en lo fundamental, bajo la acción de esfuerzos de tracción de la corteza terrestre, estos esfuerzos han originado sistemas de fallas que dividieron la zona en una serie de bloques horsticos y gravens que enmascararon las estructuras más antiguas. Por otra parte, los movimientos de traslación horizontal que provocan el desplazamiento de los mantos tectónicos de Cuba Oriental fueron de gran magnitud, principalmente para las serpentinas que forman una unidad alcotana.

Las dislocaciones de plegamiento que presenta la región son sumamente complejas. En la secuencia más antigua se hace difícil el desciframiento de las meso-estructuras plegadas dada la monotonía litológica que presenta, no obstante, los estudios realizados permiten afirmar que en las secuencias más antiguas (rocas metamórficas y vulcanógenas) existen tres direcciones principales de plegamiento:

1. Noreste - Sureste.
2. Noroeste - Sureste.
3. Norte - Sur.

1.14. Principales sistemas de fallas del territorio.

En los estudios tectónicos precedentes del territorio se han reconocido y fueron cartografiados cuatro sistemas de estructuras disyuntivas que corresponden a

cada uno de los periodos de la evolución geotectónica (Rodríguez, 1998). Las fallas más representativas por sistemas son.

El primer sistema y más antiguo de la región el cual se encuentra pasivo las fallas de este sistema son: Falla El Liria y Falla Caimanes Abajo.

El segundo sistema se encuentra activo y en él se encuentran las siguientes fallas: **Falla Los Indios**; En varios puntos esta estructura aparece cortada y desplazada por fallas de dirección norte-noreste. Su trazado es en forma de una línea curva cóncava hacia el oeste-sudoeste con un rumbo que oscila entre los 10° y 30° oeste en los diferentes tramos que la conforman.

Falla Cayo Guam; Con una dirección $N15^{\circ}W$, se extiende desde la parte alta del río de igual nombre esta estructura aparece cortada y desplazada en varios tramos por fallas de dirección noreste y sublatitudinales.

Falla Moa; Es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, Haciéndose más recta hacia el norte con una dirección de $N48^{\circ}E$, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo $N25^{\circ}W$.

Falla Miraflores; Se extiende en forma de arco cóncavo hacia el este-noreste con un trazo casi paralelo a la falla Moa, con un rumbo $N25^{\circ}W$ desde el límite sur del área hasta Cayo Chiquito y desde aquí hasta Punta Majá con una orientación $N35^{\circ}E$.

Falla Cabaña; Orientación $N70^{\circ}E$ hasta la zona de Zambumbia donde es truncada por un sistema de fallas submeridionales En las cercanías de Centeno esta estructura es cortada y desplazada por la falla Cananova tomando una orientación $N56^{\circ}E$.

Falla Quesigua; Se expresa a través de un arco con su parte cóncava hacia el este nordeste, manteniendo en su parte septentrional, donde su trazo es más recto un rumbo $N10^{\circ}E$ y en la meridional, $N40^{\circ}W$.

Falla Maguey; Asume un rumbo $N65^{\circ}E$ por más de siete kilómetros hasta Calentura abajo donde se cruza con las fallas Moa y Caimanes. En su parte más

con la roca subyacente aparecen bloques exóticos de metamorfitas. Dentro del macizo ultramáfico, constituyendo grandes bloques tectónicos, se encuentran incluidos bloques de gabros normales, olivínicos y gabro diabasas que en ocasiones aparecen anfibolitizados. Con frecuencia se puede encontrar una amplia gama de rocas magmáticas en las secuencias vulcanógenas-sedimentarias del Paleoceno al Eoceno Medio, donde predominan las rocas piroclásticas.

En general, se plantea que las rocas magmáticas de la región aparecen en dos grandes grupos. El primero lo constituyen las rocas que conforman la asociación ofiolítica y el segundo, las rocas pertenecientes al arco insular volcánico del Cretácico, representado por la Formación Santo Domingo.

1.16 Características geomorfológicas.

Genéticamente el relieve de Moa y sus áreas adyacentes está clasificado dentro del tipo de Horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionados (Rodríguez, 1998), en su estudio morfotectónico de la región clasificó el territorio en dos zonas geomorfológicas fundamentales.

Zona de Llanuras; Se desarrolla en toda la parte norte del área ocupando la zona comprendida desde la barrera arrecifal hasta los 100-110 m de altura hacia el sur, originadas por la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos entre los que predominan los fluviales y marinos. Entre los tipos de llanuras se encuentran las fluviales, marinas y palustres parálicas.

Zona de Montañas; Es la zona geomorfológica más extendida dentro del área de las investigaciones, ocupando toda la parte sur y central. Los valores morfométricos, así como la configuración de las elevaciones son extremadamente variables en dependencia de las características litológicas y del agrietamiento de las rocas sobre las cuales se desarrolla, así como del nivel hipsométrico que ocupan. Teniendo en cuenta esos parámetros el relieve de montaña fue clasificado en cuatro subtipos: premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas,

submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas, montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas y montañas bajas diseccionadas.

1.17 Caracterización del área de estudio

1.17.1 Ubicación geográfica de la región de estudio

Afloramiento N°1. Nuevo sector de Centeno

Según el informe de EXPLOMAT del año 2002 el área de estudio se ubica próximamente a la granja de Centeno municipio de Moa, en la cercanía de la cuenca del río Cabaña, a 2.75 km del Tejar en sentido de la carretera Moa - Sagua. Limita al sur, al este y al oeste con un arroyo y con el río Cabaña y al norte con una finca particular, tiene las siguientes coordenadas:

X1: 691851.431 Y1: 222121.771

X2: 691835.143 Y2: 222121.223

X3: 6191805.499 Y3: 222113.035

Pertenece a la hoja cartográfica 5177-I "Sagua de Tánamo a escala 1:50 000 del I.C.G.C.

En este sector se delimitaron bloques de recursos, y están representados en bloques de Recursos Medidos y bloques de Recursos Indicados.

Bloque de (Recursos Medidos): está conformado por todos los pozos perforados en este sector, delimitado por los pozos positivos, los cuales se encuentran a una distancia aproximadamente de 100 m.

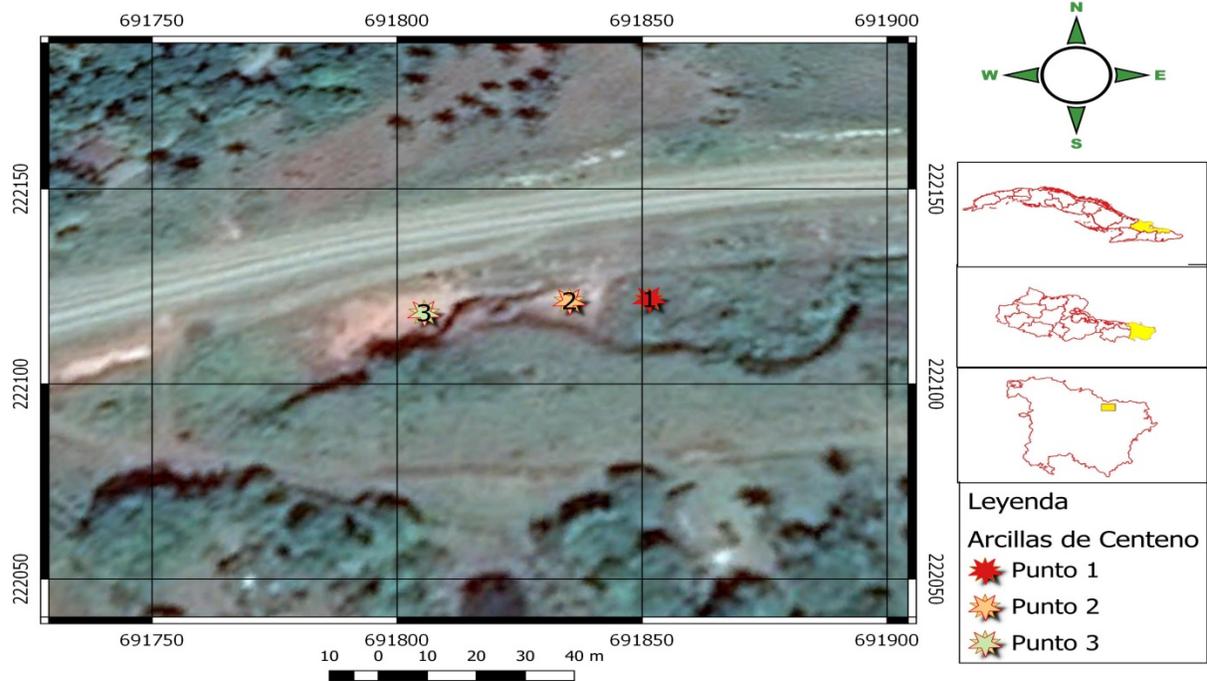
Este bloque está caracterizado por los siguientes parámetros: 22.52 % de plasticidad, 0.93 % de CaCO_3 , macrogranulometría (% retenido) por los tamices 5.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm 0.053 mm y <0.053 mm de 1.15 %, 1.62 %, 1,13 %, 0.8 %, 4.69 % y 90.21 % respectivamente.

Presenta un área de 59 431.0 m², una potencia promedio de cubierta de 0.24 m, de útil 4.53 m y no presenta intercalaciones estériles, obteniéndose un volumen de cubierta de 14 263.44 m³ de útil.

Bloque (Recursos Indicados): Es el resultado de la extrapolación a ¼ de la red (100 x 100 m) por fuera de los pozos positivos.

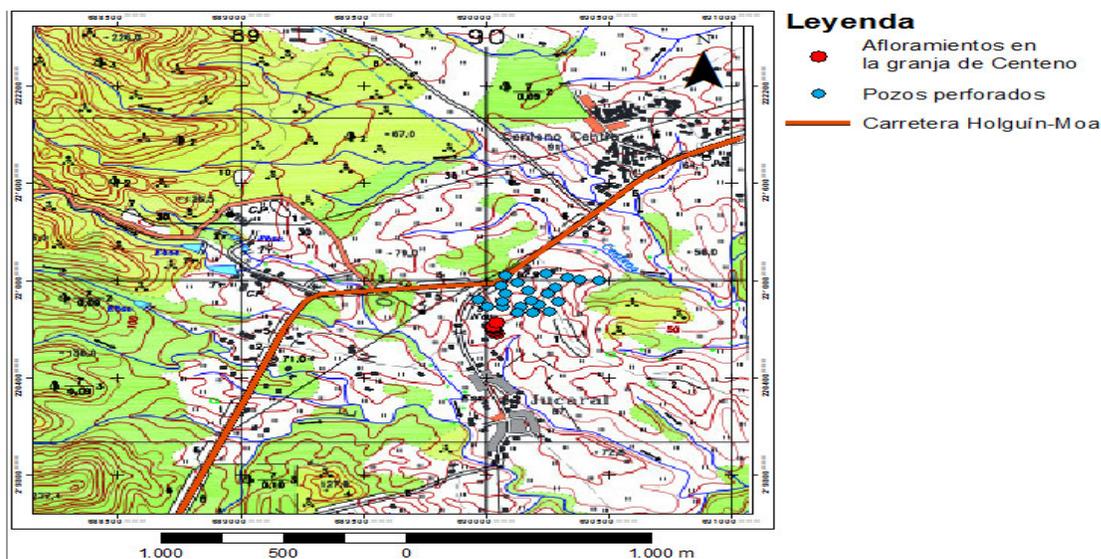
Este bloque está caracterizado por los siguientes parámetros: 22.18 % de plasticidad, 0.88 % de CaCO_3 , macrogranulometría (% retenido) por los tamices 5.0 mm, 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.053 mm y <0.053 mm de 1.99 %, 1.94 %, 1.29 %, 0.88 %, 4.69 % y 88.5 % respectivamente (tabla 4).

Presenta un área de 29 118.0 m², una potencia promedio de cubierta de 0.22 m, de útil 4.77 m y no presenta intercalaciones; obteniéndose un volumen de cubierta de 6 405.96 m³ y 138 892.86 m³ de útil (EXPLOMAT,2002)



Escala: 1: 50 000

Figura 2.3. Mapa esquemático topográfico de los trabajos realizados en el área de estudio (fuente propia, tomado en 2019).



Escala 1: 50 000

Figura 2.3. Mapa esquemático topográfico de los trabajos anteriores realizados en el área de estudio (tomado de Báez Gómez, 2017).

Tabla 1.5 Composición Química de las arcillas rojas de la región de Centeno (M-1, Villa Figueiral, 2010; M-2, Fonseca, 2003).

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₂	PPI
M-1	31.65	28.87	13.86	0.50	-	-	0.18	0.31	17
M-2	35.65	29.50	10.25	0.55	2.0	-	0.18	0.28	-

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

2.1. Introducción.

La adecuada selección de los métodos y materiales merece una especial atención. De ahí que el objetivo de este capítulo sea describir los principales materiales a utilizar y los métodos empleados para la realización del trabajo.

En el presente capítulo se realiza una descripción detallada de la metodología empleada durante la evaluación de materiales arcillosos de la zona de Centeno.

Para una mejor precisión de los resultados de estas investigaciones se realizaron los siguientes trabajos que se resumen en las siguientes etapas:

- **Etapla I: Preliminar.**
- **Etapla II: Trabajo de campo.**
- **Etapla III: Preparación de las muestras.**
- **Etapla IV: Trabajo de laboratorio**
- **Etapla V: Trabajo de gabinete.**

2.2 Etapla I: Preliminar.

En esta etapa se realiza artículos una búsqueda bibliográfica mediante la revisión de una serie de científicos, trabajos de diploma, tesis de maestría, doctorados, ponencias de congresos y convenciones de ciencias de la tierra, entre otros

documentos relacionados con la geología de Cuba. Utilizando la base de datos del centro de información del Universidad Minero Metalúrgico de Moa, así como información suministrada por el fondo geológico y sitios web de la INTERNET especializados en el tema, luego se procede a elaborar el marco teórico conceptual y el diseño de la investigación, definiendo el problema a resolver y la metodología a emplear para solucionarlo.

2.3 Etapa II: Trabajo de campo

Esta segunda etapa corresponde al trabajo de campo. En ella se realizan visitas a las diferentes zonas de Centeno de dicha localidad, con el objetivo de analizar los materiales arcillosos, Localizándose una arcilla plástica de colores rojos a rojos abigarrados, producto de la alteración de los gabros presentes en la zona, presentando una constitución geológica simples, con accesibilidad buena, se utilizó el plano geológico de Moa a escala: 1:100 000 y el de ubicación geográfica a escala 1:50 000, trabajando toda la información en plano a escala 1:100 000. En esta zona se hicieron perforaciones manuales, ver anexo, también se hizo un corte geológico, ver figura 2.4.

2.4 Toma de muestras

Toma y selección de las muestras de arcillas

El tipo de muestreo que se utilizo es por surco tratando de obtener un compósito de todo el perfil desde el techo despreciando la capa vegetal hasta el piso del afloramiento despreciando la zona de alteración, también se utilizó el tirabuzón para hacer perforaciones, dichas perforaciones tienen una potencia de un metro, si sobrepasa de un metro (se encuentra la roca madre).

Se seleccionaron las muestras buscando una mayor representatividad de la materia prima en el corte, abarcando toda la regularidad de la mineralización y coloración del suelo. Para la toma de muestra se seleccionó un corte del afloramiento con el objetivo de obtener una muestra representativa a todo lo largo de los perfiles de meteorización, es un perfil arcilloso enriquecido con

óxido hidróxido de hierro como se puede observar por su coloración, es un perfil ya descrito por otros autores, similar con el descrito en Cayo Guan con la diferencia que tienen mayor mayor contenido de óxido e hidróxido de hierro, es un perfil desarrollado sobre gabro descrito en otras literatura son arcillas de buena calidad que se utilizó en el tejar.

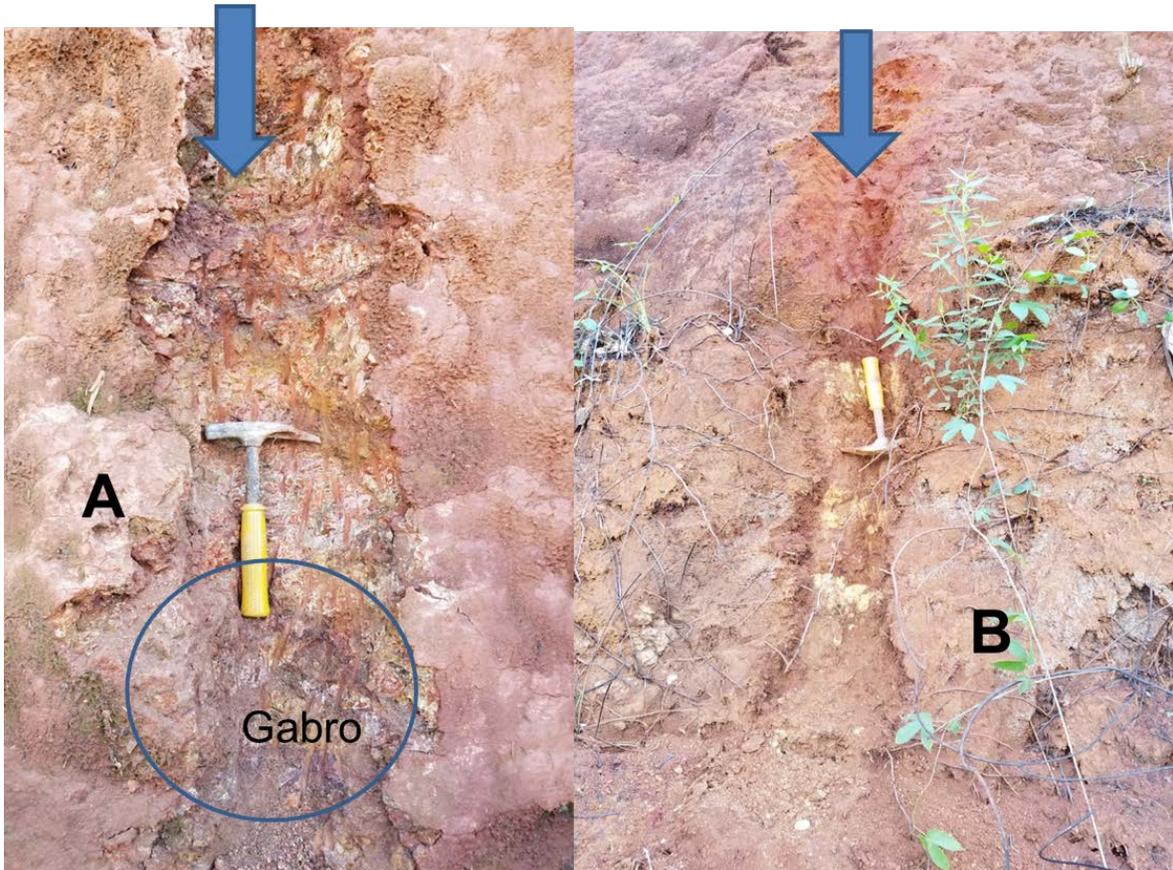


Figura: 2.4. Corte geológico en el depósito de Centeno (tomado en 2018).

Fuente: Propia.

2.5 Etapa III: Preparación y ensayo de las muestras

En este caso se llevó a cabo la selección y preparación de las muestras. Una vez colectada en el depósito, la materia prima, esta fue mezclada, homogeneizada y sometida a una primera inspección y descripción.



Figura 2.5. Arcillas del depósito de centeno.

2.6 Etapa IV: Trabajo de laboratorio.

Metodología para el cálculo de caolín equivalente.

Durante el trabajo de laboratorio se empleó el método térmico para realizar la calcinación de las arcillas y calcular el caolín equivalente; para esto se tomaron tres muestras representativas de las arcillas de Centeno, estas arcillas fueron secadas a 200 grados, luego fueron trituradas en un molino planetario de bolas, después de esto fueron pesadas las muestras en una balanza analítica, luego en crisoles de cerámica refractaria fueron calcinadas las muestras en un horno en tres series de calcinación a 200 ,350 y a 850 °C.

Con los datos obtenidos en la calcinación, y según la norma de Almenares Reyes de 2015 se pudo calcular la cantidad de caolín equivalente presente en las muestras, ver en la ecuación 1.1 y 1.2 (Almenares Reyes, 2017). El contenido total de minerales arcillosos puede ser cuantificado mediante ATG en el intervalo de pérdida de masa correspondiente a la pérdida de los grupos OH^- estructurales. Sin embargo, incluso a partir de las derivadas u otros tratamientos matemáticos sobre las curvas de ATG es muy difícil separar la contribución de cada uno de los minerales arcillosos presentes a la pérdida de masa, y por tanto, la cuantificación individual de cada mineral. Sobre la base de que son los minerales del grupo de la caolinita los minerales arcillosos predominantes en la muestra y los que más contribuyen a la pérdida de masa, y de la inexactitud de asignar este efecto a un mineral arcilloso en particular, es criterio del autor, que el contenido total de

minerales arcillosos, en el que contribuyen todos, en mayor o menor medida, al carácter puzolánico de los productos de calcinación, debe reportarse en términos de caolinita equivalente (K^E), esto es, asumiendo que la pérdida de masa en el intervalo de temperatura entre 350 y 850 °C, normalizada con respecto a la masa seca a 200 °C, corresponde a la caolinita. La expresión matemática utilizada para este cálculo se reporta en la ecuación 1.1 y la expresión para calcular K^E se presenta en la ecuación 1.2, donde 13,96 es el contenido (% en masa) de grupos hidroxilos estructurales asociados a la capa octaédrica que corresponde teóricamente a la caolinita pura. Esta forma de expresar el contenido total de minerales arcillosos de un material será utilizada a lo largo del presente trabajo, (Almenares Reyes de 2015).

El K^E se presenta en la ecuación 1.2, donde 13,96 es el contenido (% en masa) de grupos hidroxilos estructurales asociados a la capa octaédrica que corresponde teóricamente a la caolinita pura. Esta forma de expresar el contenido total de minerales arcillosos de un material será utilizada a lo largo del presente trabajo.

1.1

$$\%OH^- = \frac{m(350^\circ C) - m(850^\circ C)}{m(200^\circ C)} \cdot 100$$

1.2

$$K^E = \frac{\%OH^-}{13,96} \cdot 100$$

Tabla 2.1. Criterios límites para cumplir con los requisitos de materia prima para el LC3 (Roger Samuel Almenares Reyes, 2017).

Criterios	Límites
Al ₂ O ₃	>18,0 %
CaO	<3,0 %
SO ₃	<2,0 %
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	>0,3 %

PPI	>7,0 %
-----	--------

2.7 Método de Difracción de Rayos X (DRX)

Los Rayos X se analizaron las muestras calcinadas y sin calcinar.

La Difracción de rayos x permite saber cuáles de varios posibles compuestos cristalinos existen en la muestra. Tiene múltiples y varias aplicaciones en campos diversos como la física, la química, la ciencia de los materiales, la mineralogía, la geología, la metalurgia extractiva, metalurgia física, cerámicas, polímeros, farmacia, etc.

El análisis preliminar de la composición mineralógica a partir de los resultados de la difracción de rayos X se realizó utilizando el software HighScore Plus 3.0.2 (2011), mediante subrutinas programadas para la identificación de fases minerales utilizando las bases de datos PDF 2 (2004) y COD (2015), teniendo en cuenta la composición química de las muestras. El difractograma se realizó empleando un difractómetro Panalytical Xpert Pro MPD, con radiación $\text{CuK}\alpha$ y una rejilla de divergencia de $0,5^\circ$. Las muestras fueron analizadas entre los 4 y los 70° (2θ), a un paso angular de $0,017^\circ$ y un tiempo por paso de 80 segundos.

2.8. Determinar la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet.

Este método es una nueva prueba rápida, pertinente y fidedigna (R3) para predecir la actividad puzolánica de arcillas calcinadas con contenido de caolinita extendiéndose desde 0 para 95 %. El resultado de ensayos con más de 80 tipos de arcillas de Europa, América y en Cuba se ha permitido establecer una ecuación de correlación para determinar la resistencia a la compresión en morteros normalizados para una dosificación de PPC30 a partir de los contenidos de caolín equivalente.

Fórmulas para la correlación a los 1, 3, 7, 28 y 90 días siendo (x) el caolín equivalente y (y) la resistencia a la compresión.

$$y (90 \text{ días}) = 0.413x + 38.409, R^2= 0.9011$$

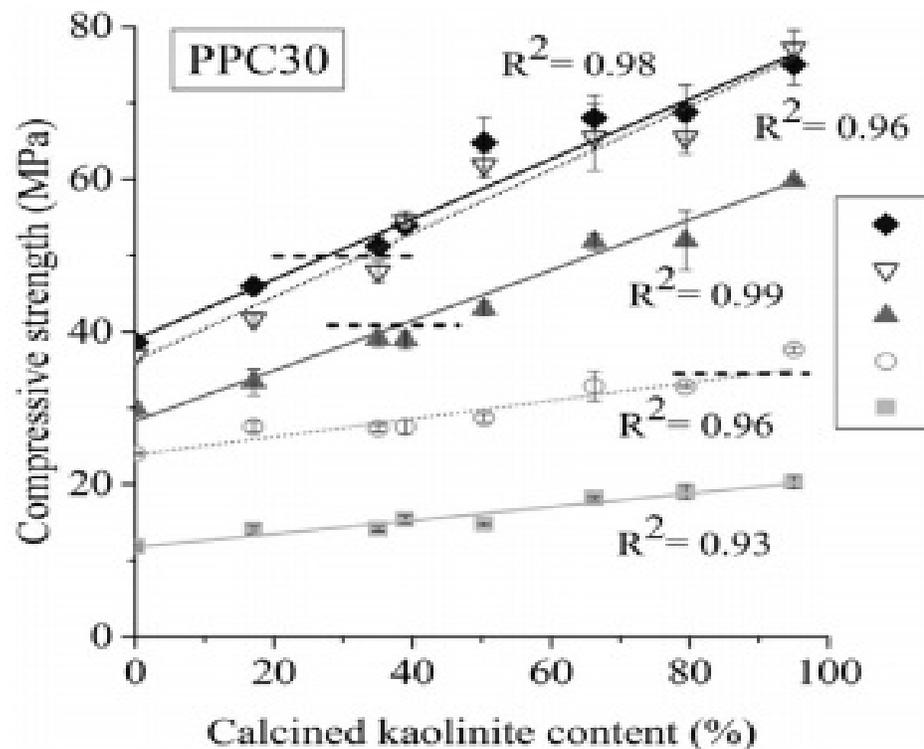
$$y (28 \text{ días}) = 0.45x + 34.505, R^2= 0.9118$$

$$y (7 \text{ días}) = 0.3363x + 27.879, R^2=0.9236$$

$$y (3 \text{ días}) = 0.1483x + 22.52, R^2=0.9297$$

$$y (1 \text{ día}) = 0.0899x + 11.198, R^2= 0.9585$$

A continuación aparece un diagrama para la dosificación de PPC30 para determinar la resistencia de morteros normalizados a partir del contenido de caolín equivalente en nueve arcillas con contenidos distintos de caolín calculados mediante estas fórmulas, que fueron resultado del artículo: (Avet, François; Snellings, Ruben; Alujas Diaz, Adrian; Ben Haha, Mohsen; Scrivener, 2016).



CAPITULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

3.1. Introducción.

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de los análisis químicos, Difracción de Rayos X de arcillas calcinadas y sin calcinar, Cálculo del caolín equivalente y PPI, correlación de resistencia a la compresión según el contenido de caolín equivalente, los resultados de la evaluación de potencialidades.

3.2. Composición química de las arcillas de la región de Centeno.

La composición química de las arcillas de la región de Centeno presenta mayores valores de porcentaje de dióxido de sílice (SiO_2), trióxido de alúmina (Al_2O_3), dichos compuestos son los más importantes en la constitución de las arcillas

Las principales fases minerales identificadas por DRX en la arcilla de Centeno son Cuarzo (SiO_2), la caolinita [$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], Hematita [Fe_2O_3] y la Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

Tabla 3.1. Composición química de las arcillas de la región de Centeno.

Compuestos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	SO_2	PPI
Arcilla (%)	31.65	28.87	13.86	0.50	0.18	0.31	9,06

3.3. Análisis de los resultados de DRX.

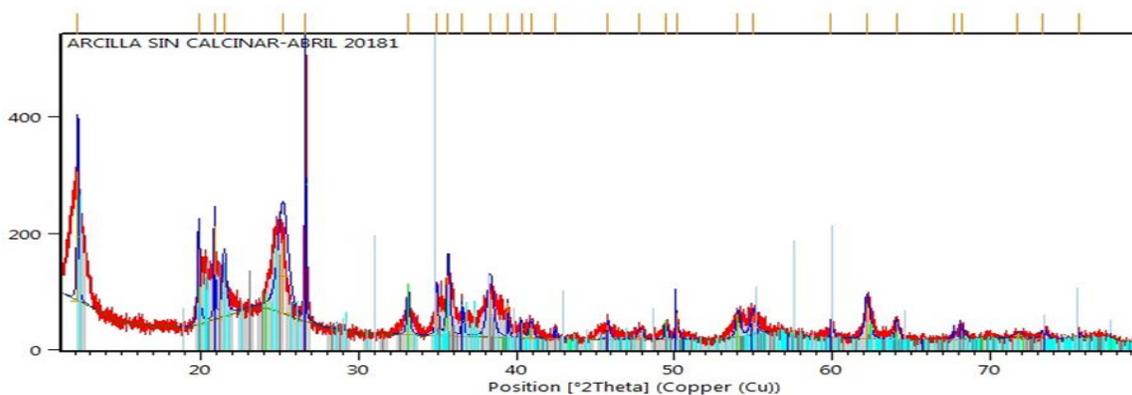


Figura 3.1. Análisis del difractómetro DRX a la arcilla sin calcinar.

Para el caso de la arcilla sin calcinar los máximos difractométricos se le asignaron al cuarzo (SiO_2) entre los siguientes valores (4.25-3.34-1.81-1.54), a la hematita (Fe_2O_3) (2.69-2.51-1.83-1.69) y a la (caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)- nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (7.13-4.35-4.18-4.12-3.56-3.36) sin poderse hacer mayores distinciones sobre la fase que predomina.

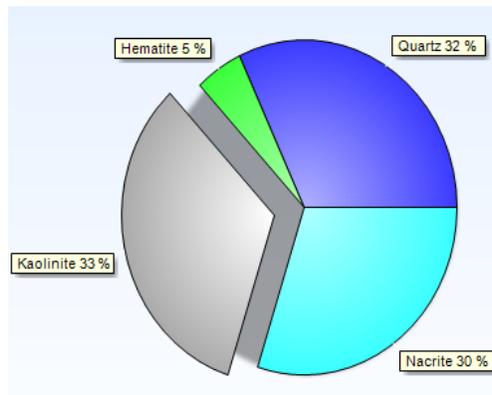


Figura 3.2. Cuantificación difractométrica a la arcilla sin calcinar.

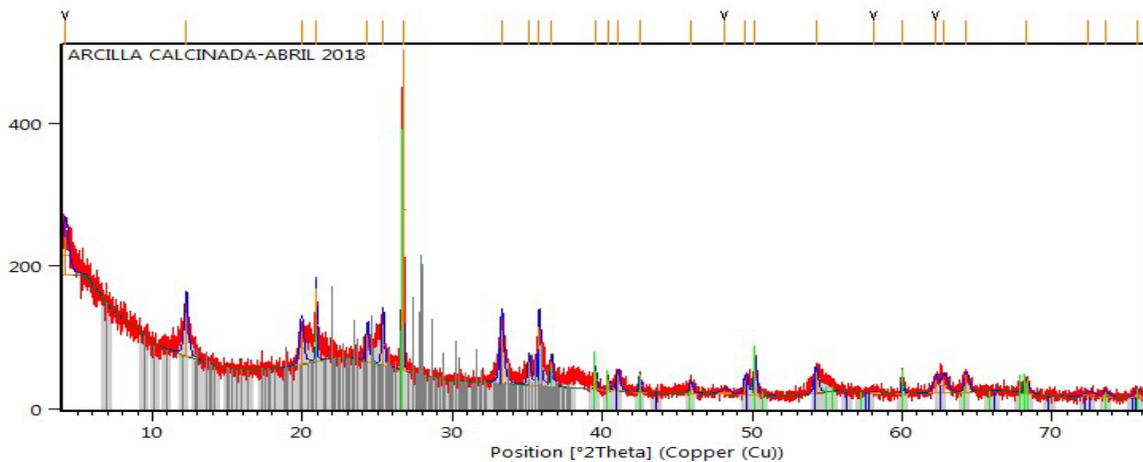


Figura 3.3. Análisis del difractómetro DRX a la arcilla calcinada

Para la arcilla calcinada los máximos difractométricos que se le asignaron al cuarzo (SiO_2) son de (4.25-3.34-1.81-1.54), se asume la presencia de anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) debido a la presencia de reflejo de menor intensidad, a la cuantificación. Esto se puede asumir ya que en el proceso de calcinación se generó desorden estructural de las partículas mostrando anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) baja en cristalinidad, según Almenares Reyes en el 2015 la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) puede aparecer alrededor de los 900°C no descartando que el proceso empiece

antes, además se encuentran máximos difractométricos para la hematita (Fe_2O_3) y son (2.69-2.51-1.83-1.69), esto se interpreta que durante el proceso térmico la caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y la nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) de la muestra sin calcinar pierden los grupos OH o sea se desidroxilan y pasan a formar metecaolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$).

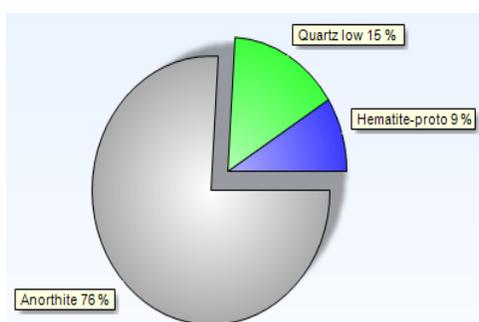


Figura 3.4. Cuantificación difractométrica a la arcilla calcinada.

3.4. Resultados del cálculo de caolín equivalente.

Aplicando la norma de calcinación de Almenares Reyes del 2015 se determinó que las arcillas caoliníticas del depósito de Centeno presentan contenidos favorables de caolín equivalente para la fabricación de LC3, reportando algunos de los valores más elevados de arcillas caoliníticas identificados en el país, con un promedio de KE de 64, 91.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos luego de la calcinación.

Nº	Fecha	200°	350°	850°	%OH	KE
1	CT-07-02-18	44,77	44,06	40,15	8,72	62,49
2	CT-07-02-18	12,95	12,77	11,57	9,30	66,59
3	CT-07-02-18	13,14	13,01	11,80	9,17	65,67

3.5. Resultados correlación de resistencia a la compresión según el contenido de caolín equivalente.

Empleando el método de correlación de François Avet el cual nos permite correlacionar según el contenido de caolín equivalente en las muestras arcillosas, se obtuvo la resistencia a la compresión en morteros normalizados a los 1, 3, 7,

28, 90 días, para una dosificación de PPC30. Obteniendo a los 28 días una resistencia de 64,47 MPa no muy diferente a la resistencia que alcanza a los 90 días que es de 65,91 MPa ver gráfico 1.5.

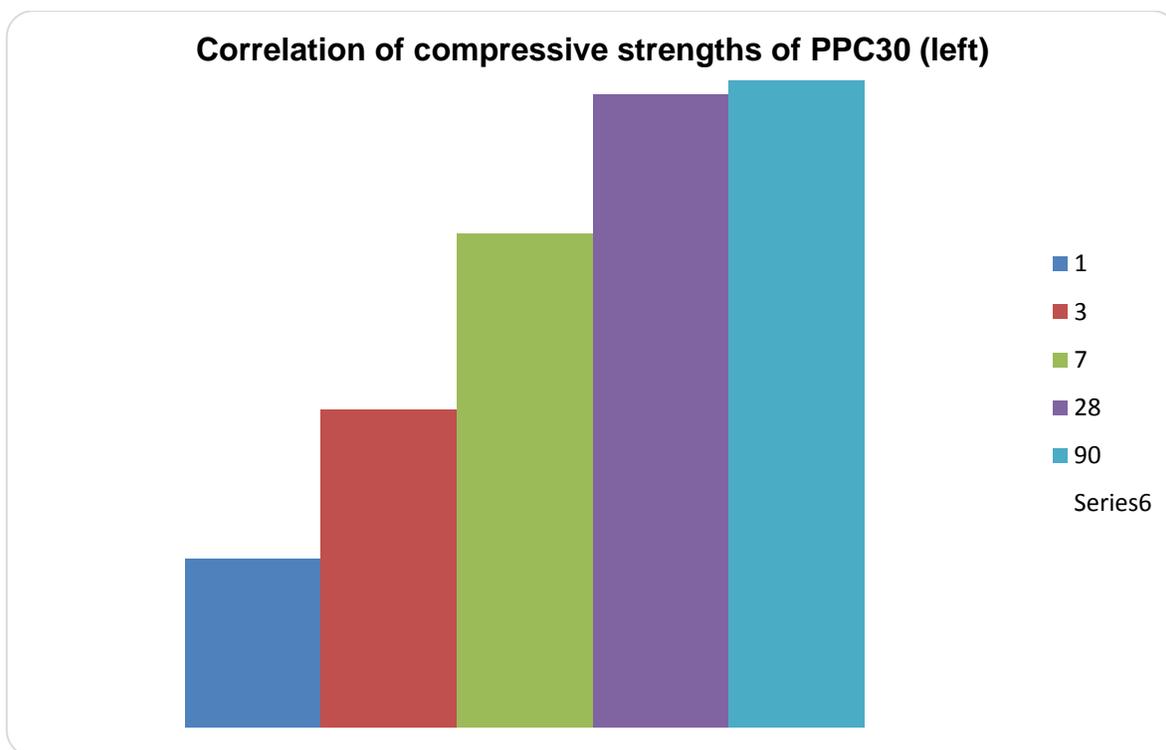


Gráfico 1.5: Determinación de resistencia a la compresión por el método de (François Avet, 2016).

3.6. Análisis y discusión de los resultados de la evaluación de potencialidades.

Tabla 2.5. Clasificación de las arcillas de acuerdo a su potencial bajos los criterios expresados en el gráfico PPI (350-850 °C) vs. Al_2O_3

Tipo	Composición	Potencial
I	% $K^E > 60$	Alto
II	$60 > \% K^E > 40$	Bueno
III	% $K^E < 40$	Moderado
IV	Contenido variable de K^E ,	Debe valorarse de manera

	contaminadas con minerales no arcillosos, relativamente abundantes, térmicamente activos, que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos (carbonatos, sulfuros, sulfatos).	individual
--	---	------------

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede decir que el deposito Centeno pertenece al grupo IV, las cuales presentan alto potencial y se valoraron de manera individual porque el contenido K^E es variable debido a que está contaminado con minerales no arcillosos, relativamente abundantes y térmicamente activos, que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos. En este caso se corrigieron las pérdidas de masa para evitar la sobreestimación del contenido de minerales arcillosos.

CONCLUSIONES

- Las principales fases minerales identificadas por DRX en la arcilla de Centeno son cuarzo (SiO_2), caolinita [$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], hematita [Fe_2O_3] y la n acrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).
- La caracterización química arrojó como resultados valores dentro de los límites aceptables para las producciones de cemento LC3.
- Se logró determinar las pérdidas por deshidroxilación de la materia arcillosa en cada muestra, se constató un promedio final 9.0633 %.
- Los valores de caolín equivalente promedian un 64,92 %.
- Se logró determinar las potencialidades del depósito arcilloso siendo del tipo IV, que deben ser evaluadas de manera individual dado el contenido de minerales acompañantes.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio más detallado a los cementos LC3 artesanales, así como ensayos de laboratorio para obtener su caracterización según lo establece la NC 96-2011 para cementos con adición activa.

Profundizar en los trabajos investigativos sobre los tipos tecnológicos de material arcilloso presentes en el depósito arcilloso de Centeno, debido a su posible explotación como material cementicio suplementario de buena reacción puzolánica y a la vez con capacidades de formar parte de morteros y hormigones de buena resistencia.

Bibliografía.

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- Alakhras, N. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36.
- Almenares Reyes, R. S. (2017). *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas.
- Alujas, A. (2010). *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes*. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Applied Clay Science Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- Baronio, G., & Binda, L. (1997). Study Of The Pozzolanicity Of Some Bricks And Clays. *Construction And Building Materials*, 11.
- Batista, R., Coutin, D., & Mesa, F. (2013). Los Recursos Minerales y el desarrollo local. Caso de estudio, Municipio Guanabacoa, La Habana . In *V Convención Cubana de Ciencias de La Tierra, Geociencia*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Batista Rodríguez, A. J. (1998). *MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR DEPARTAMENTO DE GEOFISICA Tesis de maestría Características*

geológicas y estructurales de la región de Moa a partir de la interpretación del levantamiento. MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR ISPJAE, Habana.

Castillo, R., Fernández, R., Antoni, M., Alujas, A., Scrivener, K., & Martirena, J. F. (2010). Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista Ingeniería de Construcción*.

Costoya, M. F. (2008). Effect of Particle Size on the Hydration Kinetics and Microstructural Development of Tricalcium Silicate.

Crespo Lambert, M., & Dunán Ávila, P. L. (2017). *Cartografía geológica, escala 1:50 000 del sector Yamanigüey, municipio Moa.* Moa.

Cubadebate.cu. (2018). Cuba produce cemento ecológico menos costoso y más resistente.

Damineli, B. L., & John, V. M. (2012). Developing Low CO₂ Concretes: Is clinker replacement sufficient? The need of cement use efficiency improvement. *Key Engineering Materials*, 517, 342–351. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.517.342>

Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., & Sorrentino, D. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>

Guerra, I., & Betancourt, S. (2013). República de Cuba Universidad Central " Marta Abreu " de Las Villas Facultad de Construcciones Departamento de Ingeniería Civil Trabajo de Diploma Evaluación de la mineralogía y composición química en la reactividad puzolánica de arcillas caoliníticas cub.

He, C., Makovicky, E., & Osbaeck, B. (1996). Thermal treatment and pozzolanic activity of, *10(95)*, 351–368.

Heller, L. (2006). Handbook of clay science. Elsevier Ltd.

Hendriks, C., Worrell, E., Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (2004). *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry.* Interlaken, Suiza. <https://doi.org/10.1016/B978-008043018-8/50150-8>

- Herrera del Sol, D. (2018a). *Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC3*. Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas.
- Herrera del Sol, D. (2018b). *Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC3*. UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Höök, M., Zittel, W., Schindler, J., & Aleklett, K. (2008). *A supply-driven forecast for the future global coal production. A contribution to Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO)*. Uppsala, Suecia.
- Hooton. (2011). *Materiales Cementicios Suplementarios*.
- Humphreys, K., & Mahasenana, M. (2002). *Toward a Sustainable Cement Industry. Substudy 8: climate change*. Geneva, Suiza.
- IGP. (2013). *Léxico Estratigráfico de Cuba*. (Servicio Geológico de Cuba, Ed.), 459. Retrieved from <http://www.igp.minem.cu>
- Juventudrebelde.cu. (2007). *Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo*. *Juventud Rebelde*.
- Martirena, F. (2004). *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Martirena, J. F., Middendorf, B., Gehrke, M., & Budelmann, H. (1998). Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*, 28, 1525–1536.
- Massazza, F. (1976). Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements,. *ILCemento*, 1, 3–38.
- Muller, C. J. (2005). *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics*. Swiss Federal Institute of Technology , ZURICH.

- Müller, N., & Harnisch, J. (2008). *A blueprint for a climate friendly cement industry*. Nuremberg, Alemania: Universidad de Ciencias Aplicadas Offenburg.
- Pane, I., & Hansen, W. (2005). Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, 35, 1155–1164.
- Papadakis, V. G., & Tsimas, S. (2002). Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1525–1532.
- Pusch, R. (2006). *Mechanical properties of clays and clay minerals*. Handbook of clay Science.
- Ramezaniyanpour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials. Properties, Durability, Sustainability*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg*. London, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>
- Rosell, M. (2010). *Zeolita Natural Cubana del Tipo Clinoptilolita-Heulandita como Material Cementicio Suplementario en Hormigones*. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Santa Clara.
- Sabir, B. B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete : a review, 23.
- Salazar, A. (2002). *Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos* (3era ed.). Cali: Corporación Construir.
- Samanta, C., & Chatterjee, M. K. (1981). Pozzolana and Pozzolanic Cements — A Review Part I : Pozzolan. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 40, 37–43. <https://doi.org/10.1080/0371750X.1981.10822517>
- Scrivener, K. L., & Favier, A. (Eds.). (2015). *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries (Vol. 10). Lausanne. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_43

- Snellings, R. (2011). *Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites*. Universiteit Leuven, Katholieke.
- South, W., & Hinczak, I. (2001). *New Zealand Pozzolans-An ancient to a modern dilemma. Sustainable Development of Cement and Concrete*. Michigan, USA: American Concrete Institute.
- Tironi, A. (2013). *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica*. Cuba.
- Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2012). Incorporation of calcined clays in mortars : porous structure and compressive strength, 1, 366–373. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.049>
- Toledo, R. D., Gonçalves, J. P., Americano, B. B., & Fairbairn, E. M. R. (2007). Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research*, 37, 1357–1365. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.005>
- Vera Lazcano, M. A. (2018). *Evaluación de la actividad puzolánica y comportamiento térmico de las arcillas del yacimiento Yaguajay como materia prima para la producción de cemento de bajo carbono*. Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas.
- Viltres Milán, Y. (2011). *Evaluación de riesgos por deslizamiento en taludes y laderas del sector este del municipio Moa*. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
- Vizcaíno, L. M. (2014). *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada -caliza*. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara.
- Vizcayno, C., Gutiérrez, R. M., Castello, R., Rodríguez, E., & Guerrero, C. E. (2010). Pozzolan Obtained By Mechanochemical And Thermal Treatments Of Kaolin. *Applied Clay Science*, 49, 405–413.

Anexos

Anexo 1. Imágenes del afloramiento principal objeto de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



Majagual Azul

Descripción del afloramiento: Se encuentra ubicada en la subida de la loma que va desde Los Pinos de Centeno a Pueblo Nuevo de Centeno, en la cercanía del Majagual Azul, en sentido de la carretera Moa - Sagua, dista a 275 km del Tejar.



A: Perforación manual de pozo. **B:** Discreción y corte geológico del afloramiento.





Imágenes en el depósito arcilloso Centeno, municipio Moa.